

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 88 (1990)

Heft: 5

Artikel: Que se passe-t-il au Yellowstone : ou de l'application de méthodes géodésiques à la résolution de problèmes géophysiques et géodynamiques

Autor: Klingelé, E.E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-234327>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

peut pas en saisir et comprendre toute la richesse? Et pour encore mieux observer cette complexité, Joël de Rosnay proposait que l'on invente le «macroscop», instrument permettant d'observer la globalité du complexe, alors que le microscope ou le télescope ont été inventés pour permettre d'observer l'infiniment petit et l'infiniment lointain.

Le raisonnement analogique

Faute de macroscop, nous avons besoin d'un instrument qui nous permette d'observer et de réfléchir en termes de systèmes et non plus de particules unitaires. A nos modes de raisonnement classiques (raisonnement analytique, synthétique, déduction et induction), la systémique nous propose d'ajouter l'analogie. Rien de nouveau, puisque l'analogie est le pain quotidien des enfants et des artistes. Mais la nouveauté consiste à proposer aux penseurs et aux scientifiques de l'utiliser. Le raisonnement analogique bénéficie d'un statut ambigu: considéré comme une imprudence intellectuelle, on lui conteste toute rigueur scientifique, tout en admettant qu'il stimule l'imagination et la découverte grâce à son pouvoir suggestif. Je commence à comprendre pourquoi un géomètre cantonal de mes connaissances, qui avait parfois tendance à abuser de l'analogie, se faisait si facilement qualifier de «philosophe»!

Cette méthode analogique nous conduit logiquement vers la modélisation et la si-

mulation, technique qui permet de transposer dans un référentiel que l'on connaît bien les éléments d'un problème nouveau et complexe. Ainsi, comprendre l'ordinateur est souvent difficile pour nous qui n'avons jamais été formés sur ce nouvel instrument; souvent, il est très éclairant de comparer l'ordinateur et la place qu'il prend dans notre vie à la voiture, réalité que l'on connaît souvent mieux.

Ces regards relativement nouveaux nous conduisent inexorablement au langage graphique langage tellement plus riche que celui des mots, et langages que nous, géomètres, devons particulièrement bien connaître.

Conclusion

Monsieur Descartes, nous devons bien admettre que la philosophie que vous nous avez léguée il y a plus de 350 ans ne suffit plus pour notre monde moderne. C'est avec plaisir que nous avons fait un bon bout de chemin ensemble, mais dès à présent, permettez que l'on fasse route avec ceux qui dans les domaines de l'informatique, de la linguistique, de la psychologie ou même de la sociologie, ont fait le pas de la systémique. Et avec Daniel Durand, auteur de «La Systémique» dans la collection Que Sais-je?, nous nous fixons les quelques règles suivantes:

- ne pas réduire la variété en vue de simplifier
- n'éliminer ni l'incertain, ni l'aléatoire, ni le flou ou l'ambigu

- ne pas ignorer les contraintes
- ne pas viser une connaissance exhaustive
- ne pas rejeter l'analogie, même si elle est incertaine
- préférer un schéma révélateur à une explication détaillée
- observer le système alternativement de l'intérieur et de l'extérieur
- fixer des objectifs plutôt qu'établir une programmation détaillée
- accepter les conflits et rechercher les compromis
- se consacrer autant à l'observation de l'environnement qu'au fonctionnement du système.

Bibliographie:

Daniel Durand: La systémique, Que Sais-je?, 1987

J.-L. Le Moigne: La théorie du système général, 1978

B. Walliser: Systèmes et modèles, Le Seuil, 1977

J. De Rosnay: Le Macroscop, Le Seuil, 1975

Edgar Morin: La méthode, Points, Le Seuil, 1977

Adresse de l'auteur:

Jean-Paul Miserez

Chargé de cours EPFL

Rue Louis-Vautrey 26

2800 Delémont

Que se passe-t-il au Yellowstone

Ou de l'application de méthodes géodésiques à la résolution de problèmes géophysiques et géodynamiques

E. E. Klingelé

Cet article décrit, d'une façon détaillée, une application à grande échelle de moyens géodésiques (GPS, nivellement, mesures électroniques de distance, gravimétrie) destinée à résoudre des problèmes de géophysique et de géodynamique dans une région protégée (Parc national) et d'accès difficile, aux Etats Unis d'Amérique.

Dieser Artikel beschreibt ausführlich die Anwendungsmöglichkeiten geodätischer Methoden (GPS, Nivellement, elektronische Distanzmessung, Gravimetrie), die zur Lösung geophysikalischer und geodynamischer Probleme in einer geschützten (Nationalpark) und unzugänglichen Region der Vereinigten Staaten gewählt wurden.

1. Introduction

Le plateau du Yellowstone, situé dans le nord-ouest de l'état du Wyoming, (fig. 1) est un des plus grand site d'activité hydrothermale du monde (Geysers, fumerolles, fontaines brûlantes). Durant les deux millions d'années passées trois éruptions volcaniques catastrophiques ont éjectés plus de 3500 km³ de cendres rhyolitiques formant trois gigantesques calderas.

Une activité sismique intense, comprenant le plus grand tremblement de terre historique de la région (Hebgen Lake – tremblement de 1959, Ms 7.5) ainsi qu'une sismicité diffuse dans et autour de la caldera du Yellowstone caractérisent cette région. Un flux de chaleur d'environ 1500 mW/m², excédant de 30 fois la moyenne continentale, une déformation crustale historique verticale de plus de 1 m, reflètent la dynamique contemporaine de cette région volcaniquement et tectoniquement active.

En 1987 un projet de recherche interdisciplinaire utilisant GPS, nivellement, tilatération et gravimétrie de précision et concentré sur le plateau volcanique du Yellowstone, la région proche du lac Hebgen et de la zone des failles de Teton fut mis en place afin d'établir un réseau de mesure des déplacements verticaux et horizontaux de la croûte terrestre.

Le but de ce projet était d'étudier plusieurs points scientifiquement importants tels que:

- 1) La cinématique et la dynamique du «hot spot» (point chaud) du Yellowstone
- 2) D'évaluer les sources du volcanisme quaternaire, du haut flux de chaleur et des particularités hydrothermale du plateau du Yellowstone.
- 3) La cinématique de la zone faillée du lac Hebgen
- 4) Les relations entre les déformations crustales, le volcanisme, les particularités hydrothermales, la sismicité et la structure de la croûte terrestre.

L'évidence d'une déformation inhabituelle du plateau du Yellowstone fut découverte par Pelton et Smith (1979, 1982) qui démontrèrent, sur la base d'une répétition en 1975, 1976, 1977, du nivellement de 1923, un mouvement vertical allant jusqu'à 75 cm (fig. 2). Un nivellement et une trilatération par mesure électronique de distances (EDM) dans la région adjacente au lac Hebgen a mis en évidence une force d'extension anormalement élevée (Savage et al., 198.) ainsi qu'un mouvement vertical à large échelle (Reilinger et al. 1977) subsistant plus de dix ans après le tremblement de 1959.

Afin de fournir un ensemble des données de base pour l'observation systématique de cette région, des scientifiques, étudiants et des techniciens de l'université d'Utah, du Massachusetts Institut of Technology (MIT), du U.S. National Geodetic Survey (NGS) et de l'US Geological Survey (USGS) se sont joints en un effort coopératif avec des collègues de l'institut de géodésie et de photogrammétrie de l'EPF-Zürich, du National Park Service, du Air Force Geophysical Laboratory ainsi que de la Defense Mapping Agency afin d'établir le projet d'étude des déformations crustales de la région du Yellowstone-Hebgen Lake.

La campagne de terrain 1978 décrite dans cet article, a consisté en:

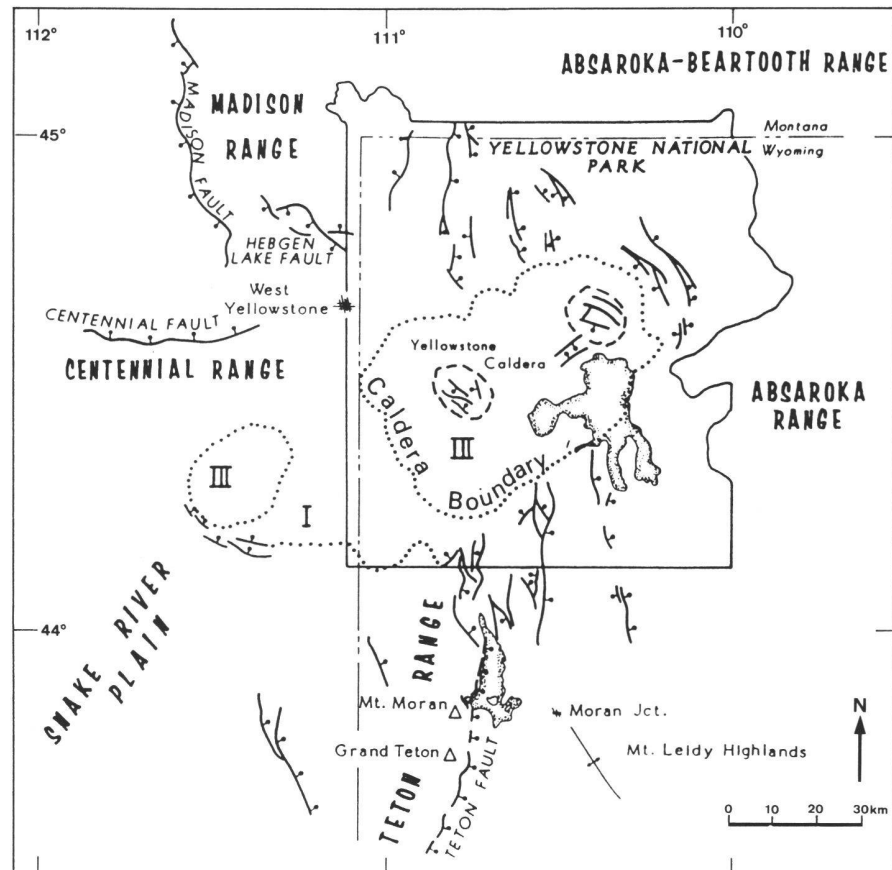


Fig. 1: Carte tectonique de la région du Yellowstone-Lac Hebgen, entourant la zone du projet d'étude des déformations crustales de 1987. La limite de la caldeira est indiquée par une ligne pointillée. Les âges de la caldeira correspondants aux chiffres romains sont:

I. 2 millions d'années; II. 1.2 millions d'années; III. 0.6 million d'années.

Les lignes traitillées indiquent les dômes résurgents. Les escarpements de la faille produite par le tremblement de terre de 1959 sont marqués par des lignes continue au nord-ouest de la ville de «West Yellowstone».

- a) l'établissement d'un réseau de 80 stations GPS
- b) l'observation d'un réseau de 208 stations gravimétriques de précision
- c) la répétition de 650 km de ligne d'un nivellement de 1^{er} ordre et enfin
- d) la réobservation de deux réseaux de trilatération.

Les collaborateurs des universités et du National Geodetic Survey opérèrent 11 récepteurs GPS et trois gravimètres. Trois équipes du NGS et deux de l'USGS s'occupèrent du nivellement et de la trilatération.

2. Survol géologique et géophysique

2.1 Volcanisme et tectonique

La région du Yellowstone – Hebgen Lake – Teton est une des régions les plus actives sismiquement parlant du monde et aussi une des plus jeunes volcaniquement.

Christiansen (1984) et Smith et Christiansen (1980) ont montrés que trois cycles distincts de volcanisme rhyolitique ont eu lieu au Yellowstone; chacun culminant par la formation explosive d'une caldeira dont l'intensité était comparable aux plus intenses explosions de l'histoire géologique. Il y a 2 millions d'années la première de ces éruptions a éjecté 2500 km³ de cendres de tufs rhyolitiques pour former le premier cycle de caldeira. Le second cycle culmina il y a 1,2 millions d'années par une éruption de plus de 280 km³ d'un même matériel. L'éruption finale de formation de la caldeira eut lieu il y a 600 000 ans et éjecta 1000 km³ de cendres rhyolitiques qui formèrent des tufs consolidés. Durant cette dernière explosion un drainage de la chambre magmatique causa l'effondrement de son toit créa la célèbre Yellowstone-Caldera longue de 75 km et large de 45 km (fig. 1). Juste après, des résurgences magmatiques formèrent deux dômes structuraux à l'intérieur de la caldeira même.

Traduction française de l'article: What is moving at Yellowstone. EOS Vol. 70, No. 8, February 1989. Par R. B. Smith, R. E. Reilinger, C. M. Meertens, J. R. Hollis, S. R. Holdahl, D. Dzuringin, W. K. Gross and E. E. Klingele

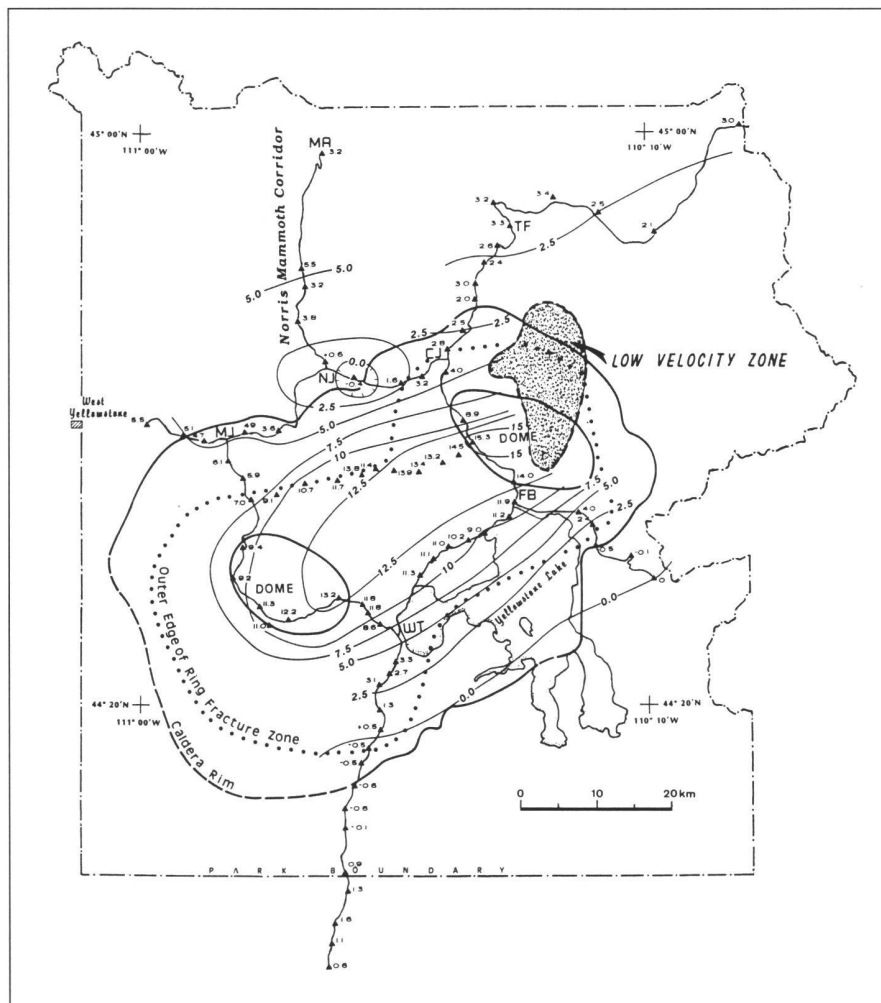


Fig. 2: Carte des mouvements verticaux mis en évidence par les nivellements de 1923–1975 et 1967–1977 (Pelton et Smith, 1979, 1982). Les isolignes représentent les mouvements, en mm/année, relatifs à une station de base située à l'est du parc du Yellowstone (au dehors de la zone d'activité sismique et hydrothermale) et arbitrairement fixée à 0 mm/an. La zone à faible vitesse sismique, marquée par des hachures, est issue des résultats de Smith et Braile (1984).

Durant les derniers 600 000 ans la caldera s'est remplie de sédiments et de produits de plus de 40 petites éruptions de laves basaltiques et rhyolitiques (la plus récente datant de 75 000 ans).

Ces éruptions volcaniques furent accompagnées sans aucuns doutes, par d'intenses déformations crustales et par une activité sismique similaire à celles observée actuellement.

Quoique le volcanisme jeune et le flux de chaleur élevé du Yellowstone reflète un épisode thermal majeur il y eut quand même une phase éphémère de propagation d'un système silicique; représenté par la province volcano-tectonique du Yellowstone-Snake River longue de 900 km, qui commença il y a 1,8 million d'années dans le sud ouest de l'Idaho.

Des calculs du mouvement relatif du Yellowstone par rapport à un cadre de référence, pris sur le manteau terrestre, mon-

trèrent un mouvement en direction du sud-ouest de la plaque Nord-Américaine, à une vitesse de 3 à 4 cm par année. Cette direction est opposée au mouvement de propagation du volcanisme siliceux le long de la plaine de la Snake River.

Ce résultat est en accord avec l'hypothèse que le système Yellowstone-Plaine de la Snake River représente la trace du mouvement de la plaque Nord-Américaine au dessus d'un point chaud (hot spot) du manteau ou d'une quelconque source de chaleur litho-asténosphérique.

2.2 Geophysique régionale

Le plateau du Yellowstone est marqué par une intense activité sismique, des vitesses sismiques basses, une faible densité, une déformation crustale active, une haute topographie et un flux de chaleur élevé (Smith et Braile, 1984). Ces pro-

priétés intégrées dans l'histoire volcanique quaternaire suggèrent la présence de magma à moyenne voire faible profondeur dans la croûte terrestre.

2.3 Flux de chaleur et propriétés thermiques

Les propriétés physiques qui distinguent le Yellowstone des autres centres d'activité siliciques du monde est l'extension de son système hydrothermal de haute température ainsi que son flux de chaleur élevé. La chaleur restituée par le système hydrothermal du Yellowstone qui s'élève à environ 46.10^9 watts ainsi que le flux d'énergie thermique moyen, environ 1800 mW/m^2 (Fournier et Pitt, 1985) font de lui le plus grand d'Amérique du nord. Des mesures conductives du flux thermique faites dans le Yellowstone-Lake, ont montré des valeurs allant de 125 à 2500 mW/m^2 avec une moyenne aux alentours de 1500 mW/m^2 (Morgan et al., 1977).

Ces valeurs élevées du flux de chaleur qui sont environ 30 fois plus grandes que la moyenne continentale, sont supposées refléter le refroidissement d'un magma partiellement cristallisé et solidifié, situé en dessous de la caldera.

2.4 Déformation de la croûte de la caldera

La répétition des levés de nivellement a procuré l'évidence la plus claire de la présence de déformations de la croûte de la caldera (fig. 2): Presque 1 m de surélévation de 1923 à 1984 à une vitesse de 1,5 à 2,5 cm par année (Pelton et Smith 1979, 1982; Dzurizin et Yamashita, 1987). Cependant le surélévation historique a été épisodique, Dzurizin et Yamashita ont montrés que la partie nord-est de la caldera s'était abaissée de plus de 20 mm entre 1984 et 1986.

La source de la déformation de la caldera du Yellowstone est inconnue. Elle pourrait résulter de divers mécanismes comme une injection de magma du manteau dans la croûte, d'une accumulation d'un fluide magmatique à pression lithosphérique, qui évolua durant la cristallisation du magma rhyolitique ou encore d'une variation des contraintes tectoniques régionales. Tous ces mécanismes sont capables de produire une déformation mesurable de la croûte. L'injection de magma dans la croûte moyenne et supérieure est une explication plausible pour le soulèvement car ce processus semble avoir été important durant une longue période de temps et aussi parce que la basse vitesse sismique de la croûte supérieure suggère une fusion à faible profondeur.

Une image générale apparaît par conséquent pour l'emplacement des magmas crustaux, qui ont produits des déformations incluant l'effondrement intra-caldera

le long de failles circulaires d'extension, et dans les temps historiques les soulèvements et abaissements de la croûte.

2.5 Les déformations crustales de la région du lac Hebgen (Hebgen Lake)

Le seisme du lac Hebgen de 1959 ($M_s = 7,5$), le plus grand historiquement de la région, a produit un escarpement de faille de 28 km de long et d'un rejet vertical de 6 m. Ce tremblement de terre fut dû à plusieurs foyers comme le montrent des arguments seismologiques (Doser 1985). Des mesures répétitives de nivellements et de trilatération, près du site du tremblement de terre, ont montrés que de rapides déplacements verticaux et horizontaux ont suivis cet événement (Savage et al. 1985; Reilinger et al., 1977; Reilinger, 1986).

Le changement maximum d'élévation ayant eu lieu pendant la période post seismique, excède 30 cm et touche une région d'un diamètre de 50 km autour de l'épicentre.

Des mesures de trilatération effectuées entre 1973 et 1984 montrent les plus grands rapports de tension observés aux Etats-Unis, à l'exception de la Californie, et comparable à ceux observés le long de la faille de St. Andrea.

Reilinger (1986) a interprété la rapide déformation verticale et horizontale, ayant suivi le tremblement du lac Hebgen de 1959, comme le résultat d'une relaxation viscoélastique post seismique; alors que Savage et al. (1985) considèrent que la composante normale de la tension d'extension représente une accumulation permanente. En se basant sur les valeurs observées des rapports de tension, Savage et al. (1985) suggèrent qu'une répétition du tremblement du lac Hebgen pourrait se produire dans les 100 à 200 prochaines années. Bien que ce temps de répétition soit relativement court comparé à la moyenne des temps de récurrence de la province (1 000 à 10 000 ans) il est cohérent avec les récents résultats paléosismiques de cette zone (Doser and Smith, 1983).

Une interaction entre la déformation de la caldera du Yellowstone et le tremblement du lac Hebgen a été proposée par Meertens and Levine (1985). Selon leur modèle la compression tectonique horizontale régionale agissant sur un matériel à basse vitesse situé sous la caldera participe à l'élévation verticale du Yellowstone. Des vitesses d'élévations verticales comparables à celles observées à l'intérieur de la caldera pourraient être générées par un matériel hétérogène soumis à une contraction de 1 μ strain par an.

Avec une diminution de 20% du module d'élasticité et un nombre de Poisson de 0,4 le corps anormalique se conduit comme une inclusion dans la croûte poussée vers le haut en réponse à la compression horizontale. La recherche d'ar-

guments en faveur d'une telle relation entre déformations verticales et horizontales, dans la zone de la caldera et du lac Hebgen fut un des objectifs importants du projet de 1987.

2.6 La Sismicité du Yellowstone et du Lac Hebgen

Cette sismicité représente une part importante de la ceinture sismique qui s'étend du nord au sud au travers de l'ouest des Etats Unis sur environ 1300 km. La zone est dominée par des failles normales d'a-

ges cénozoïques (fig. 1). Des failles normales, orientées ouest le long des montagnes du centenaire et de la région du lac Hebgen d'un part, ainsi que des failles orientées au nord, adjacentes aux chaînes des Teton et de Madison au sud et au nord-ouest, d'autre part, convergentes au plateau du Yellowstone, suggèrent un champ régional de contraintes superposé à celui associé au processus thermique de la caldera.

De forts tremblements de terre y compris celui du Lac Hebgen de Magnitude 7,5

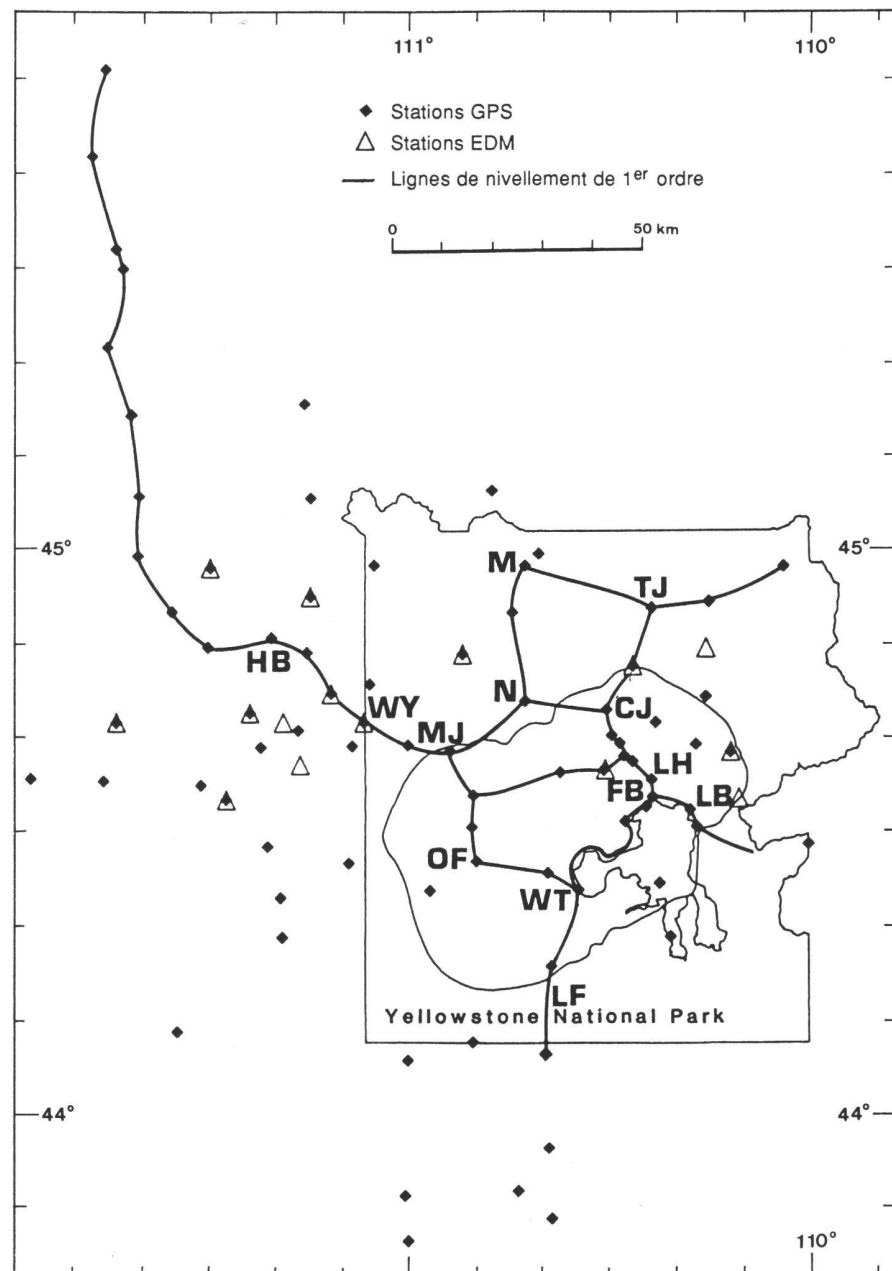


Fig. 3: Emplacements des stations GPS (◆), des points du trilatération (△) et des lignes de nivellement de 1^{er} ordre (—).

HB = Zone de la faille du Lac Hebgen; WY = West Yellowstone; N = Norris; M = Mammoth; OF = Old Faithful; WT = West Thumb; FB = Fishing Bridge; CJ = Canyon Junction; TW = Tower Junction; LB = Lake Butte; LF = Lewis Falls; LH = Rapides de Lee Hardys; MJ = Madison Junction. La station de base du GPS était placée à l'aéroport de West Yellowstone.

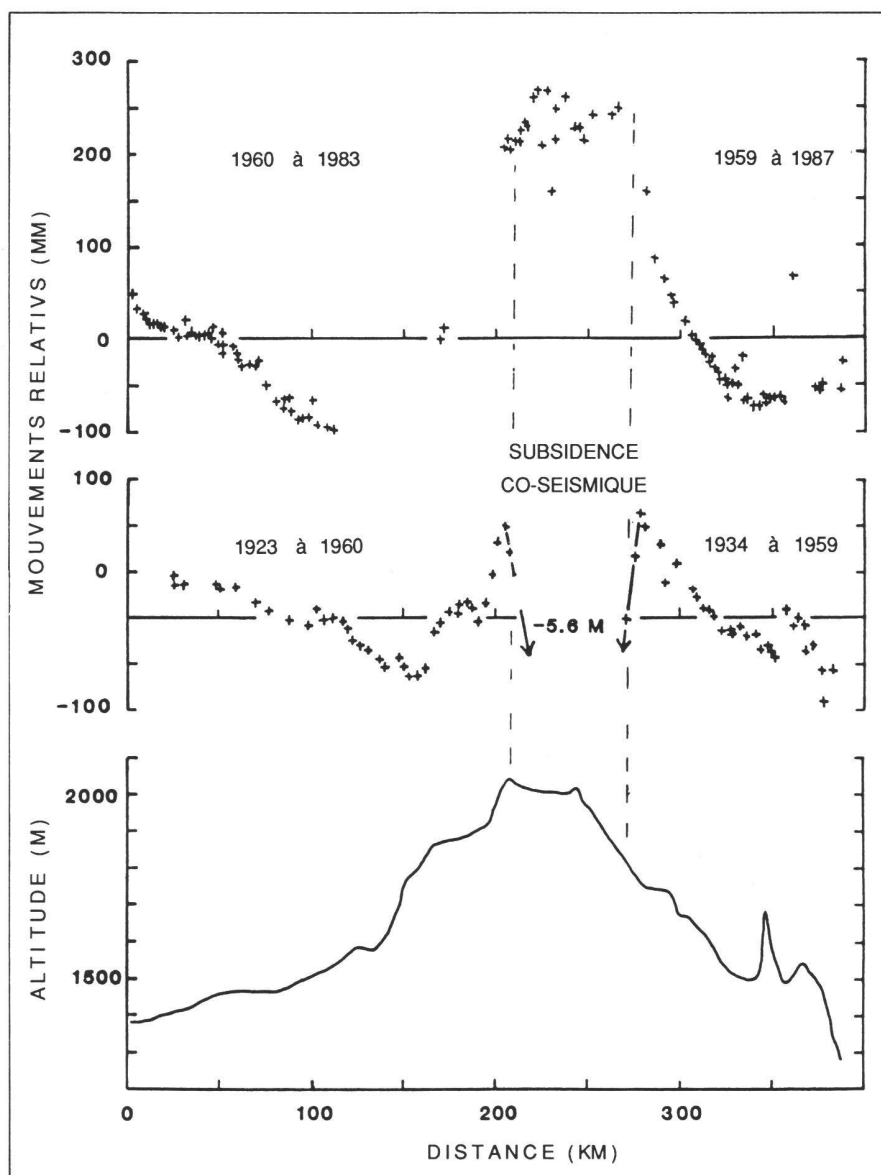


Fig. 4: Profils d'altitude et de variations d'élévation de la région du tremblement de terre du Lac Hebgen, de 1959. Les données sont issues en partie de la ligne de nivellement coupant la zone de subsidence co-sismique majeure. Noter les 300 mm d'élévation de la zone épiscopale, relatifs aux points de référence du nord-ouest.

ainsi que six autres d'une magnitude supérieure à 6 ont eu lieu dans la région du Yellowstone durant les temps historiques. Des essaims de séismes caractérisent la caldera du Yellowstone et sont corrélés avec des dérangements de l'activité hydrothermale. La profondeur maximum des foyers des tremblements de terre est d'environ 20 km à l'extérieur de la caldera alors qu'à l'intérieur elle excède rarement 4 km (Smith et Braile, 1984; Fournier et Pitt, 1985). Cette relation suggère que le matériel situé sous la caldera, à une profondeur supérieure à 4 km, n'est pas capable de supporter des contraintes élevées, probablement à cause de sa haute température. La zone des tremblements peu profonds,

à l'intérieur de la caldera, est bien corrélée avec la position de l'élévation verticale de 1923 à 1984.

2.7 La structure des vitesses sismiques de la caldera

Des études des retards des ondes P et S des téléseismes aussi que des anomalies gravimétriques régionales indiquent que des vitesses anormalement lentes ($-15\% V_p$) pourraient s'étendre jusqu'à une profondeur de 250 km sous le plateau du Yellowstone (Iyer et al., 1981; Evoy, 1977).

Des profils de sismique de réflexion et de réflexion à grand angle (Smith et al., 1982) ont révélés une croûte supérieure

hétérogène sous toute la caldera, où des vitesses sismiques de compression sont réduites d'environ 10% sur une surface qui coïncide assez bien avec les mouvements verticaux de 1923 à 1984. Une petite zone dans la partie nord-est de la caldera montre un déficit gravimétrique restreint et une réduction de 20% des vitesses sismiques dans la croûte supérieure, à des profondeurs entre 2 et 12 km. Cette anomalie est considérée comme la meilleure évidence d'une connexion magmatique entre la croûte et la surface et a été le but d'observation avec 4 récepteurs GPS et quelques stations de gravimétrie de précision.

3. Les mesures GPS

La première justification pour l'établissement des stations de GPS en 1987 fut de fournir un réseau de base destiné au contrôle systématique et à long terme des déformations verticales et horizontales de la croûte. Des déterminations tri-dimensionnelles précises de position, basées sur la réception des signaux radio des satellites NAVSTAR, ont été effectuées à l'aide de 11 récepteurs GPS TI4000 (Texas Instruments) sur des lignes de base de 5 km à 250 km de long (fig. 3).

Quelques uns des avantages de la technique GPS sur les techniques géodésiques classiques sont que les emplacements des stations ne sont pas limités par la ligne à vue, que cette technique est moins coûteuse, qu'elle fournit des positions tri-dimensionnelles et que la portabilité des récepteurs permet l'établissement de stations dans des zones d'accès difficile.

3.1 La sélection des sites de GPS

Les sites de GPS ont été choisis sur la base d'intérêts strictement scientifiques en tenant compte de leur capacités tri-dimensionnelles. Dans des buts de comparaison et de continuité, des points géodésiques ont été occupés dans la mesure du possible. Une majorité de stations GPS furent positionnées sur des repères de nivellement installés le long des routes. Additionnellement plusieurs sites de trilatération furent occupés (fig. 3). Les capacités du GPS ont aussi offert la possibilité d'effectuer des mesures sur 10 stations qui étaient jusqu'alors inaccessibles aux autres méthodes géodésiques. Les sites du Yellowstone-Hebgen Lake ont été choisis afin de couvrir zone des déformations historiques, à l'intérieur de la caldera, ainsi que la région des mouvements verticaux et de changements rapide de contraintes, entourant l'épicentre du séisme de Hebgen Lake.

Des stations du réseau de trilatération de Hebgen Lake furent occupées en même temps que des stations additionnelles de GPS afin de densifier le réseau.

Dix stations faiblement espacées furent occupées le long de la ligne croisement, Canyon Junction–Lake Butte; ligne qui a été annuellement nivelée, depuis 1983, par l'USGS.

D'autres stations faiblement espacées ont été établies le long d'un ligne de nivellement croisant la partie sud-ouest de la caldera. La partie nord-ouest du réseau GPS croise la large zone de soulèvement autour de la faille du Hebgen Lake alors que la partie la plus septentrionale entoure la faille de Teton.

3.2 La campagne de printemps

Des observations préliminaires ont été conduites en juin 1987 pour premièrement entraîner les opérateurs des universités et aussi pour mesurer une partie du réseau destiné à être réobservé durant la campagne principale. Ces stations furent concentrées le long de la ligne de nivellement nord de la caldera (fig. 3). Neuf jours d'observations avec 7 récepteurs sur 21 sites ont été conduits.

3.3 La campagne principale (1987)

L'expérience principale d'étude des déformations crustale fut conduite en Septembre et Août 1987. Jusqu'à 10 récepteurs ont opérés chaque jour sur le terrain (2 UNAVCO, 5 NGS, 3 USGS). Une station de base a été aussi établie à l'aéroport de West-Yellowstone. Deux sites additionnels, utilisés pour le rattachement à un réseau de référence, ont opérés durant tout le projet: l'une à Cheyenne, Wyoming et l'autre au repère mobile VLBI à Platteville, Colorado. Les équipes de NGS ont prêté leur assistance pour l'établissement des repères et leur liaison avec les lignes de nivellement.

3.4 Acquisition des données sur le terrain

Pour les deux campagnes de 1987, des récepteurs à deux fréquences TI 400 furent utilisés en conjonction avec le système d'exploitation GESAR 1.2 opérant à la cadence de 30 sec.

Les scénarios de satellites furent choisis de façon à être en accord avec les stations permanentes de référence situées à Yellowstone, Canada; Westford, Massachusetts; Austin, Texas et Mojave, Californie; avec des mineurs ajustements pour les positions locales.

Avec une bonne couverture de référence des stations il est possible d'améliorer la détermination des orbites et d'augmenter la fidélité à long terme. Une couverture de quatre satellites fut disponible plus de quatre heures par jour et chaque station a été maintenue en observation au moins 6 heures et demie par jour pendant deux jours.

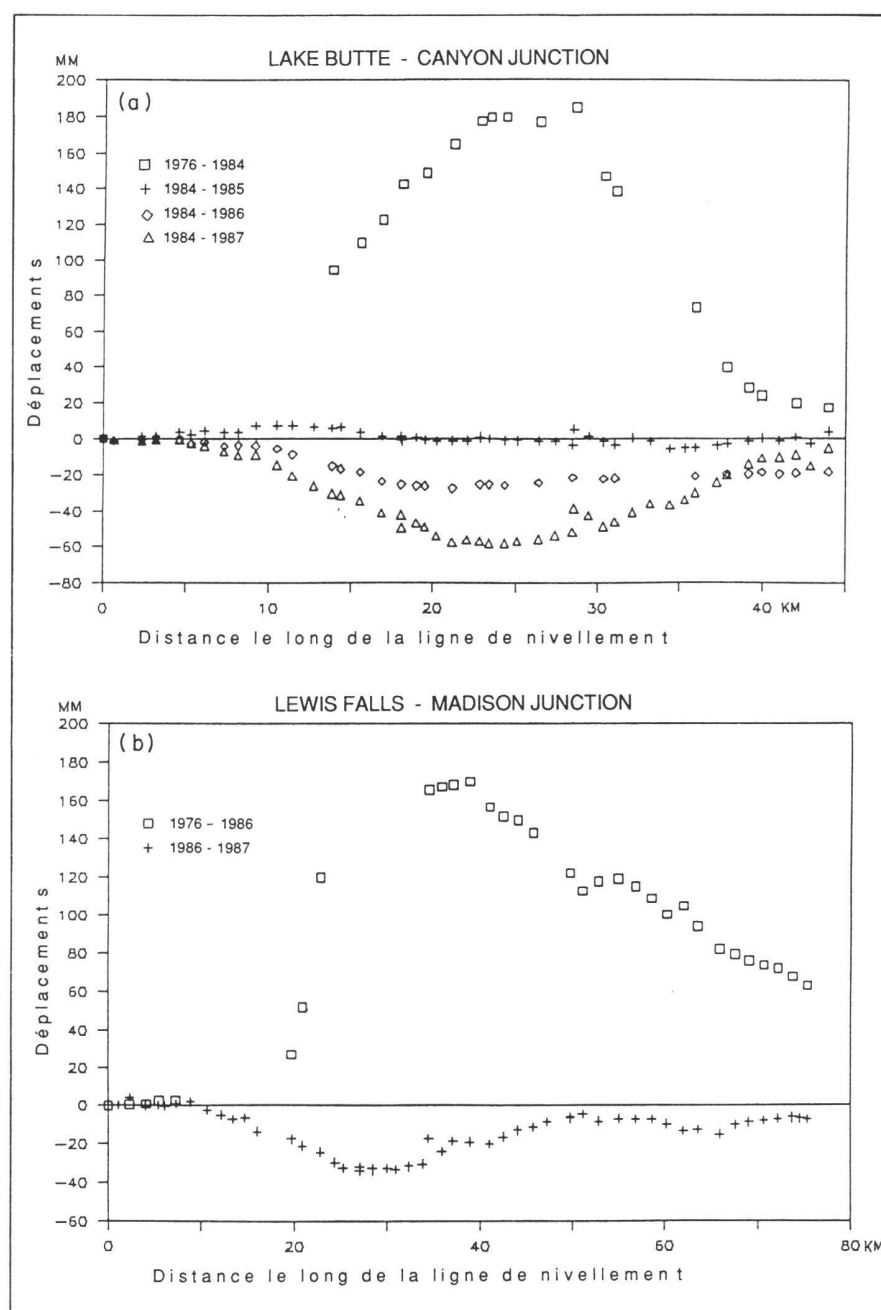


Fig. 5: Graphiques des déplacements verticaux successifs, de 1976 à 1987 le long de deux lignes de nivellement coupant la caldera du Yellowstone.

- a) Du lac Butte à Canyon Junction en passant par la zone des mouvements maximum de «Le Hardys Rapids».**
b) Du lac Lewis à Madison Junction en passant par le célèbre geyser Old Faithful.

3.5 Traitement des données

Les logiciels de traitement des données GPS se sont considérablement affinés et améliorés durant les années passées et la précision de leurs résultats approche celle des mesures VLBI. Cependant pour chaque étude la distribution des stations, la longueur des lignes de bases, la géométrie des satellites, les conditions troposphériques, la longueur des observations, la qualité et la consistance des données des stations de références sont uniques. Pour la campagne du Yellowstone–Lake

Hedgen, le volume des données a représenté un défi supplémentaire: Un total de 30 jours de données avec chacun 15 récepteurs furent collectées.

L'accent a été particulièrement mis sur l'évaluation de la précision et de l'exactitude des mesures car il s'agissait de la première d'une série d'expérience planifiée pour la région du Yellowstone–Hebgen Lake.

La précision des mesures GPS est typiquement évaluée sur la base de la répétabilité des mesures sur les lignes de base

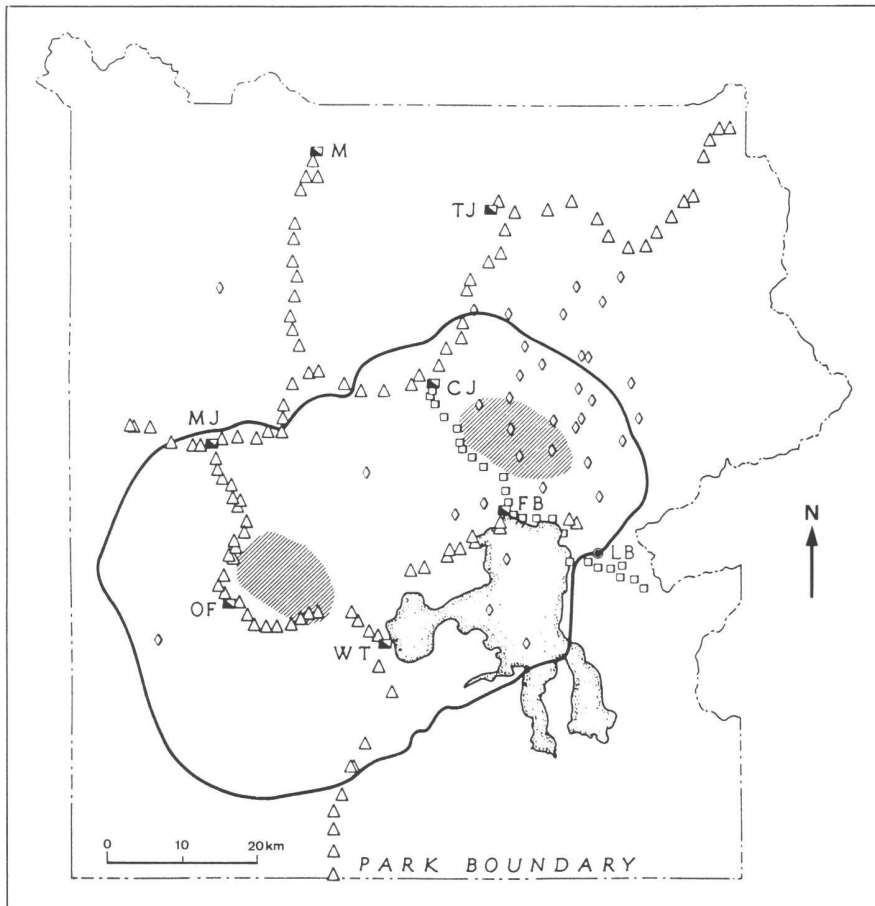


Fig. 6: Situation des stations gravimétriques de précisions du parc national du Yellowstone. La station de référence se trouve à Canyon Junction (CJ).

commune, et l'exactitude est déterminée par comparaison avec d'autres mesures géodésiques. Pour, le projet de 1987 il a été possible d'évaluer la répétabilité des mesures au jour le jour ainsi qu'entre les campagnes de Juin et d'Août/Septembre. Il fut aussi possible de comparer directement les données GPS et EDM acquises aux mêmes repères et en même temps. Les mesures simultanées sont particulièrement importantes au lac Hebgen car des changements de la longueur de la ligne de base, allant jusqu'à 1 cm par an, ont été mis en évidence au travers du réseau EDM.

Le traitement des données GPS n'étant pas encore complètement automatique, certaines décisions doivent être prises par opérateur comme par exemple la détermination des orbites et la soustraction du glissement de cycle. De plus les logiciels disponibles ont différentes approches. Afin d'évaluer plus objectivement l'exactitude des données du Yellowstone-Hebgen Lake celles-ci ont été traitées indépendamment à l'aide de différents algorithmes. L'université d'Utah et l'USGS emploient le logiciel de 2^{ème} et 3^{ème} génération de l'université de Berne alors que les groupes du MIT et du NGS emploient leurs propres programmes. Des comparaisons avec les résultats de l'EDM seront faites pour les

données collectées sur les mêmes sites. Etant donné que la plus grande partie de ce logiciel est encore en développement, une comparaison des résultats sera d'une grande aide pour l'évaluation des mérites de chacun d'eux.

4. Nivellement

4.1 Région du lac Hebgen

Le projet d'étude des déformations crustales de 1987 comprenait une répétition du nivellement de 1934 et 1959 le long d'une ligne passant au travers de la zone de subsidence co-sismique du tremblement de 1959 (fig. 3).

Les changements d'altitudes déterminés à partir de ces nouvelles mesures sont reportées à la figure 4. Pour cette figure les nouvelles données ont été rattachées à la ligne de nivellement s'étendant au sud, nivellement en 1923, 1960 et 1983. Les données de 1987 sont présentées en relation avec les mouvements co-sismiques et la topographie (la période co-sismique comportant une période d'environ 1 année de déformation post-sismique).

Ces nouvelles données indiquent un mouvement vertical d'élévation, relatif aux points nord-ouest, d'environ 30 cm, entre 1959 et 1987, dans la zone épicerale.

Ceci confirme les mouvements verticaux déjà mis en évidence dans la zone entourant le séisme de 1959 (Reillinger, 1959).

4.2 Yellowstone plateau

Le nivellement de 1987 à travers le plateau du Yellowstone (fig. 5) comprend les lignes originales établies en 1983 remesurées en 1975, 1976 et 1977. En addition des lignes de rattachement aux nouveaux points de GPS ont été établies (fig. 37). Une attention toute particulière a été portée à l'établissement de points complémentaires (sécurité) et aux rattachements aux points USGS de densification récemment implantés sur les lignes Canyon-Junction-Lake Butte et Madison Junction-Thumb (fig. 3).

Ces deux lignes ont révélé le mouvement d'élévation principal de 1923 à 1984. Une ligne de nivellement, établie en 1955, coupant la caldera centrale, fut aussi remesurée afin de rattacher les deux lignes principales la recoupant.

Les résultats des nivellements annuels entre Canyon Junction et Lake Butte de 1983 à 1987 (fig. 5a) indiquent: Un soulèvement continu dans la partie nord de la caldera à une vitesse de 23 ± 1 mm par année, durant la période 1976-1983 et de 17 ± 7 mm par année entre 1983 et 1984. Un arrêt du soulèvement entre 1984 et 1985 (0 ± 7 mm/année). Une subsidence entre 1985 et 1986 (-26 ± 7 mm/année) puis entre 1986 et 1987 (-38 ± 7 mm/année).

Dans la partie sud-ouest de la caldera (fig. 5b) entre Madison Junction et Lewis Falls les observations de 1976, 1986, 1987 ont montré que le soulèvement continue à une vitesse moyenne de 17 ± 1 mm par année de 1976 à 1986 puis s'inverse en subsidence de 1986 à 1987 (-22 ± 9 mm/année). Le schéma de la subsidence récente est similaire à celui de la subsidence antérieure (fig. 5) ce qui suggère une source dans une région commune de la croûte supérieure.

5. Gravimétrie de précision

La gravimétrie de précision est une méthode efficace pour évaluer les déformations verticales de la croûte dans des régions difficiles d'accès. La méthode peut être utilisée pour faire le pont entre des levés géodésiques disjoints ou pour étendre leur couverture dans des zones d'accès difficiles. Les observations gravimétriques peuvent fournir des informations quantitatives sur des changements d'élévations et, combinées avec des données d'altitudes orthométriques, peuvent permettre l'évaluation des changements temporels de masse sous la surface terrestre. Cette méthode devrait permettre de distinguer entre sources de déformation

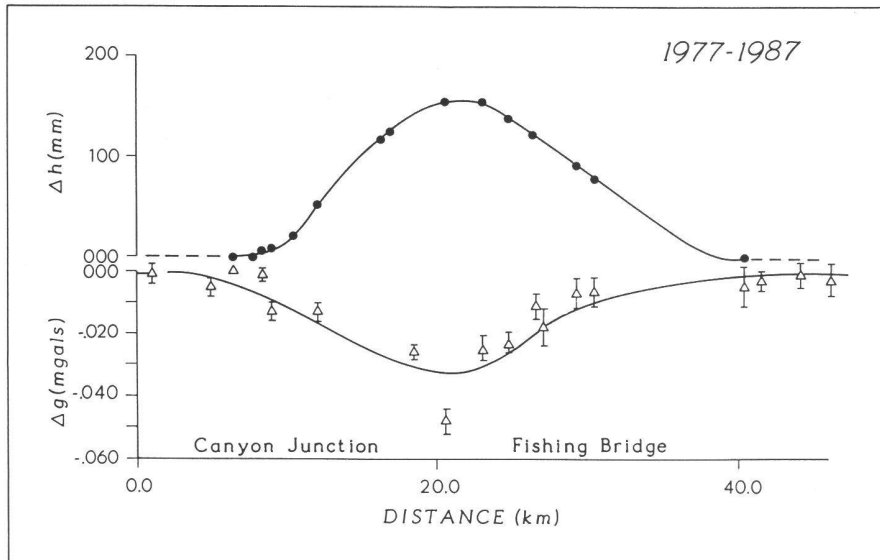


Fig. 7. Graphique montrant une comparaison entre les différences d'altitude (1977-1987) et les variations de pesanteur à travers la partie nord-ouest de la caldera du Yellowstone; de Canyon Junction au lac Butte.

magmatiques et sources tectoniques. Les objectifs des mesures gravimétriques de cette campagne étaient:

- 1) De déterminer si les variations de gravités sont associées aux variations des altitudes orthométriques.
- 2) De déterminer les relations existantes entre ces deux variations, si celles-ci existent.
- 3) D'évaluer les déformations crustales dans les zones d'accès difficiles.
- 4) D'obtenir une évaluation qualitative du mécanisme des sources responsables des variations des altitudes orthométriques observées et de la pesanteur.

Les 133 stations gravimétriques de précision (fig. 6) établies en 1977 coïncident avec les repères de nivellements situés sur les routes principales du Yellowstone (Evoy, 1977). En 1984, 55 stations additionnelles furent implantées dans les zones d'accès difficiles et en 1987 20 nouvelles stations furent établies sur les sites de GPS.

5.1 Le levé gravimétrique de 1987

Entre Août et Septembre 1987, la plupart des stations de 1977 et une partie de celles situées dans les zones d'accès difficiles (1984) ont été mesurées (fig. 6). Les observations de 1977 et 1987 furent conduites durant la même période de l'année afin de minimiser les effets saisonniers de la nappe phréatique. Durant la campagne de 1987 trois gravimètres Lacoste et Romberg furent utilisés: Deux modèles G et un modèle D.

Des techniques spéciales de boucles ont été employées afin de mieux maîtriser la dérive instrumentale des gravimètres. Les erreurs standards moyennes obtenues

sont de 7 μ gal pour les stations des zones d'accès difficiles et de 5 μ gal pour les stations de l'intérieur de la caldera.

Les mesures gravimétriques (Δg) et les changements d'altitudes orthométriques dans la partie nord de la caldera (fig. 7) indiquent une diminution de la pesanteur allant jusqu'à 60 μ gals durant la période de 1977 à 1987. Ces diminutions reflètent probablement l'accroissement des altitudes d'une part et d'autre part un afflux de masse dans la croûte superficielle. Les changements de pesanteur et d'altitude coïncident assez bien et le maximum du soulèvement (12 cm) correspond à une diminution de g de 30 μ gal. Le rapport $\Delta g/\Delta h$ le long du profil montre une valeur de $-1,7 \mu\text{gal/cm}$ au point de soulèvement maximum.

Ce rapport est significativement plus petit que le gradient normal de la pesanteur ($-3,086 \mu\text{gal/cm}$) et suggère un accroissement net de masse, sous la caldera, entre 1977 et 1987.

5. Trilatération

L'USGS a établi un réseau de trilatération au lac Hebgen en 1973 et dans la part nord-est de la caldera du Yellowstone en 1984 (Savage et al., 1984).

Les mesures de longueurs à l'aide de Géodolites ont une erreur standard d'environ 0.2 part par million (ppm) ou ± 5 mm pour une ligne de 20 km. Une précision comparable est attendue des mesures GPS pour des lignes de mêmes longueurs.

Des mesures GPS ont été effectuées sur beaucoup de sites de trilatération afin de relier les deux réseaux entre eux. La densification du réseau de trilatération à l'aide

de GPS devrait fournir une plus grande résolution spatiales des tensions.

Additionnellement des comparaisons directes sur des lignes communes permettront de déterminer la précision relative des mesures GPS et EDM.

Les deux réseaux de trilatération, mesurés en 1973, 1974, 1976, 1978, 1981 et 1984 furent remesurés en 1987 durant la campagne GPS et ont montrés une vitesse d'extension permanente d'environ 0.3 μ strain/année, perpendiculaire à la trace de rupture de 1959 (Savage et al., 1985).

Les résultats préliminaires de 1987 indiquent que cette tension continue de s'accumuler à la même vitesse. Aucun changement significatif n'a été observé à travers la partie nord-est de la caldera entre les mesures de 1984 et de 1985 (Dzurisin et Yamashita, 1987). Les déplacements détectés en 1987 sont consistants avec les schémas de subsidence déterminés par nivellement, bien que marginalement significatifs.

6. Résumé

La compréhension des causes des déformations contemporaines dans la région du Yellowstone-Hebgen Lake est important pour comprendre plusieurs points de géodynamiques qui sont:

- a) La dynamique du «point chaud» du Yellowstone
- b) La cinématique de la déformation d'extension intracontinentale
- c) Le mécanisme de placement des magmas siliceux et basaltiques
- d) La rhéologie lithosphérique

et pour évaluer les risques volcaniques et sismiques.

Le soulèvement de la caldera du Yellowstone pourrait être aussi bien causé par une inflation magmatique, une compression tectonique ou par une accumulation de fluides magmatiques durant le refroidissement et la cristallisation de rhyolites. Inversement la subsidence pourrait refléter une déflation, une extension ou une migration de fluide vers le haut.

Des données définitives sont actuellement manquantes mais une surveillance constante des mouvements du sol, de la sismicité, de la pesanteur et du flux des fluides hydrothermaux est planifiée pour restreindre le nombre des mécanismes possibles.

Etant donné la complexité du système hydrothermal du Yellowstone une interaction entre magmatisme, tectonique et processus hydrothermaux semble la plus plausible.

Des répétitions du nivellement, de la trilatération, des mesures GPS et de gravimétrie de précision peuvent fournir les in-

formations nécessaires à la distinction entre accumulation de tensions d'origine magmatique ou tectonique et relaxation sismiques; car ces phénomènes sont caractérisés par des comportements temporels différents.

Les futures mesures de déformations de la région du Yellowstone-Lake Hebgen-Teton devraient être faites d'un façon complète et systématique au moins bi-annuellement, afin d'avoir accès aux déformations à long terme. D'autre part une répétition et une densification des mesures à intervalle de temps plus court serait désirable là où les conditions géologiques les permettent et quand les déformations dépassent un seuil jugé significatif pour s'attendre à des tremblements de terre ou à des signes précurseurs d'éruption volcaniques.

References:

Christiansen, R. L., Yellowstone magmatic evolution: Its bearing on understanding large-volume explosive volcanism, in *Explosive volcanism: Inception, evolution, and hazards: Studies in geophysics*: Washington, D. C., National Academy Press, 84–95, 1984.

Doser, D. I. Source parameters and faulting processes of the 1959 Hebgen Lake, Montana, earthquake sequence, *J. Geophys. Res.*, v. 90, 4537–4556, 1985.

Doser, D. I. and R. B. Smith, Seismicity of the Teton-Southern Yellowstone region, Wyoming, *Seismol. Soc. Amer. Bull.*, 73, 1369–1394, 1983.

Dzurisin, D. and K. M. Yamashita, Vertical surface surface displacements at Yellowstone caldera, Wyoming, 1976–1986, *J. Geophys. Res.*, 92, 13,753–13,766, 1987.

Evoy, J. A., Precision gravity reobservations and simultaneous inversion of gravity and seismic data for subsurface structure of Yellowstone, University of Utah, M. S. thesis, 212 p, 1977.

Fournier, R. O., and A. M. Pitt, The Yellowstone magmatic-hydrothermal system, in Stone, Claudia, ed., *Geothermal Resources Council 1985 International Symposium on Geothermal Energy (transactions): International Volume*, 319–327, 1985.

Iyer, H. M., J. R. Evans, G. Zandt, R. M. Stewart, J. M. Cookley, and J. N., Roloff, A deep low-velocity body under the Yellowstone caldera, Wyoming; delineation using teleseismic P-wave residuals and tectonic interpretations, *Geol. Soc. America Bull.*, 92, 1471–1646, 1981.

Les personnes suivantes ont activement participé comme organisateurs et/ou acteurs de ce projet:

University of Utah:	B. Smith, C. M. Meertens, J. R. Hollis
M.I.T.:	R. E. Reilinger
National Geodetic Survey:	S. R. Hodahl, Lt. M. Mathwig, R. Kolkesh
U.S. Geological Survey:	D. Dzurisin, W. K. Gross, W. H. Prescott, J. C. Savage
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETHZ:	E. E. Klingelé
UNAVCO, University of Colorado:	J. L. Stowell
National Park Service, Yellowstone:	R. Hutchinson, J. Varley
Defense Mapping Agency, Cheyenne Wyoming:	R. Stone
Air Force Geophysical Laboratory:	J. Cipar

Les fonds nécessaires à ce projet ont été fournis par:

The National Science Foundation: grants EAR- 8618341 et EAR- 8618705; The National Geodetic Survey; The US Geological Survey, Volcano Hazard Program; The National Park Service; E.T.H.-Zürich; The U.S. Air Force Geophysical Labs.

Meertens, C. M., and J. Levine, Compressive tectonic strain as a possible mechanism for long-term vertical deformation of the Yellowstone caldera, *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, 66, 46, 853, 1985.

Morgan, P. D., D. D. Blackwell, and R. E. Spafford, Heat flow measurements in Yellowstone Lake and the thermal structure of the Yellowstone caldera, *J. Geophys. Res.*, 82, 3719–3732, 1977.

Pelton, J. R., and R. B. Smith, Recent crustal uplift in Yellowstone National Park: *Science*, 206, 1179–1182, 1979.

Pelton, J. R., and R. B. Smith, Contemporary vertical surface displacements in Yellowstone National Park, *J. Geophys. Res.*, 87, 2745–2751, 1982.

Reilinger, R. E., G. P. Citron, and L. D. Brown, Recent vertical crustal movements from precise leveling data in southwestern Montana, western Yellowstone National Park, and the Snake River Plain, *J. Geophys. Res.*, 82, 5349–5359, 1977.

Reilinger, R. E., Evidence for postseismic viscoelastic relaxation following the 1959 M = 7.5 Hebgen Lake, Montana earthquake, *J. Geophys. Res.*, 91, 9488–9494, 1986.

Savage J. C., M. Lisowski, and W. H. Prescott, Strain accumulation in the Rocky Mountain states, *J. Geophys. Res.*, 85, 6429–6435, 1985.

Smith, R. B., and L. W., Braile, Crustal structure and evolution of an explosive silicic volcanic system at Yellowstone National Park, in *Explosive Volcanism: Inception, Evolution, and Hazards*: Washington, D. C., National Academy Press, 96–109, 1984.

Smith, R. B., and R. L. Christiansen, Yellowstone Park as a window on the earth's interior, *Scientific American*, 242, 104–117, 1980.

Smith, R. B., M. M. Schilly, L. W. Braile, J. A. Lehmann, J. Ansorge, M. R. Baker, C. Prodehl, J. H. Healy, S. Muller and R. W. Greensfelder, The 1978 Yellowstone-eastern Snake River Plain seismic profiling experiment: Crustal structure of the Yellowstone region and experiment design, *J. Geophys. Res.*, 87, 2583–2596, 1982.

Adresse de l'auteur:

PD Dr. E. Klingelé
Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich