Bundesamt für Umweltschutz
Office fédéral de la protection de l'environnement
Ufficio federale per la protezione dell'ambiente

Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 3

Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire en Suisse occidentale, avec quelques commentaires

Bern, 1988

Bundesamt für Umweltschutz
Office fédéral de la protection de l'environnement
Ufficio federale per la protezione dell'ambiente

Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 3

Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire en Suisse occidentale, avec quelques commentaires[1)]

André Pugin[2)]

[1)] Recherche subventionnée par la Commission Géologique Suisse
[2)] Département de Géologie et de Paléontologie, rue des Maraîchers 13, 1211 Genève 4

Bern, 1988

Rapp. géol. Serv. hydrol. et géol. natl. 3 (1987)
(avec 1 planche)

Editeur et diffusion:
Service hydrologique et géologique national, CH-3003 Berne
© 1987

1.88 400 A43011

Préface

Le travail présenté dans cette publication a été entrepris à l'initiative de la Commission Géologique Suisse qui en a assuré le financement. Il fait suite à une étude similaire appliquée à la Suisse orientale et apporte ainsi un complément de valeur aux travaux du Professeur W. Wildi à l'est du Napf. La pièce maîtresse de ce travail est une carte polychrome au 1:250'000 présentant la base des sédiments du Quaternaire. Elle est le fruit — en particulier — de la compilation et de l'interprétation d'une multitude de données géophysiques et de sondages. Nous nous associons à l'auteur pour remercier chaleureusement les géologues et bureaux privés ainsi que les organismes d'Etat qui lui ont généreusement ouvert leurs archives et donné accès à des sources d'informations inédites.

En raison du vaste champ d'intérêt que suscitera cette étude — pour l'hydrogéologie du pays et la géologie du Quaternaire en particulier — le Service hydrologique et géologique national a accepté d'en assurer la publication. Proposée à l'impression dans les "Matériaux pour la Carte Géologique de la Suisse" il a été décidé finalement de la publier dans la nouvelle série des "Rapports géologiques", mieux adaptée pour des notes d'intérêt général mais de volume réduit.

L'auteur est seul responsable du contenu du texte et de la carte.

Service hydrologique
et géologique national
Le chef

Dr Ch. Emmenegger

Vorwort

Die dieser Publikation zugrundeliegende Arbeit wurde auf Veranlassung der Schweizerischen Geologischen Kommission, die auch deren Finanzierung sicherte, ausgeführt. Sie schliesst an eine analoge, von Prof. W. Wildi in der Ostschweiz durchgeführte Studie an und bietet somit eine wertvolle Ergänzung zu dessen Arbeiten östlich des Napf-Gebietes. Das Kernstück dieser Arbeit bildet eine mehrfarbige Karte im Massstab 1:250'000, auf welcher die Basis der quartären Sedimente höhenmässig dargestellt ist. Zu diesem Zwecke musste vor allem eine Vielzahl an geophysikalischen Daten und Bohrungen kompiliert und interpretiert werden. Zusammen mit dem Autor möchten wir jenen Geologen und privaten Büros sowie staatlichen Dienststellen, welche ihm in grosszügiger Weise ihre Archive geöffnet und Zugang zu unpublizierten Informationen gewährt haben, unseren verbindlichsten Dank aussprechen.

Im Hinblick auf das grosse Interesse, welches diese Studie insbesondere für die Hydrogeologie unseres Landes und die Quartärgeologie hervorrufen wird, hat sich die Landeshydrologie und -geologie bereit erklärt, die Publikation dieser Arbeit zu übernehmen. Ursprünglich für den Druck in den "Beiträgen zur Geologischen Karte der Schweiz" vorgesehen, wurde schliess-

lich beschlossen, sie in der neuen Reihe "Geologische Berichte", die für Kurzartikel von allgemeinem Interesse geeigneter ist, herauszugeben.

Für den Inhalt des Textes und der Karte ist der Autor allein verantwortlich.

Landeshydrologie und -geologie
Der Chef

Dr. Ch. Emmenegger

Prefazione

Il lavoro presentato in questa pubblicazione, è stato intrapreso dietro iniziativa della Commissione Geologica Svizzera, la quale ne ha assicurato il finanziamento. Esso fa seguito ad uno studio analogo applicato alla Svizzera orientale, apportando così un complemento di valore ai lavori del professore W. Wildi all'est del Napf. La parte principale di questo lavoro è la carta policroma al 1:250'000 contenente la base dei sedimenti Quaternari. Essa è il frutto, in modo particolare, della compilazione e dell' interpretazione di molteplici dati geofisici e di sondaggi. Ci associamo all'autore per ringraziare calorosamente i geologi e gli uffici privati, come pure gli enti dello stato, che gli hanno generosamente aperto i propri archivi e facilitato l'accesso a fonti d'informazione inedite.

Considerando l'ampio interesse che susciterà questo studio – particolarmente per l'idrogeologia del Paese e la geologia del Quaternario – il Servizio idrologico e geologico nazionale ha accettato di assumere l' incarico della pubblicazione. Proposto in un primo tempo di comunicarlo nei "Materiali per la Carta Geologica della Svizzera", è stato finalmente deciso di pubblicarlo nella nuova serie dei "Rapporti geologici", piú adatto per articoli d'interesse generale, ma di volume ridotto.

L'autore è il solo responsabile del contenuto del testo e della carta.

Servizio idrologico
e geologico nazionale
Il capo

Dott. Ch. Emmenegger

Résumé

Une carte des isohypses du relief du fond rocheux dans les bassins quaternaires est présentée pour la Suisse occidentale. Comme dans d'autres régions périalpines, les vallées glaciaires principales sont surcreusées. Les cotes les plus profondes sont de 400 m au-dessous du niveau de la mer dans la vallée du Rhône et de 200 m au-dessous du niveau de la mer dans la vallée de l'Aar (lac de Thoune); le fond rocheux du lac de Neuchâtel est situé légèrement au-dessous de la cote 0 m. Ces surcreusements sont essentiellement dus à l'érosion glaciaire le long de zones de fracturation ou de limites stratigraphiques importantes entre roches de forte et de faible fracturation. Une relation entre l'intensité de l'érosion et un flux géothermique élevé est postulée pour certaines vallées.

Abstract

A depth map of the per-Quaternary bed-rock has been established for the western part of Switzerland. Most of the valleys shown on this map are the product of glacial processes, as it is the case in many other peri-Alpine areas. The Rhône valley (400 m below the sea level) and the Aar valley (200 m below the sea level) are the deepest. Bed-rock unter the lake of Neuchâtel is slightly below sea level. Glacial erosion is generally associated with fractured areas and often follows lithostratigraphic boundaries between slightly and heavily fractured rocks. A relationship between glacial erosion and heat flow may also exist.

1. Introduction

Dans les vallées périalpines, érosion et sédimentation glaciaires au cours du Quaternaire restent des phénomènes mal connus. Il est cependant difficile de remédier à cet état de choses, malgré la masse considérable d'informations géologiques et géophysiques qui existent au sujet du remplissage de ces bassins. L'hétérogénéité des données rapportées dans les expertises inédites et dans les publications, ainsi que la nature lenticulaire des corps sédimentaires, rendent en effet difficiles les corrélations latérales. En outre, comme la datation des dépôts antérieurs à la dernière glaciation est souvent problématique, l'établissement de la succession litho- et chronostratigraphique passe obligatoirement par un inventaire horizontal et vertical complet des corps sédimentaires au sein des bassins.

Dans le cadre d'un projet de recherche concernant les remplissages des bassins glaciaires périalpins au cours du Quaternaire, on présente ici une analyse de la topographie du fond rocheux sous les dépôts glaciaires en Suisse occidentale, faisant suite au travail de WILDI (1984) pour la Suisse orientale. La cote maximale d'investigation de 750 m a été choisie dans le but d'inclure dans cette étude la région de la Sarine au sud du canton de Fribourg. Cette compilation de données d'un grand nombre de sondages géologiques et géophysiques, permettra d'une part une première appréciation des remplissages sédimentaires des vallées, et invitera d'autre part à une discussion concernant les causes et les mécanismes de creusement des vallées.

Cette recherche a été effectuée en un temps très limité; une amélioration de la carte des isohypses (planche hors texte) est de ce fait toujours possible. Dans beaucoup de secteurs, de nouveaux sondages géologiques et des mesures géophysiques préciseront certainement les dimensions et la morphologie des bassins sédimentaires quaternaires.

2. Méthodes employées pour l'établissement de la carte des isohypses

Cartes géologiques

Dans les régions à faible épaisseur de sédiments quaternaires, les isohypses du soubassement ont été extrapolées à partir des cartes géologiques, publiées ou non.

Sondages

Une compilation des données de sondages, mentionnées dans la littérature ou dans des rapports inédits a permis la reconstruction des profondeurs maximales de plusieurs bassins actuellement non-lacustres.

Les documents inédits ont pu être consultés auprès des institutions suivantes: Archives Géologiques Suisses (Berne), Bureau des Autoroutes (Fribourg), Bureau des Autoroutes (Lausanne), Institut de Géophysique (Lausanne), Musée de Géologie (Lausanne), Service cantonal de Géologie (Genève), Service de l'environnement (Fribourg), Wasser- u. Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (Berne) pour les institutions publiques; ABA GEOL (Fribourg), BEB (Hannover) et SEAG (Zürich), Expertisen und Planungen P. Frey (Zug), H.B. de Cérenville (Lausanne), P. Blanc (Le Mont-sur-Lausanne), Colombi-Schmutz-Dorthe (Fribourg), Geotest AG (Berne), Dr. H. Jäckli AG (Zürich), P. Kellerhals & Ch. Haefeli (Berne), J. Norbert (Lausanne) pour les bureaux privés.

Sur la carte, une distinction a été faite entre les forages qui ont touché le fond rocheux et ceux qui n'ont pas atteint la roche, mais qui présentent un intérêt certain.

Gravimétrie

Les isohypses du soubassement des vallées quaternaires profondes ont été établies à l'aide des levés gravimétriques et des anomalies résiduelles publiées par OLIVIER (1983), en procédant de la façon suivante:

- En suivant LÄUPPI (1983): un poids volumique moyen de 2,15 g/cm^3 a été admis pour les sédiments meubles du dernier cycle glaciaire; une anomalie de 1 mgal correspondant à 68 m de sédiments.
- Les profondeurs ainsi obtenues ont été corrigées en fonction des données obtenues par forage.

En appliquant cette méthode, nous avons pu quelquefois sous-estimer une profondeur, faute de connaître l'existence de sédiments compactés tels que silts argileux ou moraines anciennes. Dans les endroits où l'on ne trouve que des sédiments peu compactés, une erreur de 10% sur 100 m d'épaisseur a été constatée lors de forages récents, ce qui constitue néanmoins un résultat acceptable.

Les résultats de MARCHANT & BESSON (1986), basés sur la gravimétrie, ont été repris sans modification pour la région de St-Maurice.

Sismique

De nombreux profils sismiques ont été effectués dans le passé: dans le Léman (VERNET et al. 1974), le lac de Neuchâtel (BETRIX, en prép.) et le lac de Thoune (MATTER et al. 1971).

Dans la région étudiée, FINKH et al. (1984) ont effectué des profils de sismique réflexion et réfraction dans les lacs périalpins, dont le Léman et les lacs de Neuchâtel, de Bienne et de Thoune. Ce travail a permis de caler et de recalculer les isohypses à partir des isobathes de l'interface entre les sédiments meubles et le substratum rocheux (moyennes pondérées). A la suite de ces corrections, les isohypses obtenues par sismique réflexion et par gravimétrie ont pu être corrélées. La qualité de cette corrélation indique que les méthodes de géophysique employées donnent une bonne approximation du niveau du fond rocheux.

Des analyses de sismique sur terre ferme sont publiées dans les régions suivantes: le Bödeli (Interlaken) par BODMER et al. (1973) et KELLERHALS & HAEFELI (1982), le Seeland par KELLERHALS & SCHNEIDER (1971) et la plaine du Rhône par FINGER & WEIDMANN (sous presse). Ces travaux ont été repris sans modification.

Synthèses à partir de forages

La carte d'isohypses du fond rocheux dans le canton de Genève dessinée par AMBERGER (1978, 1986), ainsi que celle de la région de la ville de Berne établie par STAEGER (sous presse) ont été reprises sans modification.

Du fait que ce travail est essentiellement basé sur des résultats obtenus avec des méthodes géophysiques, un nouveau sondage mécanique peut modifier ou préciser dans le futur la position des isohypses pour une partie de la carte.

3. Quelques caractéristiques des bassins et vallées étudiées

Les noms locaux mentionnés dans ce chapitre sont ceux de la Carte nationale au 1:100'000.

Région de Genève

Le sillon profond du Léman, comblé essentiellement par des silts, se prolonge vers la plaine de l'Aire au pied du Salève; le seuil le plus élevé se situe autour de la cote +300 m (AMBERGER 1978). Un autre sillon commence vers Ferney et se dirige vers Chancy en s'approfondissant. Les formations d'âge quaternaire dans ces bassins s'arrangent selon une géométrie complexe (voir p. ex. DERIAZ et al. 1976).

Le Léman et la vallée du Rhône entre Villeneuve et St-Maurice

Les données gravimétriques n'étant pas suffisantes dans la vallée du Rhône en amont d'Evionnaz, il n'a pas été possible d'établir correctement les isohypses de la base des sédiments du Quaternaire pour la partie supérieure de cette vallée. La grande profondeur du toit rocheux (-400 m) est une des caractéristiques du bassin de la basse vallée du Rhône. Des remontées du fond rocheux se situent au défilé de St-Maurice (alt. +400 m?) et à Villeneuve (alt. -200 m).

Dans la plaine du Rhône les résultats sismiques publiés par FINGER & WEIDMANN (sous presse) sont proches de ceux obtenus par D. Rigassi (communication personelle) en utilisant les anciennes données gravimétriques de GONET (1965). Ce sont essentiellement des silts argileux qui remplissent ce bassin. Des graviers glaciolacustres et fluviatiles constituent le sommet des sédiments de la vallée du Rhône (FREYMOND 1971).

Gros-de-Vaud, région de Cossonay

Une faible couche de moraine recouvre la molasse sur ces reliefs assez élevés (AUBERT 1981). Seuls quelques petits sillons remplis essentiellement d'alluvions graveleuses et de moraine sont observés. Les sillons les plus importants analysés par ARN (1984) sont les suivants: Bioley-Orjulaz, Thierrens, Cossonay et Cuarnens.

Régions de la Plaine de l'Orbe et de la Broye

Les dernières études réalisées dans ces deux régions sont celles de PETCH (1970) pour la Plaine de l'Orbe et de PARRIAUX (1981) pour la vallée de la Broye. Ces deux bassins ne sont pas très profonds, l'épaisseur de sédiments meubles est au maximum de 150 m. Malgré leur éloignement géographique, ces deux bassins se ressemblent: ils sont remplis dans une grande proportion par des silts argileux, avec parfois une moraine ou des graviers à la base et des sédiments lacustres et fluviatiles au sommet de la série. De par sa relative simplicité, cette succession de faciès est attribuable à un simple retrait glaciaire.

PARRIAUX (1976, 1978) décrit, dans la Broye, plusieurs sillons fossiles dont l'un alimente les sources d'Henniez.

Régions des lacs et du Seeland

La cote minimale du fond rocheux pour le lac de Neuchâtel est d'environ 0 m et de +200 m pour le lac de Bienne, tandis que la cote minimale pour le lac de Morat reste encore très hypothétique. Le bassin du lac de Neuchâtel se continue dans le Seeland avec une épaisseur de sédiments d'environ 300 m, ce qui implique que le fond rocheux se situe à la cote approximative de +100 m. Près de Wohlen, KELLERHALS & TRÖHLER† (1981) décrivent un forage de 286 m qui atteint la molasse à la cote +145 m. Le log présente essentiellement des silts avec

un petit passage graveleux. WELTEN (1982) donne quelques analyses d'échantillons pris sur ce sondage: à l'aide d'un assemblage de pollen, il démontre l'existence d'une phase chaude avec des arbres thermophiles; on peut en conclure que le remplissage de ce bassin s'est effectué lors de plusieurs cycles glaciaires.

Au-dessus de Concise, sur les bords du lac de Neuchâtel, une alternance de craies et de tourbes a été observée stratigraphiquement située sous une moraine (sondage pour l'autoroute Yverdon—Neuchâtel, Bureau des Autoroutes, Lausanne). Il semblerait que plusieurs cycles glaciaires soient présents dans ce grand bassin.

Vallée de l'Emme

La partie inférieure de l'Emmental est remplie de silts glaciolacustres et lacustres. Cette vallée présente les mêmes caractéristiques que le Seeland: on y trouve des graviers au sommet d'un bassin rempli de silts (Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern 1977).

Moyenne vallée de l'Aar et de la Gürbe

Depuis le bassin profond du lac de Thoune (-200 m), le fond rocheux remonte, vers Thoune, jusqu'à l'altitude présumée de +450 m. Le bassin quaternaire s'approfondit de nouveau jusqu'à une altitude de +250 m environ et se termine dans la région de Berne, où GERBER (1924, 1934) a signalé l'existence de plusieurs anciennes vallées remplies d'alluvions graveleuses. Un des anciens cours de l'Aar passerait par Zollikofen, Moosseedorf, Schüpfen et Lyss (HANTKE 1980, p. 391). KELLERHALS & ISLER (1983) décrivent la géométrie des corps sédimentaires de ce bassin; le bassin de la Gürbe présente les mêmes caractéristiques que celui de l'Aar, ayant connu les mêmes conditions de sédimentation. En profondeur, ce sont essentiellement des silts glaciolacustres puis une succession de graviers avec des intercalations de sédiments interglaciaires de nature variable qui se sont déposés (SCHLÜCHTER 1979).

Régions de la Sarine et de la Singine

Ces deux rivières présentent la particularité d'avoir une altitude élevée au débouché des Préalpes, respectivement à +700 m et à +850 m. De ce fait, d'anciens canyons creusés dans la molasse et remplis de sédiments témoignent de plusieurs périodes chaudes. Une ancienne vallée de la Sarine a déjà été remarquée par BÜCHI (1926) sous le nom de "Vallée de la basse terrasse". D'anciennes vallées sont signalées par DORTHE (1962). Un ancien cours de la Singine devait passer par Tavel et Düdingen (BÜCHI 1927). Ces anciennes vallées sont remplies par des graviers fluvioglaciaires et surmontées par des moraines (blocs dans une matrice silteuse). En amont de Zumholz pour la vallée de la Singine, et en amont de Rossens pour la

vallée de la Sarine, il existe des bassins glaciolacustres dont les sédiments se sont probablement déposés lors du dernier retrait des glaces.

4. Sédimentation dans les bassins quaternaires: Traits généraux de la stratigraphie

Dans les bassins sédimentaires périalpins du Quaternaire, une sédimentation de silts argileux est dominante. Chaque forage profond rencontre ces silts qui contiennent quelques galets dispersés. Leur mode de dépôt est vraisemblablement glaciolacustre. Des graviers glaciolacustres et fluviatiles, ainsi que des tourbes et des craies lacustres, terminent le remplissage de ces bassins.

La plupart des sédiments se sont déposés lors du dernier cycle froid de la glaciation du Würm. Cependant, dans certaines régions, d'anciens cycles interglaciaires ont été mis en évidence:

1. Deux cycles interglaciaires ont été vus en sondages à Meikirch dans le Plateau bernois par WELTEN (1982, diagr. la, lb); ces deux périodes définies au moyen de la palynologie sont le Holstein et l'Eem. Les glaciations seraient classiquement Mindel, Riss et Würm.
2. Dans la vallée de l'Aar, SCHLÜCHTER (1976, 1979) démontre l'existence de dépôts de deux périodes froides majeures et les interprète comme étant les témoins des glaciations du Riss et du Würm.
3. Un interglaciaire est présent dans le Seeland: WELTEN (1982) en démontre l'existence.
4. De nombreux interstades froids sont mis en évidence par ARN (1984) dans le bassin lémanique et le canton de Vaud. Seuls les lignites de Grandson sont attribués avec réserve au cycle du Riss par cet auteur.
5. MORNOD (1947), DORTHE (1962) et VAN DER MEER (1982) décrivent une sédimentation de graviers qui remplissent d' anciens canyons creusés par la Sarine lors de périodes climatiques chaudes.
6. Le bassin de Genève présente des sédiments situés stratigraphiquement au-dessous de la dernière moraine würmienne. JOUKOWSKI (1923) puis REYNAUD (1982) attribuent d'anciens lignites (pont Sous-Terre) à l'interglaciaire Riss/Würm ou éventuellement au Würm précoce, selon ce dernier auteur.

La corrélation des cycles interstadiaires froids au moyen de la palynologie reste encore incertaine; lors de ces phases, l'association des flores n'est pas aussi caractéristique que lors de phases interglaciaires chaudes.

Le mode de sédimentation glaciolacustre, rencontré en Suisse occidentale dans les grands bassins du Quaternaire, est fondamentalement différent de celui exposé par PENCK & BRÜCKNER (1909). Ces auteurs montrent une chronologie basée sur la lithostratigraphie par imbrications de terrasses de sandur dans les vallées de la Suisse orientale: ce mode de dépôt étant peu fréquent dans la région étudiée, une analyse uniquement morphologique ne permet pas d'y établir une stratigraphie.

5. Profondeur des bassins

Les grandes vallées qui émergent des Alpes ont un fond rocheux dont la cote est située au-dessous du niveau de la mer. Cette grande profondeur a été constatée dans tous les bassins périalpins (FINKH et al. 1984). Le bassin du lac de Neuchâtel, qui n'est pourtant pas directement relié à une grande vallée alpine, montre également une érosion dans la molasse, et la cote minimale de son toit est située au-dessous du niveau de la mer.

Dans le bassin versant du Rhône, le fond rocheux remonte jusqu'à l'altitude d'environ 300 m dans la région de Genève. Dans le bassin versant de l'Aar, la roche remonte jusqu'à l'altitude de 400 m, à Soleure. Ces constatations nous amènent à considérer que dans ces vallées, des dépressions ont été comblées. Ces dépressions atteignent des profondeurs similaires à celles des vallées de Suisse orientale (WILDI 1984).

6. Mécanismes de formation des bassins quaternaires

Tectonique

En considérant les axes des bassins sédimentaires, on observe que leurs directions ne sont pas quelconques:

1. Lorsque les vallées de l'Aar et du Rhône sortent des Alpes, elles ont une direction SE–NW;
2. Sur le Plateau suisse, ce sont les axes NE–SW qui prédominent:
   - Broye–Seeland–Soleure
   - Yverdon–Bienne
   - Limpachtal
   - Moosseedorf–Wangen a.A.
   - divers linéaments sur le Plateau vaudois, fribourgeois et bernois

3. Les autres grands axes ont une direction E–W:
   - lac Léman: de Montreux à Nyon
   - Seeland: de Lyss à Kerzers
   - Vallée de la Singine: Thörishaus–Laupen
   - Vallée de l'Aar: Bremgarten–Wileroltigen
   - Moosseedorf–Lyss
   - Kräiligen–Winistorf

En Suisse orientale, ces linéaments majeurs ont déjà été remarqués par WILDI (1984, p. 547) qui les interprète comme un jeu de failles conjuguées. De nombreux autres linéaments, interprétés comme des fractures, ont été observés en Suisse occidentale par RIGASSI (1978, p. 263).

Certains linéaments correspondent à des failles dans les vallées périalpines de l'Aar, de la Gürbe, de la Sarine et du Rhône. D'autres linéaments correspondent à une limite stratigraphique importante. Par exemple, la limite entre les calcaires du Mésozoïque – fortement fracturés et karstifiés – et les faciès marno-gréseux de la molasse – peu fracturés – est située sous le lac de Neuchâtel et de Bienne. Si l'on considère que les bassins suivent des fractures ou des limites stratigraphiques, leur genèse n'est cependant toujours pas expliquée; il faudrait éventuellement considérer la fracturation comme étant un agent qui favorise leur formation.

Isostasie

L'existence d'un abaissement isostatique lié au poids des glaces est peu probable dans le bassin lémanique actuel. Suivant SCHAER (1981), la relaxation se serait terminée bien avant nos jours. Les faibles mouvements enregistrés sur le Plateau seraient dus à une tectonique alpine (léger enfoncement de la région de Genève). L'amplitude de ces mouvements tectoniques est cependant trop faible pour expliquer le relief du bassin; lors d'une subsidence tectonique, il aurait été comblé continuellement par l'apport détritique. Seule une action érosive des glaces sur les sédiments et le fond rocheux a pu s'opposer au comblement du lac, étant donnée la proximité des Alpes.

Erosion fluviatile

Des seuils rocheux élevés sont présents à l'aval de chaque bassin sédimentaire. Cette observation infirme l'hypothèse d'une érosion fluviatile dans la genèse de ces bassins.

Un dépôt de graviers et de sables n'est pas incompatible avec un environnement glaciolacustre, vu l'importance de l'écoulement d'eau à la base de certains glaciers (CHURCH & GILBERT 1975). Par forage, dans le lac de Zürich, des graviers et des sables ont été trouvés à la base d'une série de silts argileux (GIOVANOLI 1984, HSÜ & KELTS 1984). Dans les mêmes conditions, sous des silts argileux, des graviers ont été trouvés dans la Plaine de l'Orbe (Sondages 1986).

Il serait intéressant de cerner la géométrie de ces corps sédimentaires à l'aide de la sismique réflexion, afin d'en déterminer la genèse; une compréhension de ces corps dans les bassin du Quaternaire pourrait également aboutir à une meilleure appréciation de la circulation d'eau en hydrogéologie.

Erosion glaciaire, une hypothèse

Dans l'état actuel de nos connaissances, il est difficile de proposer un modèle cohérent expliquant les phénomènes d'érosion glaciaire en général, et plus particulièrement le surcreusement des vallées glaciaires. C'est ainsi que certains paramètres sont jugés de façons très différentes par les auteurs:

- L'épaisseur de la calotte glaciaire est considérée, par BOULTON (1974), comme facteur primordial de l'érosion glaciaire;
- HALLET (1979, 1981) considère en revanche que l'épaisseur du glacier serait secondaire et que l'érosion serait essentiellement fonction de la fonte de la glace à la base du glacier.

Ces facteurs, combinés avec les effets de la granulométrie des débris transportés d'une part, de leur forme et de leur dureté par rapport au soubassement d'autre part, détermineraient non seulement l'érosion, mais également le taux de sédimentation dans les bassins.

Dans les vallées périalpines, les observations suivantes permettent de préciser quelque peu les conditions physiques à la base des glaciers, au cours du creusement et du surcreusement des bassins:

- La partie inférieure des vallées est généralement remplie de sédiments fins, surtout silteux, qui contiennent relativement peu de galets arrondis; on peut ainsi exclure une prépondérence de l'effet abratif par les galets lors du dépôt de ces silts.
- Sur le Plateau vaudois, CHOFFAT† & AUBERT (1983) démontrent que le glacier s'est écoulé sur un substrat molassique dégelé. Les marnes ont réagi plastiquement aux contraintes engendrées par le glacier.
- Des mouvements non seulement longitudinaux, mais également transversaux, donc rotatifs, au sein des corps de glace sont indiqués par l'asymétrie des dépôts de pente de certaines vallées. Dans les Préalpes fribourgeoises, au pied du Moléson, le soubassement de la vallée de l'Albeuve comprend, à l'adroit, du Flysch du Gurnigel, et au revers des calcaires des Médianes; suite à des mouvements rotatifs, ce sont des moraines, uniquement constituées de Flysch du Gurnigel, qui se sont déposées sur le revers. Des asymétries de dépôts peuvent être remarquées dans le bassin lémanique, dans la basse vallée de la Broye, dans la moyenne vallée de l'Aar et dans celle de la Gürbe.

Ce genre de mouvement "convectif" a été observé par exemple dans la zone d'ablation du glacier d'Athabasca au Canada (RAYMOND 1971), c'est-à-dire dans une zone de grande mobilité de la glace.

- La mobilité de la glace a pu être augmentée le long des vallées actuelles par un flux de chaleur terrestre relativement élevé. Ceci peut en effet être déduit à partir des mesures du flux de chaleur dans les lacs périalpins (FINKH 1981). Ces mesures indiquent par exemple une augmentation du flux de chaleur de plus de 30% dans le bassin du lac de Zürich (2,99 HFU*) par rapport aux environs immédiats de ce lac (Tiefenbrunnen; FINKH & HSÜ 1984). Le flux géothermique est généralement plus élevé dans le lac Léman (1,88 à 2,21 HFU*) et le lac de Neuchâtel (1,87 HFU*) que dans les régions terrestres (env. 30°C/km dans la molasse, 1,53 à 1,70 HFU* dans le massif du Gotthard). Ces anomalies géothermiques très locales seraient corrélables avec des circulations d'eau profonde, donc chaude. Cette chaleur se transmettrait le long de fractures parallèles à l'axe des vallées périalpines. L'existence d'une situation similaire peut être soupçonnée dans certaines parties de la calotte glaciaire de l'Antartique, où des sondages sismiques ont permis la mise en évidence d'une couche de glace d'une mobilité très élevée à la base des glaciers (BLANKENSHIP et al. 1986).

Dans les vallées surcreusées du Plateau suisse, l'existence temporaire d'eau de fonte dans la partie la plus profonde des bassins glaciaires peut être affirmée à la suite de la découverte de graviers délavés au fond du bassin du lac de Zürich (GIOVANOLI 1984).

En conclusion, on peut supposer l'existence d'une liaison étroite entre la fracturation du soubassement, le flux de chaleur intense et l'érosion, ou le surcreusement des bassins glaciaires périalpins.

Remerciements

Le présent travail a été proposé par MM. les Prof. J.-P. Schaer de Neuchâtel et Prof. W. Wildi de Genève. Ils ont suivi avec intérêt son élaboration, tout en prodiguant de précieux conseils de son début à sa fin. C'est par l'appui financier de la Commission Géologique Suisse qu'il a pu être mené à bien.

Sont cordialement remerciés tous les bureaux cités dans le texte, ainsi que les personnes suivantes, pour nous avoir fourni les renseignements nécessaires: Dr. A. Ackermann (Fribourg), Dr. G. Amberger (Genève), Dr. R. Arn (Lausanne), A. Aviola (Fribourg), Dr. F. Becker (Fribourg), Dr. E. Blumer (Berne), Dr. H.B. de Cérenville (Lausanne), Dr. J.P. Dorthe (Fribourg), Dr. W. Finger (Zug), P. Frey (Zug), R. Gianolini (Fribourg), B. Graaf (Lausanne), Prof. H. Jäckli (Zürich), Dr. P. Kellerhals (Berne),

*$\mu cal/cm^2$ sec

Prof. B. Kübler (Neuchâtel), J. Norbert (Lausanne), Dr. A. Parriaux (Lausanne), D. Rigassi (Genève), Prof. L. Rybach (Zürich), Dr. D. Staeger (Berne), J. Thierrin (Fribourg), Prof. J.P. Vernet (Genève) et Dr. M. Weidmann (Jongny) dont la description de sondages dans le canton de Vaud a été des plus précieuses pour ce travail.

De nombreux documents ont été obtenus auprès des Archives Géologiques Suisses; ce Service fédéral a été indispensable pour une synthèse régionale de ce genre.

M. Pugin-Amram a contribué à l'amélioration du manuscrit et nous remercions MM. les Prof. W. Wildi et Prof. J.-P. Schaer, MM. les Dr. M. Weidmann, Dr. G. Amberger et Dr. R. Wernli d'avoir accepté d'en faire une lecture critique.

M. le Dr. L. Jemelin du Service hydrologique et géologique national est cordialement remercié pour les améliorations apportées au texte et au graphisme de la planche hors texte.

Bibliographie

AMBERGER, G. (1978): Contribution à l'étude du Quaternaire de la région lémanique: Résultats de quelques sondages profonds exécutés à Genève. — Eclogae geol. Helv. **71**/1, 193-206.

— (1986): Isohypses du contact Molasse—Quaternaire. — Serv. cant. Géol., Genève (inéd.).

ARN, R. (1984): Contribution à l'étude stratigraphique du Pléistocène de la région lémanique. — Thèse Univ. Lausanne.

AUBERT, D. (1981): Géomorphologie du Gros-de-Vaud. — Mém. Soc. vaud. Sci. nat. **17**/2 (100), 57-116 (de même: Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne 257).

BETRIX, M.A. (en prép.): Séquences sédimentaires du lac de Neuchâtel. — Thèse Univ. Neuchâtel.

BLANKENSHIP, D.D., BENTLEY, C.R., ROONEY, S.T. & ALLEY, R.R. (1986): Seismic measurement reveal a saturated porous layer beneath an Arctic ice stream. — Nature **322**/3, 54-57.

BODMER, R., MATTER, A., SCHELLER, E. & STURM, M. (1973): Geologische, seismische und pollenanalytische Untersuchungen im Bödeli bei Interlaken. — Mitt. natf. Ges. Bern (N.F.) **30**, 51-62.

BOULTON, G.S. (1974): Process and patterns of glacial erosion. Dans: COATES, D.R. (Ed.): Glacial Geomorphology (p. 41-87). — Binghampton, N.Y., State Univ. New York.

BÜCHI, O. (1926): Das Flussnetz der Saane und ihrer Nebenflüsse während der Interglacialzeiten (ausgenommen die Sense). — Bull. Soc. fribourg. Sci. nat. **28**, 128-148.

— (1927): Interglaciale Senseläufe. — Eclogae geol. Helv. **20**/2, 226-229.

CHOFFAT†, P. & AUBERT, D. (1983): Erosion et morphologie glaciaires de la molasse. — Bull. Soc. vaud. Sci. nat. **76**/4 (364), 321-340.

CHURCH, M. & GILBERT, R. (1975): Proglacial fluvial and lacustrine environments. Dans: Glacial and glaciolacustrine sedimentation. — Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral. **23**, 22-100.

DERIAZ, P., ODIER, M. & AMBERGER, G. (1976): Cadre géologique et caractéristiques géotechniques des formations rencontrées. Dans: Galerie technique et d'eaux pluviales, Genève. — Bull. tech. Suisse romande **102**/4, 68-78.

DORTHE, J.P. (1962): Géologie de la région au Sud-Ouest de Fribourg. — Eclogae geol. Helv. **55**/2, 327-406.

FINGER, W. & WEIDMANN, M. (sous presse): Quelques données géologiques nouvelles sur la vallée du Rhône entre Sion et le Léman. — Bull. Murithienne, Soc. valais. Sci. nat.

FINKH, P. (1981): Heat flow measurements in 17 perialpine lakes. — Bull. geol. Soc. Amer. **92** (II), 452-514.

FINKH, P. & HSÜ, K.J. (1984): Heatflow of the Lake Zürich region, a comparison of land-based measurements. Dans: HSÜ, K.J. & KELTS, K.R. (Eds.): Quaternary geology of Lake Zürich: an interdisciplinary investigation by deep lake drilling (p. 157-159). — Contr. Sedimentol. **13**, Stuttgart.

FINKH, P., KELTS, K. & LAMBERT, A. (1984): Seismic stratigraphy and bedrock forms in perialpine lakes. — Bull. geol. Soc. Amer. **95**, 1118-1128.

FREYMOND, P. (1971): Les dépôts quaternaires de la vallée du Rhône entre St-Maurice et le Léman, d'après les résultats des sondages d'étude de l'autoroute et de l'aménagement hydroélectrique du Bas-Rhône. — Bull. Soc. vaud. Sci. nat. **71**/1 (335), 1-14 (de même: Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne **189**, 1-14).

GERBER, E. (1924): Einige Querprofile durch das Aaretal mit Berücksichtigung der letzten Bohrungen und Tunnelbauten. — Mitt. natf. Ges. Bern **1923**, 24-31.

— (1934): Bern—Worblaufen, dem linken Aareufer entlang. Dans: BECK, P., GERBER, Ed. & RUTSCH, R.: Exkursion Nr. 38: Umgebung von Bern. Geologischer Führer der Schweiz (Fasz. VIII, p. 568-571). — Wepf, Basel.

GIOVANOLI, F. (1984): Operation, coring summary, and technical data. Dans: HSÜ, K.J. & KELTS, K.R. (Eds.): Quaternary geology of Lake Zürich: an interdisciplinary investigation by deep lake drilling (p. 21-29). — Contr. Sedimentol. **13**, Stuttgart.

GONET, O. (1965): Etude Gravimétrique de la plaine du Rhône. Région St-Maurice—Lac Léman. — Matér. Géol. Suisse, Géophys. **6**.

HALLET, B. (1979): A theoretical model of glacial abrasion. — J. Glaciol. **23**, 39-50.

— (1981): Glacial abrasion and sliding: their dependence on the debris concentration in basal ice. — Ann. Glaciol. **2**, 23-28.

HANTKE, R. (1978-1983): Eiszeitalter, Bd. **1** (1978), **2** (1980), **3** (1983). — Ott, Thun.

HSÜ, K.J. & KELTS, K.R. (Eds.) (1984): Quaternary geology of Lake Zürich: an interdiciplinary investigation by deep lake drilling. — Contr. Sedimentol. **13**, Stuttgart.

JOUKOWSKI, E. (1923): L'âge des dépôts glaciaires du Plateau genevois. — C.R. Soc. Phys. Hist. nat. Genève **40**/2, 49-52.

KELLERHALS, P. & HAEFELI, C. (1982): Hydrogeologie Bödeli und angrenzende Karstgebiete. — Wasser- u. Energiewirtschaftsamt Kanton Bern (unveröff. Ber.).

KELLERHALS, P. & ISLER, A. (1983): Profilserie durch die Quartärfüllung des Aare- und des Gürbetroges zwischen Thunersee und Bern. – Eclogae geol. Helv. **76**/2, 417-430.

KELLERHALS, P. & SCHNEIDER, A. (1971): Hydrogeologische Karte Seeland, geophysikalische Sondierungen (Geotest AG). – Wasser- u. Energiewirtschaftsamt Kanton Bern (unveröff. Ber.).

KELLERHALS, P. & TRÖHLER†, B. (1981): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 76: Lyss. – Schweiz. geol. Komm.

LÄUPPI, U.F. (1983): Geomorphologie im mittelländischen Reuss-Gletschergebiet. – Diss. Univ. Zürich (Lötscher, Luzern).

MARCHANT, R. & BESSON, O. (1986): Etude gravimétrique des collines de Chiètres. – Diplôme Univ. Lausanne (inéd.).

MATTER, A., SÜSSTRUNK, A.E., HINZ, K. & STURM, M. (1971): Ergebnisse reflexionsseismischer Untersuchungen im Thunersee. – Eclogae geol. Helv. **64**/3, 505-520.

MEER, J.J.M. VAN DER (1982): The Fribourg Area, Switzerland. A study in Quaternary geology and soil development. – Publ. Fys. Geogr. Bodemk. Lab. Univ. Amsterdam **32**.

MORNOD, L. (1947): Sur les dépôts glaciaires de la vallée de la Sarine en Basse-Gruyère. – Eclogae geol. Helv. **40**/1, 15-35.

OLIVIER, R. (1983): Atlas gravimétrique du Plateau Suisse, partie Ouest. – Bull. Inst. Géophys. Univ. Lausanne **5**.

PARRIAUX, A. (1976): Elément hydrographique fossile dans la Broye moyenne. – Bull. Soc. vaud. Sci. nat. **73**/1 (349), 51-65.

– (1978): Le gîte des eaux minérales d'Henniez. Etat des connaissances et données nouvelles sur sa prolongation. – Eclogae geol. Helv. **71**/2, 377-395.

– (1981): Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin de la Broye. – Thèse EPF Lausanne **393**.

PENCK, A. & BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter. – Tauchnitz, Leipzig.

PETCH, M. (1970): Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de l'Orbe. – Matér. Géol. Suisse, Géophys. **11**.

RAYMOND, C.F. (1971): Flow in a transverse section of Athabasca glacier, Alberta, Canada. – J. Glaciol. **10**, 55-84.

REYNAUD, C. (1982): Etude stratigraphique, sédimentologique et palynologique des dépôts du Pléistocène supérieur au Sud du Bassin genevois. – Thèse Univ. Genève.

RIGASSI, D.A. (1978): Carte du Bassin molassique. Dans: TRÜMPY, R. (Ed.): Geology of Switzerland, a guide book. Part B: Geological Excursions (Exc. V, p. 263). – Schweiz. geol. Komm. (Wepf, Basel/New York).

SCHAER, J.-P. (1981): Mouvements verticaux dans le bassin lémanique depuis la fonte des grands glaciers alpins. – Arch. suisses Anthropol. gén. (Genève) **45**/2, 171-179.

SCHLÜCHTER, C. (1976): Geologische Untersuchungen im Quartär des Aaretals südlich von Bern. – Beitr. geol. Karte Schweiz (N.F.) **148**.

– (1979): Übertiefte Talabschnitte im Berner Mittelland zwischen Alpen und Jura (Schweiz). – Eiszeitalter u. Gegenwart **29**/4, 101-113.

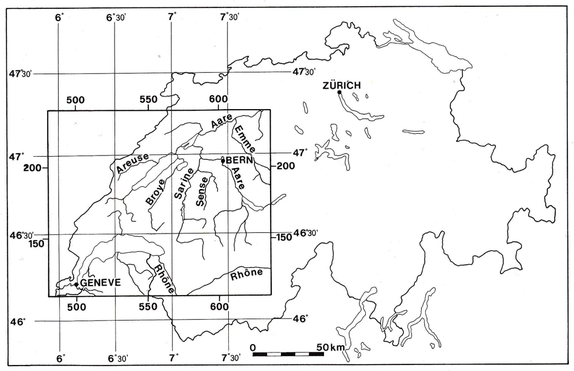
STAEGER, D. (sous presse): Baugrundkarte der Stadt Bern und Umgebung. – Beitr. Geol. Schweiz, klein. Mitt.

VERNET, J.P., HORN, R., BADOUX, H. & SCOLARI, G. (1974): Etude structurale du Léman par sismique réflexion continue. – Eclogae geol. Helv. **67**/3, 515-530.

Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (1977): Grundlagen für die siedlungswasserwirtschaftliche Planung des Kantons Bern, Hydrologie Emmental. – Zwischenber. WEA Bern.

WELTEN, M. (1982): Pollenanalytische Untersuchungen im Jüngeren Quartär des nördlichen Alpenvorlandes der Schweiz (Textbd. u. Diagrammh.). – Beitr. geol. Karte Schweiz (N.F.) **156**.

WILDI, W. (1984): Isohypsenkarte der quartären Felstäler in der Nord- und Ostschweiz, mit kurzen Erläuterungen. – Eclogae geol. Helv. **77**/3, 541-551.



Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire en Suisse occidentale

Val de Travers
Lac de Neuchâtel
Val. de la Broye
Murtensee
Bielersee
SEELAND
SAANETAL
AARETAL
Limpachtal
Emmental
Gürbetal
Sensetal
Aaretal
Thunersee
Val. de l'Orbe
La Mentue
La Venoge
Val. de la Glâne
Ärgeratal
La Broye
VAL. DE LA SARINE
Le Léman
VALLÉE DU RHÔNE
LE RHÔNE
N
0 5 10 15 20 km

750 m. s. mer
600
400
200
0
−200
−400

600 Ligne isohypse (tracé sûr / probable)
550 Ligne isohypse intermédiaire
Profil sismique
517 Forage atteignant la roche en place, avec cote du toit rocheux
517 Forage interrompu dans le Quaternaire, avec cote atteinte