

Zeitschrift: Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) =
Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF))
Band: 71-F (1973)
Heft: 1

Artikel: Nivellement et surrection actuelle des Alpes
Autor: Jeanrichard, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-226176>

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>

F. Jeanrichard

Résumé

L'étude des mouvements de l'écorce terrestre a pris une ampleur considérable durant les 15 dernières années. La répétition des nivellements nationaux de nombreux pays permet de déceler les mouvements verticaux du sol. En Suisse, l'étude a surtout porté sur la ligne Bâle-Lucerne-St-Gothard-Chiasso. La comparaison des nouveaux nivellements (1967 à 1971) aux anciens (1907 à 1919) a révélé l'existence d'une surrection des Alpes atteignant un maximum de 5 cm dans les nappes simplio-tessinoises. Le montant de cette surrection a été confirmé par des études récentes entreprises en Autriche et en France. Les résultats des recherches géologiques sont également en bon accord avec les valeurs trouvées par nivellement.

Zusammenfassung

Die Studien zur Bestimmung von Erdkrustenbewegungen haben in den vergangenen 15 Jahren einen beachtlichen Umfang angenommen. Durch Wiederholen der Messungen in den nationalen Nivellementnetzen lassen sich Vertikalbewegungen des Bodens bestimmen. In der Schweiz wurde zur Hauptsache die Linie Basel-Luzern-St. Gotthard-Chiasso untersucht. Der Vergleich der neuen Resultate (1967 bis 1971) mit den alten (1907 bis 1919) ergibt eine Hebung der Alpen, die in den penninischen Decken des Tessins einen maximalen Betrag von 5 cm erreicht. Die Größenordnung dieser Hebung stimmt mit der kürzlich in Österreich und in Frankreich festgestellten überein. Auch die geologischen Untersuchungen bestätigen die Resultate des Nivellements.

1. Aperçu de l'organisation internationale de la recherche sur les mouvements de l'écorce terrestre

Les géodésiens se sont occupés depuis longtemps de l'étude des mouvements du sol. Les méthodes géodésiques utilisées pour mesurer les tassements ou les glissements de terrain sont bien connues. Mais en plus de l'étude de phénomènes locaux, les géodésiens s'intéressèrent également aux recherches sur les mouvements affectant l'écorce terrestre sur de grandes étendues.

En 1954, nous trouvons en première place parmi les vœux et résolutions adoptés à la X^e Assemblée générale de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI):

Mouvements de l'écorce terrestre:

«L'Union géodésique et géophysique internationale recommande que des mesures géodésiques soient répétées à des intervalles de temps réguliers en vue de déterminer les changements relatifs de positions (aussi bien dans le sens horizontal que dans le sens vertical) pour un certain nombre de stations particulièrement bien choisies dans les régions où de tels changements sont à craindre.

Les opérations de triangulation, de mesure de traverses, de nivellement de précision doivent pouvoir être effectuées avec une précision suffisante pour déceler des déplacements de l'ordre de 1 mm par année dans l'intervalle des mesures successives. Ces mesures successives doivent pouvoir être répétées dans des conditions aussi identiques que possible.»

Mais en 1957, lors de la XI^e Assemblée générale de l'UGGI, le professeur Baeschlin, président du groupe d'étude 13 de l'Association internationale de géodésie (AIG), constatait que la documentation sur les mouvements de l'écorce terrestre n'était pas encore suffisante pour entreprendre des études valables.

La Commission «Mouvements de l'écorce terrestre» créée lors de la XII^e Assemblée générale de l'UGGI en 1960 donna une nouvelle impulsion aux recherches. Cette commission est rattachée aujourd'hui à la section V (Interprétation physique) de l'AIG et comprend cinq groupes de travail: Europe de l'Ouest, Europe de l'Est, Scandinavie, Amérique du Nord, Océanie¹.

Les sujets à l'ordre du jour du premier symposium de cette commission en 1962 donnent une idée de ses activités:

- Questions générales et tâches de la commission.
- Problèmes géodésiques et mouvements de l'écorce terrestre.
- Détermination des mouvements séculaires de l'écorce à l'aide d'observations des marées terrestres et d'observations gravimétriques.
- Observations océanographiques (niveau des mers) et leur signification pour la détermination des mouvements récents de l'écorce terrestre.
- Confrontation des mouvements lents (séculaires) et des mouvements rapides (sismiques).
- Problèmes géologico-morphologiques concernant l'étude des mouvements de l'écorce terrestre.
- Dérive des continents et structures profondes de la terre.
- Application pratique de l'analyse des déformations superficielles récentes (lors de l'édification de grandes constructions, extractions de mines, etc.).

La tâche de la commission ne consiste pas seulement à rassembler des données mais aussi à organiser de nouvelles recherches qui élargiront nos connaissances des mouvements récents de l'écorce.

En 1961 les professeurs Yu. D. Boulanger et J. A. Meschirikov ont présenté un projet de programme qui incluait:

- l'établissement de cartes de mouvements de l'écorce terrestre sur de grandes étendues (en premier lieu en Europe et en Amérique du Nord);
- l'organisation d'un service international d'observations des mouvements de l'écorce au moyen d'un réseau de

¹ Le président de cette commission est le professeur Yu. D. Boulanger, Institut de physique de la terre, Moscou, URSS. Le délégué suisse à cette commission est M. N. Pavoni, D^r ès sc. tech., Institut de géophysique de l'EPF, 8049 Zurich.

polygones où auraient lieu des observations géodésiques, géophysiques et géologico-morphologiques et

- l'étude des dérives des continents et des déformations du géoïde à l'aide d'observations astro-géodésiques spéciales.

Cette commission a organisé cinq symposia entre 1962 et 1971. Le symposium de 1973 aura lieu en Indonésie et celui de 1974 en Suisse. Les résultats des comparaisons de nivellements de différentes époques en Suisse feront l'objet de communications dans le cadre de cette commission.

A part le programme de cette commission «Mouvements de l'écorce terrestre» existe un autre programme à l'échelle mondiale appelé «Projet géodynamique». Ce programme a été établi par un comité ad hoc formé de représentants de l'Union géodésique et géophysique internationale et de l'Union internationale des sciences géologiques. Les recherches sont axées sur la dynamique de la terre et incluent les études relatives aux mouvements et déformations de la lithosphère, aux caractéristiques de l'intérieur de la terre et spécialement à la mise en évidence de mouvements profonds. La Suisse contribue à la réalisation de ce programme et une dizaine de groupes de travail ont été formés². Le groupe 1, «Mouvements récents de l'écorce terrestre», comprend des géologues, des géophysiciens et des géodésiens. Des projets précis d'études des mouvements verticaux et horizontaux existent et seront réalisés durant ces prochaines années: étude des mouvements le long de la ligne Rhône-Rhin, le long du décrochement de Pontarlier dans la région de la vallée de Joux, dans la région du Simplon, aux environs de Bâle (flexure rhénane).

Les géodésiens doivent effectuer dans ces régions des mesures de distances, d'angles et des nivellements de très haute précision.

Les autres groupes s'occupent de sujets tels que la sismicité, les phénomènes de métamorphose, la cinématique et la dynamique des Alpes, le magnétisme terrestre.

L'étude du mouvement vertical des grandes chaînes de montagnes en Europe aurait dû susciter, semble-t-il depuis longtemps, l'intérêt des géodésiens.

En 1960 déjà, M. E. Huber, directeur du Service topographique fédéral, avait eu l'intention de faire des recherches sur les mouvements verticaux des Alpes à l'aide du nivellement primordial. Lors d'une entrevue avec M. R. Wernthaler, chef du Service de nivellement du «Bayerisches Landesvermessungsamt», il avait proposé une collaboration internationale avec les pays limitrophes, à condition que des résultats intéressants soient découverts sur la ligne du St-Gothard. Mais faute de personnel, la répétition des mesures sur la ligne Bâle-St-Gothard-Chiasso avait dû être reportée à 1967/1971.

Au vu des résultats obtenus sur cette ligne, puis en Autriche et en France, un groupe de travail comprenant des géodésiens allemands (Bavière), autrichiens, français, italiens et suisses a été formé en 1972. Son but est d'étendre un réseau de nivellement aussi homogène que possible sur tout l'arc alpin, afin d'avoir une référence pour des mesures futures.

2. Etat actuel des recherches sur les mouvements verticaux de l'écorce terrestre en Suisse

Les recherches entreprises sur les mouvements verticaux de l'écorce terrestre en Suisse se fondent uniquement sur la comparaison des anciennes mesures du nivellement fédéral (1903 à 1925) aux nouvelles mesures entreprises dès 1943. La figure 1 indique quelle partie du réseau aura été répétée jusqu'à fin 1973. Les altitudes anciennes et nouvelles ont été confrontées pour toutes les lignes répétées du réseau. Mais les résultats les plus intéressants ont été découverts sur la transversale Bâle-St-Gothard-Chiasso.

Rappelons brièvement quelles sont les caractéristiques de notre réseau de nivellement primordial:

Deux réseaux de nivellement primordial se sont succédés en Suisse. Le premier, appelé Nivellement de précision, fut effectué entre 1865 et 1887 par la Commission géodésique suisse. Il se prête peu à des recherches de mouvements de l'écorce terrestre en raison de l'incertitude des longueurs des mires utilisées sur des différences d'altitude considérables. L'erreur kilométrique moyenne découlant de la compensation du réseau s'élève à $\pm 3,7$ mm. De 1892 à 1902, le Bureau topographique fédéral entreprit la révision complète des repères.

Le second, appelé Nivellement fédéral, fut observé par le Service topographique fédéral entre 1903 et 1927. Tous les anciens repères du Nivellement de précision encore intacts y furent incorporés. Ce réseau comprend 18 polygones et a une longueur de 3000 km environ, y compris les rattachements aux pays voisins. Les repères sont placés par groupes de trois à quatre; la distance moyenne entre chaque groupe est de 0,8 km. Toutes les lignes ont été observées dans les deux sens, chaque mesure étant faite par un observateur différent. Des mires à compensation (système Goulier) et à réversion ont été utilisées jusqu'en 1913. Elles étaient étalonnées au début et à la fin de chaque campagne sur le grand comparateur du Service topographique. En plus, les mires à réversion étaient comparées journalièrement à un mètre-étalon en invar. Les instruments utilisés étaient un niveau de Kern & Cie à Aarau et un niveau de Breithaupt à Cassel (système Seibt). La lunette de ces instruments était pourvue d'un objectif de 40 mm d'ouverture et l'agrandissement était de 40 fois. La distance instrument-mire était en principe de 20 m. Dès 1912 des essais furent entrepris avec des mires en invar. Dès 1914, l'emploi de ces dernières se généralisa, avec celui des instruments de type Zeiss III dotés de micromètres permettant la lecture du $\frac{1}{10}$ de mm. Les mesures se firent très soigneusement et toutes les précautions furent prises pour protéger les instruments du soleil et du vent. Les lectures s'effectuaient dans l'ordre suivant: lecture sur mire arrière – lecture sur mire avant – lecture sur mire avant – lecture sur mire arrière. L'erreur moyenne accidentelle déduite des discordances aller-retour s'élève à $\pm 0,4$ mm/km et l'erreur systématique à $\pm 0,2$ mm/km pour le réseau entier, selon les formules internationales de 1912.

En 1944, une compensation du réseau fut effectuée en système dynamique [5]. Les valeurs de la pesanteur furent interpolées d'après la carte des isanomales dressée par le professeur Niethammer, puis corrigées des anomalies de Bouguer et topographique. L'erreur moyenne après compensation s'élève à $\pm 1,4$ mm/km. La divergence entre l'erreur moyenne résultant de la compensation et celle obtenue

² Le président du comité suisse du «Projet géodynamique» est le professeur E. Niggli, Institut de minéralogie et de pétrographie de l'Université, 3012 Berne.

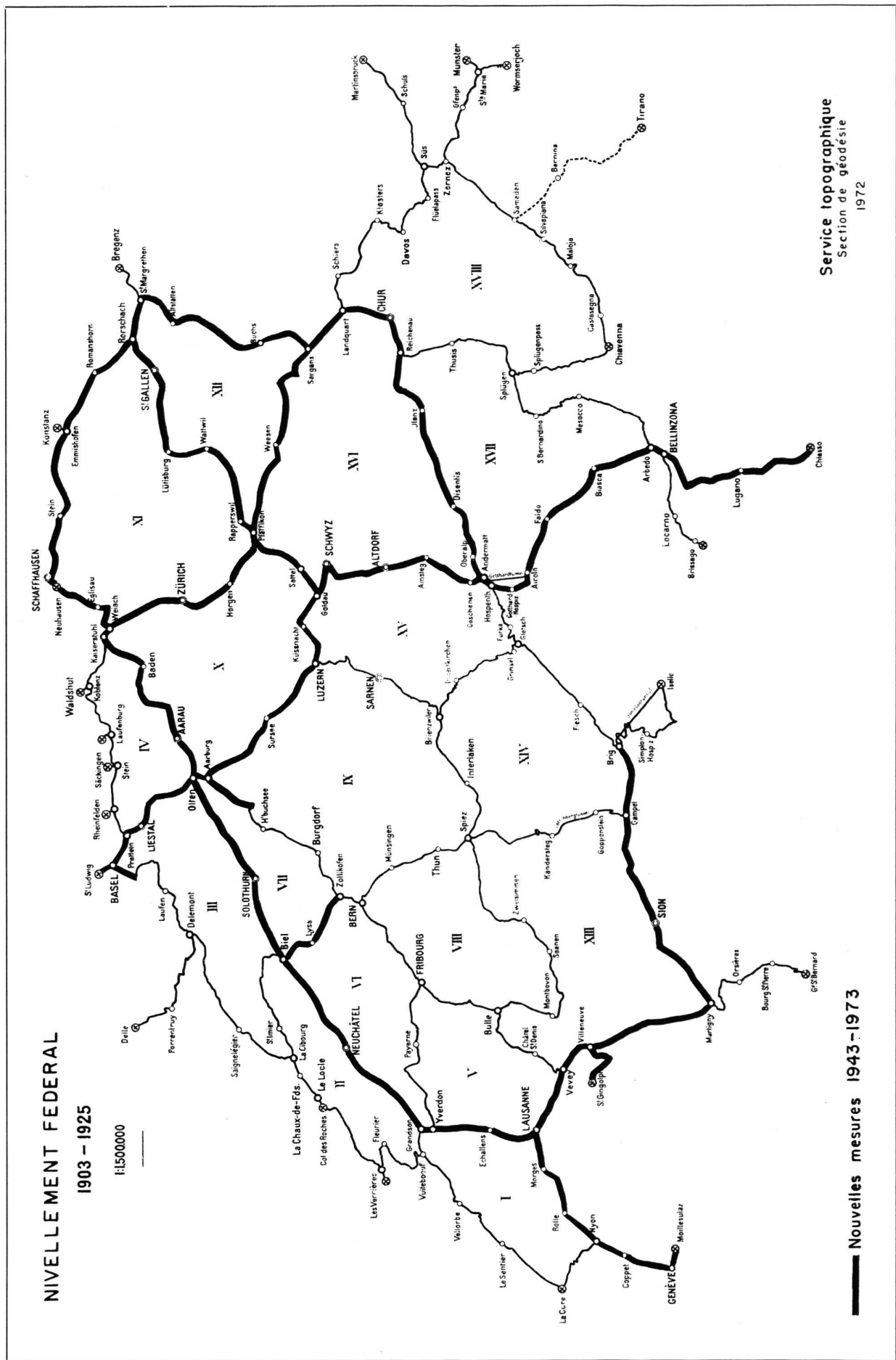


Abb. 1

à partir des discordances aller-retour peut s'expliquer, en partie, par le fait que le nivellement a été effectué dans un laps de temps de 25 ans, que les écarts théoriques de fermeture présentent une certaine marge d'incertitude et enfin que la moyenne aller-retour n'est pas exempte partout d'erreurs systématiques. Depuis 1943, avec une interruption de 1954 à 1959, le Service topographique fédéral a répété environ le 50 % du réseau mesuré entre 1903 et 1927. On a pu ainsi, même si les nouvelles lignes ne forment pas des polygones fermés, comparer les anciennes et les nouvelles altitudes [2]. Les nouvelles mesures ont été effectuées avec des mires Wild, en invar, graduées en centimètres. Les niveaux utilisés sont du type Wild NIII et Wild NA2. La précision des mesures, déduite des discordances aller-retour, est sensiblement la même que celle de l'ancien nivellement. Les principaux obstacles à des mesures de haute précision sont, aujourd'hui, le revêtement tendre des routes le long desquelles passe le cheminement (et qu'il n'est pas toujours possible d'éviter si l'on veut reprendre les anciens repères) et le trafic motorisé très dense. Durant ces dernières années, le Service topographique fédéral a consacré les campagnes de nivellement à la répétition de la ligne Bâle–Olten–Lucerne–St-Gothard–Bellinzona–Chiasso. Le but de ces mesures était d'abord obtenir des altitudes homogènes des nouveaux repères fédéraux le long de cette ligne, puis, si possible, d'obtenir des indications sur les mouvements récents de l'écorce terrestre, en particulier dans les Alpes.

3. Description de la ligne de nivellement Bâle–Chiasso

3.1 Description géographique

La ligne de nivellement Bâle–St-Gothard–Chiasso traverse les trois principales régions naturelles de la Suisse, soit le Jura, la Région molassique (nommée parfois à tort Plateau suisse) et les Alpes. Elle suit, en général, les routes principales et le cheminement présente une longueur de 330 km. De Bâle (alt. 270 m), elle se dirige d'abord vers l'est en suivant la vallée de l'Ergolz; puis à Sissach, elle s'incurve vers le sud, coupe les crêtes sud du Jura au col du Hauenstein (691 m) et redescend sur Olten (390 m), situé, de profil, sur la bordure nord de la Région molassique.

La ligne traverse ensuite cette dernière en s'élevant au maximum à 562 m, atteint Lucerne (445 m), passe au nord puis à l'est du lac des Quatre-Cantons, atteint Amsteg (520 m) situé au pied nord de la rampe conduisant au col du St-Gothard.

Elle rejoint le col par une pente moyenne de 4,5% (maximum 7%) sur 35 km. Du col (2108 m) elle redescend sur Airolo (1160 m) par l'ancienne route du val Tremola, suit la vallée de la Léventine, passe à Biasca (300 m), puis à Bellinzona (230 m) et atteint Lugano (270 m) après s'être élevée à 554 m au col du Monte Ceneri. Elle traverse ensuite le lac de Lugano sur la digue de Melide et aboutit enfin à Chiasso (230 m), sur la frontière italo-suisse.

3.2 Tectonique

Les grandes unités tectoniques traversées par la ligne de nivellement Bâle–Chiasso sont décrites ci-après (voir aussi fig. 2).

Partant de Bâle, situé sur la partie S d'un bassin de subsidence tertiaire (fossé rhénan), on franchit le Jura et ses

assises secondaires pour aborder ensuite un nouveau bassin tertiaire, aux couches subhorizontales, le Bassin molassique suisse. La partie méridionale de celui-ci, aux structures relevées en écaillles chevauchantes, parallèles au front des Alpes, est chevauchée à son tour par les grandes nappes helvétiques. Ces nappes représentent la couverture sédimentaire secondaire des massifs hercyniens, écoulée vers l'extérieur lors de l'orogénèse alpine. Les massifs centraux hercyniens (Aar et Gothard) sont formés de granites et de schistes cristallins; ils sont séparés par un synclinal sédimentaire pincé, la zone d'Urseren.

Dès Airolo, pied sud du St-Gothard, on atteint les nappes simplio-tessinoises formées de roches métamorphiques. Une culmination axiale transversale au niveau de la Léventine livre une coupe profonde dans l'empilement subhorizontal de ces nappes. Puis les structures plongent fortement vers le S et disparaissent au niveau de Bellinzona (Zone des racines).

La ligne insubrienne franchie, on aborde les Alpes du Sud, puis leur couverture sédimentaire. Enfin, de profil, Chiasso est situé en bordure de la plaine du Pô, bassin tertiaire de subsidence probablement encore actif.

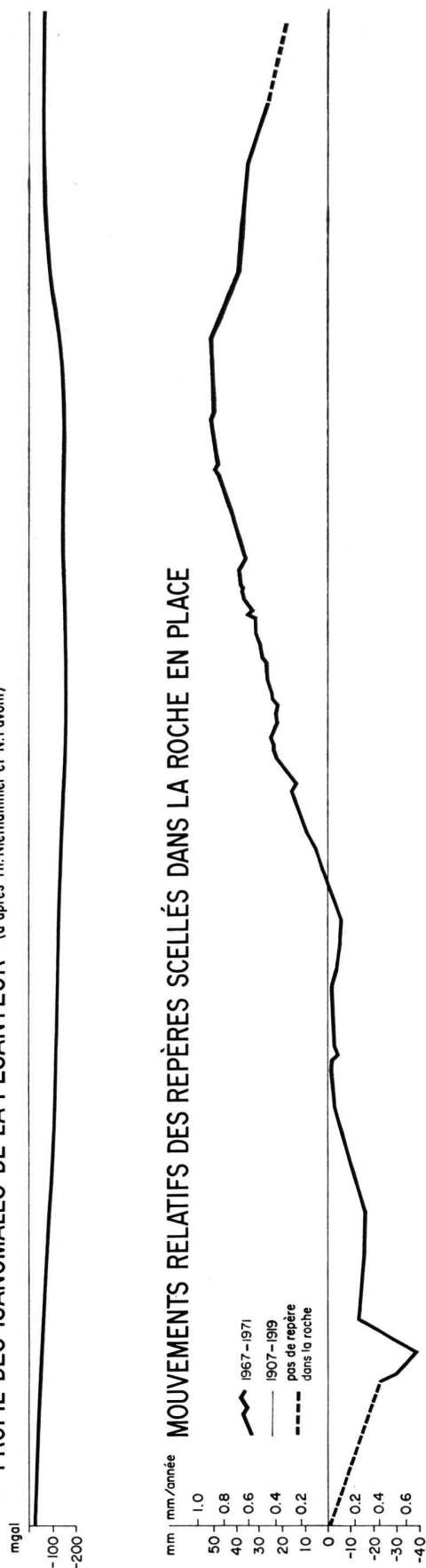
4. Situation géologique des repères

Bâle, point de référence pour la comparaison des altitudes des anciens et des nouveaux nivellements est bâtie sur la «basse terrasse» (Niederterrasse), formation alluvionnaire quaternaire reposant sur les niveaux marneux et gréseux de l'oligocène moyen du Fossé rhénan.

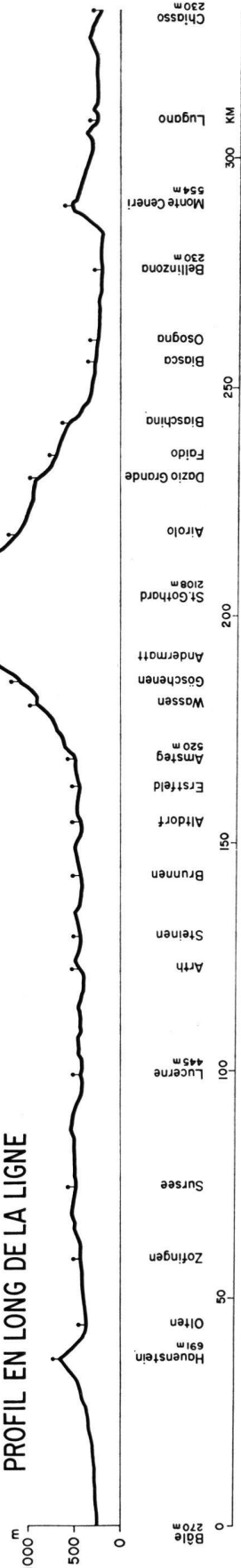
La «flexure rhénane» (Rheintalflexur) franchie, et jusqu'au pied nord du Hauenstein, la ligne de nivellement traverse les entablements calcaires mésozoïques du Jura tabulaire, accidentés de nombreuses failles d'orientation SW-NE (système rhénan). Aucun repère n'est, malheureusement, scellé dans ces entablements calcaires.

Ce n'est qu'au km 32, à l'altitude de 494 m que l'on rencontre les premiers repères scellés dans le rocher calcaire. On se trouve alors à la limite entre le Jura tabulaire et le Jura plissé, faisceau de plis déversés et charriés vers le N dans la région du Hauenstein. Les couches jurassiques s'ennoient ensuite sous la molasse, au S d'Olten (chaîne du Born), marquant ainsi la limite S de l'unité tectonique jurassienne. Passé cette limite, la ligne a pour support les formations tertiaires du bassin molassique suisse, recouvertes par endroits de placages morainiques datant de la dernière glaciation (Würm). Peu avant Lucerne et à Lucerne même, les repères sont scellés dans la molasse plissée et charriée en écaillles au front des nappes helvétiques. Au pied N du Rigi, au bord du lac de Zoug, ils sont scellés dans les poudingues calcaires, d'âge tertiaire également. La ligne traverse ensuite l'amoncellement dû à l'éboulement de 1806 dans la région de Goldau. A Steinen (km 130), elle quitte définitivement la région molassique pour entrer dans la zone des nappes helvétiques calcaires (Drusbergdecke, Axendecke). Puis on aborde la couverture sédimentaire plissée du massif de l'Aar, au S d'Altdorf (calcaires et dolomites). Erstfeld se trouve déjà dans le cristallin de ce massif (Erstfeldergneiss). Puis on traverse, après Amsteg, situé au pied nord de la rampe du St-Gothard, des écaillles de granites et de gneiss divers. La ligne quitte le massif de l'Aar à Andermatt, traverse la zone

PROFIL DES ISANOMALES DE LA PESANTEUR (d'après Th. Niethammer et N. Pavoni)



PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



COUPE TECTONIQUE TRÈS SCHEMATISEE (adaptée d'après le guide géologique de la suisse, 1934)

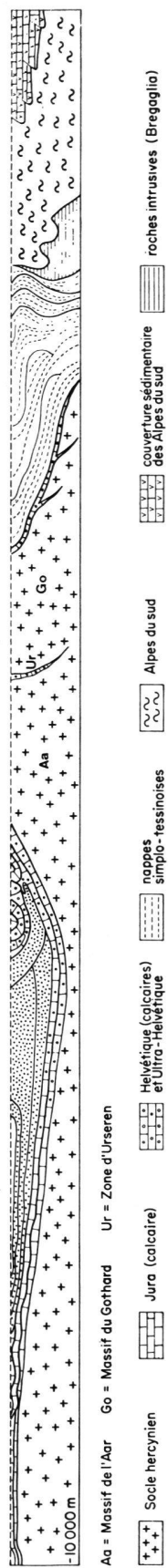


Abb. 2

sédimentaire d'Urseren, et atteint le massif du St-Gothard. C'est dans les gneiss et les granites de ce massif que sont scellés tous les repères utilisés pour la comparaison des altitudes des deux nivellements dans cette région.

Puis le cheminement suit la vallée de la Léventine creusée au travers du cristallin des nappes simplio-tessinoises (gneiss, schistes cristallins et autres roches métamorphiques). En franchissant deux paliers (la gorge de Daziogrande, verrou gneissique, puis la Biaschina, obstruction de la vallée par un éboulement), la ligne atteint l'altitude de 400 m. Les repères dans la roche en place se font plus rares et ce n'est que 5 km après Biasca que l'on en retrouve un groupe dans les gneiss du flanc E de la vallée. On aborde alors la bordure méridionale des nappes simplio-tessinoises, dite zone des racines. A Bellinzone, les repères sont scellés au pied de la colline rocheuse (amphibolites) portant le Château d'Uri. De Bellinzone, la ligne se dirige vers le SW en traversant la ligne insubrienne et s'élève ensuite jusqu'au col du Monte Ceneri (554 m).

Dès Lugano, la ligne a pour support la couverture sédimentaire des Alpes du Sud, composée de formations allant du Permien au Tertiaire, voire quaternaire (amas morainiques). Les derniers repères scellés dans la roche en place sont situés à 4 km environ au sud de Lugano. Ensuite jusqu'à Chiasso, tous les repères sont scellés à des bâtiments ou à des ouvrages d'art.

5. Les mesures de Bâle à Chiasso

5.1 Les anciennes mesures

Les mesures du tronçon Bâle–Olten–Lucerne–Goldau, soit toute la partie de la ligne située au nord des Alpes, datent de 1907, 1909 et 1911. Cette partie de la ligne, qui présente d'ailleurs les plus petites différences d'altitude, a été mesurée avec des mires à compensation et des mires à réversion. Les différences d'altitude atteignent au maximum 420 m pour le tronçon Bâle–Hauenstein et au maximum 162 m pour celui de Olten à Goldau. L'incertitude de la longueur des mires qui pourrait subsister malgré les contrôles ne devrait pas jouer un rôle important.

Le reste de la ligne, qui comprend la traversée des Alpes par le col du St-Gothard, fut mesuré avec des mires en invar en 1918 et 1919.

5.2 Les nouvelles mesures

Les nouvelles mesures ont été effectuées entre 1967 et 1971. Entre Bâle et Chiasso, 430 repères anciens ont été repris dans les nouvelles mesures. Le 27% de ces repères est scellé dans la roche en place. Mais la répartition n'est pas régulière: 7% sont scellés dans la roche entre Bâle et Brunnen, 19% entre Brunnen et Bellinzona et seulement 1% entre Bellinzona et Chiasso.

La précision des nouvelles mesures est difficile à évaluer car les lignes répétées ne forment pas un nombre suffisant de mailles dont les écarts de fermeture serviraient au calcul de l'erreur moyenne quadratique du réseau. Il faut se contenter d'un examen des discordances entre nivellements aller et retour. Les erreurs quadratiques moyennes calculées à partir des discordances aller–retour varient entre 0,3 et 0,5 mm/km. Cette façon de calculer la précision du nivellement donne les mêmes valeurs pour les anciennes mesures de 1907 à 1919.

6. Comparaison des altitudes 1967 à 1971 à celles de 1907 à 1919

6.1 Méthode

La comparaison des nouvelles aux anciennes altitudes observées ne porte que sur les repères scellés dans la roche en place. L'horizon de référence est Bâle pour les deux nivellements. Les différences Δ = altitude observée 1967 à 1971 moins altitude observée 1907 à 1919 ont été reportées graphiquement dans les figures 2 et 3. Toutefois la comparaison n'est pas tout à fait rigoureuse car nous avons négligé les facteurs suivants:

- Influence luni-solaire sur la verticale.
- Influence de la réfraction sur les visées avant et arrière.
- Mouvement des repères utilisés comme point d'arrêt entre chaque campagne.

L'influence luni-solaire sur la verticale peut être calculée rigoureusement, mais le recueil des données nécessaires au calcul exige un travail assez considérable. Sur la différence entre deux nivellements effectués sur un même parcours à des moments différents, cette influence ne devrait pas être très importante. Mais il est prévu, dans une phase ultérieure, d'en calculer la grandeur.

L'erreur différentielle de réfraction joue un rôle d'autant plus grand que la pente du cheminement est plus accusée. Mais pour les anciens nivellements, nous ne possédons aucune indication permettant un calcul même approximatif de cette influence. Lors du nivellement du col du St-Gothard en 1970, nous avons tenté, à partir d'observations météorologiques simples (vitesse du vent, couverture nuageuse, insolation, heure), d'estimer la grandeur de l'influence de la réfraction sur les nivellements aller et retour, d'après la méthode préconisée par N. Wunderlin dans [8]. Les recherches ne sont pas encore terminées.

Mais il ne faut pas oublier que les nivellements aller et retour d'un même tronçon se font à des jours différents et à des heures différentes. On peut penser que la moyenne de ces nivellements composants est, dans une large mesure, exempte d'erreurs dues à la réfraction.

Pour les anciennes mesures, la période entre deux campagnes de nivellement le long de la ligne Bâle–Olten–Lucerne–Goldau ne dépasse pas deux ans. En plus, le rattachement se fait à un groupe de trois à quatre repères. La période la plus longue entre deux campagnes atteint neuf ans à Goldau. Là, l'influence du mouvement des repères atteint environ 3 mm. Pour les mesures de 1967 à 1970, les repères d'arrêt ont toujours été choisis parmi les groupes scellés dans la roche en place. Les périodes entre deux campagnes sont toujours plus courtes qu'une année. Les mouvements des repères d'arrêt seront introduits lorsque les nouvelles lignes formeront un réseau pouvant être compensé.

6.2 Résultats

La figure 2, deuxième graphique depuis le haut, nous montre quels sont les résultats obtenus. Entre Bâle et le pied nord du Hauenstein il n'y a pas de repères dans la roche en place. C'est pourquoi la ligne des mouvements est interrompue. Au Hauenstein même, les repères dans la roche accusent un affaissement par rapport à Bâle et à Olten. Cet affaissement atteint 3,7 cm et les deux nivellements confrontés datent de

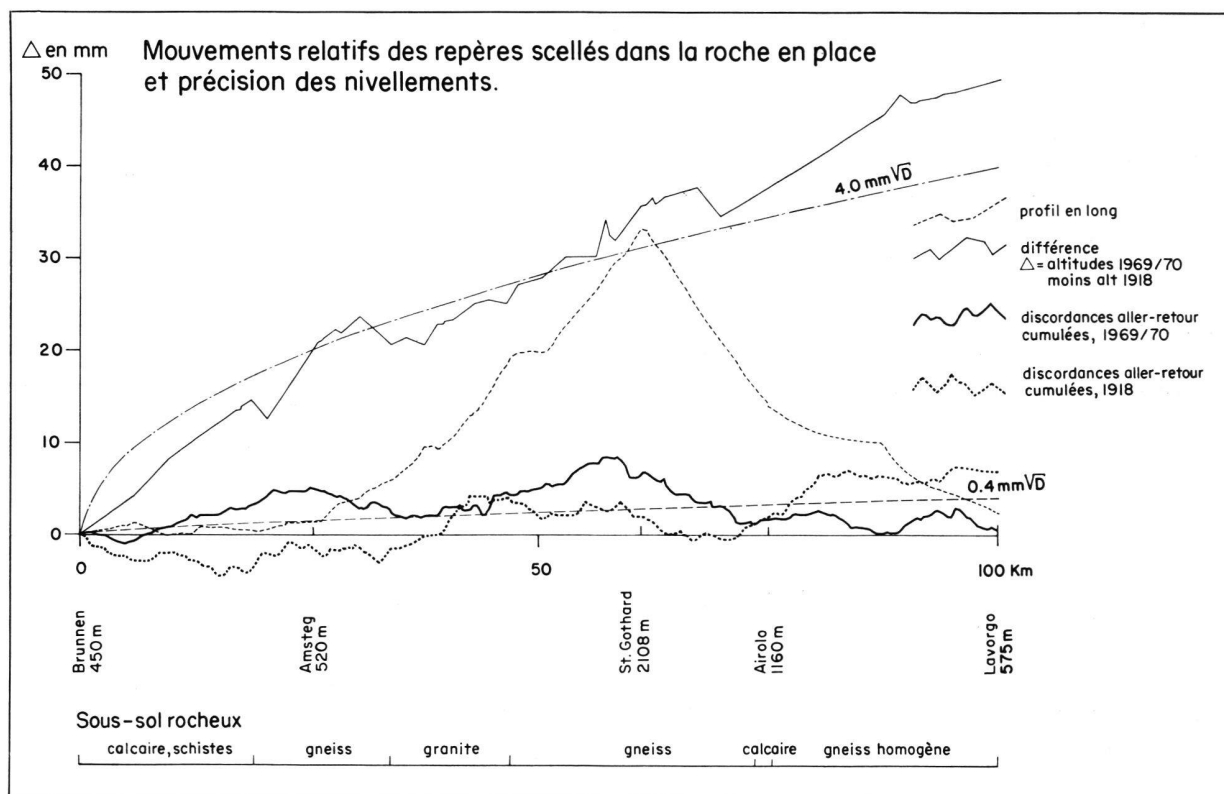


Abb. 3

1911 et 1967/1968. Entre Olten et Lucerne, le graphique indique une grande stabilité des repères scellés dans la molasse. Cette stabilité est maintenue jusqu'aux environs de Brunnen. Dès que la ligne pénètre sur le noyau cristallin (massif de l'Aar et massif du Gothard) l'indice d'un soulèvement est très visible. La surrection maximum atteint environ 5 cm dans les nappes simplio-tessinoises. Elle atteint encore 2,5 cm à 4 km au sud de Lugano, où l'on trouve le dernier repère de la ligne dans la roche en place. Les derniers repères de la ligne dont les altitudes peuvent être comparées se trouvent peu avant Chiasso mais ne sont plus scellés dans la roche. A Chiasso même, un seul repère de l'ancien nivellement a pu être repris dans le nouveau et il accuse un affaissement de 20 cm.

Le résultat le plus intéressant se trouve sur le tronçon de 100 km environ entre Brunnen et la zone de surrection maximum dans le Haut-Tessin.

On pourrait alléguer que les différences entre les nivellements anciens et les nouveaux proviennent d'autres causes que des mouvements du sol : par exemple, différence entre l'étalonnage des mires, ou imprécision et erreurs systématiques des nivellements. Nous avons essayé dans la figure 3 de mettre en relation les mouvements des repères et la précision des nivellements :

- Les graphiques des discordances cumulées aller-retour des nivellements de 1969/1970 et ceux de 1918 ne présentent pas de systématisme accusé. En particulier, il ne semble pas y avoir une corrélation entre la forme des courbes de ces graphiques et le profil en long de la ligne. Cela signifie que les mires utilisées par l'équipe ayant fait l'aller et les mires de l'équipe ayant fait le retour ont la même échelle. Les erreurs kilométriques moyennes calculées à partir des discordances atteignent $\pm 0,34$ mm

pour le nivellement de 1918 et $\pm 0,27$ mm pour celui de 1969/1970.

- Les différences entre les deux nivellements, par rapport à un point choisi au nord des Alpes, croissent d'une façon régulière du nord au sud. Si les mires utilisées en 1918 et en 1969/70 présentaient des erreurs d'étalonnage, le graphique des différences entre les deux nivellements présenterait une discontinuité au point le plus haut du cheminement. Rappelons que le point de référence est situé à 450 m d'altitude, le point le plus haut à 2108 m et le point au sud à 575 m.
- Les différences entre les anciens et les nouveaux nivellements sont de l'ordre de grandeur de $4,0 \text{ mm } \sqrt{D}$ (ou D est la distance en kilomètres). Mais l'erreur quadratique moyenne de cette différence, calculée à partir des discordances aller-retour est de l'ordre de grandeur de $0,4 \text{ mm } \sqrt{D}$.

Même si l'on trouve trop favorable l'erreur quadratique moyenne (e.q.m.) calculée à partir des discordances aller-retour (dont il faudrait encore contrôler la distribution qui n'est, en général, pas gaussienne) et que l'on prenne l'e.q.m. telle qu'elle résulte de la compensation de 1944, soit 1,4 mm/km, le soulèvement maximum de 5 cm est encore 2,5 fois plus grand que son e.q.m.

D'autres raisons renforcent encore nos présomptions d'un soulèvement actuel des Alpes. Ce sont les résultats obtenus le long des lignes du nivellement fédéral Rorschach-Sargans et Vevey-Martigny-Brigue, puis les résultats obtenus à l'étranger.

Sur les deux lignes du nivellement fédéral sus-mentionnées, le même phénomène a lieu que sur la ligne Brunnen-Amsteg-St-Gothard : plus on s'approche des Alpes, plus gran-

des sont les différences positives entre les nouveaux et les anciens nivellements (voir également [2]).

7. Etat actuel des recherches sur les mouvements verticaux des Alpes dans les pays limitrophes

Les résultats cités ci-après ont été exposés au cours d'une réunion en 1972 à Berne, à laquelle ont pris part des géodésiens allemands (Bavière), autrichiens, français, italiens et suisses. Un compte rendu de cette réunion a été publié par M. J.J. Levallois, directeur du Bureau central de l'Association internationale de géodésie, dans le «Bulletin géodésique» N° 105 (1^{er} septembre 1972).

Travaux autrichiens: Des comparaisons de nivellements de différentes époques ont été faites sur la ligne Lend (vallée de la Salzach)–Tunnel du Tauern–Spittal a.d.Drau. Une partie des résultats a déjà été publiée par le Dr Senftl dans [6]. La comparaison porte sur des nivellements de 1906/1910, 1949 et 1969/1970. Un soulèvement relatif maximum de l'ordre de 70 mm en 60 ans a été mis ainsi en évidence. Ce maximum a lieu dans le noyau cristallin du massif des Hohen Tauern.

Travaux français: Le réseau de nivellement français a été repris complètement entre 1962 et 1969. Dans la région alpine, les nouveaux nivellements de 1968 et 1969 ont pu être confrontés à l'ancien nivellement général de la France de 1890. Trois profils ont été plus particulièrement étudiés:

- Bourg-Nantua (Ain)–La Roche-sur-Foron (Haute-Savoie)
- Grenoble (Isère)–Tunnel-de-Fréjus (Savoie)
- La Beaumette (Commune d'Oze) et la Fontaine-de-Crêtet (Commune de Mont-Genèvre)

Le premier de ces profils, situé à peu près sur le parallèle de Genève, traverse uniquement des terrains marquant l'extrémité sud de la chaîne du Jura. Aucun mouvement d'allure systématique n'y est décelable, mis à part des affaissements de caractère tout à fait local.

Le profil Grenoble–Tunnel-de-Fréjus présente par contre des discordances entre les nouvelles et les anciennes mesures qui dépassent les tolérances les plus indulgentes. La discordance maximum coïncide avec la traversée du massif cristallin de Belledune Tarentaise.

Le troisième profil contourne le massif cristallin de l'Oisans par le sud. La ligne de nivellement n'est pas posée directement sur les roches cristallines. Mais des discordances systématiques apparaissent également, comme si les terrains jurassiques et le Flysch de la région d'Embrun subissaient une poussée par en-dessous. Ce soulèvement a bien lieu dans le prolongement d'une bande générale joignant le massif du Mercantour au massif du Pelvoux.

L'ordre de grandeur des surrections constatées atteint environ 1,5 mm par année.

Travaux italiens: Des comparaisons d'altitudes entre les nivellements de 1880 à 1890 et 1948 à 1956 ont été faites en Italie du Nord. Bien que les anciennes altitudes soient calculées dans un système orthométrique et que les altitudes récentes aient été obtenues en répartissant l'écart de fermeture des polygones, la comparaison montre une tendance très marquée d'une surrection des régions alpines. Un ma-

ximum est atteint dans la région de Reschen-Scheideck, puis les différences diminuent plus on approche de Udine et Trieste où une tendance à des affaissements se manifeste.

Des comparaisons de mesures brutes seront faites dans les prochains temps, de même façon que dans les pays voisins.

Travaux en République fédérale allemande (Bavière): Le premier réseau homogène de nivellement, appelé «Bayerisches Präzisionsnivellement» fut terminé en 1893. De 1906 à 1916, d'importants travaux de réfection furent entrepris, car de nombreux repères du premier réseau avaient disparu. De nouvelles mesures furent également effectuées. Des écarts jusqu'à 9 cm ont été constatés entre les anciennes et les nouvelles altitudes dans les Préalpes bavaoises. Ces écarts ont été interprétés géologiquement de façon détaillée et indiquent des mouvements de l'écorce terrestre.

Le réseau de nivellement actuel de premier ordre, appelé «Neues bayerisches Haupthöhennetz», a été mesuré principalement entre 1948 et 1958. Des comparaisons d'altitudes ont été effectuées par M.R. Wernthaler, et les résultats ont été publiés par la «Deutsche Geodätische Kommission». Il semble que des mouvements encore actifs n'existent qu'en deux régions; un affaissement de l'ordre de grandeur du demi-millimètre par année dans la région de Regensburg–Passau et une surrection du même ordre de grandeur en Souabe occidentale.

Des comparaisons d'altitudes manquent dans les Alpes bavaoises. Si une surrection des Alpes a lieu actuellement encore, elle devrait se manifester en des profils nord-sud touchant la Bavière et l'Autriche. En plus, la ligne de séparation entre le plateau de Souabe et de Bavière et le massif alpin serait coupée perpendiculairement par ces profils. Le réseau conçu par M. Wernthaler se prête bien à de telles études: six lignes principales suivent la direction désirée et six autres ne présentent que de petites divergences par rapport à cette direction. Ces profils devraient être encadrés par une ligne de référence, par exemple la ligne Lindau–Garmisch–Berchtesgaden.

En résumé, la comparaison de nivellements nouveaux à des nivellements anciens dans les Alpes montre des discordances systématiques dès que ces nivellements reposent sur un noyau cristallin (fig. 4). Tous les travaux ont les caractéristiques communes suivantes:

- Réitération des nivellements à des intervalles de 50 à 80 ans.
- Tendance au soulèvement des massifs cristallins.
- Ordres de grandeur des vitesses de surrection de 1 mm par année en Autriche et en Suisse, et de 1,5 mm par année en France.
- Indépendance des profils en long des lignes de nivellement et des profils des mouvements des repères.

8. Les résultats des méthodes géologiques

Les vitesses de surrection peuvent être déterminées par estimation de l'ablation ou par l'étude des données de la géochronologie et du métamorphisme.

Malgré leur importance, des montagnes telles que les Alpes seraient vite (à l'échelle géologique) réduites à peu de chose si l'érosion seule agissait. Mais le relief actuel semblant se

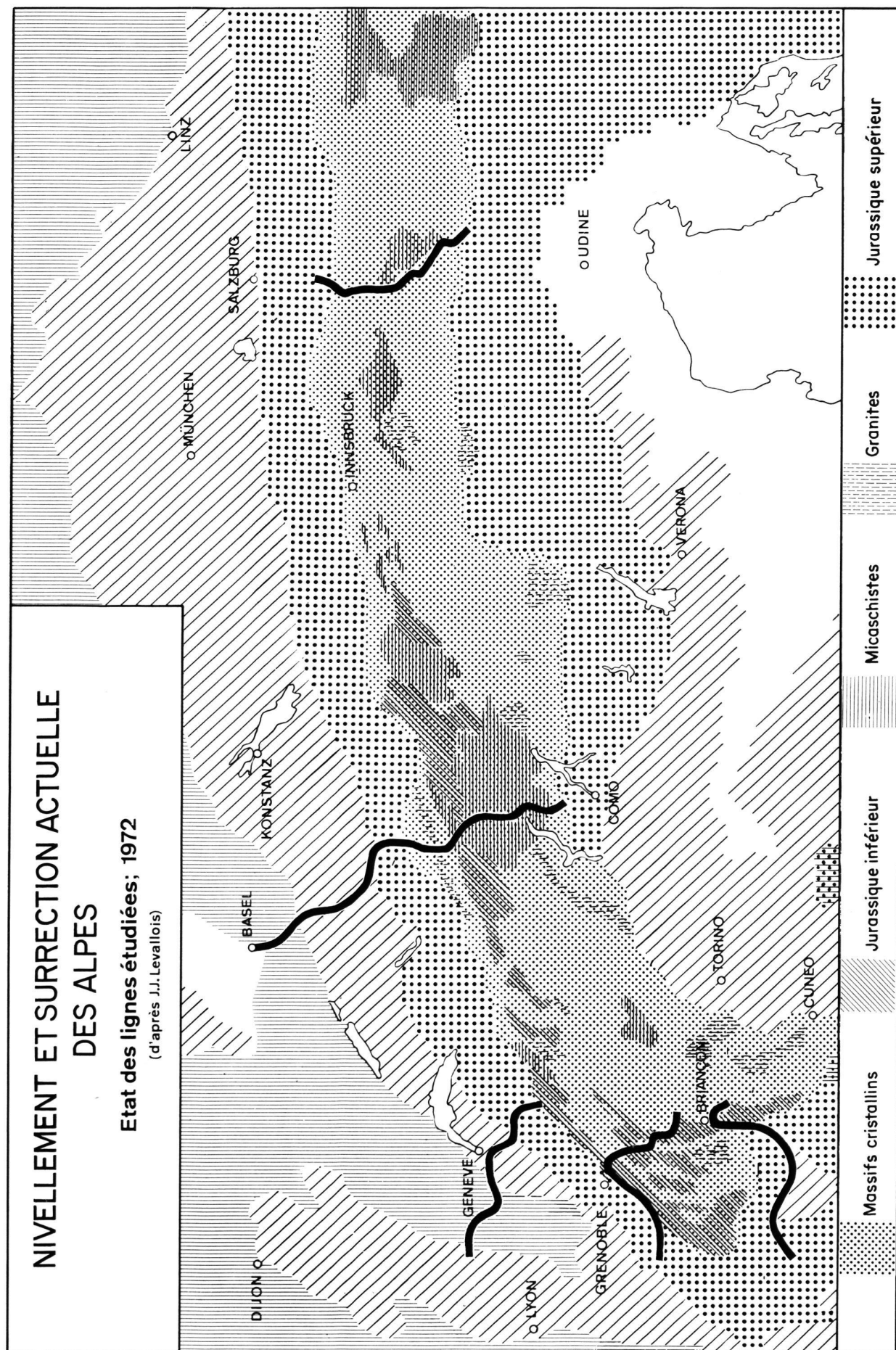


Abb. 4

maintenir, il faut en conclure que les effets de l'érosion sont compensés par une surrection à peu près équivalente.

Sydney P. Clark jr. et E. Jäger ont déterminé les limites de la vitesse de dénudation, qu'ils estiment être égale à peu près à la vitesse de surrection, à l'aide de données géothermiques et géochronologiques [1]. Ces auteurs se basent en particulier sur l'âge et la profondeur de formation des Biotites. Connaissant le flux géothermique mesuré dans quelques tunnels alpins (Gothard, Simplon, Tauern), la conductivité des roches, etc., les auteurs trouvent avec leur modèle des valeurs de surrection atteignant 0,4 à 1,1 mm/année. Ils citent également les chiffres obtenus par d'autres méthodes :

Charge des sédiments des cours d'eau :

Corbel 1959	0,21 à 0,70 mm/année
Wegmann 1957	0,07 à 0,91 mm/année
Jäckli	0,58 mm/année

Volume des sédiments du Rhône d'après

Menard, Smith et Pratt 1965	0,4 mm/année
-----------------------------	--------------

Condition de pression et de température du métamorphisme :

Zwart, 1957	1 mm/année
-------------	------------

Différence d'âge des muscovites et des biotites

1 mm/année

Modèle thermique

Gothard et Tauern	0,4 à 0,7 mm/année
Simplon	0,4 à 1,1 mm/année

Bien qu'il ne soit pas prouvé que la vitesse de surrection des Alpes ait été uniforme, la concordance des chiffres ci-dessus avec les résultats obtenus par la méthode directe du nivellement est étonnamment bonne.

9. Travaux futurs et leur coordination

Les résultats trouvés jusqu'à maintenant dans les Alpes méritent qu'une recherche approfondie soit entreprise. C'est pourquoi un groupe de travail réunissant des géodésiens allemands (Bavière), autrichiens, français, italiens et suisses s'est constitué. Le but est d'établir un réseau de nivellement aussi homogène que possible sur tout l'arc alpin, de la Méditerranée à Vienne. L'époque est particulièrement opportune, car tous les pays intéressés viennent de reprendre leurs réseaux de nivellement. Il s'agit donc de faire un choix parmi les lignes existantes et de procéder à des jonctions nouvelles dans les 5 à 7 années à venir. Ce réseau comprendra en principe une ligne au sud des Alpes de Gênes à Vienne, une ligne au nord des Alpes et des traverses. Il pourrait être mesuré à nouveau dans 3 à 4 décennies. On obtiendrait ainsi des indications plus précieuses sur les mouvements des Alpes que ne le font les recherches sur des lignes isolées. On a renoncé à effectuer des mesures de très haute précision, répétées dans des intervalles de temps relativement courts, et préféré utiliser les nivellements nationaux dont la précision relative reste suffisante pour des études à long terme. Les mesures très précises et par conséquent fort coûteuses doivent être réservées à des recherches de caractère local.

Les résultats des recherches sur d'autres lignes de nivellements dans les Alpes seront rassemblés durant les prochaines années par le Service topographique fédéral. Ils seront présentés périodiquement à l'occasion des congrès de la commission internationale «Mouvements de l'écorce terrestre» et dans le cadre des assemblées de l'UGGI. Ces recherches, nous l'espérons, favoriseront la collaboration internationale entre géodésiens et un travail fructueux entre géodésiens, géologues et géophysiciens.

Bibliographie

- [1] Sydney P. Clark jr. and E. Jäger: Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. American Journal of Science, vol. 267, décembre 1969.
- [2] Commission géodésique suisse et Service topographique fédéral: Rapport sur les travaux géodésiques exécutés de 1967 à 1970, présenté à la XV^e Assemblée générale de l'UGGI, Moscou, août 1971.
- [3] F. Jeanrichard: Contribution à l'étude du mouvement vertical des Alpes. Bolletino di Geodesia e Scienze affini, N° 1, janvier/février 1972.
- [4] J. J. Levallois: Sur la mise en évidence d'un mouvement de surrection des massifs cristallins alpins. Bulletin géodésique, N° 105, 1^{er} septembre 1972.

- [5] M. Schürer: Die Reduktion und Ausgleichung des schweizerischen Landesnivellements. Annexe au procès-verbal de la 88^e séance de la Commission géodésique suisse, 1944.
- [6] E. Senftl: Ein Beitrag zum Nachweis rezenter Bewegungen in den Hohen Tauern. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 2, April 1970.
- [7] Société géologique de la Suisse: Guide géologique de la Suisse 1934.
- [8] N. Wunderlin: Verwendung rechnerisch bestimmter Refraktionswinkel in einem Höhenwinkelnetz. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 11, November 1970.