

## MOUVEMENTS DU SOL ET MORPHOGENÈSE

### INTRODUCTION

L'un des problèmes les plus simples, les plus évidents et les plus fondamentaux de la géographie est celui des volumes montagneux. Pourquoi y a-t-il, là, un relief saillant? Par extrapolation à partir de l'exemple frappant des volcans, l'homme a longtemps pensé que tout volume saillant résultait d'un soulèvement. Puis, dans le courant de l'Histoire, il est venu, par l'observation de l'érosion torrentielle, à admettre que ces mêmes volumes pouvaient n'être que des résidus, des masses épargnées par l'érosion différentielle. Enfin au XIX<sup>e</sup> siècle s'est fortifiée la conception classique selon laquelle il y eut, autrefois, des soulèvements géologiques, puis, dans un deuxième temps, attaque de ces volumes structuraux par l'érosion. Un progrès certain a d'ailleurs été réalisé lorsque l'on admit que l'érosion pouvait avoir travaillé simultanément aux soulèvements.

Mais ce que l'on était arrivé à admettre pour le passé géologique paraissait inadmissible pour le passé récent, et à fortiori pour le présent. Que les Alpes aient bougé juste après le Miocène, oui certes. Qu'elles se soient encore soulevées à la fin du Pliocène, oui, à la rigueur... Mais qu'elles aient subi une tectonique quaternaire, halte là, n'exagérons pas! Car enfin le Quaternaire est cet instant privilégié de l'histoire de l'Univers qui vit apparaître l'Homme et s'apaiser, du coup, les forces de la Nature. Que si l'on trouve à 900 m d'altitude des coquilles littorales d'âge pliocène, c'est que le niveau de base s'est abaissé, depuis, d'autant. Que si la Scandinavie s'élève d'un mètre par siècle, et de façon indubitable, c'est

qu'elle se réajuste isostatiquement: ce n'est pas de la tectonique. Que si la Californie se déforme visiblement lors de chaque tremblement de terre, ce n'est pas encore de la vraie tectonique. Que si le temple de Pouzzoles monte et descend comme un ludion, cela ne prouve rien, puisque c'est un point isolé du littoral... Admirables raisonnements en vérité. On ne peut qu'admirer l'audace d'EMM. DE MARTONNE qui, dès 1911, faisait soulever les Carpathes après l'installation du réseau hydrographique pliocène. Encore un mérite tombé dans l'oubli.

Actuellement la mode est inverse, et le mobilisme tend à condamner en bloc, et comme sentant le fagot, tout ce qui rappelle l'eustatisme. L'érosion régressive, l'influence du niveau de base, autant de notions à jeter au feu. La tentation est forte, d'ailleurs, car au jeu subtil des enchaînements et des ruptures d'équilibre qui fait la nature si complexe, le pur mobilisme oppose une simplicité monolithique.

Mon intention, dans ces exposés, est d'abord de passer en revue les divers mouvements qui, récemment ou actuellement, ont modifié ou modifient la surface topographique, vrais mouvements néotectoniques d'une part, mouvements du sol non tectoniques d'autre part. Puis d'étudier les effets de ces divers mouvements en fonction des conditions climatiques, c'est à dire leur incidence sur le déroulement des diverses morphogenèses.

### I — DÉFINITION D'UN « SYSTÈME GÉODYNAMIQUE »

*La néotectonique.* — Il faut bien poser dès l'abord que la néotectonique n'a rien de différent, ni dans ses causes ni dans ses effets, de la tectonique tout court. Il s'agit toujours de déformations structurales d'origine endogène et consistant en failles, plissements, soulèvements, gauchissements, basculements, etc. Seul diffère l'âge et, par voie de conséquence, l'ampleur des phénomènes. Sont néotectoniques les déformations d'âge *quaternaire* (Calabro-Villafranchien compris), les déformations d'âge *historique* (depuis l'usage de l'écriture) et les déformations *actuelles* (depuis deux générations humaines par exemple).

Mais l'âge récent exclut en général que ces déformations soient très amples, et la difficulté essentielle de la néotecto-

nique est qu'il faut apporter la preuve de ces déformations avec le maximum de précision. Et là deux cas peuvent être envisagés, selon que l'on peut se référer à l'altitude zéro (domaine littoral) ou que l'on ne peut pas (domaine continental).

a) L'identification des *déformations littorales* est en principe relativement aisée, et elle s'appuie sur des critères géologiques solides. En général on se fonde sur l'existence de dépôts de faciès côtier, faciès défini surtout par des faunes. Mais on y ajoute déjà des notions de formes: perforations par les Lithodomes, trottoirs incrustés par certaines algues, sillon d'abrasion, grottes littorales, etc. La morphoscopie des sables et des galets ressortit aux méthodes géomorphologiques modernes. Les résultats commencent à être bien établis. Par exemple on a identifié le Pliocène marin sur le Bas Oronte à 850 m d'altitude, on a reconnu le delta pliocène du Var à 1000 m, et le Calabrien littoral à 900 m en Calabre. Enfin on trouve du Tyrrhénien à 350 m sur les bords du golfe de Corinthe.

Certes l'interprétation de ces résultats a d'abord été proposée en fonction des postulats eustatiques: les dépôts très au-dessus de + 100 étant Calabriens, les dépôts à + 100 étant Siciliens, les dépôts à + 60 Milazziens, les dépôts à + 30 Tyrhéniens, et enfin ceux à + 15 m étant Monastiriens. C'est le schéma commode mais simpliste de Depéret et de Lamothe, en Méditerranée du moins. Mais depuis pas mal d'années déjà des anomalies graves sont apparues. Par exemple Castany et Ottmann ont démontré que le Sicilien de + 60 m comporte une faune ayant vécu aux alentours de 300 m de profondeur: par conséquent, si le dépôt n'a pas été soulevé, il faut admettre que la mer sicilienne montait à 360 m d'altitude... Ce n'est qu'un exemple parmi d'autres.

D'autre part l'interprétation eustatique se heurte à la vraisemblance la plus élémentaire car des faits non douteux prouvent que la croûte terrestre est capable de soulèvements ou d'affaissements relativement rapides. Le cas de soulèvement le plus connu et le plus certain est celui de la *Scandinavie*, où les rivages de la mer à Yoldia (âge: — 6000 à — 7000 av. J. C.) se retrouvent actuellement à + 250 m. Mais il s'agit d'une compensation post-glaciaire, argumentent les eustaticiens: oui,

mais elle prouve au moins l'élasticité de la croûte terrestre. Comme cas d'affaissement on citera celui de la basse *plaine du Pô*, où la base du Calabrien (non pélagique) est actuellement à — 3000 m (GABERT). Ou celui du littoral de la Louisiane ou du Rio de la Plata, littoral qui s'enfonce de 5 à 10 mm par an. Phénomène de subsidence, objectera-t-on: oui, et puis après? Et si, comme le pensent beaucoup de géologues, les mouvements tectoniques vrais ne résultaient, souvent, que du transfert de matière des continents vers l'Océan par l'action de l'érosion? Et si, comme le pense BJELOUSSOV (colloque de Leipzig, 1962), les déformations les plus classiques n'étaient provoquées que par ces perpétuelles oscillations de la croûte terrestre? Sans parler de la théorie de la *flexure continentale* chère à J. BOURCART et qui se trouve confirmée en tant d'endroits du Globe qu'elle n'est plus une théorie mais une règle, une hypothèse mais un fait d'observation...

De toute façon les témoignages de déformations des lignes de rivage hors des zones subsidentes ou en voie de réajustement isostatique, se multiplient. Je ne citerai qu'un exemple, appuyé sur les travaux en cours de M. ROLAND PASKOFF sur la *côte du Chili*: au Sud du rio Limari (prov. de Coquimbo) la présence d'un aplanissement du Pléistocène ancien d'une part, d'un climat semi-aride très conservateur des formes d'autre part, met en évidence tout un assortiment de déformations récentes. La plus significative me paraît être l'étagement de falaises mortes en nombre variable le long du littoral (fig. 1): il n'est pas rare de constater qu'une terrasse marine se divise «en deux éléments séparés par un abrupt d'allure rectiligne», abrupt qui n'est autre qu'une faille quaternaire.

La conclusion à laquelle sont donc parvenues les études sur le Quaternaire littoral est à peu près la suivante: l'eustatisme est, dans son principe, valable mais il est très fréquemment masqué par les effets de la néotectonique; les niveaux supérieurs doivent très généralement leur altitude à la tectonique; seules la transgression tyrrhénienne et la transgression flandrienne ont laissé des traces relativement peu dérangées, sauf exception.

b) Mais l'étude des *déformations en milieu continental* présente, elle, la difficulté majeure de ne pouvoir se référer

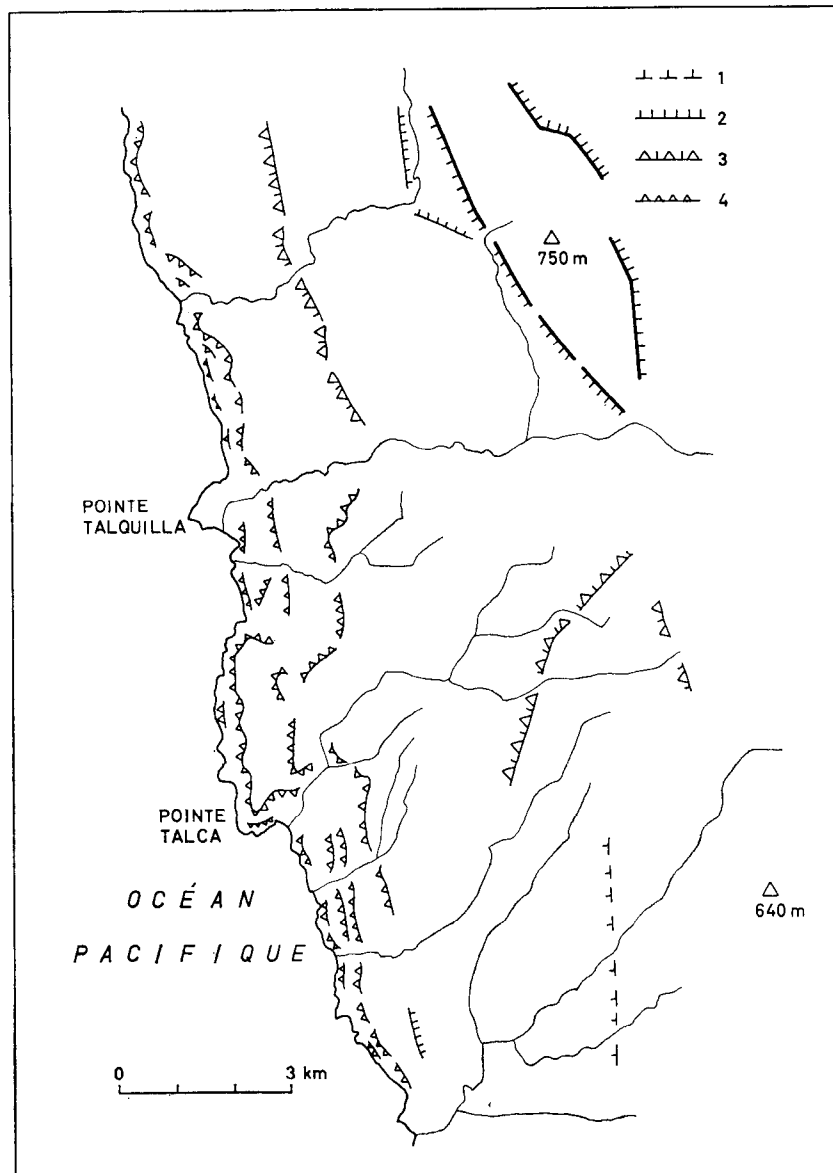


Fig. 1 — Néotectonique littorale sur les côtes du Chili. Inspiré de la fig. 2 de R. PASKOFF, Terrasses littorales et tectonique récente entre l'embouchure du Río Limari et la baie Teniente, province de Coquimbo, Chili (*Revista Geographica, I. P. G. H.*, 1966, n° 65); article aimablement communiqué en cours d'impression. Signes conventionnels: 1, faille probable; 2, escarpement de faille; 3, escarpement de faille retouché en falaise; 4, falaise morte. On est vers 30° de latitude sud. Noter la multiplication des falaises mortes vers le milieu de la figure, signe de bombement tectonique.

au niveau zéro. Parfois des raisonnements ont été appuyés sur des anomalies dans l'altitude de la limite des neiges persistantes... Quand on pense aux fantaisies actuelles de cette limite on ne peut que se méfier: sauf lorsqu'il y a anomalie très grave il est dangereux de compter à partir des neiges würmiennes ou rissiennes. Mais le pire est que les déformations continentales peuvent très rarement être étudiées à l'aide des méthodes géologiques classiques. En effet les déformations se sont faites à l'air libre, elles sont souvent de petite taille, et elles ne sont généralement pas fossilisées sous un manteau discordant: il n'y a pas «la» discordance stratigraphique significative. De plus les pendages ne peuvent pas être interprétés avec certitude car les dépôts continentaux sont, souvent, initialement en pente (glacis, cônes de déjection, etc.). On conçoit l'aubaine que représentent les dépôts lacustres qui, eux, ont parfois une pente ou une horizontalité interprétables. Enfin s'ajoute la difficulté des datations. Les milieux continentaux ont peu de fossiles, et lorsqu'ils en ont ces fossiles sont souvent mal conservés, et lorsqu'ils sont bien conservés ils s'avèrent souvent peu significatifs du point de vue chronologique. Bref, des conditions de travail très différentes de celles qu'on rencontre sur les «plages soulevées».

En milieu continental on a donc recours à d'autres méthodes. Par exemple à l'étude des associations biologiques (les pollens, en particulier), voire de particularités chimiques (méthode de l'oxygène 18) capables de signification climatique: d'où une datation relative approchée, par comparaison avec d'autres cas. Par exemple à l'étude des associations d'instruments préhistoriques (pourvu que ces instruments soient en place): d'où une datation relative susceptible de recouper la datation climatique. Par exemple, si l'on a beaucoup de chance, à l'étude du carbone 14 qui permet, pour les âges rapprochés, une datation absolue satisfaisante. Plus récemment la méthode argon-potassium a permis des datations beaucoup plus lointaines. Mais la méthode fondamentale pour la néotectonique continentale, c'est encore la *méthode géomorphologique*. On pourrait l'appeler la *méthode du résidu*. Puisque telle forme ne peut être ni une falaise marine, ni une terrasse fluviale, ni un rebord de coulée, ni un rebord de doline, ni une niche d'arrachement, etc., elle ne peut être

qu'un abrupt de faille. Bien mieux on peut mesurer la forme sur le terrain donc mesurer la déformation: «cette faille mesure exactement 17 m de rejet». Enfin la morphologie permet, par l'emboîtement des formes, d'établir une chronologie relative. Si l'on veut passer à une chronologie absolue il faut évidemment glisser latéralement vers les dépôts corrélatifs, et les dater, si possible, par les méthodes indiquées précédemment.

Grâce à ces combinaisons de méthodes on peut arriver, en néotectonique continentale, à des précisions parfois honorables. C'est ainsi que j'ai pu, dans les Abruzzes, montrer que la tectonique de la fin du Rissien a fait rejouer les failles d'environ 20 m, ce qui, réparti sur environ 75 millénaires, aboutit à des saccades de 25 mm par siècle. Il ne s'agit, évidemment, que d'un ordre de grandeur.

c) Reste enfin à parler de la *tectonique historique* et de la *tectonique actuelle*. L'éventail des moyens dont nous disposons est assez impressionnant mais, si ces moyens permettent de prouver les déformations, il n'est pas toujours aisé de connaître la cause de la déformation. Procédés archéologiques, pour les déformations passées, avec toute l'incertitude que l'on sait; procédés géologiques parfois; procédés morphologiques, essentiels; procédés géodésiques, permettant de mettre en évidence des déformations invisibles à l'œil nu; procédés sismologiques, permettant de dire si tel ou tel séisme est d'origine tectonique ou pas; procédés gravimétriques, enfin, qui nous indiquent s'il y a compensation isostatique (auquel cas la déformation est d'origine douteuse) ou pas.

Les résultats bruts sont incontestables: le Globe se déforme sous nos yeux à petits coups. Et les faits sont tellement nombreux que les diverses commissions nationales de géologie se préoccupent d'en dresser le catalogue: failles actives dans les Abruzzes; soulèvement de la région du Syr Daria (URSS) de 12 mm par an; décrochements latéraux et rejets verticaux de 3 m en Californie; faillages de 4,50 m de rejet en Nouvelle-Zélande; affaissement de la vallée de l'Elbe de près d'un centimètre par an; etc. Là aussi, comme sur les littoraux, il apparaît que certains secteurs sont mobiles et d'autres pas.

En conclusion, et conformément au bon sens, la surface du Globe n'est pas plus immobile maintenant qu'autrefois.

Plus l'analyse géologique devient fine et plus il apparaît qu'il n'y a pas eu des phases d'activité orogénique séparées de phases d'immobilité. Il n'y a jamais eu, semble-t-il, rémission de l'activité orogénique, mais déplacement de ses points d'application. Donc perpétuelle naissance des reliefs, dans la mesure, naturellement, où cette naissance n'est pas contre-battue par l'érosion.

*Mouvements non tectoniques.* — A qui étudie ces problèmes il apparaît que l'une des préoccupations constantes des néotectoniciciens et des géomorphologues est de faire soigneusement le départ entre les mouvements de la surface du sol qui ont réellement une origine tectonique (ce qui laisse indûment supposer que l'on connaît les causes exactes de ces mouvements!) et ceux, accessoires en quelque sorte, qui résultent de tassements ou de gonflements des terrains, etc.... Tel bombement du sol dans le Sud de la Tunisie, par exemple, n'est pas dû à la tectonique, mais simplement à la poussée d'un diapir salifère. Donc il ne compte pas, en bonne orthodoxie de tectonicien. Or mon propos, maintenant, propos de géomorphologue et non de géologue, est de démontrer que ce bombement compte tout de même puisqu'il est, tout autant, un relief... Les mécanismes sont peut-être (sûrement même) différents, mais le résultat est le même.

Parmi les causes non tectoniques mais tout de même génératrices de mouvements du sol on distingue le volcanisme, la «tectonique» salifère, les tremblements de terre, la détente des roches.

a) La plus connue et la plus évidente de ces causes est le *volcanisme*. J'en parlerai donc à peine. Le volcanisme crée des volumes nouveaux, déclenche des effets de barrage, de défluviation, et même des effets mineurs particuliers par la température des laves et des cendres (cuisson des sols argileux, etc.). Il agit par crises paroxysmales, souvent accompagnées de séismes. Plus spéciale mais plus proche de notre préoccupation présente est l'injection de lave entre les strates (laccolite) avec bombement superficiel et fissuration radiale.

b) La «*tectonique salifère*» est due, on le sait, à la faible densité des roches salines telles que le gypse, l'anhydrite ou le sel gemme, et surtout à leur plasticité. Sous le poids d'un

couvercle sédimentaire quelconque le gypse ou le sel arrive à fuser en passant par une fissure, et vient occuper une position stratigraphiquement anormale. Ce poinçonnement, ou diapirisme, ou typhonisme, aboutit à créer une boursofflure, de la surface du sol, tout comme les authentiques laccolites. Et l'on connaît un peu partout dans le monde, en Algérie, en Tunisie, au Texas, etc., de ces «*dômes de sel*». Or il y a là création de reliefs nouveaux: bombement avec, parfois, affaissement central à cause d'une rapide dissolution du «chapeau», fissures radiales avec orientation des vallées, etc. Mais la présence des roches salines a bien d'autres conséquences: les géologues (par exemple FALLOT, GIGNOUX, GOGUEL) ont insisté depuis longtemps sur le rôle de lubrifiant que le sel du Trias ou du Lias a joué dans les tectoniques tangentielles: en France le massif de Gigondas-Suzette, au Portugal l'Arrábida, sont des exemples de ce «volcanisme sédimentaire». Il ne nous concerne pas. Mais nous concerne tout spécialement l'apparition des dômes de sel à la surface même du sol, et le lent écoulement latéral de cette masse plastique, véritable tectonique de gravité en action sous nos yeux. Ces «*glaciers de sel*» ne peuvent exister, évidemment, qu'en pays arides (sinon ils seraient dissous...), par exemple sur les plateaux iraniens. Le sel n'a jusqu'à présent attiré l'attention des morphologues que par sa solubilité, son modelé karstique (exemple: le rocher de sel de Djelfa), mais il est également responsable de toute une néotectonique curieuse et peu connue dans ses effets morphologiques.

c) Les *tremblements de terre* retiendront davantage notre attention car ils sont, au contraire, très répandus sur la planète. Et ils ont une énorme importance. On sait que l'origine des tremblements de terre est très variée. On distingue classiquement:

1) les séismes à cause *tectonique*, c'est à dire provoqués par un jeu ou un rejeu tectonique, très souvent un failage. Exemple: séisme de San Francisco en 1906, séisme du Montana en 1959. Le foyer est toujours superficiel: dans le cas du séisme du Montana il était à 45 km.

2) les *séismes profonds* provoqués par un froissement intracrustal. Le foyer est à plus de 100 km. Mais, comme dans le cas des séismes tectoniques, il est détectable par les

calculs dits du «mécanisme au foyer» (voir Symposium d'Ottawa, 1957).

3) les *séismes profonds d'origine inconnue*, non détectables par l'analyse dite du mécanisme au foyer.

4) les *séismes volcaniques*, qui accompagnent et parfois précèdent les éruptions. Ils sont fréquents au Japon, en Italie, aux Açores, etc.

5) les *séismes d'effondrement*; c'est-à-dire provoqués par un effondrement superficiel grandiose. Malgré le scepticisme des spécialistes on peut en citer au moins un cas: celui de Lagopuzzo, dans le Latium, en 1895.

6) enfin, peut-être, des *séismes de tectonique salifère*. Ils ne sont signalés nulle part, mais il me semble que certains séismes bizarres pourraient s'expliquer par une poussée diapire ou une saccade de glacier de sel. La catégorie reste hypothétique pour le moment.

Or, quelle que soit leur origine, les séismes ont les mêmes effets, pourvu qu'ils soient de même magnitude. On citera d'abord, pour mémoire, les *raz de marée*: le séisme du Chili de 1960 provoqua une vague qui avait encore 10 m de hauteur quand elle atteignit le Japon. On citera surtout une intense *fragmentation des roches*: P. BIROT l'a signalée pour les Andes du Pérou et c'est peut-être vrai pour tout le pourtour du Pacifique. Dans ce cas la fissuration, voire le failage, sont conséquence et non cause. On citera la mise en déséquilibre des dépôts superficiels, et précisément de ceux qui sont issus du broyage, donc le déclenchement de gigantesques *éboulements*: la présence de très gros blocs dans l'accumulation des débris (d'où le terme de mégabrèches), la non stratification, le très léger émoussé des blocs, autant de signes apparemment aberrants de ces éboulements. On connaît des mégabrèches de ce genre dans l'Apennin central, dans le Nevada, dans la garrigue de Nîmes. Parfois la progression de l'onde sismique arrive à transporter ces blocs éboulés assez loin de leur paroi de départ: c'est l'effet «table vibrante» dont parle H. TAZIEFF à propos du séisme du Chili de 1960, mais qui avait déjà été signalé incidemment par MONTESSUS DE BALLORE à propos du séisme d'Assam de 1897. On citera enfin les *fissures de tassement*, qui peuvent être de véritables failles.

L'une des conséquences les plus intéressantes des séismes, et certainement la moins connue, est qu'ils peuvent précipiter des déséquilibres internes et déclencher un nouveau cycle de perturbations. Il faut, semble-t-il, que la longueur de l'onde sismique entre en résonance avec les contraintes accumulées en un point de la structure. De la sorte un faillage en train de se préparer peut être déclenché prématurément, comme une avalanche de neige déclenchée par un coup de canon intentionnel. D'où l'apparition de failles consécutives au séisme, à distinguer soigneusement des failles initiatrices. D'où, éventuellement, le réveil d'un volcan. Un tremblement de terre non tectonique peut donc avoir des effets authentiquement tectoniques: c'est là le fait sur lequel je voulais insister.

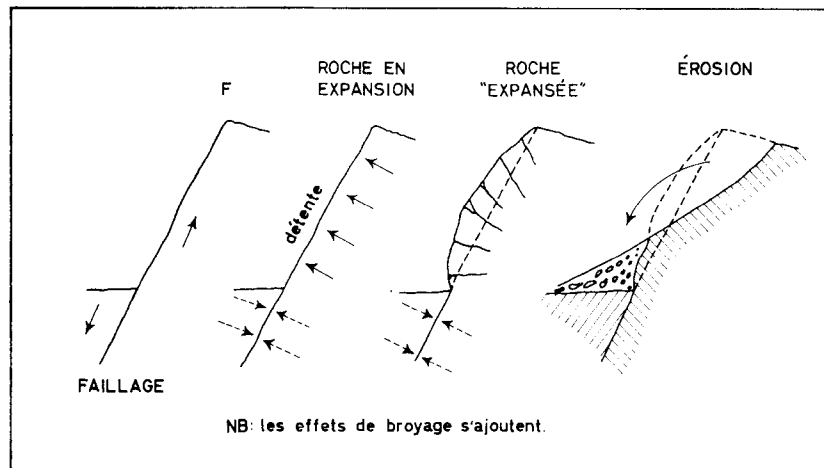


Fig. 2 — Exemple de détente post-tectonique. Fondé sur quelques observations faites dans les Abruzzes. Après le faillage (à gauche), détente du miroir puis expansion de la roche, gonflement et fendillement du miroir, enfin transport des fragments vers le bas sous l'effet de la gravité, du gel, etc.

d) Il faut enfin évoquer les *phénomènes de détente*, bien connus des ingénieurs, et auxquels la géomorphologie commence enfin à s'intéresser. L'idée de base est que la cohésion interne d'un solide résulte de l'équilibre rigoureux entre pressions et tensions, et que par conséquent une rupture de cette cohésion (par exemple par faillage) entraîne un déséquilibre, donc une détente: la roche se fragmente d'elle-même, elle est

«expansée» dans le jargon des techniciens. Pour nous, deux cas sont à envisager.

Le premier cas est précisément celui de la *détente après rupture tectonique*. D'après certaines observations que j'ai faites dans les Abruzzes, il semble bien que des miroirs de faille peuvent bomber légèrement et se fendiller (fig. 2). Dans

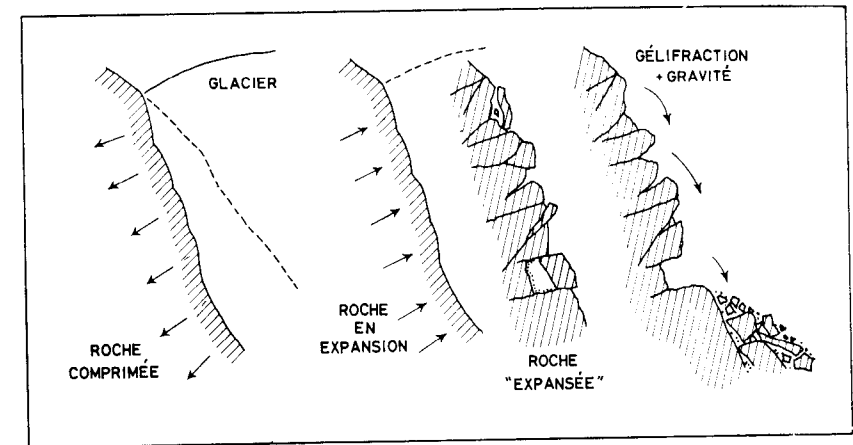


Fig. 3 — Exemple de détente post-glaciaire. Inspiré des travaux de G. GALIBERT. A gauche le glacier donne à la paroi un profil anormalement raide; mais la roche est maintenue par la pression de la glace. Puis, le glacier ayant fondu, la roche se détend, se fissure, et finalement le flanc d'auge s'éboule dans la vallée.

la brèche de friction on voit des vides lenticulaires, de minces espaces entre les feuilletts. Je crois qu'il y a là non seulement un effet de laminage mais aussi un effet de détente. Naturellement cette roche spontanément fragmentée est une proie facile pour l'érosion.

Le second cas est celui de la *détente après érosion accélérée*. L'expérience des ingénieurs prouve que les parois de tunnels sont souvent le lieu d'éclatements spontanés, de projections de fragments rocheux, phénomène consécutif à la détente que subit la roche, mise en déséquilibre par le forage du tunnel. Dans le tunnel du Mont Blanc, par exemple, cette détente fut responsable de plusieurs accidents mortels, et il fut nécessaire de consolider la roche en voie d'expansion, de l'armer de broches métalliques fort rapprochées. Or il semble bien, si j'interprète correctement la pensée de G. GALIBERT,

que pareille détente se produise, dans la nature, d'une part sur les flancs d'auges déglacées (d'où, par exemple, les éboulements interglaciaires ou post-glaciaires de la montagne alpine) (fig. 3), d'autre part sous le glacier lui-même, à l'aval des verrous: dans ce dernier cas (fig. 4) le classique «quarrying» ne serait pas l'œuvre de la glace mais une détente spontanée

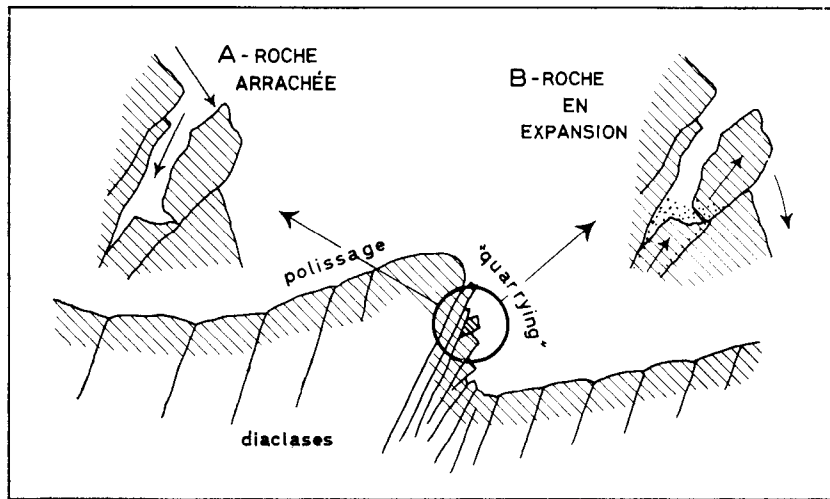


Fig. 4 — Exemple de détente sous les glaciers. Egalement inspiré de GALIBERT. A gauche en haut explication du quarrying, c'est-à-dire du débitage de l'aval des verrous, par arrachage sous l'action de la glace (A). A droite (B) explication par détente: la roche en expansion injecte littéralement des blocs dans le glacier. La cause de cette expansion n'apparaît pas clairement.

de la roche... Ces interprétations tout à fait nouvelles rejoignent l'hypothèse selon laquelle les diaclasses courbes responsables de la forme des pains de sucre tropicaux seraient dues à un effet de détente (fig. 5).

On voit quelles perspectives révolutionnaires s'ouvriraient à la géomorphologie au cas où les observations de ce genre se multiplieraient: la montagne s'ébrouant et projetant blocs et cailloux sans que les agents habituels de l'érosion aient eu à intervenir... Mais il ne s'agit encore que de possibilités: il faut accumuler les faits précis et ne pas se hâter de conclure.

*Conclusion: le «système géodynamique».* — Tous les phénomènes que nous venons de passer en revue — soulèvements

épéirogéniques, néotectonique vraie, intumescences par volcanisme vrai ou par diapirisme du sel, tremblements de terre, détente post-tectonique ou post-érosion — ne sont à première vue, que des phénomènes dispersés dont certains effets sont

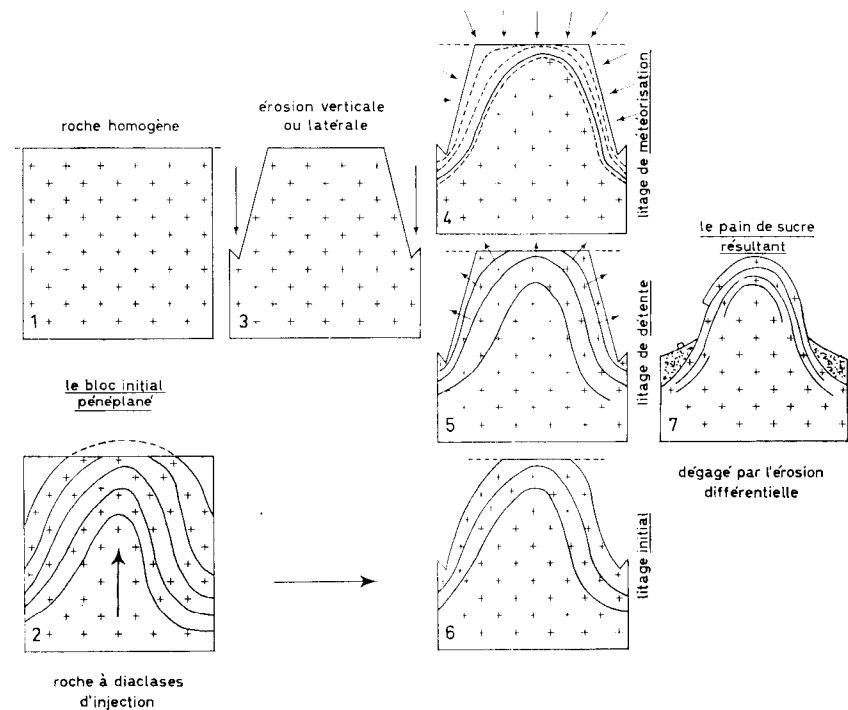


Fig. 5 — Application de la détente au cas des pains de sucre tropicaux. Si la masse cristalline est homogène au départ (1) on aboutit, après creusement (3) aux deux hypothèses suivantes: ou bien les diaclasses courbes que l'on observe sont le résultat de la météorisation (4), ou bien elles sont dues à la détente de la roche (5). Si la masse cristalline est affectée de diaclasses courbes directement lors de sa mise en place (2), il n'y a plus de problème et on aboutit à 6. Dans tous les cas le pain de sucre (7) résulte du dégagement de ces diaclasses par l'érosion différentielle. Actuellement seules les hypothèses 5 et 6 restent en présence, 4 ayant été éliminée depuis assez longtemps.

comparables par le résultat d'une simple convergence, et ils ne présenteraient pas d'intérêt géographique s'ils n'étaient artificiellement réunis, comme dans un bouquet... Il n'en est rien. Car, d'une part, ils ont tous une origine interne commune, le déséquilibre des contraintes (si le déséquilibre, lui, a des

causes variées), d'autre part ils sont reliés par des connexions tellement solides que l'ensemble mérite le nom de «*système*». Et puisqu'il s'agit, fondamentalement, de mouvements de la lithosphère, ce système mérite le nom de «*géodynamique*».

On a représenté sur la figure 6 les interconnexions du «*système géodynamique*», telles que les recherches de la

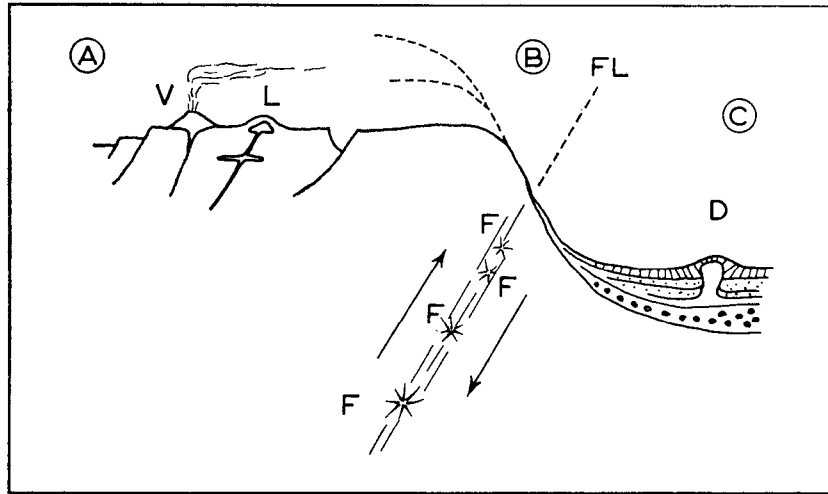


Fig. 6 — Le «*système géodynamique*». A est le compartiment en voie de soulèvement, avec ses failles distensives, ses manifestations volcaniques (V, volcan; L, laccolithe); il est en proie à l'érosion (régradation). B est le bourrelet d'affrontement avec sa tectonique compressive (FL, la flexure continentale; FFF les divers foyers sismiques qui jalonnent la «*surface d'action*»). La gravimétrie et le magnétisme y sont généralement anormaux par excès. C est le compartiment en voie d'affaissement, avec ses dépôts d'aggradation, ses anomalies géophysiques négatives, sa tectonique de compression (D, diapir salifère). Tout ceci est naturellement fortement schématisé. Pour plus de détails voir les travaux de GUTENBERG.

géophysique, de la géologie et de la géomorphologie permettent de les situer. Soit deux compartiments mobiles de l'écorce terrestre, l'un en voie de soulèvement l'autre en voie d'affaissement, l'ensemble étant affecté par un mouvement latéral dont nous n'avons pas à rechercher ici la cause. Sur un tel modèle la partie qui se soulève présente des anomalies positives de la gravimétrie et du magnétisme, l'autre partie des

anomalies négatives, et le contact entre les deux dessine une «*flexure continentale*», laquelle se prolonge, vers la profondeur, par une surface de cisaillement, ou «*surface active*». Le bourrelet d'affrontement, flexure comprise, est par excellence un lieu de néotectonique de compression, accompagnée de *séismes* tectoniques, à foyers superficiels. Il est probable que des phénomènes de détente accompagnent cette tectonique de compression. A l'arrière du bourrelet la tectonique est, au contraire, de distension: d'où les jeux et rejeux de failles, les manifestations volcaniques, les phénomènes de détente. D'où aussi, naturellement, toute une gamme de séismes: séismes dûs aux failles, séismes dûs au volcanisme et séismes secondaires, c'est-à-dire de résonance. Un bon exemple d'une telle association de phénomènes nous est donné par la partie occidentale, c'est-à-dire interne, de l'Apennin central. Dans la partie basse en avant du bourrelet (alias flexure continentale) on trouve assez généralement des gisements salifères, souvent associés au pétrole (voir le pied des Carpathes, par exemple). Par conséquent des possibilités de diapirisme, avec d'éventuels petits tremblements de terre. Dans les trois zones — zone arrière, zone du bourrelet, zone avant — des déséquilibres peuvent être accélérés sous l'influence de séismes lointains: lointains latéralement ou lointains en profondeur.

J'espère avoir montré d'une part que ce que je propose d'appeler le «*système géodynamique*» présente une réelle unité, d'autre part que la néotectonique vraie n'est qu'un aspect de ce système.

## II — CONSÉQUENCES MORPHOGÉNÉTIQUES DU SYSTÈME GÉODYNAMIQUE

Après avoir analysé les diverses causes de mouvements du sol, il convient maintenant d'en décrire les effets. Mais les effets «*primaires*» n'ont pas les mêmes résultats (ou les mêmes apparences) en tous points de la planète. La géomorphologie ne s'occupe pas d'un Globe théorique, mais de régions réelles, pourvues de climats, de couverture végétale, etc. D'où la nécessité de faire intervenir des conditions zonales.

*Les phénomènes de néostructuration.* — Les «*mouvements du sol*» ont pour effet immédiat de modifier la structure des



masses minérales, et cette modification nous concerne directement puisqu'elle crée de nouveaux volumes visibles. Mais cette «néostructuration» n'a ni la même signification ni les mêmes conséquences selon qu'elle est une *macrostructuration* (par exemple modifications de quelques mètres au moins) ou une *microstructuration* (phénomènes de moins d'un mètre): on sait l'importance des tailles, donc des seuils dimensionnels, dans la nature.

Dans les effets de *macrostructuration* on rangera la plupart des dislocations, failles, plis, bombements, gauchissements, basculements, etc., engendrant directement une déformation topographique sensible: par exemple un gradin de faille. La déformation topographique déclenche en général une désorganisation du réseau hydrographique: un cours d'eau peut être bloqué et former un lac ou se jeter dans un autre bassin par défluviation. Lors du séisme du Montana, le 17 août 1959, des failles de 1 m de rejet ont suffi pour bouleverser, parfois, l'écoulement des eaux. Mais la macrostructuration a aussi pour conséquence de modifier les écoulements souterrains: soit les vrais réseaux karstiques, soit la nappe phréatique. On connaît les modifications hydrologiques qui accompagnent les séismes.

Les effets de *microstructuration* consistent en général en une modification de la structure intime des roches sur quelques millimètres, quelques centimètres, quelques décimètres. La néotectonique s'accompagne souvent d'une induration, ou d'un laminage, des plans de faille. Parfois la faille est davantage un broyage, et sur plusieurs décimètres, voire plus encore, la roche devient une brèche, avec des vacuoles, etc. Les séismes engendrent des effets de compaction, de tassement, et par voie de conséquence des fissures, des décollements, des fendillements. La détente mécanique a des effets d'expansion: la roche est fragmentée, les petits bancs déconnectés, une poudre minérale envahit les fissures. Bref les assises rocheuses, pour ces diverses causes, perdent de leur solidité (fig. 7). La ressemblance avec les effets de la météorisation, ou des agents habituels de l'érosion, n'est qu'apparente. En effet les agents extérieurs n'attaquent que la surface du sol: d'où, par exemple, les fissures de gélifraction, les feuilletts de la desquamation thermique, les cuirasses de la pédogenèse. Tandis

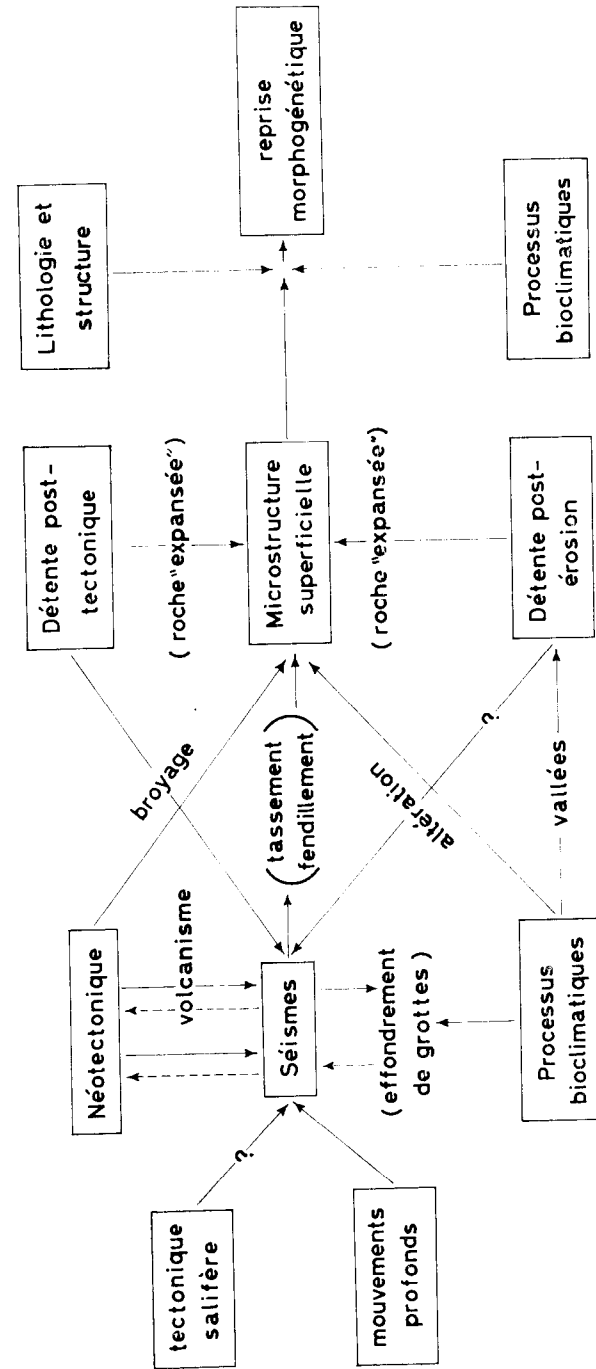


Fig. 7 — Tableau des connexions géodynamiques. A gauche les divers mouvements, endogènes pour la plupart, et générateurs de néostructures de grande taille. Au milieu, les effets de microstructuration. A droite les effets secondaires, généralement cataclysmaux (glissements de terrain, etc.).

que la microstructuration géodynamique peut affecter la roche sur de très grandes épaisseurs. On comprend, alors, la gravité des *effets dérivés* de cette microstructuration, effets très souvent cataclysmiques, tels que glissements en planches, glissements panamiens ou éboulements en masse. On comprend que des structures, fragilisées une première fois, soient plus sensibles à de nouvelles secousses telluriques. Ces effets dérivés entraînent à leur tour des modifications dans l'écoulement des eaux, généralement par barrage (barrage sismique de J. BORDE) d'où des lacs de retenue, des défluviations, souvent plus importantes que celles qui résultent de la macrostructuration. Enfin le dernier acte est constitué par les réajustements eux-mêmes: captures, vidanges de lacs momentanés par rupture de barrage, épanchements de laves torrentielles, etc.

Il est bien évident que tous ces phénomènes dérivés sont sous la dépendance étroite des conditions géographiques régionales. Le *climat*, d'abord. La *topographie*, c'est-à-dire la raideur des pentes et la forme des versants. L'*hydrologie* de surface et l'*hydrologie* souterraine. Les *sols*, enfin, non moins importants, qu'il s'agisse de sols pédologiques au sens strict du terme ou, plutôt, de dépôts superficiels peu ou pas consolidés. Selon que les sols sont minces ou épais, amorphes ou structurés, perméables ou imperméables, plastiques ou rigides, les effets dérivés de la néostructuration en grand comme en petit seront différents. On ne négligera pas davantage le facteur *végétation* (végétation haute ou basse, tapis continu ou discontinu, enracinement profond ou superficiel, etc.), non plus que les *œuvres de l'homme*: tranchées de routes ou de chemins de fer, lacs artificiels, etc.

Or il semble bien que cet ensemble de préoccupations soit assez nouveau, du moins dans la mesure où elles sont liées à la géodynamique, et je serai forcé de faire beaucoup d'hypothèses...

*Effets de la géodynamique en zone froide.* — On connaît les effets des éruptions volcaniques dans les régions englacées, sous ou sur la glace: je ne les cite donc que pour mémoire. D'ailleurs le volcanisme n'entre pas dans mon propos. Mais que sait-on des effets de la néotectonique sous la glace? A peu

près rien, et pour cause... On peut supposer que la naissance d'un petit gradin de faille sous un glacier provoquera des chutes de séracs, que l'accident topographique sera vite émoussé, mais que les zones de roche broyée seront rapidement excavées. S'il y a détente, le quarrying spontané (voir GALIBERT) nourrit la glace en blocs rocheux, donc augmente la quantité d'abrasif et de moraine de fond. Quant aux séismes — et là les observations sont plus nombreuses — ils provoquent des éboulements de parois sur le glacier. Il est probable que l'arrivée de blocs sur le glacier commence par favoriser l'érosion glaciaire, mais qu'il y a un seuil de surcharge au-delà duquel cette érosion diminue. Mais les séismes provoquent aussi des écroulements de glace: au Pérou l'écroulement du glacier du Huascarán en 1962 a déclenché une lave de 10 millions de m<sup>3</sup>, qui a littéralement calibré en auge la vallée d'accueil.

En *conditions périglaciaires* le fait de base est que le travail de la gélifraction est parfaitement préparé par la microstructuration. Que se produise une faille, et un double phénomène de fragmentation par broyage et de fragmentation par détente permet au gel de pénétrer dans le miroir de faille. D'où une rapide démolition du gradin aboutissant d'une part à transformer le miroir en un «versant de Richter», ou versant d'ébouilisation selon E. DE VAUMAS, d'autre part à accumuler à la base un vaste cône de débris. Il est possible que, lors de saccades tectoniques accompagnées de forts séismes, les débris aient été déplacés assez loin vers l'aval par le phénomène «table vibrante». Déglacées, les auges glaciaires perdent de la pureté de leur profil transversal autant par détente que par action du gel; et elles sont longées à leur base par des accumulations d'assez gros et même de très gros blocs (fig. 4).

De toute façon le système géodynamique, en climat périglaciaire, aboutit à faciliter l'ennoyage des parties basses du paysage par les débris rocheux. Or cet ennoyage, ou au moins cette surcharge, a des effets morphogénétiques importants. Au moment de la décharge massive d'eau de fusion, c'est-à-dire au printemps, le ruissellement est empêtré dans la multitude des blocs et des cailloux, et devient ruissellement diffus; c'est-à-dire qu'il se produit une tendance à la planation latérale

bien plus qu'une tendance à l'incision verticale. Toute chose égale par ailleurs, la géodynamique a les mêmes effets qu'une période d'englaciation (terminologie de J. TRICART) ou d'anaglaciale (terminologie de L. TREVISAN). Donc elle favorise la formation des glacis.

De même le système géodynamique bouleverse l'évolution karstique, superficielle ou profonde. En surface, l'abondance des débris porte rapidement les eaux à la saturation en carbonates, donc elle diminue leur agressivité tant pour la dissolution de surface que pour la dissolution en profondeur. De plus, si les réseaux souterrains sont mûrs (Irlande, Laponie, Préalpes) les néostructurations provoquent des effondrements, des verrouillages de conduits, des obturations par excès de fragments. Il est probable que cet enrayement n'est que momentané et que les obstacles sont vite réduits. Le karst périglaciaire en zone à géodynamique doit évoluer par spasmes, à condition, naturellement, que le climat ne soit pas sec.

*Effets de la géodynamique en zone tempérée.* — Pour limiter le champ des hypothèses je me bornerai, là aussi, à n'envisager que la nuance océanique des climats. Avec le *climat tempéré océanique* nous voyons déjà intervenir, à côté du gel hivernal (donc de la gélifraction), de fortes pluies, une dissolution karstique importante, une pédogenèse modérée: il est probable que devant cette coalition de moyens les néostructures ne peuvent opposer une résistance très sérieuse. Pourtant il convient de distinguer deux cas. Ou bien la croissance des volumes (par néotectonique ou pseudo-tectonique) est relativement rapide: et la désorganisation du réseau hydrographique doit être durable. En effet les lacs de barrage ont chance de survivre puisqu'il y a de l'eau et que les températures sont modérées; et les rivières détournées ont tôt fait de s'aménager un nouveau et bon lit puisqu'elles sont pourvues, par les débits et la charge solide, d'une bonne capacité de creusement. Ou bien la croissance des reliefs est lente: et dans ce cas c'est précisément la capacité de creusement vertical qui permet aux rivières de se maintenir par antécédence. On notera, enfin, que la production de débris par détente spontanée de la roche doit être relativement gênée

par la solidité du tapis végétal: en tous cas ces débris ne s'étaleront pas sans difficulté.

On ne citera que pour mémoire les effets de la géodynamique sur le karst «tempéré», car ils ne paraissent pas devoir être très originaux. Ou bien le karst est jeune, et il sera immédiatement bloqué en profondeur. Ou bien il est évolué: et les ruptures de conduits souterrains seront vite réparées. Seule nouveauté, la non dispersion de l'agressivité des eaux de surface, puisqu'il n'y a pas production généralisée de cailloux.

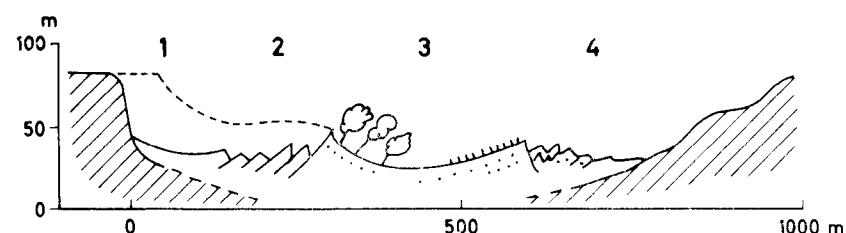


Fig. 8 — Exemple de glissement de terrain d'origine sismique. Les éboulements du Rio San Pedro, exutoire du lac Rihihue, Chili, mai 1960. Extrait de BORDE, thèse, d'après WEISCHET. 1, zone de départ avec slumping; 2 et 3, zone d'arrivée (flowage) avec distinction entre zone des écailles (2) et zone frontale (3); 4, zone périphérique des projections.

Par contre les effets secondaires dûs aux séismes sont connus pour être redoutables. Les sols étant relativement épais, la fourniture d'eau étant abondante, les tremblements de terre déclenchent de gigantesques glissements de terrain dès qu'il y a pente (fig. 8). Le matériel barre alors les vallées, retient des lacs, etc. Mais J. BORDE a observé au Chili que les débâcles par rupture de barrage ont un puissant effet de récurage mais ne déposent pas une forte épaisseur d'alluvions. Il est vraisemblable que ces cataclysmes sont encore plus notables dans les matériaux volcaniques meubles.

Nous examinerons maintenant, par commodité, les *climats méditerranéens*. Il est bien connu que les pays méditerranéens ont de très belles formes structurales. Par conséquent les reliefs de néostructure, bien nettoyés en période de pluie, peu gélivés, peu dissous, peu pédogénéés, sont bien visibles. Et la Grèce ou la Californie montrent d'admirables

gradins de faille récents ou historiques. Le réseau hydrographique, selon toute vraisemblance, se comporte comme en pays vraiment tempéré, sauf que les lacs de barrage doivent vite s'évaporer: ou bien défluviation définitive, ou bien capacité de rester sur place par antécédence. De même, pour les réseaux karstiques souterrains, on ne voit pas qu'ils doivent réagir de façon particulière. Par contre la minceur des sols — et l'observation confirme cette hypothèse — fait que la nappe phréatique est très facilement disloquée.

Les effets cataclysmes des néostructurations, étant fortement soumis au facteur climatique, sont très différents selon qu'ils se produisent en été ou en saison humide. De même il y a une grande différence de comportement entre les versants nus et les zones alluviales, l. s. En conditions sèches les séismes ne produisent guère que de petits éboulements accompagnés de nuages de poussière. Lors du tremblement de terre d'Orléansville on a vu les montagnes «fumer». En conditions humides et en sols profonds, au contraire, des glissements de terrain catastrophiques se produisent, des lacs de barrage se forment (Calabre, 1783). Bref, les pays méditerranéens réagissent plutôt comme les pays tempérés humides en ce qui concerne les effets cataclysmes, et plutôt comme les pays arides en ce qui concerne les effets de néostructuration. Ils sont, dans ce domaine également, très contrastés.

*Effets de la géodynamique en zone chaude.* — Mais c'est certainement la zone chaude qui nous offre les cas extrêmes: au chaud sec, aride ou semi-aride, s'oppose nettement le chaud humide, tropical ou équatorial.

Les *pays désertiques*, c'est bien connu, sont le paradis des reliefs structuraux. Les formes de néostructure sont, par conséquent, parfaitement conservées: gradins de faille, intumescence laccolithique ou diapirique (fig. 9 et 10), ont une netteté à nulle autre pareille, grâce à la brutalité des rares ruissellements, à l'absence de sol végétal et de végétation. Et nulle gélifraction ne vient perturber les fragmentations par détente. Par contre le vannage éolien met en évidence les cailloutis, de formation présente ou ancienne, et la tendance accentuée à la planation latérale, caractéristique de cette zone, est renforcée par la fourniture des débris de microstructuration

géodynamique. Inversement l'absence de sols, la sécheresse, réduisent presque à néant les possibilités d'effets cataclysmes: pas de glissements (mais quelques éboulements «fumants»), pas de barrages, pas de lacs, pas de vidanges par conséquent. M. PASKOFF a bien voulu me confier que lors du séisme de Valdivia, en 1960, le Norte Chico et a fortiori le Norte du Chili, véritablement aride, n'ont connu aucun des effets dramatiques qui ont endeuillé le Chili central tempéré et humide.

Or c'est tout le contraire qui s'observe en *pays tropical humide* à forêt dense: les effets majeurs sont difficiles à mettre en évidence tandis que les effets dérivés revêtent une ampleur toute particulière.

Il est difficile d'affirmer, certes, que les néostructures n'existent pas, mais elles sont pratiquement inobservables: le rejet des éventuelles failles récentes est en général inférieur à l'épaisseur du manteau d'altération, voire même du tapis forestier... Et la moindre déchirure de la topographie est vite masquée par la reconquête végétale. Par exemple les géologues britanniques durent renoncer à suivre bon nombre de failles nées lors du séisme de l'Assam (1897) à cause de la densité de la jungle. La photographie aérienne ouvre, de nos jours, des possibilités nouvelles, il est vrai.

Par contre il est tout à fait vraisemblable que l'incapacité des rivières des Tropiques humides à creuser verticalement leur lit, voue les cours d'eau à une obéissance servile vis-à-vis des accidents structuraux. La moindre faille, le moindre petit bombement, doivent modifier le tracé des réseaux. C'est à la néotectonique que doivent être attribués, par exemple, les tracés capricieux et en bayonnette des rivières dans la

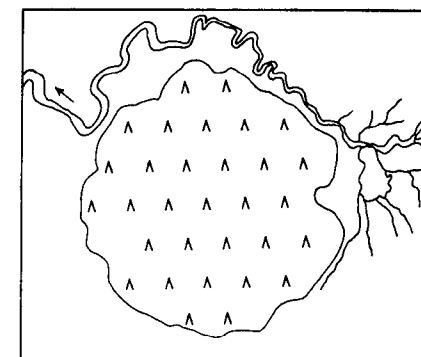


Fig. 9 — Le dôme de sel de Weeks Island, Louisiane. D'après photo aérienne, extraite de R. FABIANI, *Trattato di geologia*. On voit l'effet de cette néostructure sur le réseau hydrographique. Diamètre du dôme: environ 5 km.

région du lac Tanganyika (fig. 11). A noter, inversement, que si l'on ignorait la jeunesse de cette tectonique on ne saurait la déduire du fait que les rivières qui franchissent les gradins du lac Rukwa sont comme suspendues à chaque gradin, puisqu'elles n'ont qu'une faible capacité de creusement... Ces faits sont à rapprocher de l'inaptitude des rivières tropicales à maintenir des tracés antécédents.

Il est, enfin, légitime de supposer que la désorganisation des nappes phréatiques doit être peu durable étant donné l'épaisseur des altérites; que la désorganisation des réseaux karstiques souterrains doit être

négligeable vu le faible développement de ces réseaux (sauf cas d'espèces); enfin que les effets de microstructuration, et en particulier les effets de détente, doivent être rapidement annulés sous l'influence de l'altération, qui ne laisse subsister aucun fragment rocheux. Enfin une étude des conséquences du système géodynamique en pays tropical humide devrait tenir le plus grand compte de la variété régionale des pays tropicaux: même s'ils sont moins assagis qu'ils n'en ont l'air les morceaux du continent de Gondwana n'ont rien à

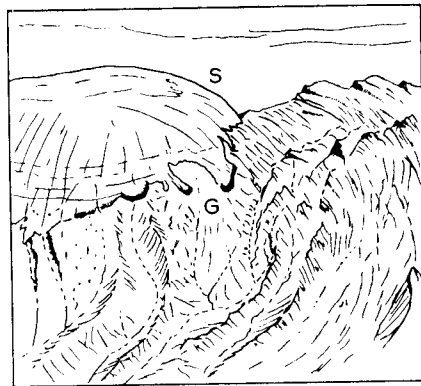


Fig. 10 -- «Glaciers de sel» en Perse. Dessin d'après photo aérienne de R. FABIANI. On voit le dôme de sel S émergeant du cœur d'un anticlinal, et s'affaissant latéralement en langues ayant une apparence de glaciers (G). Ravine-ments de climat aride.

voir avec les chaînes andines ou les volcans indonésiens...

Mais le fait d'origine géodynamique vraiment caractéristique du tropical humide est l'importance des effets cataclysmiques, dès qu'il y a la moindre pente. L'abondance des précipitations et l'énormité des altérites suffisent à l'expliquer. Glissements de terrain en masse ou en plaque, barrages de vallées, lacs de retenue, vidanges, épandages, sont bien plus développés qu'en zone tempérée humide. Que ce soit en Assam, en Indonésie, en Amérique centrale, dans les Andes

tropicales, le paysage change dangereusement après chaque crise géodynamique. Dans les Andes du Vénézuéla, par exemple, J. TRICART a mis en évidence le comblement progressif du bassin intra-montagnard de Lagunillas par les masses qui dévalent de la montagne à chaque séisme...

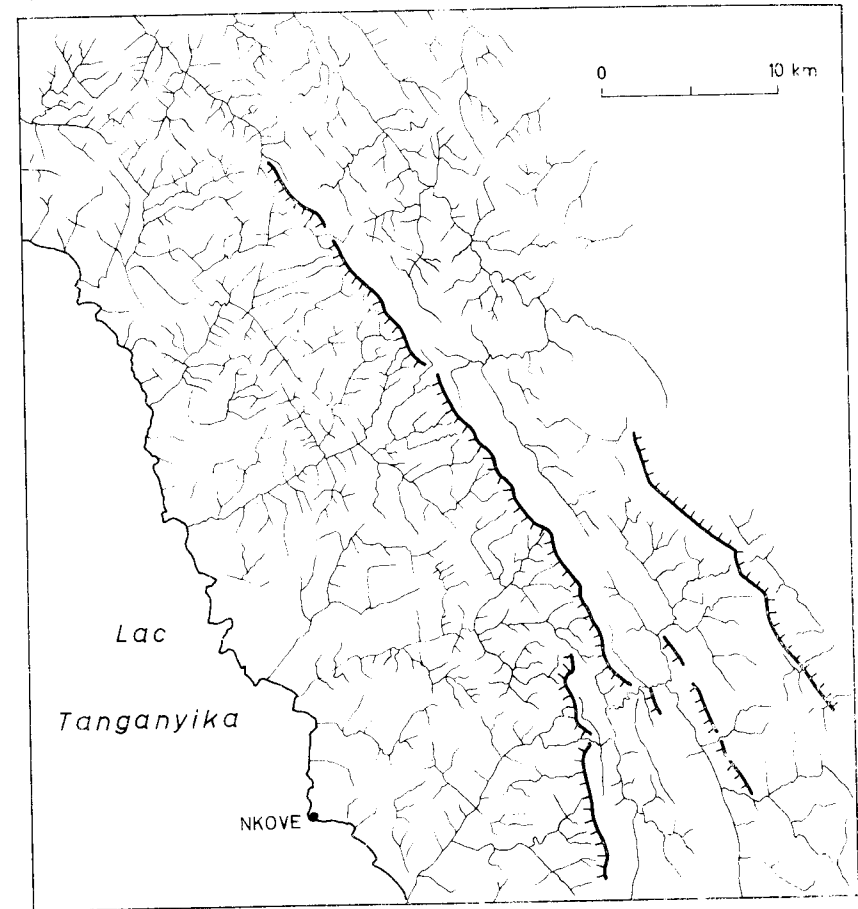


Fig. 11 -- La rive orientale du Lac Tanganyika. Dessin d'après la carte du Tanganyika au 1/250 000, feuille Sumbawanga. Les escarpements de faille, récents, sont figurés par un trait à barbules. Mais la disposition du réseau hydrographique révèle de nombreuses autres failles parallèles ou obliques.

#### CONCLUSION

La Géomorphologie, comme toute science, évolue. Des branches nouvelles surgissent et s'ajoutent au tronc essentiel

tandis que d'autres se flétrissent. Il m'a semblé que l'effet des impulsions endogènes sur le relief est une des ces branches nouvelles, et elle promet de beaucoup grandir: les phénomènes de néotectonique sont universellement reconnus, et les autres phénomènes endogènes ne nous paraissent plus aussi exceptionnels, aussi lointains. Il m'a semblé que tous ces mouvements, tectoniques ou non, pouvaient être regroupés dans une même catégorie géographique, que je propose d'appeler, provisoirement, le *système géodynamique*. Il m'a semblé enfin que les effets secondaires, cataclysmes, de la géodynamique, doivent être replacés dans leur contexte réel, c'est-à-dire zonal, si nous voulons faire œuvre de géographes. Mais l'idée est relativement neuve, les observations sont rares, éparpillées, fortuites même: j'ai dû beaucoup recourir à la théorie et à l'hypothèse (mais que serait la science sans l'imagination?). Je souhaite simplement que cette idée fasse réfléchir: qui sait s'il n'en sortira pas quelque recherche plus approfondie...

*JEAN DEMANGEOT*