

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 76 (1982-1983)
Heft: 364

Artikel: Erosion et morphologie glaciaires de la molasse
Autor: Choffat, Philippe / Aubert, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-278158>

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: 07.02.2026

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

Erosion et morphologie glaciaires de la molasse

PAR

† PHILIPPE CHOFFAT¹ ET DANIEL AUBERT²

Summary. – The late Philippe CHOFFAT's observations of excavations in the Lausanne region have demonstrated that under the Alpine moraine lie extremities of molasse beds in complete morphogenetic evolution as well as a variety of ground moraine composed almost entirely of local material. His notes have also contributed to the understanding of the process of glacial fracture of molasse by the widening of the fissures, the intrusion of soft marls, and the displacement of sandstone blocks.

The conclusions are quite surprising: it appears that the glacier responsible for these processes had the particularities of a polar glacier, while its substratum had none of the characteristics of permafrost.

INTRODUCTION

Dans le numéro 356 de ce Bulletin, MARC WEIDMANN a relevé les mérites de PHILIPPE CHOFFAT, ingénieur de profession et géologue de vocation, qui consacra les années de sa retraite à recueillir des observations géologiques dans la région lausannoise, comme l'avait fait quarante ans plus tôt un autre ingénieur, ELIE MERMIER.

La période était particulièrement favorable; dans les années 70, de nombreux chantiers bouleversaient ce territoire et y découvraient sur de vastes surfaces la moraine et la molasse qui en forment le sous-sol. CHOFFAT sut en profiter pour récolter une riche moisson de renseignements concernant ces terrains. Motivé par sa passion de naturaliste et contrôlé par sa discipline de technicien, il a recueilli, sous la forme de textes, de dessins et de photos, des milliers d'observations d'une telle précision qu'elles pourraient être remises en place dans l'espace à un mètre près, et si bien présentées que leur interprétation n'offre pas de difficultés et qu'on y découvre la géologie régionale avec le même plaisir que sur le terrain.

Si les circonstances ne lui ont pas permis de publier les résultats de ses recherches, CHOFFAT nous a laissé de volumineux dossiers conservés au

¹ Décédé le 5 novembre 1979.

² 1033 Cheseaux.

Musée géologique de Lausanne. On y trouve des descriptions très explicites, rédigées dans une langue alerte et imagée, des analyses calcimétriques, d'admirables croquis et profils complétés et corroborés par des centaines de photos commentées³. Il s'agit donc d'une documentation de valeur inestimable dont toute étude régionale devra tenir compte et pourra tirer bénéfice.

Dans l'état où il les a laissées, ces observations ne sont pas publiables; en revanche, cette montagne de documents peut être exploitée comme un précieux capital de données originales concernant la molasse, la moraine ou encore l'action érosive exercée par le glacier sur le substratum molassique et la sédimentation qui en est résultée. C'est précisément ce domaine que nous avons choisi de traiter, en remarquant que cette étude de l'érosion glaciaire, à l'échelle du banc de molasse, prolonge et complète en quelque sorte une publication récente (AUBERT, 1981) dans laquelle on envisageait le même phénomène à la dimension d'une région.

Mais en lisant cet article, il ne faut jamais perdre de vue que toute sa «matière première» est l'œuvre de PHILIPPE CHOFFAT; seules les interprétations sont de son coauteur. Les figures qui l'illustrent, à part la planche, reproduisent ses dessins, dont on s'est efforcé de conserver la finesse et la précision lorsqu'un changement d'échelle s'avéra nécessaire; d'autres ont été tirées par décalquage de photos qui ne se prêtaient pas à la reproduction. Enfin les textes descriptifs s'inspirent directement des siens. Toutefois, dans cette abondante documentation, il a fallu faire un choix, en ce sens qu'on a généralement laissé de côté les observations isolées, qui n'ont qu'une signification locale, pour s'en tenir à celles qui se répètent et détiennent ainsi une valeur plus générale.

DOCUMENTS ET INTERPRÉTATIONS

Conditions géologiques locales

L'activité de PHILIPPE CHOFFAT s'est concentrée sur les chantiers les plus importants et de préférence sur ceux de la région de Renens où il habitait. C'est pourquoi ses observations, réparties très inégalement sur le territoire lausannois, se multiplient dans les communes de Renens et de Prilly. Pour le problème particulier que nous envisageons, on peut dire que l'assiduité de ses recherches s'exprime par la densité des stries glaciaires de la planche.

Le sous-sol de la région lausannoise est formé de molasse aquitaniennne, à l'exception de sa marge occidentale où affleurent les grès et les marnes du Chattien, et de l'angle SE qui appartient à la molasse subalpine. Aquitanien et Chattien sont constitués de bancs gréseux, souvent discontinus, à ciment calcaire ou argilocalcaire plus ou moins résistant, alternant avec des niveaux

³ PH. CHOFFAT avait une grande expérience de la technique photographique, dont on trouvera le témoignage dans la publication signalée sous son nom dans la bibliographie.

plus tendres de marne et d'argile. Mais, dans la partie la plus élevée de la zone, les grès aquitaniens prennent le dessus, s'épaississent et déterminent ainsi le relief en larges gradins caractéristique des versants du Jorat (BERSIER, 1953).

Les pendages de la molasse notés sur la planche révèlent les grands traits de sa structure dans la région lausannoise. L'ouest appartient à la *zone monoclinale* du plateau vaudois, à faible inclinaison ESE. Plus à l'E, dans l'agglomération lausannoise, les bancs de molasse se redressent légèrement en sens inverse, dessinant ainsi un large synclinal très surbaissé, auquel succède, toujours dans la même direction, l'*anticlinal de Lausanne* signalé par de forts pendages SE. Enfin, cet ensemble bien tranquille est interrompu brutalement par une importante faille inverse, la première d'un faisceau de fractures par lesquelles les écailles de molasse subalpine chevauchent la lèvre occidentale de cet accident. Relevons que la grande majorité des observations de CHOFFAT se situent dans la zone monoclinale et à l'exclusion de la molasse subalpine.

Topographiquement, la région considérée appartient à un grand versant qui descend du Jorat et du plateau de Romanel vers le Léman. Très déclive à Lausanne, où un promontoire découpé par des ravins fluviaux s'avance vers le lac, il s'adoucit à l'ouest tout en s'orientant peu à peu au NW pour se raccorder à la grande dépression méridienne où coule la Venoge.

Presque partout le substratum rocheux est dissimulé par une couverture de moraine dont l'épaisseur, variable d'un endroit à l'autre, peut atteindre une douzaine de mètres, comme CHOFFAT a pu le constater dans les grands chantiers des nouveaux hôpitaux universitaires vaudois (CHUV) à Lausanne. Dans les bas, la moraine s'épaissit encore, se complète de formations graveleuses et lacustres, et atteint son maximum de développement dans les vallums de retrait, parallèles au littoral, qui détournent les affluents du lac de leur direction initiale.

Cette moraine appartient au Wurm et vraisemblablement à son dernier stade. Le glacier qui l'a déposée débouchait de la vallée du Rhône, puis, débordant les limites de la cuvette lémanique, se déployait largement sur le bassin molassique. Lors de sa plus grande extension, ce glacier de piedmont devait avoir près de 1000 m d'épaisseur au-dessus du niveau actuel du lac (JÄCKLI, 1962).

Ecoulement de la glace

Chaque fois qu'il en eut l'occasion, CHOFFAT s'est appliqué à observer les stries et les cannelures glaciaires et à en mesurer la direction au degré près. Jamais, je pense, on n'a disposé d'une telle densité d'observations de cette nature, dont la planche ne donne qu'une idée incomplète, dans la région de Renens-Prilly notamment, où les nécessités du dessin n'ont pas permis de les représenter toutes. En revanche, les autres empreintes du glacier, comme les lunules ou les griffures, n'ont été signalées nulle part.

Au S et à l'W de Lausanne, la direction générale est N20° W avec une dispersion d'une vingtaine de degrés. La glace gravissait donc obliquement le versant, sauf exceptionnellement à Renens où deux stries orientées N65° W indiquent qu'au pied du versant elle pouvait aussi participer à un écoulement dans le sens de l'axe lémanique. A son sommet, au contraire, une fois atteint le plateau, et à l'W où la topographie s'abaisse, le courant s'établissait franchement N. On remarque donc l'influence du relief sur le mouvement profond du glacier. Mais cela apparaît encore plus clairement dans les hauts et à l'E de Lausanne.

Dans les chantiers du CHUV, qui se prêtaient à de fructueuses observations, PH. CHOFFAT a pu relever de nombreuses stries disposées dans un éventail de près de 60° d'ouverture, sans préciser malheureusement lesquelles recoupent les autres. Une telle dispersion, qu'il attribuait à des hésitations du glacier, est évidemment déterminée par la proximité d'un obstacle topographique, le promontoire Cité-Sauvabelin. Quand le courant glaciaire profond était assez puissant, il le franchissait obliquement suivant une direction NNW; sinon il l'évitait en glissant sur son versant oriental.

Un autre cas de divergence, encore plus prononcé, se dessine plus à l'E, non loin de l'angle NE de la planche. Les stries montrent que la glace s'écoulait tantôt NNW, tantôt NNE, pour se rabattre finalement jusqu'à une direction N54° E, perpendiculaire au mouvement général. Peut-être s'agissait-il de la branche septentrionale d'un vaste mouvement tourbillonnaire dont il faudrait découvrir la fermeture à l'E.

La figure 1, relevée dans un chantier de Renens, montre aussi, mais à l'échelle de la morphologie de détail, la sensibilité de l'écoulement glaciaire à l'égard des accidents même minimes du relief.

Dans l'épaisseur du glacier de piedmont, le mouvement de la glace n'était pas uniforme. La glace profonde, canalisée dans la cuvette lémanique, en épousait la direction WNW au large de Lausanne, tandis que la couche superficielle qui s'étalait en éventail sur le plateau comme le montre la carte de JÄCKLI (1962), devait prendre une direction N. Dans la région lausannoise, les stries indiquent que la glace du fond rejoignait l'écoulement de surface en remontant obliquement son versant avant de prendre une direction franchement méridienne. Cette divergence entre glace profonde et glace superficielle a déjà été signalée par FLINT (1971).

L'influence de la topographie sur l'écoulement d'un glacier est bien connue (TRICART et CAILLEUX, 1962). DENIS AUBERT (1981) vient d'en décrire un exemple frappant sur un verrou du glacier de Fiesch en Valais. Ce qui est moins courant, semble-t-il, c'est l'existence en un lieu de stries entrecroisées, significatives de modifications de la direction dans le temps. Ces changements pouvaient provenir du glacier lui-même, dont la masse, la répartition des vitesses, etc. ont dû se modifier au cours de son existence. C'est l'explication admise par MASSON et BAUD (1974) dans leur étude des empreintes glaciaires de Saint-Triphon dans la vallée du Rhône, et par VIVIAN (1975)



Fig. 1. – Renens. Relief de la molasse et stries glaciaires.

à la Mer-de-Glace. On pourrait aussi invoquer les modifications du relief dues à l'érosion par le glacier lui-même, et capables en retour d'en influencer la marche.

Morphologie de la molasse

CHOFFAT a accordé une attention constante au modelé de la surface rocheuse qu'il dénomme «plancher glaciaire», affirmant ainsi à juste titre qu'elle a été façonnée par le glacier. Avec sa précision habituelle, il l'a représentée dans ses profils, illustrée par des photos, et quand les chantiers lui en donnaient la possibilité, par des isohypses équidistantes d'un mètre, sur des plans à grande échelle comme celui de la figure 1.

La molasse affleure au fond et sur les flancs des ravins ainsi que dans quelques cuestas. Ailleurs, elle est dissimulée par des matériaux meubles dont l'épaisseur excède rarement quelques mètres, sauf à l'aplomb des vallums et dans la zone littorale W encombrée d'alluvions. Sous cette couverture, on s'attend à découvrir un relief comparable à celui du modelé gla-

ciaire classique, avec ses buttes émoussées, ses roches moutonnées, etc. Il existe bien de telles formes, mais peu nombreuses, comme les deux éminences arrondies et les larges couloirs de la moitié gauche de la figure 1. En dehors de ces cas particuliers, la réalité est bien différente. C'est la zone monoclinale W qui nous réserve la surprise. De très nombreux chantiers y ont dégagé presque partout, dans la succession des couches alternativement résistantes et vulnérables, des têtes de bancs anguleuses, étagées sur les versants comme des marches d'escaliers, selon l'expression de CHOFFAT. Quelques-unes, les plus prononcées, émergent de la moraine sous forme de petites cuestas plus ou moins émoussées par l'altération atmosphérique de la roche. Les autres y sont noyées et ne déterminent que de faibles ressauts ou passent inaperçues en surface.

Ainsi les profils de la figure 2, dont les tracés sont indiqués sur la planche, révèlent le modelé molassique du versant qui s'abaisse du plateau supérieur jusqu'au niveau de Renens. Les têtes de bancs supérieures, hautes d'une dizaine de mètres, déterminent le relief en gradins si caractéristique des hauts de Prilly et de Jouxens. Les autres ne créent que de faibles ondulations sur la surface topographique. Une morphologie analogue se retrouve sur le plateau du CHUV où les grands chantiers récents ont permis de reconstituer le profil molassique de la figure 3, sous une couche morainique relativement épaisse.

Pour observer avec tant de précision une telle morphologie, il faut des circonstances exceptionnelles. Un autre chantier a permis de le faire, le creusement de la tranchée du gazoduc qui traverse le Gros-de-Vaud de la vallée de l'Orbe à celle de la Broye. M. MARC WEIDMANN, qui a suivi ces travaux avec assiduité, a pu constater par endroits l'existence de têtes de bancs ensevelies dans la moraine (communication orale). J'ai eu moi-même l'occasion d'en observer de pareilles dans un chantier proche de mon domicile.

PHILIPPE CHOFFAT s'est appliqué à dessiner scrupuleusement ces têtes de bancs sur tous ses profils à grande échelle (fig. 1, 3, 9, 12 et 13) et à en fixer l'image sur ses photos (1 et 2). On y distingue la mise en relief des niveaux résistants, le retrait des intercalations marneuses et, dans l'ensemble, un profil tranchant plus prononcé que dans les formes analogues du relief d'altération et sans rapport avec celui des buttes glaciaires. Choffat insiste sur le fait que leurs talus ou leurs escarpements ne sont jamais encombrés, à leur base, d'éboulis ou de produits d'altération; c'est toujours de la moraine qui y est appliquée, comme on peut le vérifier sur les figures et les photos 1 et 2. Cette remarque est importante; elle prouve que ce relief n'est pas le simple héritage d'un modelé antérieur conservé sous la moraine, mais que le glacier est intervenu dans son façonnement. Nous verrons de quelle manière dans le paragraphe sur l'érosion.

En définitive, à part la nature des résidus, la morphologie submorainique de la molasse ne diffère pas fondamentalement du relief habituel des roches sédimentaires monoclinales, caractérisé par l'alternance de têtes de bancs

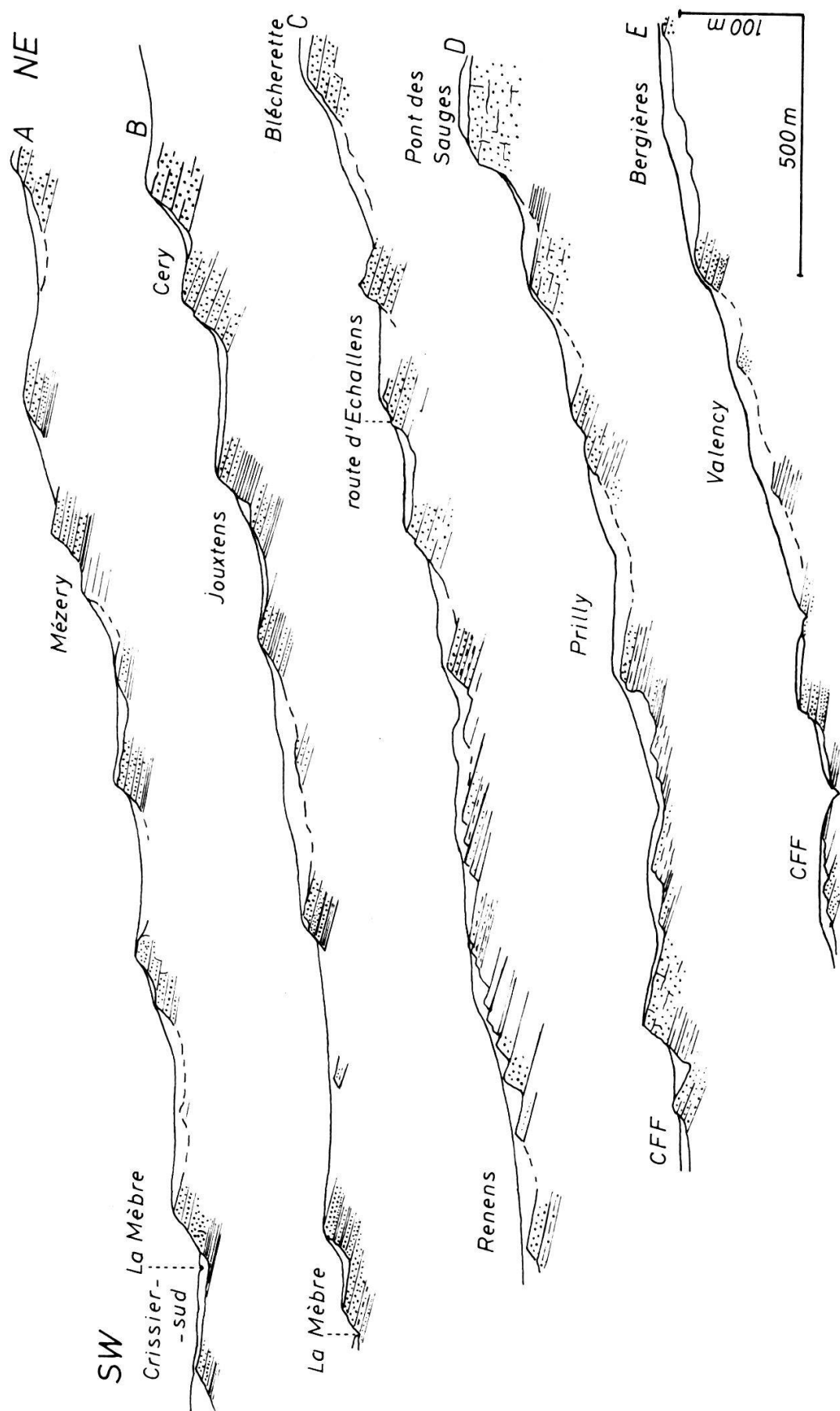


Fig. 2. - Profils molassiques du versant Renens-Prilly.

plus ou moins saillantes et de sillons de largeur variable. Toutefois dans notre cas, le glacier a laissé plusieurs empreintes spécifiques. La crête et le front des têtes de bancs portent la marque d'une action de démolition dont le mécanisme sera examiné plus loin, et leur dos possède des surfaces polies et striées par l'abrasion, des pavages irréguliers dus à la fragmentation des bancs de grès par la friction glaciaire (fig. 4), ainsi que d'autres dérangements.

Moraine molassique

Entre la molasse et la moraine alpine, riche en éléments erratiques, s'intercale par endroits un matériau marneux, le «*matelas*» de CHOFFAT. Il s'agit d'une sorte de bouillie de marnes d'origine molassique, associées à des sables provenant de la mouture des grès, et renfermant des fragments et des blocs de grès à cassures fraîches (photo 1). Elle paraît s'être déposée à sec car on n'y observe aucune trace de remaniement. Il en existe aussi une variété plus rare, mince et litée par le passage du glacier, renfermant des débris couchés et alignés horizontalement.

Les cailloux erratiques y sont rares ou absents, sauf exceptionnellement dans la partie supérieure où le passage à la moraine alpine est parfois graduel. Pourtant sur les profils et dans le relevé des sondages, la limite entre les deux terrains est généralement nette, et le mélange entre les deux n'est signalé qu'une seule fois. Enfin, en quelques points, cette moraine repose sur un mince coussin de la variété alpine, intercalé entre elle et la molasse.

Les analyses granulométriques ont démontré que ces marnes et les grès qu'elles renferment proviennent de séries molassiques peu éloignées. Ces matériaux arrachés au substratum par le glacier, pétris, déplacés et déposés par lui, répondent à la définition de la moraine de fond. Nous les appellerons donc *moraine molassique* pour les distinguer de la moraine habituelle, alpine. CHOFFAT en a constaté la présence dans beaucoup de fouilles et de forages. Elle y forme parfois une couche continue d'épaisseur variable (fig. 5); mais la plupart du temps elle s'accumule contre les têtes de bancs et à leur pied, dans des dépressions pièges (fig. 12, photo 1). Elle pénètre aussi dans les crevasses et les fissures des bancs de grès (fig. 10, c).

Comme on vient de le dire, la moraine molassique et dans une moindre mesure la moraine alpine renferment des blocs de grès anguleux ou peu émoussés, isolés, alignés (fig. 12) ou groupés (fig. 5), ou encore superposés. Dans plusieurs cas, l'analyse calcimétrique a permis d'identifier le banc jamais très éloigné, dont ils se sont détachés. Ainsi ceux de la figure 12 proviennent de la petite paroi voisine; un autre, qui n'a pas été représenté, gît dans un bain de moraine molassique, à 38 m de son banc d'origine et au même niveau. Certains ont tracé sur leur substratum des rainures de même direction que les stries glaciaires, preuve qu'ils ont été simplement entraînés par le glacier sans être roulés. Toutefois les plus éloignés commencent à se désagréger.

Gros blocs

Parmi ces blocs, CHOFFAT en signale d'énormes, grandes plaques ou volumineuses masses de grès, en position anormale sur les marnes molassiques ou immergées dans la moraine, d'où le nom de «radeaux» qu'il leur a donné (photo 3). Leur point de départ, lointain peut-être, n'a jamais pu être déterminé. La dalle de l'avenue de Morges, quartier occidental de Lausanne, représentée de profil sur la figure 6, mesure 20 m de long, quelques mètres de large, 1 à 5 m d'épaisseur. La photo 4 en montre la proue. Sa face supérieure a subi l'abrasion glaciaire et sa face inférieure porte des cannelures

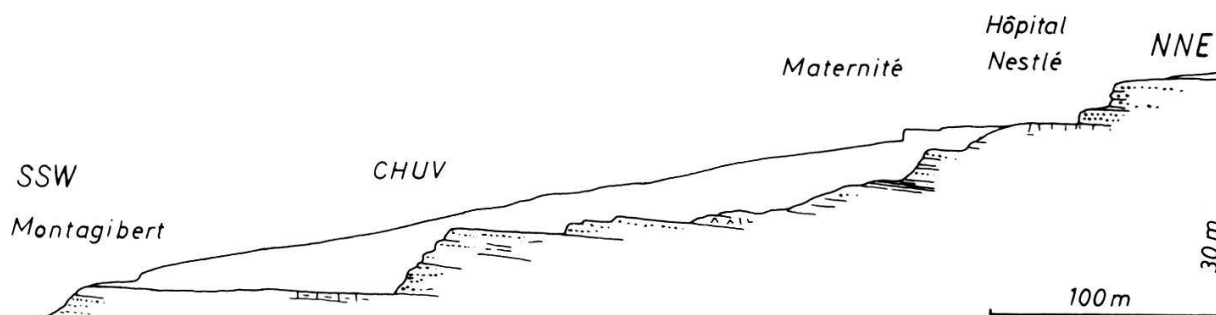


Fig. 3. - Lausanne. Profil de la molasse dans le quartier des hôpitaux.

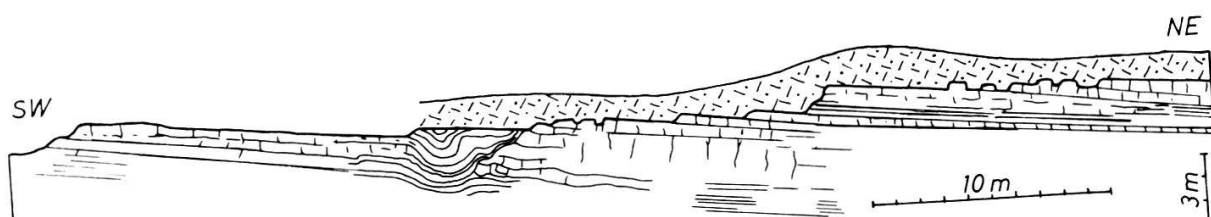


Fig. 4. - Renens. Accidents de la surface molassique.

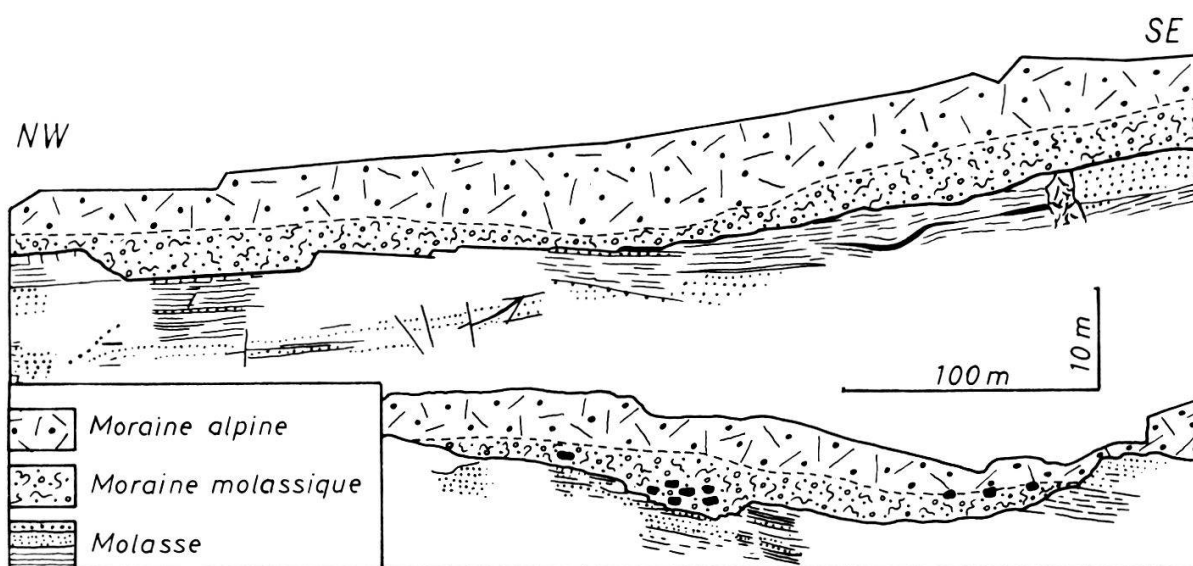


Fig. 5. - Prilly. Moraine alpine et molassique.

imprimées au cours de son mouvement de reptation, analogues à celles de la photo 5, qui appartiennent au radeau de Bellefontaine à Lausanne. Les marnes molassiques malaxées sur lesquelles repose la première de ces dalles ont été injectées dans les fissures de sa face inférieure comme le montre la photo 6, et forment en avant un bourrelet de compression qui encapuchonne la proue du bloc de grès.

Celui de l'usine Bobst à Prilly est particulièrement impressionnant par son volume, près de 300 m³. Son éperon représenté sur la figure 7 chevauche et écrase un paquet de marnes molassiques.

Autour de ces radeaux, les matériaux mous qui les renferment sont perturbés par des surfaces de cisaillement lustrées et concaves, disposées concentriquement autour des blocs comme les parois d'une baignoire. Il en existe latéralement, dessous, en avant, en arrière (photo 7), et il peut y en avoir plusieurs systèmes emboîtés les uns dans les autres comme des pelures d'oignons. Longues parfois de plusieurs mètres, elles portent de fines stries, transversales par rapport à l'axe du bloc. L'origine de ces «*coques*» – c'est le nom que leur donne CHOFFAT – s'explique par le comportement des blocs immergés par la pression glaciaire dans des masses molles, morainiques ou molassiques, où cet enlèvement a engendré un reflux latéral, suivant des surfaces de rupture cylindriques, comparables aux remous et au sillage d'une embarcation.

Erosion glaciaire

L'œuvre de PHILIPPE CHOFFAT est celle d'un géomètre. Riche en observations et en mesures rigoureuses, elle nous fournit les éléments d'une étude du mécanisme de l'érosion exercée par le glacier sur la molasse.

L'*abrasion* est le procédé érosif le plus évident, par lequel la glace, armée de fragments minéraux, use les surfaces rocheuses, les polit, y trace des stries et des cannelures. CHOFFAT cite nombre de ces «*miroirs*» – c'est son expression – localisés sur le dos des têtes de bancs. L'abrasion est sans doute responsable aussi du modelé des buttes et des sillons de la figure 1 et de l'excavation de quelques cuvettes de surcreusement, et c'est elle qui a alimenté en résidus argileux et sableux la matrice de la moraine molassique.

Fissuration et injection. Le glacier n'agit pas seulement par friction, mais également par sa pression hydrostatique et sa poussée dirigée. Or, en raison du mouvement de la glace, de sa viscosité et des accidents morphologiques du plancher rocheux, ces forces appliquées à la molasse n'ont pas partout la même valeur. A chaque rupture de pente, en particulier à l'aval des têtes de bancs, il doit se produire une légère dépression facilitant le déplacement des fragments rocheux. C'est ce que CHOFFAT appelait l'appel au vide. Des cavités existent effectivement à l'aval des bosses sous les glaciers actuels, où plusieurs auteurs les ont signalées (VIVIAN, 1975).

Entre également en ligne de compte la fissuration, sur l'importance de laquelle TRICART et CAILLEUX (1962) ont insisté. Des diaclases d'origine

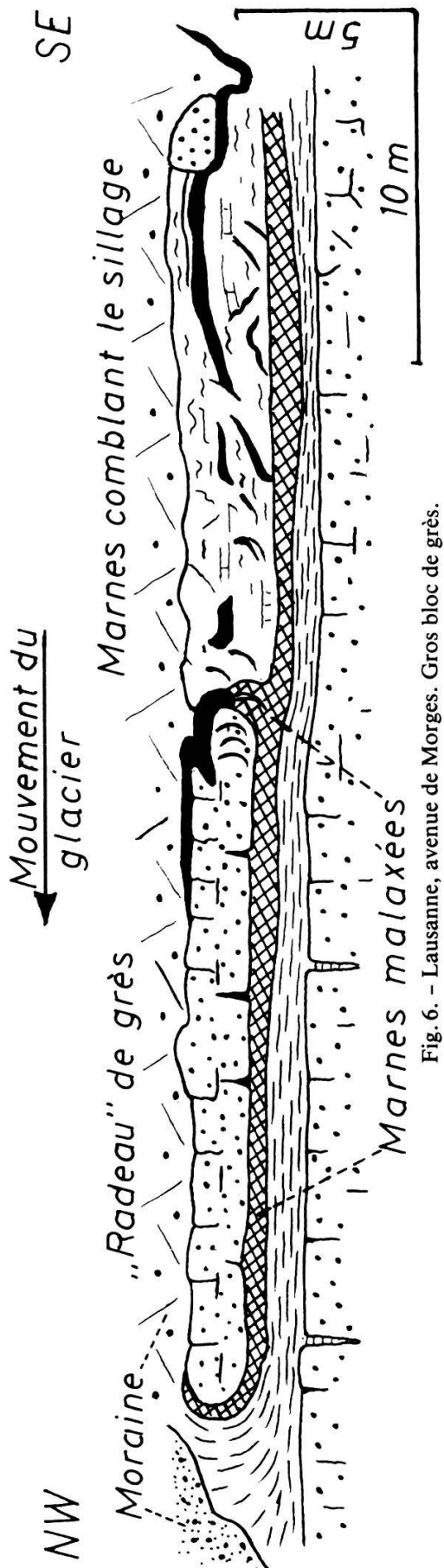


Fig. 6. - Lausanne, avenue de Morges. Gros bloc de grès.

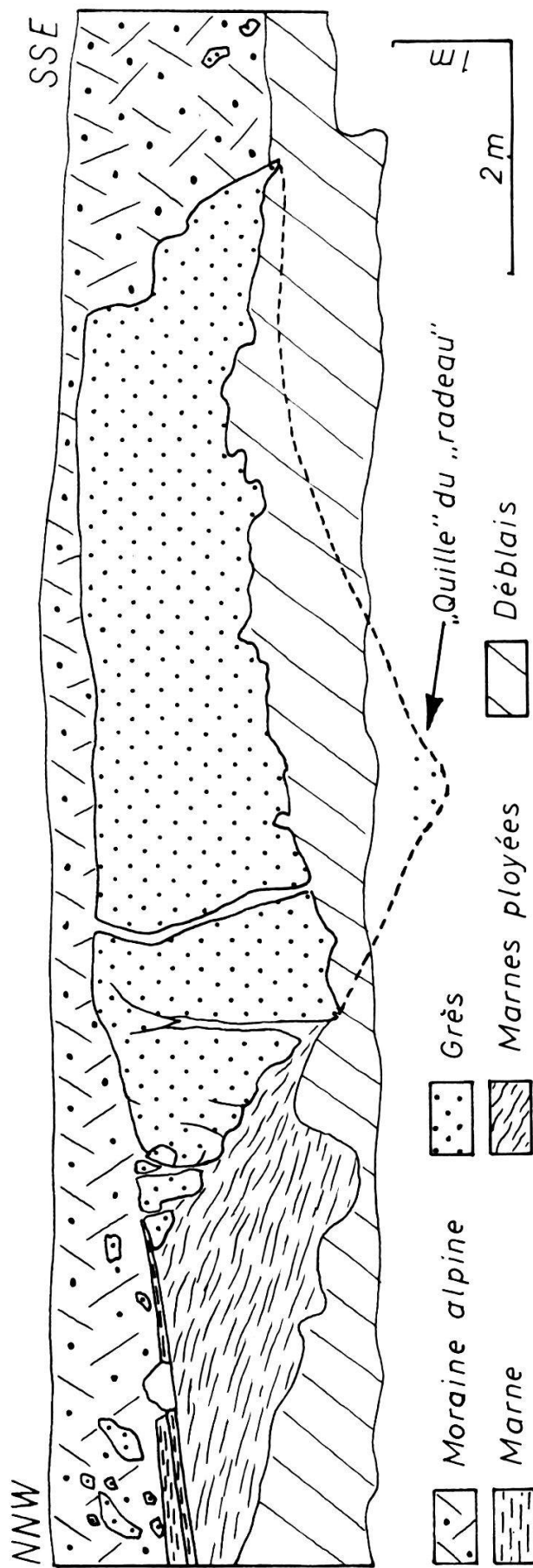


Fig. 7. - Prilly. Proue d'un gros bloc (d'après photo).

tectonique, plus ou moins perpendiculaires à la stratification, fracturent les couches dures de la molasse dans toutes les directions. Il existe aussi des fentes béantes, étroites et profondes, comme celles de l'avenue de Morges à Lausanne, larges de 15 cm, profondes de 2 à 3 m. Localisées dans d'épais bancs de grès, elles se ferment en haut et en bas dans des niveaux marneux ou gréseux, qui compensent l'ouverture de la fente par une fissuration diffuse ou des tassements latéraux.

Notre observateur a remarqué que ces fentes ouvertes sont généralement parallèles au versant. On peut donc supposer qu'elles ont été élargies par gravité et par la pression du glacier dans la direction de moindre résistance. C'est bien ce qui apparaît sur la figure 8; la fente qui y est représentée, et qu'illustre d'autre part la photo 8, sépare de son banc-mère un gros bloc de grès qui ébauche un coulissage en direction du versant. Cette explication rejoint l'idée de TRICART et CAILLEUX (1962) suivant laquelle le poids d'un inlandsis aurait pu multiplier les diaclases et même les ouvrir.

Toutefois, la plupart des fentes ouvertes sont bourrées de terrains meubles, originaires des marnes molassiques ou morainiques sus- ou sous-jacentes. Les propriétés de ces matériaux de remplissage, leur compacité, leur structure parfois fluidale visible sur la photo 6, ainsi que les fines stries tracées sur leurs épontes, montrent qu'ils ont été injectés par le haut ou par le bas, par l'énorme surcharge glaciaire, seule puissance capable d'exercer une telle pression (fig. 9 et 10; photos 9, 10 et 11).

Les couches marno-argileuses sont donc les niveaux sensibles de la molasse. Sous l'effet du poids de la glace, elles se déforment, changent d'épaisseur, se laminent et peuvent même s'interrompre (fig. 9). Les matériaux plastiques qui les constituent fluent en direction des zones de moindre résistance et pénètrent dans les fissures en les élargissant. La cassure d de la figure 10 prouve que ce phénomène n'est pas localisé en surface. Un cas extrême est révélé par la figure 11, celui d'une épaisse assise gréseuse complètement disloquée par l'éclatement d'un niveau marneux sous-jacent.

Deux de ses propriétés rendent donc la molasse particulièrement vulnérable à l'emprise du glacier: la fissuration qui en affaiblit les bancs gréseux et les niveaux marneux qui se comportent dans la masse rocheuse comme une sorte de «levain», sous l'effet de la compression.

Les fissures et les marnes n'ont pas partout les mêmes effets. Sur le dos des têtes de bancs, la poussée du glacier peut déranger les moellons délimités par le réseau de diaclases ou même y déchausser et en arracher des blocs (fig. 4). Sa pression est également capable de briser des niveaux de calcaire gréseux à travers une couche de marne, superficielle (fig. 10a). Enfin la figure 4 illustre le cas exceptionnel du plancher molassique ployé localement sur plusieurs mètres d'épaisseur, en raison peut-être d'une faiblesse tectonique initiale.

Débitage. L'évolution morphologique des têtes de bancs, avec leur brusque rupture de pente et leur escarpement, s'explique ainsi dans la région

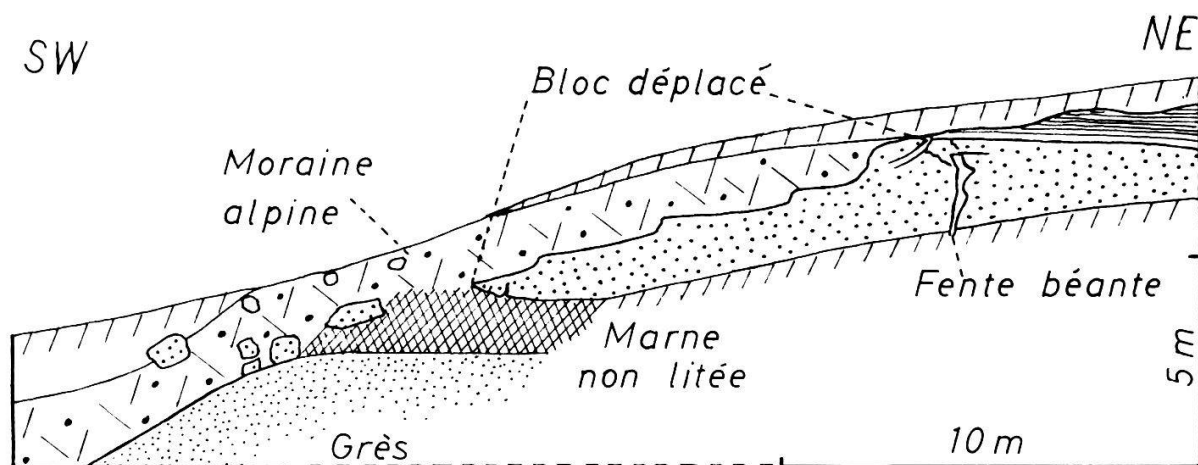


Fig. 8. - Jouxens. Rupture d'un banc de grès.

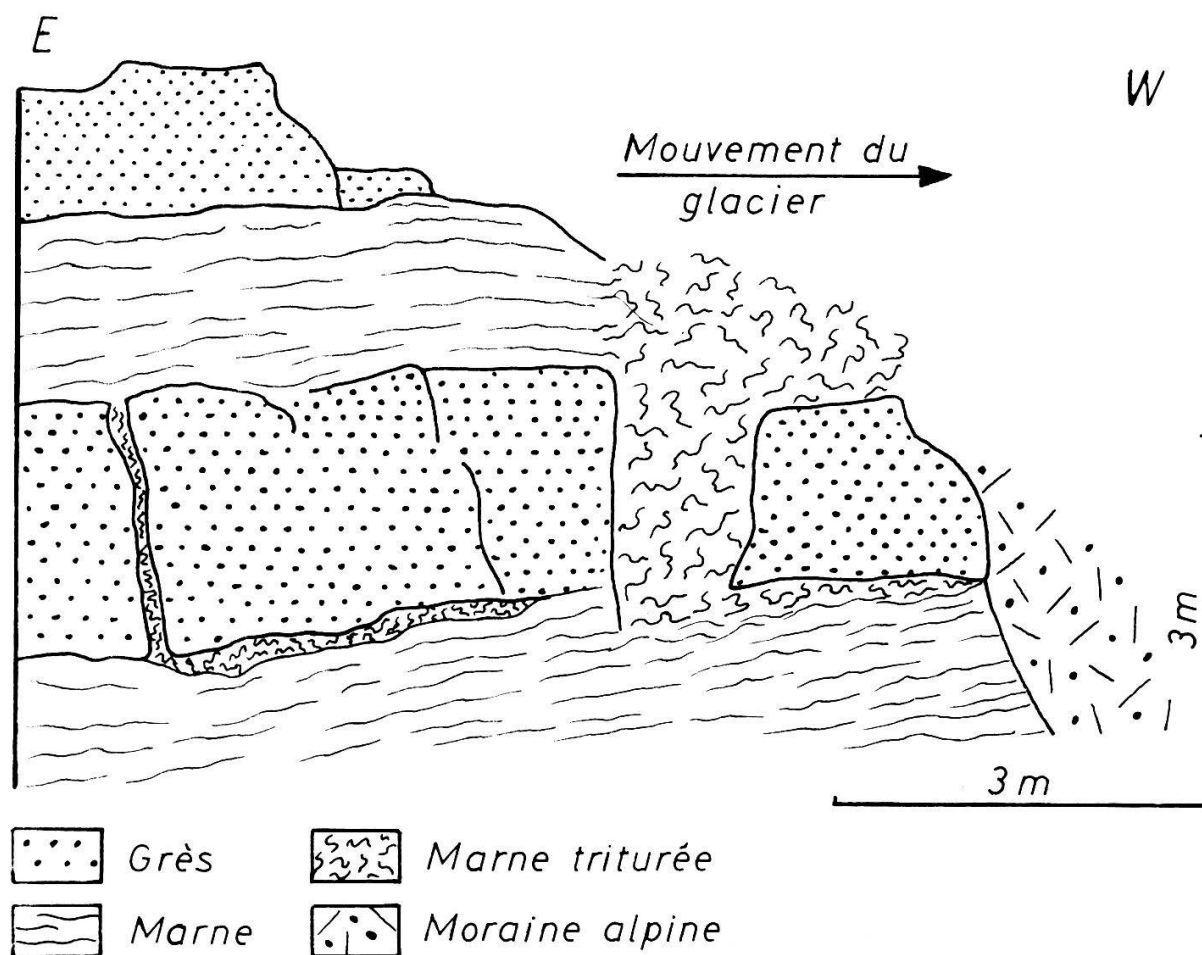


Fig. 9. - Prilly. Dislocation d'une tête de banc.

de Renens d'après PHILIPPE CHOFFAT: «Sur un plancher molassique fissuré N13°W, cheminant dans une direction N22°W des glaces inférieures qui attaquent cette fissuration sous un angle aigu. Les blocs fendus sont arrachés de leurs bancs-mères et dérapent vers le large (...). Il faut donc qu'une

composante du mouvement des glaces éloigne le bloc séparé parallèlement à lui-même et perpendiculairement à la poussée générale (...). Cela implique qu'une masse pâteuse s'insère entre lui et son banc-mère.»

La coïncidence, fortuite à Renens, de la direction des têtes de bancs, des diaclases et de l'écoulement de la glace, constitue peut-être un facteur favorable à l'évolution de ce relief, sans pour autant en conditionner l'existence. On le constate d'ailleurs dans les chantiers du CHUV (fig. 3) où les stries glaciaires sont obliques, voire perpendiculaires aux têtes de bancs. Au demeurant, l'orientation de ces dernières est déterminée géométriquement dans tous les modèles, par l'intersection du plan de stratification et de la surface du versant, dont l'orientation, il est vrai, a pu être influencée par celle des diaclases. Si la surface est peu inclinée ou horizontale comme dans le Gros-de-Vaud, *cuestas* et *buttes* suivent donc la direction tectonique (AUBERT, 1981).

Ces réserves n'infirment d'aucune manière l'explication de CHOFFAT. Ses dessins et ses photos démontrent avec toute la clarté désirable comment évolue une tête de banc par le processus du *débitage*. On entend par là l'extraction par le glacier de fragments et de blocs aux dépens de bancs rocheux. Certains auteurs comme BIROT (in VIVIAN, 1975, p. 386) en nient l'existence; SUDGEN et JOHN (1976), TRICART et CAILLEUX (1962) en admettent l'efficacité sur des roches très fissurées, tandis que FLINT (1971) lui attache une importance primordiale tout en reconnaissant que son mécanisme n'est pas clair.

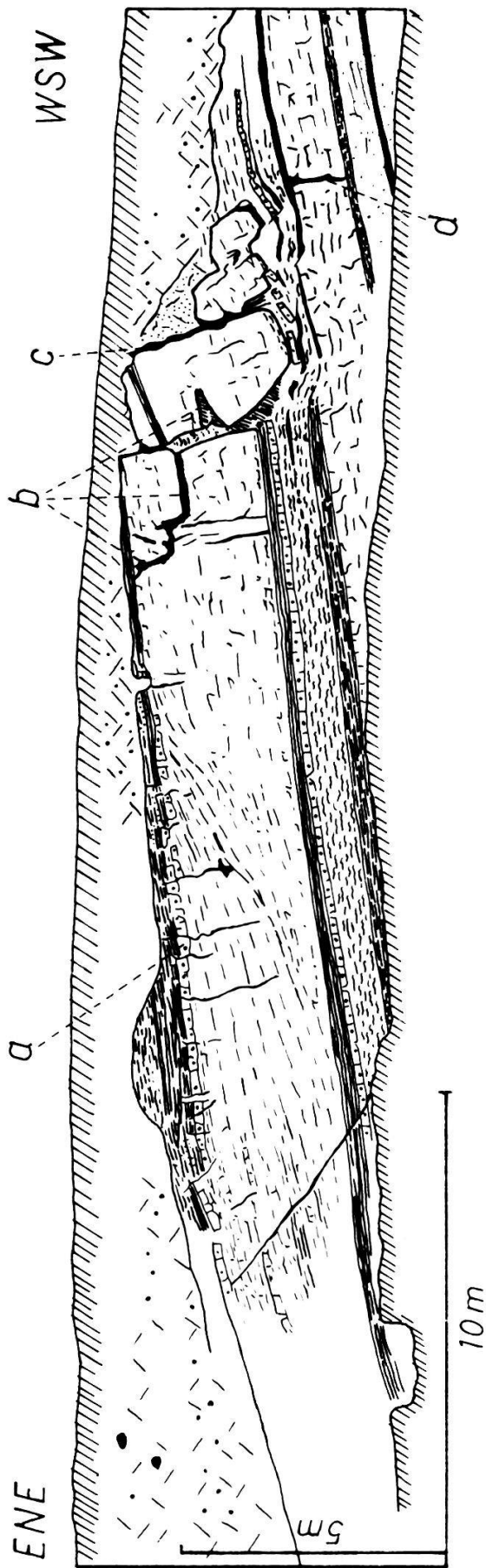
Dans le cas qui nous occupe, celui de la molasse, sa contribution au façonnement des têtes de bancs ne fait pas de doute; la présence dans la moraine de blocs de grès morphologiquement intacts en apporte la preuve et les illustrations suivantes en révèlent les processus:

Ouverture des diaclases (fig. 8, photo 8). En ouvrant certaines diaclases convenablement orientées, le glacier prépare la dislocation des bancs de grès.

Injection des marnes (fig. 9, 10, photos 9, 10, 11). Comprimées par la pression glaciaire, les marnes plastiques morainiques et molassiques pénètrent dans les fissures et les élargissent. En profondeur elles contribuent ainsi à affaiblir la série molassique et en surface à libérer des blocs (fig. 9; blocs b de la fig. 10).

Evacuation des blocs. La rareté des moellons en train de se détacher de leur banc d'origine, relevée par CHOFFAT, s'explique par le fait qu'ils participent alors au mouvement glaciaire. Il s'agit donc d'une opération rapide, beaucoup plus brève que la lente préparation préalable. Aussi la figure 13, décalquée d'une photo, revêt-elle un intérêt exceptionnel en nous faisant assister à la dislocation de bancs de grès, avec des blocs détachés du banc-mère, puis écartés de plus en plus les uns des autres.

Dépôt (fig. 12). Les blocs traînés par le glacier sont abandonnés dans la moraine molassique.



a. Calcaire gréseux brisé
b. Marne molassique injectée

c. Marne morainique injectée

d. Marne molassique injectée par le haut et par le bas

Fig. 10. - Renens. Dislocation d'une tête de banc.

Pourtant le débitage peut revêtir une forme de démolition plus violente. La figure 10, par exemple, représente un épais banc de grès disloqué en plusieurs masses effondrées sous le poids de la glace et écartées les unes des autres par la pression des marnes interstitielles. Un autre cas est reproduit sur la figure 11 avec cette différence que dans cet exemple le mouvement de la glace heurtait de front le talus de molasse.

Il est clair qu'avant l'occupation glaciaire il existait déjà des têtes de bancs modelées par les phénomènes d'altération. Une fois recouvertes de glace, elles n'ont pas disparu; au contraire, elles sont restées actives. Usées dorsalement par l'abrasion, taillées frontalement par le débitage, elles ont continué à évoluer morphologiquement en reculant parallèlement à elles-mêmes. C'est à la même conclusion que j'étais parvenu à propos des têtes de bancs du karst jurassien (AUBERT, 1969). Les *cuestas* du relief normal doivent aussi suivre une évolution analogue. Il s'agit donc d'une loi générale du modelé des roches sédimentaires monoclinales, imposée par leur stratification et la perpendicularité de leurs diaclases.

Sédimentation glaciaire

Nous avons vu qu'il existe deux sortes de moraines, une *moraine alpine* renfermant des cailloux et des blocs erratiques emballés dans une matrice en partie d'origine locale (GASSER et NABHOLZ, 1969; PETERS, 1969), et une *moraine molassique* composée presque exclusivement de matériaux autochtones, sans aucune trace de remaniement par des eaux de fusion (fig. 5, 12, 13; photo 1).

La première constitue une couche supérieure presque continue, ainsi que quelques lentilles inférieures appliquées à la molasse. La seconde s'intercale entre les deux. Son intérêt particulier réside dans le fait que le substratum rocheux qui l'a alimentée diffère pétrographiquement de la charge du glacier, conditions particulièrement favorables pour envisager les problèmes qui se posent au sujet de la moraine de fond.

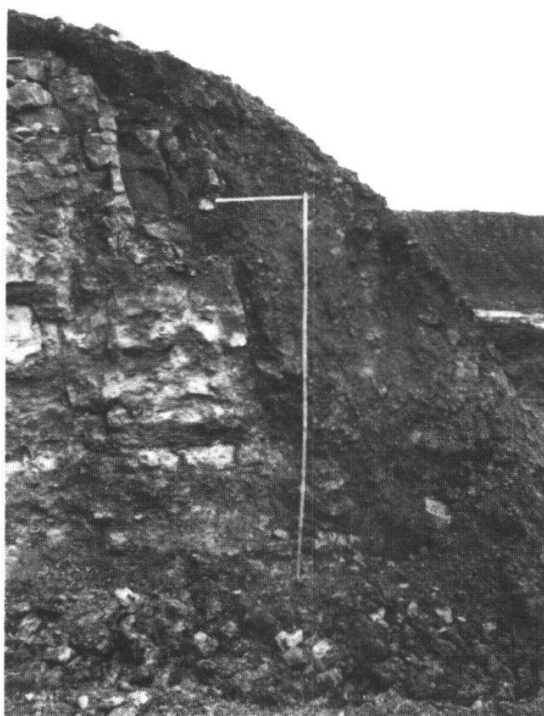
Les illustrations et les descriptions de CHOFFAT nous ont montré comment les matériaux arrachés à la molasse par l'abrasion et le débitage, puis triturés par le glacier, s'accumulaient dans les dépressions voisines, où les rejoignaient parfois de gros blocs de grès et exceptionnellement quelques éléments alpins. CHOFFAT pensait que cette moraine était entraînée d'une façon continue par le mouvement de la glace. Mais les cannelures qu'y ont tracées les blocs déposés tardivement prouvent au contraire qu'elle était immobile, du moins pour un temps, car périodiquement le glacier devait la remettre en mouvement au gré de ses changements de direction, de vitesse ou de puissance. Les observations que j'ai faites au glacier du Trient, en Valais, s'accordent avec cette façon de voir. Alors qu'en temps normal cet appareil ne libère que quelques blocailles à l'extrémité de sa langue, un certain été, on le vit dégorger de volumineux paquets de moraine de fond.

LÉGENDES DES PHOTOS

1. Renens. Banc de grès dur et moraine molassique. La règle mesure 1 m.
2. Renens. Tête de banc et moraine. Règle de 1 m.
3. Lausanne, Bellefontaine. Gros bloc enfoncé dans les marnes molassiques.
4. Lausanne, avenue de Morges. Proue du bloc de la figure 6.
5. Lausanne, Bellefontaine. Cannelures de la base d'un gros bloc.
6. Lausanne, avenue de Morges. Marnes injectées dans une fissure de la face inférieure du bloc de la figure 6. Règle de 1 m.
7. Prilly, usine Bobst. Surface de cisaillement enveloppant un gros bloc.
8. Jouxens. Fissure ouverte de la figure 8.
9. Renens. Limon injecté dans un réseau de fissures.
10. Renens. Fentes verticales remplies d'argile plastique. La règle mesure 30 cm.
11. Renens. Pénétration de matériaux meubles sus-jacents dans la fissure d'un banc de grès.



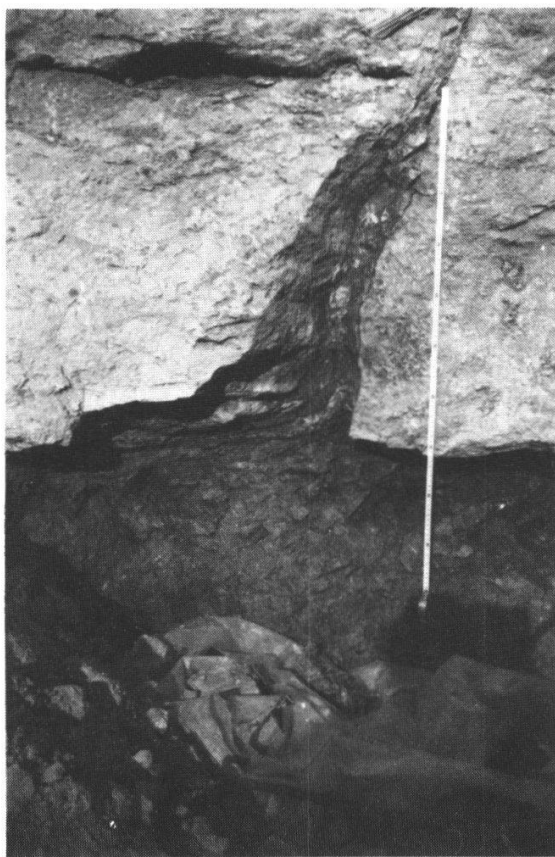
1



2



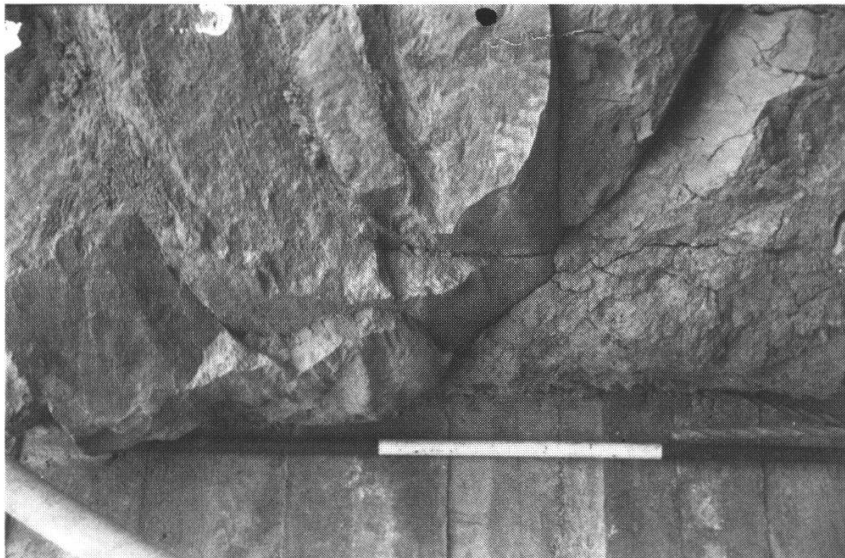
3



6



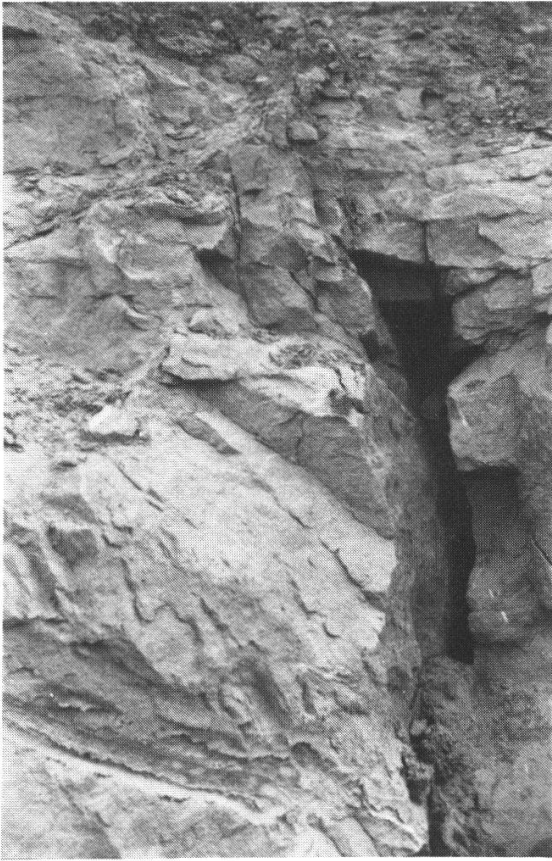
4



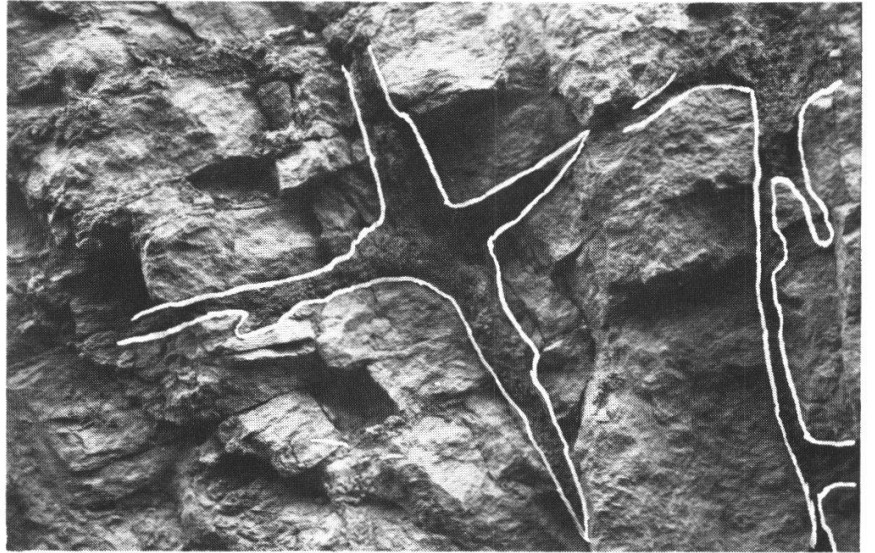
5



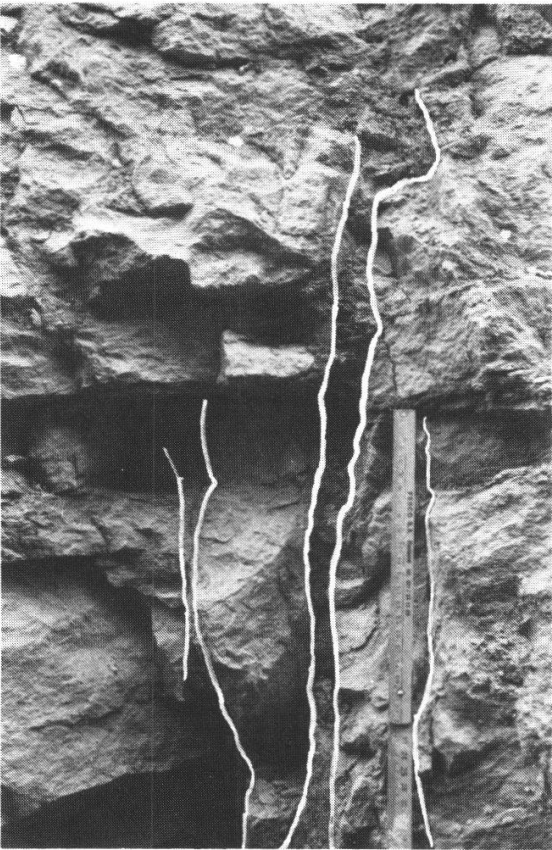
7



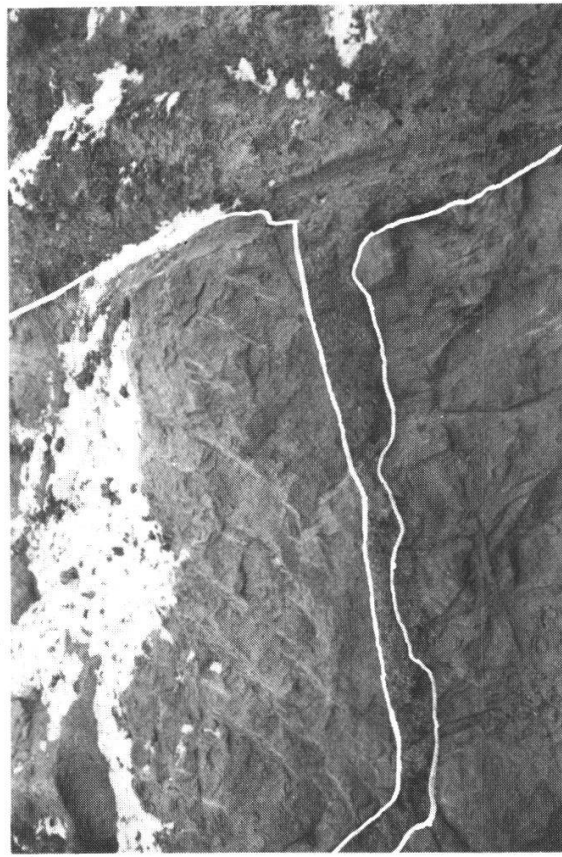
8



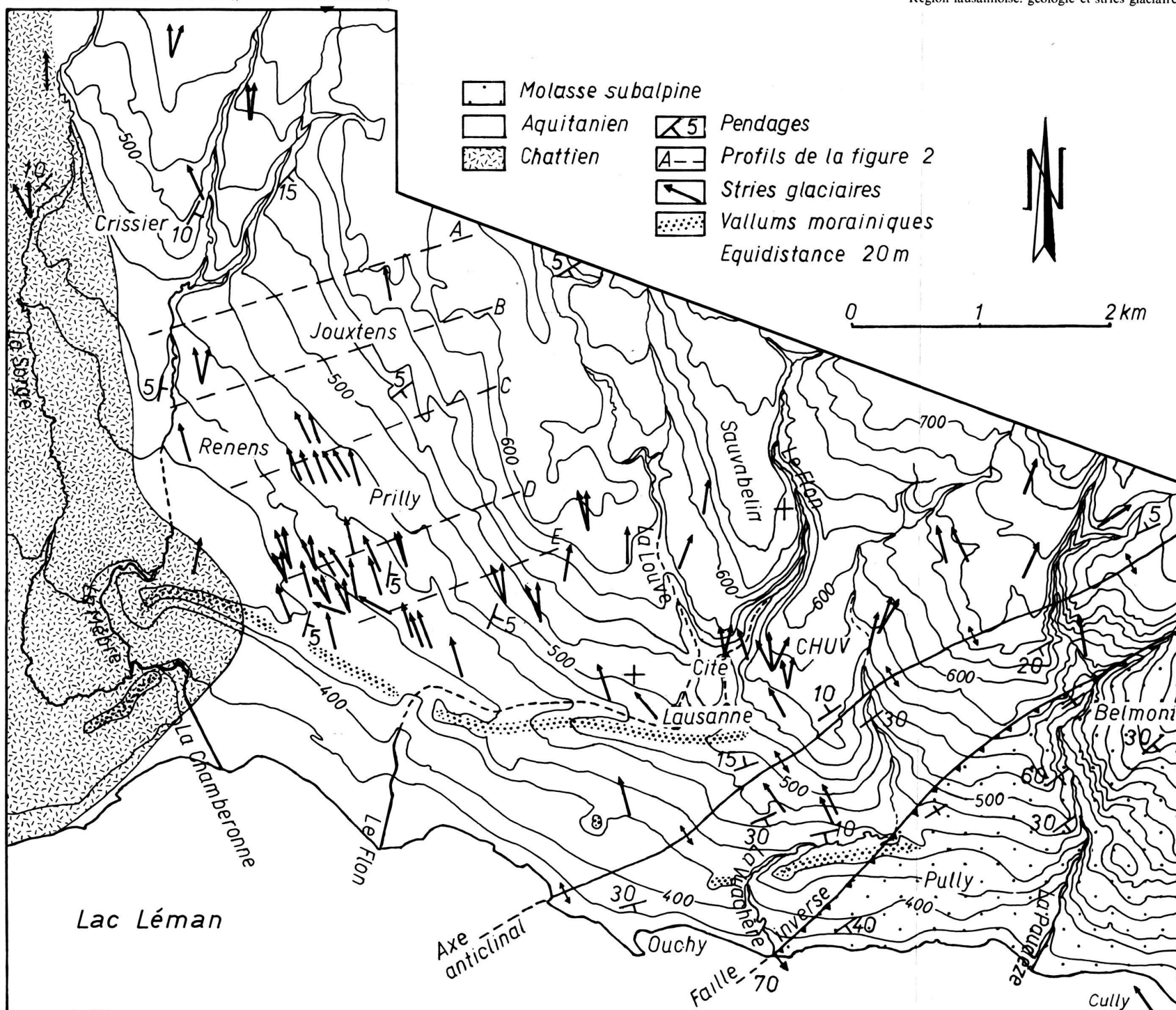
9



10



11



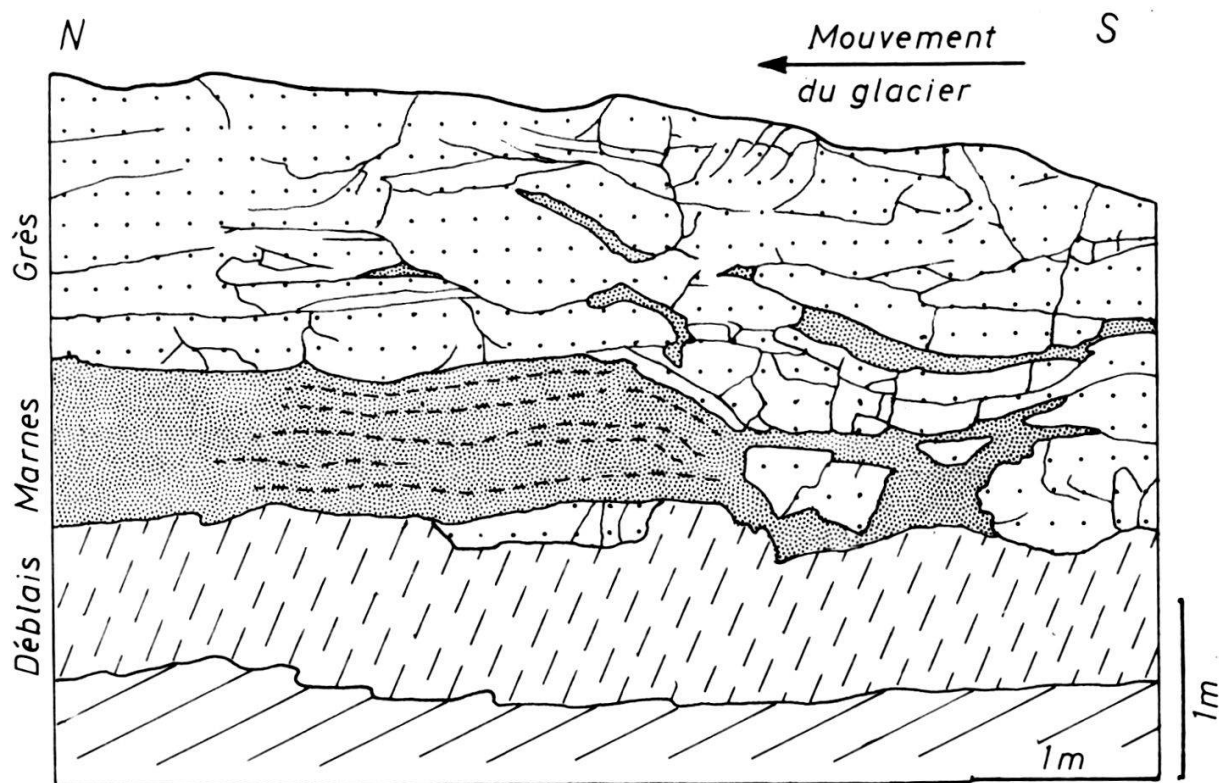


Fig. 11. – Lausanne, CHUV. Dislocation d'un banc de grès par l'éclatement d'un niveau marneux (d'après photo).

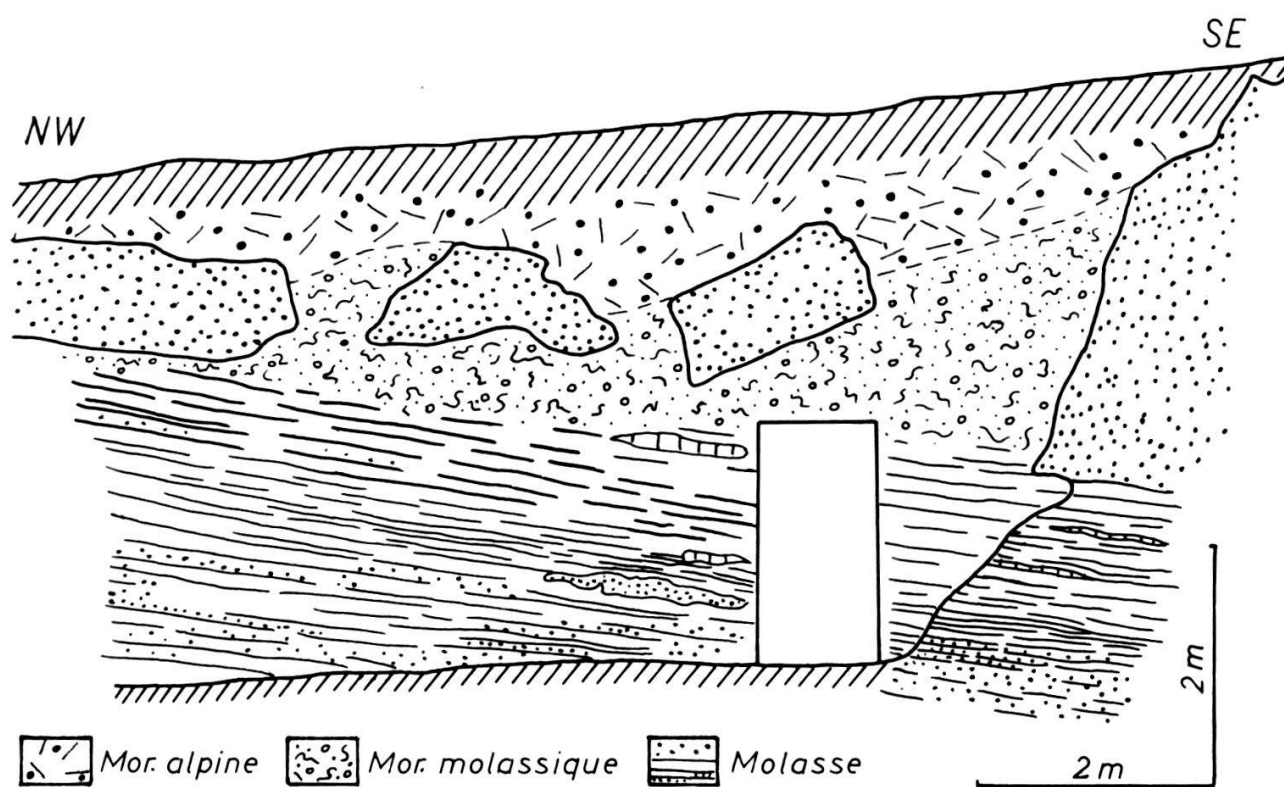


Fig. 12. – Renens. Blocs détachés d'une tête de banc.

Ce fait peut surprendre quand on sait qu'il n'en existe guère sous les glaciers alpins actuels, comme l'ont révélé les galeries d'exploration.

La superposition de trois niveaux morainiques implique évidemment la succession d'autant d'épisodes distincts de l'activité glaciaire, qui peuvent trouver place dans une hypothèse, dont le caractère insolite ne m'échappe pas!

Quel était donc ce glacier, responsable de la moraine molassique, capable d'éroder la molasse et d'en déposer les résidus à sec, sans y ajouter sa propre charge de matériaux alpins? Un *glacier polaire* aurait rempli ces conditions. Sa température inférieure à zéro degré aurait en effet exclu toute fusion au contact de la roche comme c'est le cas pour les glaciers tempérés, et sa glace profonde, rigide et sèche, n'aurait pu libérer que très difficilement les galets qu'elle retenait dans sa masse congelée. En revanche, la moraine alpine inférieure et supérieure n'a pu être déposée que par un *glacier tempéré* dont la température, dans toute sa masse, est égale au point de fusion.

Ainsi, les observations de CHOFFAT sur les formations morainiques nous amènent à envisager l'hypothèse selon laquelle le glacier de piedmont descendu des Alpes aurait été tempéré au début de la glaciation, polaire ensuite pendant la période la plus froide, puis de nouveau tempéré quand le climat devint moins rigoureux.

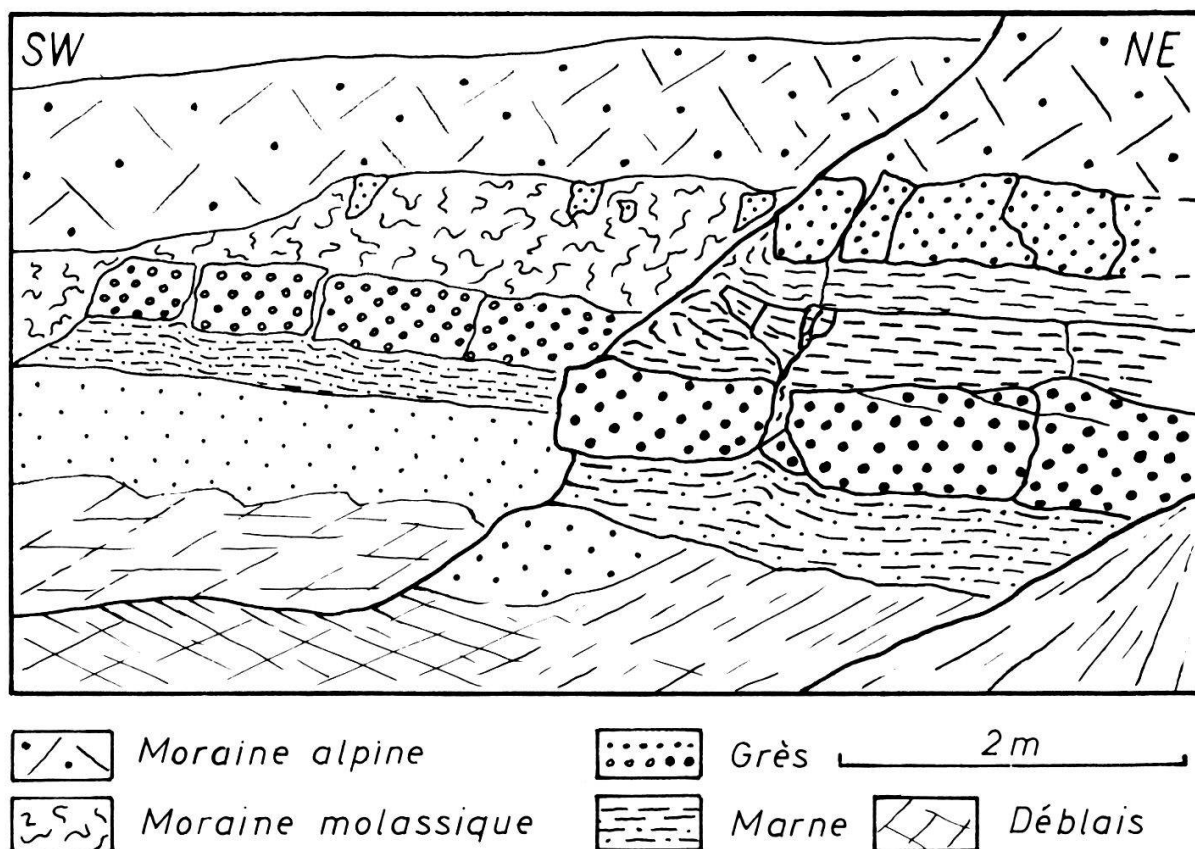


Fig. 13. – Renens. Débitage d'une tête de banc (d'après photo).

CONCLUSION

Un des mérites de PHILIPPE CHOFFAT est d'avoir découvert et décrit des faits originaux dissimulés et conservés sous la moraine, donc rarement ou jamais observés, à savoir le relief molassique façonné par le glacier, les dislocations subies par cette roche du fait de la pression glaciaire, et une variété de moraine de fond d'origine locale, sans éléments erratiques ou presque.

Un autre intérêt de ses recherches réside dans la nature des roches concernées. Alors que les travaux de morphologie glaciaire portent ordinairement sur des roches résistantes, granite, schistes cristallins, calcaire, etc., les siens s'appliquent à des grès jamais très durs et à des marnes souvent plastiques qui réagissent tout autrement à la friction glaciaire. C'est donc une nouveauté, mais il est clair que les conclusions que l'on peut en tirer ne sont pas immédiatement applicables aux autres cas.

Dans l'ensemble, il apparaît que les têtes de bancs et les cuestas héritées de la période antérieure ont continué d'évoluer et de reculer une fois recouvertes par la glace, sous l'effet de l'abrasion s'appliquant à leur dos et du débitage s'exerçant sur leur tranche. Sur ce dernier point précisément, CHOFFAT nous fait assister en quelque sorte au débitage, dont le mécanisme est par ailleurs encore mal connu. Le rôle déterminant y est joué par les diaclases et par les niveaux de marne plastique, que la pression de la glace comprime, déforme et injecte. Dans les bancs gréseux, on voit alors des fissures s'ouvrir, des argiles y pénétrer, des blocs s'écarter et finalement s'éloigner, entraînés par le mouvement du glacier, et rejoindre la moraine, en particulier la variété monogénique dont ils forment le squelette.

Dans cette dernière, comme aussi dans les marnes en place, s'enlisent parfois d'énormes dalles de grès encadrées par des surfaces de cisaillement concentriques qui se prolongent dans leur sillage.

Ces phénomènes décelés par CHOFFAT apportent de nouvelles données au problème complexe de l'érosion glaciaire et de la sédimentation morainique. En revanche, ils en soulèvent d'autres en impliquant pour le glacier et pour son substratum molassique des propriétés difficilement conciliables entre elles et malaisées à placer dans le cadre de la glaciologie classique.

Le glacier en question a l'apparence d'un glacier polaire, sinon, s'il avait été de type tempéré, il aurait ajouté sa propre charge à la moraine molassique et n'aurait pu exercer sur les marnes une pression capable de les déformer, du moins si l'on admet que la pression des glaciers de ce genre ne peut dépasser deux bars (SUDGEN et JOHN, 1976).

D'autre part, la «fluidité» de ces marnes, l'immersion des gros blocs et leurs surfaces de cisaillement excluent, semble-t-il, l'existence d'un pergélisol.

Lors de son maximum, le glacier alpin était-il donc de type polaire et s'avancait-il sur un sol non gelé? Il faut bien, presque malgré soi, en considérer la possibilité puisque les faits sont là!

La rédaction de ce travail a été facilitée par M.M. WEIDMANN, directeur du Musée de Géologie de Lausanne, qui m'a confié les dossiers de PHILIPPE CHOFFAT et m'a procuré les éléments de la géologie lausannoise, et par M. J.-P. PORTMANN de Neuchâtel, auquel je dois de précieux renseignements bibliographiques et qui a bien voulu se charger de traduire le résumé en collaboration avec M. CHIFFELLE. A tous, j'exprime ici mes sentiments de reconnaissance.

Résumé. – Les observations de feu PHILIPPE CHOFFAT dans les chantiers de la région lausannoise ont découvert, sous la moraine alpine, des têtes de bancs de molasse en pleine évolution morphologique, ainsi qu'une variété de moraine de fond composée presque exclusivement de matériaux d'origine locale. Elles ont permis aussi de comprendre le mécanisme du débitage glaciaire de la molasse par l'ouverture des diaclases, l'injection des marnes plastiques et l'entraînement des blocs de grès.

Les conclusions que l'on peut en tirer sont pour le moins surprenantes: le glacier avait, semble-t-il, les propriétés d'un glacier polaire, alors que son substratum n'avait nullement celles d'un pergélisol.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT, DANIEL. 1969. – Phénomènes et formes du karst jurassien. *Ecl. geol. helv.* 62/2, 325–399.
- 1981. – Géomorphologie du Gros-de-Vaud. *Mém. soc. vaud. Sc. nat.* 17/2, 57–116.
- AUBERT, DENIS. 1981. – Les stades de retrait des glaciers du Haut-Valais. *Bull. Murithienne* 97, 101–169.
- BERSIER, A. 1953. – Notice explicative de la feuille Jorat de l'Atlas géologique au 1:25 000.
- CHOFFAT, PH. 1935. – De l'application de la téléphotographie en photographie d'exploration. Téléphotogrammétrie du Mont-Blanc. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 58, 293–308.
- FLINT, R.F. 1971. – Glacial and quaternary Geology. 1 vol. Wiley, New York.
- GASSER, U. et NABHOLZ, W. 1969. – Zur Sedimentologie der Sandfraktion im Pleistozän des schweizerischen Mittellandes. *Ecl. geol. helv.* 62/2, 467–516.
- JÄCKLI, J. 1962. – Die Vergletscherung der Schweiz im Würmaximum. *Ecl. geol. helv.* 55/2, 285–294.
- MASSON, H. et BAUD, A. 1974. – Stries et lunules glaciaires à Saint-Triphon (vallée du Rhône). *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 72/3, 141–154.
- PETERS, T. 1969. – Tonmineralogie einiger Glazialablagerungen im schweizerischen Mittelland. *Ecl. geol. helv.* 62/2, 517–525.
- SUDGEN, D.E. et JOHN, B.S. 1976. – Glaciers and Landscape. 1 vol. Arnold, London.
- TRICART, J. et CAILLEUX, A. 1962. – Le modelé glaciaire et nival. 1 vol. Sedes, Paris.
- VIVIAN, R. 1975. – Les glaciers des Alpes occidentales. 1 vol. Allier, Grenoble.

Manuscrit reçu le 15 juin 1983.