

ESSAI

SUR LE

ROLE SISMOGÉNIQUE DES PRINCIPAUX ACCIDENTS GÉOLOGIQUES

PAR

F. DE MONTESSUS DE BALLORE (1)

(ABBEVILLE, SOMME)

La science des tremblements de terre vient de faire à Strasbourg (11-13 avril 1901) un pas de géant à la première Conférence internationale de sismologie. Ce pas décisif avait été préparé par le regretté *von Rebeur-Paschwitz*, mais il a été donné à *Gerland* de mener ce grand œuvre à bien et d'être l'âme de son exécution effective. Dès lors la sismologie, qui avait en ces dernières années du XIX^e siècle pris un développement tout à fait inattendu, va devenir autonome. Outre que devenue mondiale, étudiée qu'elle est avec ardeur sur toute la surface du globe — ce qui n'est pas sans créer de sérieuses difficultés à qui veut en suivre pas à pas les rapides progrès presque journaliers — il faut bien reconnaître qu'en raison même des sciences multiples qu'elle met à contribution en les appelant à son aide, il va bientôt devenir impossible à un seul avant d'en embrasser avec compétence tous les aspects, entre lesquels il devra choisir. Les uns, véritables physiciens, créent pour son usage, en faisant intervenir la physique, la mécanique et même les plus hautes spéculations des mathématiques, d'admirables instruments d'une exquisite sensibilité, au moyen desquels ils enregistrent et étudient les moindres vibrations de l'écorce terrestre, soit qu'elles se soient produites sous leurs observatoires mêmes ou dans leur voisinage plus ou moins immé-

(1) Reproduit, avec l'autorisation de l'auteur, d'après les *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, vol. VI, partie I, 1903.

diat, soit qu'elles aient ébranlé au delà des mers les régions les plus éloignées, tandis que de délicats diagrammes leur permettent d'en étudier après coup et à loisir les plus subtiles particularités. Mais les géologues devenus sismologues, ou plutôt les sismologues devenus géologues par nécessité, ne placent pas moins haut leur ambition. Ils veulent rendre compte du pourquoi des vibrations terrestres, faibles ou violentes, et en cherchent l'explication dans la survivance atténuée des actions géologiques, tectoniques, orogéniques et géomorphogéniques du passé, en un mot dans l'histoire géologique des régions où elles se produisent. A l'aide des tremblements de terre considérés comme le critérium de cette survivance là où ils ébranlent le sol, ils veulent même tenter de prévoir dans une certaine mesure l'avenir au moins local de la portion d'écorce terrestre qu'ils étudient, et ils ont l'audace d'affirmer par exemple que telle chaîne de montagnes est encore en voie de surrection ou de plissement, que tel vousoir terrestre est définitivement condamné au repos ou qu'il continue à être voué au soulèvement ou à l'affaissement. Si les premiers ont dans les sciences physiques, mécaniques et surtout mathématiques un guide sûr et qui ne peut guère les tromper, les seconds n'ont qu'un fil conducteur beaucoup plus lâche, la géologie et la géomorphogénie. Il leur faut beaucoup plus de prudence dans leurs déductions, plus de critique dans leurs recherches; ils doivent le plus souvent se contenter d'un à-peu-près provisoire, que leurs successeurs se chargeront de préciser. Ils ont aussi à lutter contre l'insuffisance actuelle de nos connaissances sur la sismicité réelle de beaucoup de régions, tant dans les pays même de haute culture que dans ceux surtout où l'homme civilisé n'a encore pénétré qu'à titre d'explorateur ou d'exploiteur. Il leur faut du temps, beaucoup de temps, pour être définitivement fixés sur le véritable degré de stabilité ou d'instabilité d'un territoire donné, tant le phénomène sismique est capricieux et irrégulier dans ses allures, que l'on cherche vainement à coucher dans le lit de Procuste de lois périodiques. Aussi doit-on attendre beaucoup de la future Association internationale sismologique, à laquelle le nom de *Gerland* restera attaché, pour nous donner cette connaissance dans le minimum de temps, grâce à la confection des catalogues sismiques locaux et régionaux dont elle assurera la publication, là où ils manquent encore. Ce sera une de ses plus importantes tâches.

Les phénomènes géologiques et géomorphogéniques auxquels la Terre doit son relief actuel sont aussi nombreux que variés. Pour la plupart ils dérivent des forces engendrées au sein de l'écorce terrestre

à la suite du refroidissement séculaire de la planète, abstraction faite de toute hypothèse sur son état interne, dont la plus en vogue, celle de la fluidité, est, il est vrai, fort commode, mais qu'il y a peu d'espoir de voir se vérifier jamais par l'observation directe. On va s'efforcer d'esquisser ici le rôle que peuvent jouer ces divers phénomènes relativement à la production des tremblements de terre, tout en proclamant bien haut que ces phénomènes géologiques ou autres ne sont, eux aussi, que des effets, et qu'il faut remonter aux actions et aux efforts qu'ils supposent eux-mêmes, et dont la survivance est attestée par l'instabilité du sol et l'extinction témoignée par sa stabilité.

Il est bien entendu qu'il ne s'agit point ici de faire une théorie générale des relations entre les principaux accidents géologiques et les phénomènes sismiques, mais seulement d'exposer quelques résultats, et surtout de montrer la voie dans laquelle on doit concevoir une description sismico-géologique du globe terrestre en l'état actuel de nos connaissances à ce double point de vue.

On va passer rapidement en revue ces divers traits géologiques.

Failles.

Depuis longtemps on s'est préoccupé du rôle actif des failles dans la genèse des tremblements de terre, d'autant plus qu'on avait eu quelquefois l'occasion d'en voir se produire à la suite des plus violents d'entre eux. Il est en outre très fréquent d'observer que les isoséistes d'unisme important s'allongent le long d'une faille qu'ils embrassent étroitement de part et d'autre, la forme ovale ou grossièrement elliptique étant acquise que par les plus éloignés du foyer d'ébranlement. Ce dernier résultat peut même n'être point atteint, car l'allure et la forme de ces courbes sont souvent et gravement affectées par la nature des couches autour de l'épicentre, par la disposition mutuelle des couches et enfin par tous les accidents géologiques qu'elles présentent. Mais ce sont là des phénomènes secondaires de propagation qui ne touchent en rien à l'origine du mouvement sismique et par suite ne ressortissent point à cette étude. Quoi qu'il en soit, l'allongement des isoséistes autour d'une faille ne peut laisser aucun doute : le tremblement de terre est dû à un mouvement relatif des lèvres de la faille, ou plus exactement à la manifestation brusque de l'effort tectonique auquel la faille a dû sa ouverture ou sa formation à une époque géologique antérieure, plus ou moins lointaine. Il faut bien observer que cet effort ne coïncide pas nécessairement avec la faille, il peut en être plus ou moins éloigné; mais

c'est parce que la faille introduit un élément de liberté au compartiment de l'écorce terrestre que le tremblement de terre se produit juste autour et le long d'elle. Dans ce cas il n'y a pas d'épicentre, mais bien une ligne épacentrale, constituée par la faille elle-même, et ne correspondant point du tout à la véritable origine du sisme.

C'est à bon droit que l'on vient d'employer l'expression de plus ou moins lointaine, quant à l'époque géologique de la formation de la faille. Il ressort en effet d'un nombre considérable d'observations que des failles relativement très anciennes, primaires même, jouent encore sous forme de sismes. C'est ainsi que la très ancienne fracture du Loch Ness en Écosse est le siège de fréquents ébranlements sismiques, tandis qu'au voisinage des failles beaucoup plus récentes des Hébrides et des Orcades sont en parfait repos. Il peut arriver aussi que dans certains cas une faille ancienne joue sous l'action d'efforts tectoniques différents de ceux qui lui ont donné naissance, parce qu'en définitive elle constitue une ligne de moindre résistance, où ces efforts mêmes ont plus de facilité pour se manifester. Cette déduction est d'autant plus naturelle qu'on sait bien que certaines fractures ont affecté des couches d'âge différent à diverses époques séparées par de longues périodes géologiques. Toutefois, quand il y aura doute sur la question de savoir si un sisme donné est en relation avec l'un ou avec l'autre de deux systèmes de dislocation non contemporains, il sera sage de s'adresser au plus récent, au moins provisoirement jusqu'à plus ample informé, et si les isoséistes ne donnent pas la clef du problème. Et ce doute se présentera fréquemment, car la présence d'un second système de failles peut masquer l'allongement des isoséistes le long de celles avec lesquelles il est en relation directe par suite des perturbations apportées par ce second système dans la propagation du mouvement sismique.

En résumé, les sismes qui ébranlent les failles paraissent le plus souvent être l'effet d'actions tectoniques non très éloignées, et généralement les mêmes que celles qui les ont ouvertes.

L'homme a pu voir d'importants tremblements de terre former des failles nouvelles, ou en augmenter notablement le rejet. Certains cas sont devenus classiques dans les fastes de la sismologie. Tout le monde connaît l'Allah Bund, ou digue de Dieu, dans le delta de l'Indus, et la faille de la Locride, à la suite des tremblements de terre de juin 1819 et d'avril 1894 respectivement.

Mais il ne faudrait pas croire que tout sisme avec ligne épacentrale située sur une faille, résulte d'une augmentation, si faible soit-elle, de son rejet, ou d'un glissement d'une de ses lèvres par rapport à l'autre.

C'est là un sujet sur lequel je dois nettement, quoiqu'à regret, me séparer du savant sismologue *Ch. Davison*, qui dans nombre de cas de tremblements de terre des îles Britanniques conclut à un tel glissement, dont il détermine le sens probable d'après la façon dont l'ébranlement s'est comporté par rapport à la faille, ou dont il a été ressenti dans les environs. Il tire aussi des déductions au moyen des bruits sismiques qui ont accompagné le tremblement de terre. Pour donner à ces suggestions une base expérimentale, *Horace Darwin* a tenté depuis 1900 de mesurer les mouvements supposés des lèvres de la faille. Il a choisi, d'après des considérations très rationnelles d'ailleurs, celle de *Ridge-way*, près d'*Upway* dans le *Dorsetshire*, pays où les tremblements de terre ne sont point rares. Jusqu'à 1901 du moins, ces recherches n'avaient point abouti. Auraient-elles plus tard plus de succès que cela ne prouverait point que la faille est la cause originelle du sisme, pas plus qu'un insuccès persistant n'aurait de valeur en sens inverse. C'est qu'en effet si, à une époque antérieure, l'effort tectonique a été assez intense pour aller jusqu'à la rupture des couches, avec ou sans rejet, à partir de ce moment il tend à s'épuiser graduellement, et n'est plus ultérieurement capable que de donner lieu à des sismes, sans faire mouvoir, si peu que ce soit, une des lèvres de la faille par rapport à l'autre.

Quand les environs d'une grande faille, comme celle du *Loch Ness*, sont le siège de sismes fréquents, on remarque souvent que les épïcêtres ne sont pas toujours situés sur la ligne même qu'elle détermine sur le terrain; ils manifestent presque toujours une prédilection marquée pour l'un de ses côtés par rapport à l'autre. Dans le cas actuel, c'est le côté oriental qui prédomine par le nombre d'épicentres. Quoique la détermination exacte de l'épicentre, quand il en existe un, soit généralement fort délicate parce que les observations sont trop grossières pour une construction très précise des isoséistes, cette particularité est indéniable. *Ch. Davison* en conclut, par exemple pour la fracture du *Loch Ness*, qu'un voussoir terrestre, mobile et instable, est compris entre elle et une autre faille parallèle située au delà et, par suite, à l'Est des épïcêtres latéraux, mais non encore reconnue sur le terrain, seulement présumée. Cet exemple de failles supposées pour les besoins de la cause se retrouve dans un assez grand nombre d'études géologiques sur des tremblements de terre particuliers. Je crois très imprudent, et, en tout cas, tout à fait antiscientifique, de conclure ainsi, *de plano*, à l'existence de failles ou de fractures hypothétiques, non encore décelées par les études géognostiques locales. En outre, il s'en faut que

les failles doivent suffire à tout expliquer. Il est beaucoup plus simple et surtout plus rationnel de penser que l'effort tectonique tend actuellement à se manifester latéralement à la fracture primitive, le long de la ligne des épïcêtres latéraux, ou même à une certaine distance, effort qui peut d'ailleurs ne pas être maintenant le même que celui qui a donné naissance à cette faille. Rien ne prouve non plus qu'un effort tectonique doive toujours rompre les couches terrestres exactement là même où il s'exerce. On conçoit très bien aussi qu'une fois cette rupture produite, d'autres actions géologiques subséquentes l'aient ultérieurement déblayée, comme c'est précisément ici le cas, et alors le fait même du changement ainsi opéré par tous ces phénomènes dans les rapports mutuels de position, d'arrangement et d'équilibre des couches, peut avoir, pour notre époque, déplacé latéralement la ligne suivant laquelle les efforts tectoniques peuvent se traduire au maximum sous forme de sismes, qu'il n'est pas interdit non plus de considérer comme les avant-coureurs de la formation d'une faille future, si toutefois ces efforts ont conservé une intensité suffisante pour vaincre un jour la résistance élastique des couches mises en jeu. En tout cas, c'est une tentative de rupture.

L'existence des sismes sympathiques ou de relais vient à point aussi corroborer d'une façon générale les considérations qui précèdent et en particulier la non-coïncidence de leurs épïcêtres soit avec l'effort tectonique générateur, soit avec la faille avec laquelle on les croit concomitants.

Bien des régions à tremblements de terre sont faillées, et cela suffit à faire supposer que ces accidents sont causes de sismes, bien entendu dans le sens figuré et indirect exposé plus haut. Mais il suffit, pour montrer que cette supposition, pourtant si naturelle en apparence, peut être quelquefois fort hasardée et même fausse, d'observer que les failles constituent à la surface du globe un phénomène beaucoup plus général que les régions instables. Autrement dit, il ne manque pas de régions faillées et disloquées qui soient devenues stables à la suite de l'extinction des efforts tectoniques. On n'a même pas le droit de penser que s'il tremble dans un pays non faillé, il y a tendance à formation de faille, c'est-à-dire qu'un sisme n'est qu'une faille avortée. A plus forte raison, comme on l'a déjà dit, une ligne d'épïcêtres ne doit-elle pas être considérée comme prouvant l'existence d'une faille non encore observée. D'ailleurs, nous connaissons trop mal encore les causes secondes, probablement multiples, des tremblements de terre, pour vouloir faire des failles une théorie générale de ces phénomènes. La

sismologie a tout intérêt à patienter, à avouer même son ignorance, et à se passer dans tel ou tel cas particulier d'une explication qui viendra à son heure.

Toutes les régions faillées ne sont pas instables, a-t-on dit plus haut. Et il doit en être ainsi, non seulement par suite de l'ancienneté des dislocations qui a permis l'extinction de l'effort de rupture, mais souvent aussi parce que précisément la formation même de la faille a pu dans bien des cas épuiser pour longtemps et même pour toujours l'activité tectonique disponible. La rupture a pu amener les couches à un état parfait de repos et d'équilibre. Mais par contre, on peut être, semble-t-il, absolument certain que toute faille a été à sa naissance accompagnée d'un tremblement de terre plus ou moins violent et d'intensité en rapport avec la nature et l'élasticité des roches, avec la longueur de la fracture et l'amplitude de son rejet, s'il s'est produit d'un seul coup.

Les grandes failles ne sont pas également stables ou instables sur toute la longueur de leur parcours. La variété des phénomènes géologiques est assez grande pour qu'il n'y ait pas lieu de s'étonner d'une particularité dont les exemples sont nombreux. C'est ainsi que celle du canal Calédonien n'est vraiment sujette aux sismes que dans sa partie septentrionale, de Fort William à Inverness. Sur de telles longueurs, les actions tangentielles ou radiales ont fort bien pu s'éteindre plus tôt en certains points qu'en d'autres de la même fracture.

Systèmes de failles parallèles et perpendiculaires.

Il arrive souvent que dans une même région les failles ou fractures, contemporaines ou non, forment des systèmes parallèles se coupant plus ou moins orthogonalement. C'est par exemple le cas du Chili central, à l'Ouest de la grande dépression longitudinale qui court au pied des Andes. Dans ces conditions, on peut être fort embarrassé pour décider lequel des deux systèmes est encore actif sous forme de sismes. Il faut alors chercher suivant lequel des deux s'allongent les isoséistes, mais le problème en est rendu d'autant plus délicat que l'autre système intervient pour modifier la forme de ces courbes par suite des perturbations qu'elles apportent à la propagation du mouvement sismique, et qui peuvent aller jusqu'à l'ovalisation, masquant ainsi l'allongement parallèlement au premier système. On pourrait être tenté de s'adresser *a priori* au système le plus récent, mais on peut s'y tromper, des failles anciennes étant quelquefois moins bien consolidées que d'autres plus

récentes, avoir été par exemple cimentées par des phénomènes de filonnement ou d'injections de roches, comme on le dira plus loin.

Fractures volcaniques.

Il est un genre de fractures terrestres qui passent pour engendrer fatalement l'instabilité : ce sont celles dites volcaniques. C'est que volcans et tremblements de terre ont été si souvent associés comme titres d'ouvrages et en-têtes de chapitres que ces deux genres de phénomènes ont fini par être considérés comme indissolublement liés les uns aux autres. Mais dans les pays où ils se donnent tous deux libre carrière pour les désoler, l'instinct populaire, souvent très clairvoyant, a dès longtemps fait la séparation et pris les volcans pour des soupapes de sûreté relativement aux tremblements de terre. Autrement dit, les deux phénomènes s'excluent mutuellement au moins dans une certaine mesure. La séparation des sismes en volcaniques et tectoniques est assez récente, la science n'ayant ici que de loin suivi l'observation vulgaire, comme cela lui arrive quelquefois. Et l'on sait bien maintenant que les tremblements de terre qui accompagnent les éruptions, même les plus violentes et désastreuses, sont d'ordinaire faibles et d'extension restreinte. La Montagne Pelée et le Morne de Saint-Vincent viennent d'en donner un exemple frappant, encore présent à tous les esprits.

Si l'on considère à la surface du globe non plus seulement les volcans actifs, ou d'assez récente extinction pour qu'on les puisse supposer susceptibles de se rallumer, mais ceux qui aux époques géologiques les plus variées et les plus anciennes, comme les plus modernes, ont laissé leurs produits témoigner de leur activité passée, on s'aperçoit que sauf de très rares exceptions, les régions qu'ils ont occupées sont remarquablement stables. Des éruptions tertiaires d'une intensité dont on ne peut que difficilement se faire une idée aujourd'hui, ont couvert d'énormes surfaces dans le Dekkan, dans le Nord-Ouest de l'Amérique du Nord, etc. Et cependant ce sont, surtout le premier, des pays de tout repos sismique. Dira-t-on que la faille volcanique n'est plus là soumise à aucun des efforts tectoniques auxquels ces éruptions ont dû leur origine, et que, complètement épuisés par la grandeur même des phénomènes volcaniques manifestés et par l'énormité des masses épanchées ou projetées, ces efforts n'ont plus à peine que la force nécessaire pour se traduire, non par des sismes, mais seulement par des sources thermales, plus ou moins régulièrement alignées comme les volcans

eux-mêmes? Cette réponse est insuffisante, car il serait peu vraisemblable que presque partout les efforts orogéniques aient à peu près disparu avec les phénomènes éruptifs. Mais *Branco* a jeté un certain discrédit sur les failles ou fractures volcaniques, dont parlent tant de traités de géologie et de géographie, et à sa suite *Boese* a montré en particulier qu'une des plus importantes et classiques d'entre elles, celle du Mexique, n'existe réellement pas. C'est du reste en vain qu'on chercherait une coupe géologique construite sur le terrain et accusant la coïncidence entre une ligne de volcans et une vraie fracture *importante* de l'écorce terrestre. On est ainsi amené à penser que l'expression de faille ou de fracture volcanique est à rejeter du vocabulaire géologique, comme ne correspondant point, au moins en général, à une réalité objective et qu'il faut s'en tenir simplement à l'idée d'une ligne de moindre résistance facilitant l'épanchement ou la projection des matières volcaniques, mais sans qu'il faille pour cela éliminer complètement l'intervention des actions tectoniques. Ce qui est vrai, c'est qu'au voisinage des lignes de volcans se rencontrent le plus souvent des fractures de plus ou moins même direction, ou bien des effondrements de l'écorce terrestre, apparaissant dès lors comme des phénomènes subséquents de même ordre que ceux éruptifs, et souvent en relation avec les régions instables. C'est ainsi que près de la ligne volcanique des Petites Antilles se trouvent les lignes instables des Grandes Antilles et du Venezuela, les unes comme les autres liées aux actions d'effondrement pliocène de l'Atlantique et de la mer Caraïbe, de même que les éruptions du Dekkan se sont fait jour non loin du delta de l'Indus, qui occupe un des points par où la mer jurassique a entamé le vieux continent Gondwanien, celles des Hébrides et de l'Irlande du Nord-Ouest près des lignes d'effondrement pleistocène de l'Atlantique du Nord-Est, etc.

Volcans de boue, salses, soffionis.

Les volcans de boue et autres manifestations du même genre ne constituent pas non plus, tant s'en faut, un critérium d'instabilité. Il suffit pour s'en convaincre de rappeler que les sismes de la presqu'île de Taman viennent de la haute vallée du Kouban et que ceux de Bakou et de ses environs émanent de Schémakha. Au reste, ce sont là phénomènes apparemment d'origine bien plus superficielle que les éruptions volcaniques ordinaires. A plus forte raison donc ne seront-ils pas en relation directe avec des tremblements de terre, sauf dans certains cas particuliers.

Lignes thermales.

Souvent les lignes volcaniques anciennes passent avant leur extinction totale par une période pendant laquelle l'activité thermique est leur dernière manifestation extérieure. Rien d'étonnant donc qu'elles ne correspondent pas non plus avec des régions instables. Il peut cependant s'y produire quelques sismes faibles et locaux, d'autant plus qu'une circulation prolongée d'eaux chaudes par les diaclases des roches voisines ne peut manquer d'y apporter des modifications profondes par suite de phénomènes chimiques, de dissolution, et autres, qui s'y produiront à la longue.

Il en va tout autrement quand des régions très disloquées sont en même temps le siège de nombreuses sources thermales qui profitent des failles. Dans ce cas, les conditions deviennent d'autant plus favorables à l'instabilité sismique. Les Pyrénées, le Venezuela, l'Algérie fournissent des exemples de ce genre.

Tout ce qu'on peut dire d'une façon générale, c'est que les régions thermales volcaniques sont beaucoup plus souvent stables que celles non volcaniques. Dans chaque cas particulier, il faudra chercher la cause des sismes sans se laisser aller, comme *Otto Volger*, à de dangereuses généralisations. Ce sismologue a, en effet, donné une influence prépondérante aux phénomènes chimiques dus à la circulation souterraine pour expliquer la plupart des tremblements de terre de la Suisse, après avoir été amené à établir cette théorie pour ceux du Valais de juillet 1855, théorie très contestable même pour ce cas particulier. Il existe toutefois des sismes pour lesquels cette cause paraît certaine. On peut citer par exemple ceux du Simmenthal et, en France, ceux de Bourbonne-les-Bains.

Filons, dykes et laccolithes.

Certaines régions très disloquées sont quelquefois absolument stables, ou du moins les tremblements de terre y sont rares et faibles. On en conclut à la complète extinction des efforts tectoniques qui les ont bouleversées à des époques antérieures. Cela se présente notamment dans certains pays miniers, où le filonnement semble avoir cimenté les couches en un bloc rigide et s'opposant à tout mouvement par manque d'équilibre. On peut citer par exemple certaines parties de la Saxe à l'Ouest de la Suisse saxonne, la région du grand lac Supérieur, etc.

Ailleurs de très longues fractures, remplies postérieurement à leur

ouverture par des matières diverses ont acquis de la sorte une grande stabilité sismique. C'est le cas des grands filons de quartz du flanc méridional de l'Erzgebirge, ou du sillon de Bretagne, respectivement perpendiculaires et parallèle aux systèmes de plissements qu'ils accompagnent. On pourrait citer aussi d'innombrables dykes de porphyre, basaltes, etc., et tout autant de laccolithes de matières exprimées de bas en haut à un état plus ou moins fluide et visqueux. Bref, tous ces phénomènes semblent plutôt devoir apporter avec eux un élément de stabilité, ne serait-ce que par consolidation subséquente des roches avoisinantes.

Plissements.

La relation entre les tremblements de terre et les failles ou fractures de l'écorce terrestre a été mise en avant depuis longtemps, tandis que les plissements paraissent dans l'opinion générale des sismologues avoir jusqu'à présent joué un rôle beaucoup plus effacé. Cependant ce sont là deux phénomènes dont la nature ne diffère pas essentiellement au fond ; l'un et l'autre sont dus aux efforts tangentiels résultant du refroidissement séculaire de l'écorce terrestre ; il est donc tout à fait naturel de penser que si les uns ont un caractère sismogénique bien marqué, il doit *a priori* en être de même pour les autres. Ces efforts ont pour premier effet de comprimer les couches, puis de les plisser et enfin de les rompre, sans que l'on puisse pour cela exclure des ruptures ou des failles formées indépendamment de tout plissement préalable ; cela dépend, bien entendu, de la nature et de la disposition des couches. Quoi qu'il en soit, et suivant l'élasticité plus ou moins grande de ces couches, dans bien des cas on arrivera à l'un des trois stades suivants : simple compression, se traduisant par l'augmentation rapide des dimensions des blocs aussitôt extraits des carrières (grès de Monson) ; plissements, qui peuvent n'affecter que la constitution interne de la roche, ou se manifester en grand en modifiant la topographie de la région soumise à l'effort, et c'est surtout ce second effet qui intéresse la sismologie ; enfin rupture et production de failles plus ou moins étendues, avec ou sans rejet. Les renversements de plis, les chevauchements et les charriages ne sont que des phénomènes secondaires, en rapport avec l'intensité des actions tectoniques originelles, avec la disposition mutuelle des couches, les conditions du relief extérieur local, celles de concordance ou de discordance, etc. Bref, tous ces phénomènes résultant d'une même cause, il n'est pas surprenant qu'ils

puissent caractériser des régions instables, si les efforts primitifs ne sont point complètement éteints.

La simple compression peut-elle occasionner des sismes quand l'obstacle vient à céder, c'est évidemment possible, mais il serait difficile d'en citer des cas bien définis.

Quant aux efforts de plissement proprement dits, on n'a guère songé jusqu'à présent à les faire intervenir comme pouvant donner lieu à des sismes, ou à des régions instables, explicitement du moins. Il paraît cependant hors de doute qu'il en soit ainsi pour plusieurs systèmes, comme j'ai commencé à le démontrer pour l'Erzgebirge et comme je me dispose à le prouver dans un mémoire spécial pour les plis armoricains (hercyniens ou varisiques) de l'Europe du Nord-Ouest. Cette déduction de la persistance de ces efforts de plissement, pourtant bien anciens puisqu'ils datent de la fin de l'époque carboniférienne, s'impose parce que leurs directions sont jalonnées d'épicentres assez nombreux, non seulement là où, visibles extérieurement, ils s'accusent dans le relief du pays, mais encore dans les plaines et les pénéplaines, où, affaîsés et masqués par des strates plus récentes, ils ne sont désormais reconnaissables que pour les géologues.

Cette persistance jusqu'à nos jours, sous forme de sismes, des efforts tangentiels de plissement aussi anciens, paraîtra beaucoup moins surprenante quand on se rappellera que les mêmes plissements ont joué dans les mêmes lieux à plusieurs reprises différentes correspondant à des époques géologiques séparées par de longues périodes de repos. La même remarque s'applique aux failles. En un mot, il y a des exacerbations intermittentes dans les actions tectoniques qui ont plissé ou disloqué l'écorce terrestre. On conçoit très bien dès lors que les efforts de plissement engendrent maintenant encore des tremblements de terre au même titre que ceux de rupture.

Là encore l'ancienneté plus grande ne correspond pas toujours à l'extinction, c'est-à-dire que des chaînes plissées antérieurement à d'autres peuvent être cependant plus instables. Comme résultats intéressants d'études qu'il ne s'agit pas de développer ici, je dois dire qu'à ma connaissance actuelle du moins, les plus anciens plissements susceptibles de jouer encore un rôle sismique sont ceux de la fin de la période carboniférienne. Les plissements calédoniens de l'époque dévonienne dans le Nord de l'Europe et de l'Amérique, et ceux présiluriens de la chaîne des Aravalis dans l'Indoustan, paraissent parvenus au repos le plus complet. Quant aux derniers plissements alpins, on ne saurait encore se prononcer en toute connaissance de cause en raison de la

complexité extrême des actions, qui ont donné aux Alpes, instables, leur configuration actuelle.

Quant à espérer mesurer l'augmentation de courbure qui pourrait résulter pour les plis sismiquement instables de la continuation sous forme de tremblements de terre des efforts tectoniques qui les ont engendrés, ce serait probablement une recherche encore plus délicate et peut-être plus illusoire que celle, tentée par *H. Darwin*, de l'augmentation du rejet des failles et du glissement relatif de leurs lèvres.

Enfin, si l'on a pu dire que vraisemblablement toute production de faille a été accompagnée d'un tremblement de terre, il serait certainement téméraire d'en affirmer autant des plissements.

Il n'est pas douteux que les renversements de plis, les chevauchements et les charriages de couches ne puissent correspondre à des régions instables. En particulier, *Oldham* a invoqué le premier de ces phénomènes pour les sismes de l'Assam, pays où se trouve une grande faille chevauchée (*thrust-plane*). Mais ces phénomènes se rencontrent aussi dans des régions stables. C'est que, dus à des actions tectoniques d'une incomparable intensité, ils ont justement à cause de cela même pu en marquer la fin, en raison de la grandeur du travail mécanique accompli.

Horsts.

Les horsts ou les massifs immobiles au milieu de voussoirs terrestres formés de couches plus récentes, et qui ont été à plusieurs reprises soumises à des mouvements d'élévation et de dépression, sont le plus souvent très stables, tandis que les couches qui viennent s'appuyer en discordance sur leurs bords sont plus fréquemment instables. Ici le manque d'équilibre est trop patent, comme cause possible de sismes à défaut d'autres, pour qu'il y ait lieu de développer ce point davantage.

Fragments des anciens continents.

Les grands fragments du continent primaire de l'hémisphère Nord, comme le Canada par exemple, et plus encore ceux de l'hémisphère Sud, comme l'Indoustan, l'Arabie et une grande partie de l'Afrique, ignorent presque complètement les tremblements de terre, sauf cependant sur leurs bords, comme ultime manifestation des actions relativement modernes qui les ont démantelés, et là surtout où ces mêmes actions ont commencé à les morceler. Cette simple remarque déjà

faite à propos des sismes du bas-Indus, par où la mer jurassique a pénétré dans le continent Gondwanien, montre combien est grande la dépendance entre la stabilité d'une région et son histoire géologique, et combien celle-ci est appelée à jeter un jour presque inattendu sur celles-là. Il s'ensuit aussi que l'étude, à ce point de vue, des transgressions marines anciennes, mais toutefois d'époques géologiques point trop reculées, peut aussi apporter son contingent de lumières, et ne doit pas être négligée.

Contrairement aux transgressions, certains points de la surface du globe sont restés depuis de très anciennes époques sur le bord des mers géologiques successives, ce qui se reconnaît par la succession complète des sédiments littoraux correspondants et déposés en concordance les uns sur les autres. Ce cas se présente notamment à Valogues, dans le Cotentin, et ce point, qui est resté indéfiniment sur le bord du continent armoricain, est stable. C'est donc que les actions verticales ou radiales qui ont, à une époque cependant assez récente, fait émerger ces couches au-dessus du niveau actuel de la mer, n'ont point actuellement persisté sous forme de sismes.

Limites de terrains.

Les limites de terrains jouent quelquefois un rôle sismogénique, assez bien défini. Cela se conçoit facilement par manque d'équilibre, surtout quand il y a discordance et brusque changement de niveau. En ces points, les efforts tectoniques voisins auront plus de facilité pour se manifester.

Bradisismes.

Ce qu'on vient de dire de la stabilité des environs de Valogues, comme conséquence de l'extinction des actions verticales ou radiales, nous amène tout naturellement maintenant à l'étude du rôle des phénomènes géologiques auxquels elles donnent lieu.

Issel a donné le très suggestif nom de bradisismes aux mouvements d'exhaussement et d'affaissement que l'on constate en bien des points de la surface terrestre, et qui se manifestent par les terrasses marines, à coquilles contemporaines ou quaternaires, exondées à des hauteurs variables au-dessus du niveau actuel de la mer, ou par des plages immergées que des restes de l'industrie humaine font reconnaître comme ayant été émergées à une époque peu ancienne. Ces phénomènes semblent plus fréquents dans les régions tempérées et polaires

que dans les régions chaudes, ou en tout cas y présenter un certain caractère de généralité en ce sens que les exhaussements sont sur de grands espaces exclusifs des affaissements, et inversement. Ce caractère très particulier a précisément conduit un certain nombre de savants, et non des moindres, à refuser à ces mouvements toute réalité et à les considérer comme des apparences résultant de modifications séculaires dans la forme de la surface d'équilibre des mers, modifications que l'on ne peut d'ailleurs guère expliquer que par des actions tout à fait hypothétiques d'ordre extraterrestre. Nous n'avons ici ni à nous prononcer pour ou contre, ni moins encore à développer de telles considérations. Il nous suffit de constater que d'une façon assez générale, ces mouvements, au moins apparents, des lignes des côtes, et quel que soit d'ailleurs leurs sens, ne coïncident pas avec des régions instables, géologiquement s'entend. Cette observation serait un argument en faveur de ceux qui nient la réalité de ces mouvements de l'écorce terrestre, à moins qu'on ne se contente de dire qu'étant de nature très superficielle, et que s'opérant fort lentement, ils ne sont généralement pas cause de séismes.

Il n'en est pas toujours ainsi cependant, en particulier quand ces mouvements ont atteint une amplitude considérable. Cela se présente par exemple en Ligurie. *Issel* a montré, dans son étude du tremblement de terre du 25 février 1887 sur la côte d'Azur, que les vallées actuelles du littoral se continuent sous mer jusqu'à une profondeur de 1800 m., ce que rend manifeste l'allure des courbes bathymétriques. Ce géologue a aussi étudié les conditions géologiques de cet important affaissement, et a reconnu dans les montagnes voisines des preuves d'un autre mouvement d'exhaussement de presque autant d'amplitude, et il a pu dater tous ces mouvements qui ne dépassent point l'ère messinienne, ou le Pliocène. L'instabilité bien connue des côtes liguriennes ne saurait guère être tout à fait indépendante des grandioses vicissitudes qui, pour *Issel*, n'ont peut-être pas encore dit leur dernier mot.

On connaît un certain nombre de cas où de grands tremblements de terre ont été accompagnés de modifications notables dans le relief terrestre : Croatie (tr. du 19 novembre 1880), Sumatra (tr. du 17 mai 1892), Assam (tr. du 12 juin 1897), etc., pour ne citer que les cas bien vérifiés, car on en connaît quelques autres moins certains, en Suisse et en Italie par exemple. Ces modifications ont été révélées par la géodésie. D'autres fois des vieillards ont pu constater dans le cours de leur vie des changements dans le paysage de leur pays, par exemple la visibilité d'un clocher d'un point d'où on ne pouvait l'apercevoir autre-

fois, et si ces observations n'ont pas le caractère de certitude des précédentes, que des opérations géodésiques ou des nivellements de précision rendent tout à fait indubitables, on ne doit cependant pas en nier la possibilité. Il faut donc bien admettre que dans certains cas l'écorce terrestre est encore soumise à des mouvements sensibles, qui laissent une trace permanente dans son relief, et loin de considérer ces modifications comme la conséquence des tremblements de terre à la suite desquels on les a constatées, il faut au contraire tenir celles-ci comme la véritable cause des tremblements de terre, ou mieux encore : modifications du relief et sismes sont des effets du même ordre, résultant d'une cause géologique commune. Cette dernière manière de voir s'accorde bien avec les travaux de *Lersch* et d'*Harboe* sur les changements de niveau autour d'Agram, lesquels ne se sont pas restreints à la période du tremblement de terre de 1880, mais paraissent l'avoir précédé de longtemps et avoir continué après. Le tremblement de terre aurait coïncidé avec une exacerbation de ce mouvement continu.

Les mouvements dont on vient de parler plus haut, Croatie, Sumatra, Assam, etc., ont été révélés par la géodésie ; ils sont donc hors de discussion, en tant du moins qu'ils ne sont pas de l'ordre des erreurs d'observation, ce qui nécessite un examen spécial dans chaque cas particulier. Ils ne dépendent pas directement des modifications, possibles d'après certains savants, du niveau de la mer. Il en est autrement quand on fait intervenir les nivellements non plus géodésiques, mais topographiques, ces derniers reposant sur l'invariabilité du niveau de la mer.

En 1888, le colonel *Goulier* a comparé les résultats du nivellement de la France par *Bourdaloue* (1857-1865), révisé par le colonel *Richard*, avec ceux du nivellement de précision, commencé en 1884, et cela plus spécialement pour la région qui s'étend de Marseille à Lille. Il a trouvé que l'écart des deux séries d'observations, nul à Béziers et à Marseille, augmente graduellement et assez régulièrement du Sud au Nord, pour atteindre 0^m,78 à Lille, soit une différence de 1 millimètre par 27 kilomètres. Il en résulterait un mouvement général d'affaissement du sol de la France, dans cette zone tout au moins, autour d'une charnière méridionale. On a pas manqué de faire observer que sur une aussi grande distance, ces écarts peuvent être exclusivement attribués aux erreurs d'observation, et au sein de la Société géologique de France a eu lieu en 1890 une discussion contradictoire relative aux assertions de *Van den Broeck* qui, étudiant la marche des courbes d'égale dénivellation du colonel *Goulier*, avait émis l'opinion que les massifs des

roches cristallines, surtout des plus anciennes, formaient comme des butoirs, ou des horsts, qui, contrariant le phénomène, ne semblaient pas y obéir autant que les terrains secondaires et tertiaires plus meubles, et forçaient ces courbes à les contourner. *Van den Broeck* n'a vu dans cette allure de ces courbes qu'un effet de résistance propre des massifs cristallins, et dans l'augmentation des écarts du Sud au Nord une conséquence du travail orogénique qui, à des époques assez récentes, s'est manifesté, avec une intensité considérable, dans la région méditerranéenne, il faudrait ajouter et alpine. Sans nier la valeur de l'objection relative à la grandeur des erreurs d'observation, je dois dire ici que ces courbes ne me paraissent pas absolument indépendantes des régions stables et instables de la France entre la Méditerranée et la Manche. De même que pour la Croatie, je crois qu'il y a lieu de revoir les résultats des études comparatives de nivellement d'époques différentes, car la remarque faite tout à l'heure tendrait à montrer qu'il y a là autre chose que le résultat d'erreurs systématiques. La question ne doit pas être considérée comme entièrement résolue dans le sens négatif, ainsi qu'on l'a fait à la Société géologique de France.

Les submersions récentes qui ont donné lieu à des mers peu profondes peuvent avoir leurs côtes stables ou instables, quoique ces mers ne soient pas très distantes les unes des autres. C'est le cas de la mer du Nord et de la Manche, ouvertes toutes deux à l'époque pleistocène et qui prolongeaient les vallées du Rhin et de la Seine, par des vallées qui s'étendaient jusqu'à hauteur des îles Feroë d'une part, et de celles des Scilly et du Finistère d'autre part. Les côtes bretonnes et anglaises de la Manche sont assez souvent ébranlées par les sismes, tandis que celles de la mer du Nord n'en ressentent presque jamais. Si donc on veut que dans le premier cas les actions de submersion qui ont au Sud et à l'Ouest isolé les îles Britanniques du continent, aient encore quelque influence sur la production des tremblements de terre des côtes de la Bretagne et de la Cornouailles, il faut chercher quelque différence locale de nature à expliquer la stabilité des côtes orientales de l'Angleterre. Sans qu'il soit besoin de développer ce sujet, on notera seulement que le fond plat de la mer du Nord repose, par l'intermédiaire d'alluvions continentales et glaciaires, sur des sédiments tertiaires et secondaires, qui se prolongent en pente douce jusqu'à la chaîne occidentale ou Pennine, tandis que pour la Manche le fond s'appuie directement et en discordance contre les massifs primaires disloqués, restes du vieux continent du Nord-Ouest de l'Europe.

Ces quelques considérations montrent combien on doit se garder

des généralisations hasardées, et combien peuvent différer en stabilité sismique des régions qu'un examen un peu superficiel aurait fait considérer comme se trouvant dans des conditions géomorphogéniques semblables.

Relief.

Par lui-même, le relief n'a pas d'influence sismogénique bien marquée. On peut bien citer des régions où le tassement de couches horizontales meubles semble occasionner des tremblements de terre faibles et locaux, et d'autres où ils proviennent d'éboulements ou de glissements résultant de pentes trop fortes présentées par des couches discordantes ou mal assises. Mais ce sont là de simples accidents ne correspondant pas à ce qu'on est convenu d'appeler des régions sismiquement instables.

Il en va tout autrement si l'on considère le relief comme la résultante actuelle des actions géologiques, tectoniques et géomorphogéniques antérieures. Alors on voit nettement la stabilité ou l'instabilité sismiques en relation avec l'histoire des vicissitudes du passé. Et le moment est bien venu de justifier les lois de relations entre le relief et la sismicité que j'ai énoncées en 1895. A cette époque, j'étais parvenu à terminer la description sismique du monde entier, autant du moins que les documents d'alors pouvaient le permettre, et quoique la publication n'ait pu se terminer que plus tard. Ces lois résultaient uniquement d'un examen, même sommaire et superficiel, de mes cartes sismiques, et je les considérais comme donnant des caractères au moyen desquels on pouvait différencier des régions voisines, quant à l'importance et au nombre des sismes qui les agitent en moyenne. C'étaient donc des lois purement relatives que la continuation de mes recherches n'a point infirmées, loin de là.

Or on peut synthétiser ces lois de la façon suivante : Il y a tendance à plus grande instabilité dans le cas de brusques et importants changements de pente et de niveau. Qui ne voit que ces derniers caractères correspondent en général à de grandes dislocations d'ordre géologique et à de puissantes actions tectoniques ou géomorphogéniques, dont l'influence sur la sismicité est indéniable? Ces lois semblent donc bien, d'après tout ce qui précède, représenter la réalité des faits; il est trop naturel de penser que l'instabilité sera d'autant plus grande que ces actions auront plus profondément accentué le relief des régions considérées, sans compter qu'on est aussi en droit de faire intervenir dans une certaine mesure le plus ou moins de soutien ou d'équilibre des

couches terrestres, dernier facteur qui dans bien des cas permet aux actions géologiques persistantes de se manifester plus facilement sous forme de sismes.

Mais le relief résulte aussi d'effets d'érosion et de dénudation qui sont venus donner le dernier coup de ciseau au paysage. Il va sans dire que ces actions toutes superficielles ne peuvent avoir d'influence sismogénique marquée. Elles ont pu agir au maximum et laisser la région parfaitement stable. C'est le cas, par exemple, de la Suisse saxonne, un des pays les plus pittoresques du monde, que l'on prend ici parmi beaucoup d'autres. Deux systèmes de diaclases, à peu près orthogonaux entre eux, ont transformé la surface horizontale du grès crétacé supérieur (*Quadersandstein*) en une sorte de gigantesque mosaïque. Puis les cours d'eau se sont frayé un chemin par les plus importantes fractures en creusant de véritables cañons, et après qu'un certain nombre des éléments de la mosaïque eurent été déblayés, abrasés et entraînés au loin, les autres sont restés en place en forme de piliers de terrains plus anciens, couronnés d'entablements de grès cénomaniens constituant autrefois un manteau continu. La Suisse saxonne est stable parce que ces actions tectoniques qui ont ouvert les diaclases sont entièrement éteintes, et cela en dépit du caractère violemment disloqué du pays, où les actions de dénudation et d'érosion ont atteint une extraordinaire intensité.

Tous les phénomènes dont on vient d'esquisser rapidement le rôle sismogénique possible, ressortissent directement à la géologie. Il en est quelques autres qui ne laissent pas que de donner quelquefois de précieuses indications sur la raison d'être de l'instabilité sismique.

Déviations du fil à plomb.

Les déviations du fil à plomb permettent dans certains cas de suggérer une explication aussi plausible qu'inattendue des tremblements de terre de certaines régions. La vaste plaine alluviale qui s'étend sur quelque 1 600 kilomètres du delta du Gange et du Brahmapoutre à celui de l'Indus, est en plusieurs points le siège de tremblements de terre, sinon très nombreux, du moins assez intenses pour avoir quelquefois produit des dégâts, à Delhi par exemple. Ils ne peuvent être attribués aux dislocations de l'Himalaya, et vers le Sud les accidents géologiques des parties voisines de la péninsule indoustannique sont dénués de toute activité sismique. On ne savait trop à quoi les attribuer, l'on en était réduit à penser que les puissantes alluvions de la plaine étaient des dislocations inconnues des couches profondes sous-

jaçentes, procédé d'explication qui ne pouvait satisfaire personne. Qu'il me soit permis de lancer ou plutôt de suggérer, *pour ce qu'elle vaut* bien entendu, une opinion à ce sujet et qui permet de concrétiser l'explication précédemment donnée.

Depuis longtemps on savait que l'Himalaya n'infligeait point au fil à plomb la déviation que son énorme masse aurait dû faire supposer. On en concluait à un manque de densité quelque part dans cette portion de l'écorce terrestre; mais ce n'était guère là que répondre à la question par la question. Or M. *Burrard* vient de constater qu'au Nord de la ligne qui joint Calcutta au Radjpoutana le fil à plomb est dévié vers le Sud et qu'au Sud de cette même ligne il l'est vers le Nord. Cette double observation, concordante des deux côtés de cette ligne, rend évident un excès de densité au-dessous d'elle, c'est-à-dire dans une région bien localisée, et on ne peut l'expliquer que par un substratum de roches denses formant vraisemblablement les racines de quelque ancienne chaîne de montagnes, complètement abrasée et effondrée, que la géologie seule n'avait point encore fait soupçonner. Or qui dit chaîne de montagnes, évoque l'idée de nombreuses et intenses dislocations. Il est dès lors moins surprenant que la plaine indo-gangétique éprouve quelques sismes en relation avec ces dislocations inconnues, et l'hypothèse faite antérieurement n'est plus aussi en l'air.

Déviations des courbes magnétiques.

On n'en a point encore fini avec des phénomènes tout à fait étrangers à la sismologie, en apparence du moins, et qui peuvent dans certains cas mener sur la voie de l'explication de l'instabilité de certaines régions. Les courbes du magnétisme terrestre sont dans ce cas, parce qu'elles sont nettement influencées par la nature des roches sous-jaçentes et par leur arrangement mutuel, c'est-à-dire par la disposition relative que leur ont donnée les actions tectoniques antérieures. Il est donc certain que leurs irrégularités, reflétant en quelque sorte la constitution du substratum, pourront donner lieu à des suggestions intéressantes, quant à l'instabilité des régions où on les rencontrera. Jusqu'à présent, ce point de vue tout spécial n'a pas été mis en œuvre, on s'est contenté seulement d'étudier les perturbations subies par ces courbes à la suite des grands tremblements de terre, par exemple *Tanakadate* pour celui de l'Owari et du Mino en novembre 1891. Malheureusement, je ne saurais citer actuellement d'exemples bien définis où l'on pourrait faire usage de telles suggestions.
