

Zeitschrift: Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 14 (1965-1968)
Heft: 4

Artikel: Evolution des idées sur le déplacement des lignes de rivage : origines en Fennoscandie
Autor: Wegmann, Eugène
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-258672>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.02.2026

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

Evolution des idées sur le déplacement des lignes de rivage

Origines en Fennoscandie ¹

PAR

EUGÈNE WEGMANN ²

« En toute matière, ce qui m'intéresse, c'est cette transformation par laquelle le chaos devient maniable par l'homme. »
PAUL VALÉRY.

Introduction

Celui qui parcourt les franges d'îles et de presqu'îles qui entourent la Baltique et qui étudie les roches moutonnées découvre de nombreuses inscriptions sur les surfaces polies par les glaciers et lavées par les vagues. Ces inscriptions gravées dans les roches du vieux Précambrien sont accompagnées d'une marque horizontale indiquant le niveau de l'eau au moment où ces textes furent tracés. Ceux-ci comprennent le plus souvent le nom de l'auteur, la date et parfois des renseignements supplémentaires rappelant l'événement dont le souvenir devait ainsi être perpétué. Ces documents montrent clairement que le niveau de la Baltique a changé pendant les temps historiques. Mais ce ne sont pas les seuls témoins. Ceux qui savent interpréter les traits inscrits dans le paysage reconnaissent ce phénomène aussi dans les nombreuses formations de plage visibles un peu partout à l'intérieur du pays et surtout aussi dans les régions bordant l'océan Arctique. Ces traces d'anciens rivages se rencontrent parfois à plus de 200 m d'altitude au-dessus du niveau actuel et souvent à une grande distance du rivage de la mer d'aujourd'hui.

Les déplacements de la ligne de rivage ont été observés depuis longtemps. Pour les Vikings, c'était certainement une donnée de la nature, puisque quelques-unes de leurs lois réglaient les droits de propriété des prés ayant émergé des eaux de la Baltique. C'est donc une observation plus que millénaire.

Le déplacement des lignes de rivage eut des conséquences historiques et économiques importantes. La ville de Björneborg-Pori était située au bord de la Baltique du temps de la Hansa. Actuellement, elle est entourée par des champs et des prés à perte de vue et le port a dû être déplacé à maintes reprises pendant les siècles passés ; il est actuellement aménagé sur un îlot rocheux, Mäntyluoto, relié par une digue et un pont à la terre ferme, à une trentaine de

¹ Publié avec l'aide de la Fondation Amrein-Troller (Gletschergarten Luzern) et des Fonds Louis Agassiz et François-A. Forel de la SVSN.

² Adresse : 43, faubourg de l'Hôpital, 2000 Neuchâtel, Suisse.

kilomètres de la ville. Le déplacement forcé des ports et des centres commerciaux est bien illustré par la reconstitution cartographique de la région de la ville de Vasa en Finlande pour un espace de 1500 années, par RENQUIST (1948) (fig. 1). Un petit archipel apparaît vers l'an 300, à l'époque de la christianisation de l'empire romain (en haut, à gauche). La carte suivante montre la contrée du temps des Vikings, vers 800 ; on la voit ensuite vers 1300, du temps des origines de la Confédération helvétique, et, pour finir, la région comme elle se présentait au commencement de ce siècle (à droite, en bas).

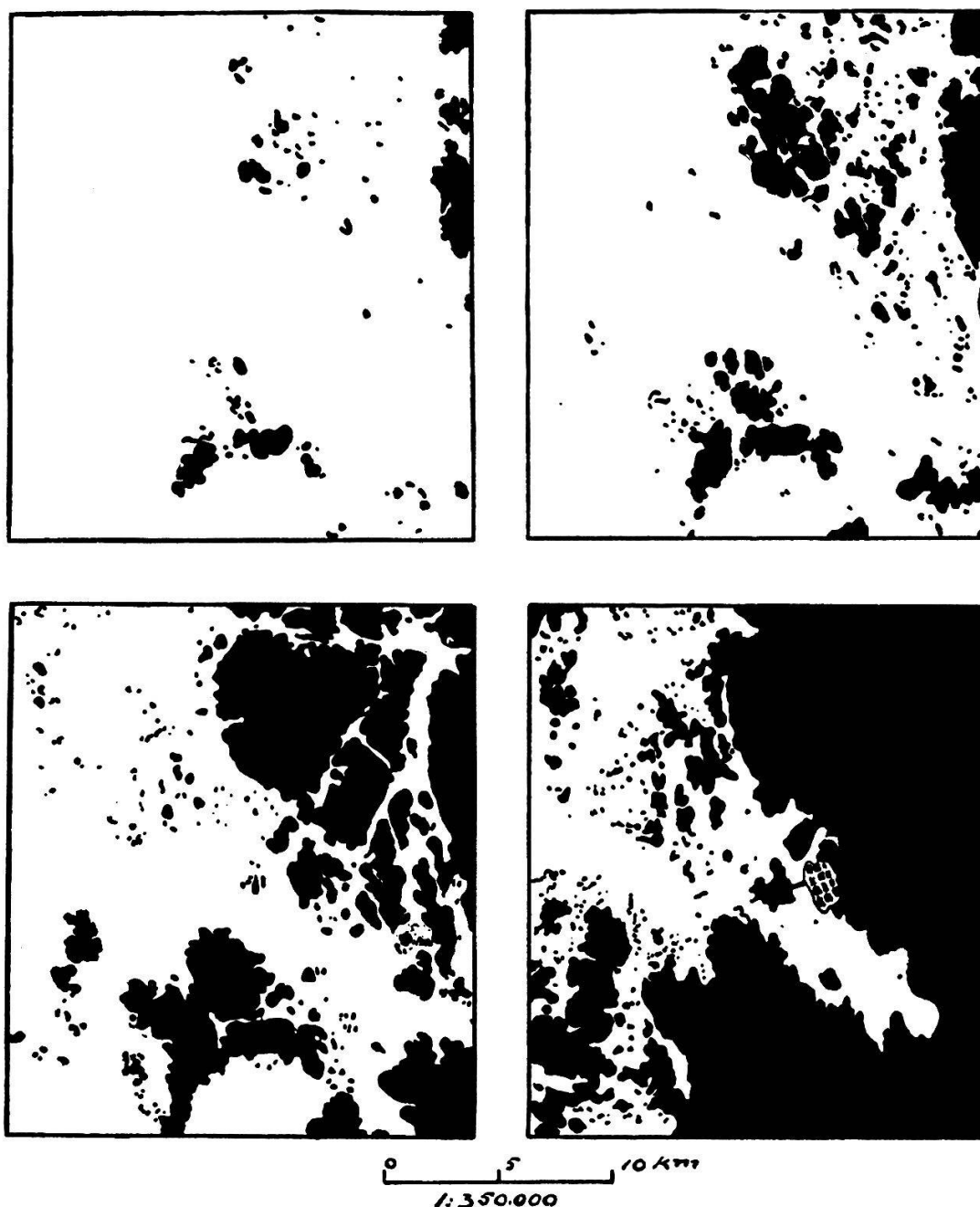


Fig. 1. — Déplacement des lignes de rivage dans la région de Vasa (Ostrobothnie, Finlande) depuis le temps de l'an 300 après J.-C. (en haut à gauche) en passant par les temps de 800 (en haut à droite), par l'époque de 1300 jusqu'au commencement de ce siècle, d'après RENQUIST (1948).

Un troisième exemple est fourni par l'évolution du lac Mälaren, en Suède, entouré par une série de vieilles villes. Autrefois, le lac était relié à la mer par des détroits navigables permettant aux bateaux venant de la Baltique de passer directement dans les eaux intérieures et, en cas de besoin, de s'y réfugier. Pendant le XI^e et le XII^e siècles, le lac fut coupé de la mer par l'apparition d'un seuil rocheux. L'émissaire se transforma petit à petit en rapides et devint un obstacle insurmontable pour la navigation. Les marchandises durent être transbordées, de sorte que le site au bord des rapides prit une importance grandissante et devint la capitale, la ville de Stockholm. Les changements de la ligne de rivage dans le lac Mälaren furent observés et décrits en 1679 par le maître de LINNÉ, Olaus RUDBECK.

Mais le phénomène du déplacement des lignes de rivage n'influence pas seulement le cours de l'histoire. Des répercussions sont encore plus sensibles dans l'évolution biologique. Des hectares émergent chaque année de la mer et ils sont peuplés par la végétation terrestre. Les premières associations se transforment graduellement, mais si les conditions changent rapidement, certaines de ces associations n'ont pas le temps d'atteindre un équilibre. Le relief entourant le golfe de Bothnie est peu accentué, de sorte que les lignes de rivage sont souvent indécises et elles se déplacent sur de grandes distances horizontales lors des changements de niveau. Des changements allant jusqu'à un mètre peuvent être observés dans l'espace de quelques heures ou de quelques jours ; ils sont dus aux conditions météorologiques. A ces oscillations de courte durée, se superposent des déplacements séculaires de la ligne de rivage. La végétation occupe les territoires libérés par la mer. L'immigration se fait en plusieurs vagues successives, comprenant des associations différentes, depuis les pionniers adaptés à la mer peu profonde en passant par les prés marécageux, jusqu'aux types de flore peuplant les terres fermes. Une série de lignées d'évolution, comprenant des associations différentes, peut être distinguée suivant les conditions topographiques, hydrologiques et climatiques (BRUNBERG et BÄRLUND, 1948). Le départ est différent suivant le caractère des eaux ; celles-ci, salées ou saumâtres en dehors des archipels, passent par différents degrés de salinité entre les îles et deviennent douces dans les parties internes de la région côtière. Mais une fois les conditions de la terre ferme établies, les changements des associations continuent et se font sentir aussi dans la végétation forestière (APPELROTH, 1948). Ces modifications dépendent en partie de l'évolution des eaux souterraines.

L'immigration de la végétation (et de la faune qui l'accompagne) a été observée depuis longtemps et ce phénomène offre un intéressant sujet de recherches pour les biologistes des pays nordiques. Laissant aux experts en successions végétales et animales ce côté du problème, nous essayerons d'esquisser l'histoire de l'exploration physiographique du phénomène. En partant de l'empirisme des temps anciens, la science a petit à petit essayé de saisir de quoi il s'agit, de mesurer les déplacements et d'en expliquer le mécanisme, en le reliant à différentes catégories d'autres événements.

Les buts de cet exposé

De nombreuses pistes furent suivies, des méthodes d'observation et de mesures inventées, des images directrices proposées pour y placer les données et les coordonner de différentes manières, avant d'arriver aux concepts actuels. Mais même ces connaissances actuelles, vues dans la perspective de l'histoire de la science, montrent clairement leur caractère d'approximations successives et deviennent ainsi le départ pour de nouvelles recherches.

Afin de pouvoir suivre la démarche des investigations, il est nécessaire de faire, pour commencer, abstraction des théories modernes et de se représenter ce qui était observable avec les méthodes et techniques des différentes époques du passé. Il faut tenir compte aussi bien des images directrices qui se relayent au cours de l'histoire, que de la place que ces images occupent dans la représentation du monde. Chaque auteur (aussi bien dans le passé qu'à présent) est conditionné par une multitude de facteurs internes et externes. Il faudrait pouvoir les suivre comme certains biographes l'ont fait (HAGBERG, 1939 ; BAILEY, 1962) ; il faudrait pouvoir reconstituer l'ambiance, aussi bien celle des savants que celle des problèmes (WEGMANN, 1958), et situer le tout dans l'histoire générale. Il est important de noter aussi l'influence des idées sur l'observation des phénomènes naturels. Ces idées sont souvent déterminées aussi bien par des images archétypiques que par des observations et ces images servent à sélectionner les observations. En essayant de suivre ainsi la pensée, on s'aperçoit, comme Arthur KOESTLER l'a souligné, que les buts des anciennes recherches étaient bien différents de ce qu'ils apparaissent dans la perspective d'aujourd'hui, mais aussi que les anciens auteurs estimaient les résultats de leurs recherches d'une manière assez différente de l'échelle des valeurs que nous leur appliquons actuellement. Certains de leurs résultats jugés comme importants à leur époque, sont considérés aujourd'hui comme secondaires, d'autres plus ou moins accessoires à leur époque, ont avancé au premier plan. Ce n'est toutefois pas une règle générale, de sorte qu'il faut examiner chaque cas pour lui-même. Une autre difficulté est constituée par le fait que non seulement beaucoup de données nous manquent, mais aussi la place pour les exposer en détail.

Il est évidemment impossible d'approfondir un tel exposé de l'évolution avec tout son réseau anastomosé de connexions. Il ne peut s'agir que de dégager quelques-unes des *lignes essentielles*, d'analyser un nombre limité de travaux marquant les tournants et de situer les points de contact et d'enchaînement avec les traces du développement d'autres branches.

Les déplacements de la ligne de rivage

La donnée primaire était le *déplacement de la ligne de rivage*, attesté en de nombreux points aussi bien par l'observation directe que par la tradition. Deux éléments interviennent, l'un mobile, la nappe d'eau, et l'autre, considéré comme solide, la terre ferme. Il était naturel de rendre l'élément mobile en premier lieu responsable et d'admettre que le niveau marin avait changé.

Cette première hypothèse apparaît déjà dans les légendes les plus anciennes du déluge et dans certaines cosmogonies. On retrouve cette image archétypique chez de nombreux peuples anciens depuis le Proche-Orient, jusqu'en Amérique et en Extrême-Orient. Les changements de niveau des eaux sont, d'après ces sources, la suite de l'augmentation ou de la diminution des quantités d'eau liquide, d'une part par les précipitations, et d'autre part par l'évaporation. Cette hypothèse se base sur une expérience courante, faite depuis longtemps par les différentes branches de l'humanité. L'ultime cause de l'augmentation des précipitations et de la diminution des eaux, était généralement interprétée comme la suite de la colère et de l'apaisement des puissances célestes.

Cette manière de voir se rencontre à travers le Moyen Age. Les divers éléments de ces traditions, profondément ancrés dans l'image du monde, influencèrent les interprétations successives, et cela jusque dans les temps modernes. On les retrouve dans certaines hypothèses encore actuellement en cours. Ce sont donc des images archétypiques, dont on voit affleurer de temps en temps des éléments sous la couverture des observations, mesures, méthodes et techniques qui se sont accumulées sur ce fond.

Un exemple intéressant, cité par RENQUIST (1948), se trouve dans un sermonnaire finnois de l'évêque Eric ERICIS, paru en 1621. Son auteur remarque, en commentant le chapitre 22 de l'Evangile de Luc, que tandis qu'à l'étranger, des inondations noient des villes et des campagnes, les eaux se retirent en Finlande, de sorte que là où régnait la mer, on voit maintenant des prés et des étendues de sable. L'auteur a certainement observé ces faits. Il les interprète comme des signes de l'approche du jugement dernier.

Début des recherches scientifiques

Les recherches scientifiques, dans le sens moderne, commencent avec une personnalité de grand format, le Suédois Urban HJÄRNE (1641-1724). D'abord étudiant à l'université de Dorpat, il eut à subir les suites des guerres avant d'arriver en Suède et à l'université d'Uppsala. Docteur en médecine de l'université d'Angers et membre de la Royal Society de Londres, il était un précurseur dans beaucoup de domaines. Médecin en chef (archiatre), il devint médecin du roi et président de l'ordre des médecins. D'abord membre et plus tard vice-président du Conseil des mines, il fit partie de nombreuses autres commissions politiques et économiques. Il lutta contre les procès des sorcières, contre les impôts trop lourds, contre l'alcoolisme et l'utilisation abusive des forêts. S'intéressant aux sciences naturelles et à leurs interactions avec la médecine, la santé publique et l'économie du pays, il eut des initiatives dans de nombreux domaines. C'est ainsi qu'il créa un jardin botanique, qu'il fonda le premier laboratoire de chimie en Suède et institua l'enseignement de cette branche. Il essaya d'organiser les services médicaux et sanitaires, de répandre des connaissances et de combattre les préjugés. La langue suédoise et la réforme de l'orthographe lui tenaient à cœur et on lui doit des tragédies et le premier roman suédois. Après la mort de Charles XII, il fut l'un

des deux hommes de confiance chargés d'examiner et de critiquer la nouvelle constitution libérale. Ayant entrepris de nombreux voyages à l'étranger et dans les différentes parties du royaume, il rassembla de nombreuses observations, s'étendant depuis les mines et les traitements des minerais jusqu'aux plantes médicinales, aux mœurs et à l'économie des habitants. Il se proposa d'écrire une « *physica specialis* » de la Suède. Dans cette description, le déplacement des lignes de rivage jouait aussi un rôle.

HJÄRNE envoya en 1694 un questionnaire à un cercle étendu de personnalités du royaume, dans lequel il demande à ses correspondants des observations, des interprétations et des opinions concernant les changements des lignes de rivage. Il demande, entre autres : « Est-ce que des rochers se sont montrés là où il n'y en avait pas avant ? » — « Est-ce que les eaux ont diminué ou les terres augmenté ou se sont soulevées ? » Les réponses publiées en deux fois, en 1702 et en 1706, constituent le premier dossier scientifique sur ce problème important. *C'est la naissance de la tectonique vivante.*

HJÄRNE a clairement posé la question, à savoir si le déplacement de la ligne de rivage était dû au retrait de l'élément liquide, à l'alluvionnement ou à la déformation de l'écorce terrestre, et il ne semble pas qu'il ait cru que l'un excluait l'autre. Après avoir examiné ses dossiers, il se pose des questions concernant les causes. Il se demande si les détroits danois ne se sont pas élargis de sorte que les eaux de la Baltique ont pu s'écouler ; il constate que tandis que la mer interne semble se vider, des inondations et des immersions sont signalées dans les régions entourant la mer du Nord ; mais il souligne que ce ne sont que des suppositions et qu'il accepterait volontiers des éclaircissements de la part de ceux qui sont mieux informés. Il est curieux de constater la large ouverture d'esprit de HJÄRNE. Elle contraste avec celle de beaucoup de ses successeurs (en partie jusqu'à nos jours) qui ne suivent généralement qu'une des pistes ouvertes par lui.

Il distingue nettement entre les phénomènes locaux, régionaux et généraux, entre les causes immédiates et les causes ultimes, et il esquisse l'ordre des questions à résoudre. Cet ordre n'a pas toujours été suivi. Les savants ont souvent préféré discuter les causes ultimes en sautant les travaux d'approche, et ces discussions se sont parfois tout à fait détachées de la réalité, en flottant librement jusqu'à l'épuisement du sujet. Des exemples d'une pareille évolution se trouvent à toutes les époques de l'histoire des sciences et ils ne manquent pas dans certaines discussions sur des sujets à la mode, une tendance qui est encore favorisée actuellement par l'extrême spécialisation.

Notons pour donner un fond à ce tableau, que la Suède, grande puissance sous l'absolutisme, perdit cette position ainsi que les richesses accumulées grâce à son industrie minière, à la suite des défaites de Charles XII, mais acquit une certaine liberté civique favorable au développement des sciences et des arts.

L'explication astronomique de cette époque fut créée par Emmanuel SWEDENBORG (1688-1772), qui, avant de s'adonner au mysticisme, était un remar-

quable naturaliste. Il considéra les déplacements des rivages de la Baltique et de l'océan Arctique, comme l'effet de changements de vitesse de la rotation terrestre. L'hydrosphéroïde serait ainsi plus aplati que le globe solide et les eaux rassemblées vers l'équateur diminueraient dans les latitudes élevées. Il estimait les changements comme étant d'environ 4 m.

Le problème scientifique était donc posé et les différentes possibilités clairement énoncées. L'évolution a néanmoins suivi des voies assez sinueuses. Les auteurs suivants ne tinrent pas compte des questions posées par HJÄRNE, mais s'engagèrent sans autre dans *une* de ces voies, comme nous allons brièvement l'esquisser.

Celsius et Linné

L'astronome royal d'Uppsala, Anders CELSIUS (1701-1744) avait entrepris des voyages étendus dans différentes parties du royaume et avait fait beaucoup d'observations sur les déplacements des lignes de rivage. Il se lança résolument sur la voie de l'hypothèse suivant laquelle les eaux terrestres avaient diminué et cela sur tout le globe. En ce qui concerne le mécanisme de cette diminution, il reprit une idée déjà émise par NEWTON, suivant laquelle une partie de l'eau s'était évaporée, une autre, avait été absorbée par la végétation qui, elle, se transformait en humus et constituait une partie des sols ; mais il n'exclut pas la possibilité de grandes quantités d'eau disparaissant dans l'écorce terrestre. C'est la théorie connue sous le nom de *la diminution des eaux*. Pour connaître les *dimensions du phénomène*, et pour obtenir des données quantitatives, il fallait créer des méthodes. La grande contribution positive et le mérite de CELSIUS sont d'avoir imaginé des méthodes pour déterminer les changements de niveau par siècle et d'avoir fourni les premières estimations. Il a commencé, entre autres, à placer des marques gravées dans les rochers, pour permettre à ses successeurs des mesures plus exactes.

Un autre célèbre savant suédois, Carl LINNAEUS (LINNÉ) (1707-1778), n'est pas seulement le créateur du système de la nature, mais il a aussi essayé de faire une synthèse des interactions visibles dans la nature. Ses nombreux voyages dans les différentes parties de la Suède l'ont familiarisé avec le phénomène du déplacement des lignes de rivage. Dans son « Oratio de telluris habitabilis incremento » en 1743, il a développé l'idée (avant WERNER) que la terre était au commencement couverte par un immense océan, à l'exception d'une seule île, sur laquelle étaient rassemblés tous les types de la création primitive, soit un seul exemplaire, soit un couple ; c'est à partir de ce stade que la terre ferme s'est agrandie et a été peuplée, aussi bien vers le Sud que vers le Nord. Le foyer des préoccupations de LINNÉ était donc différent de celui de CELSIUS, mais son image directrice le décida à se rallier aux hypothèses de celui-ci. Les deux savants firent paraître, en Hollande, en 1744, un ouvrage écrit en latin, exposant leurs découvertes. Dans cette publication, les changements de niveau sont considérés comme universels ; ce sont donc les précurseurs du principe de

l'eustatisme (cf. p. 142). Il est assez curieux de remarquer que l'ouvrage a paru en Hollande où des mouvements du rivage de signe contraire étaient connus depuis longtemps. L'autorité des deux savants était si grande que leurs résultats ne soulevèrent guère de critiques. Le fait le plus important pour la suite, était ce que l'on a appelé *la valeur de Celsius*, c'est-à-dire la diminution de l'eau par siècle. Celle-ci était évaluée par les auteurs à 4½ pieds, ce qui correspond à 125 cm, valeur arrondie plus tard à 4 pieds (120 cm). Il y eut aussi d'autres estimations, plus proches de la réalité, comme celle du pasteur de Hudiksvall (Hälsingland, Suède) en 1739, qui arrivait à 90 cm. Depuis le temps de CELSIUS et de LINNÉ, la tendance à placer des marques gravées dans les rochers, se répandit de plus en plus.

Application de la géologie à l'histoire

La « valeur de CELSIUS » devait de nouveau mettre les critiques et les recherches en marche en Europe septentrionale, et cela par un incident assez curieux, dont on connaît toutefois plusieurs parallèles récents. Un historien suédois voulut écrire une histoire du royaume et, pour en décrire les origines, il s'inspira des méthodes les plus modernes de ce temps. En se basant sur la « valeur de CELSIUS », il essaya de calculer une chronologie et de reconstituer la physiographie. Ses calculs aboutirent au résultat, étonnant pour ses contemporains, que le royaume avait commencé sous forme d'un assemblage d'îles et que la montagne de Kinnekulle avait émergé des eaux seulement 2100 ans auparavant. L'archevêque anglais USHER, avait calculé en 1650, que le monde fut créé à 9 heures, le 23 octobre de l'année 4004 avant Jésus-Christ. D'après cette chronologie, le royaume n'aurait donc émergé que pendant environ un tiers de ce temps. C'est probablement la première fois que les résultats de la géochronologie furent employés par un historien. On pouvait interpréter ces conclusions de plusieurs façons, p. ex. en admirant l'ingéniosité du Créateur, comme l'avait fait LINNÉ. Mais des esprits malveillants préférèrent les considérer comme une offense à la dignité du royaume. Une partie du clergé se prononça contre l'hypothèse de la diminution des eaux et une motion de blâme fut proposée à la diète. DAHLIN ne subit aucune sanction, mais le sujet était de nouveau d'actualité et le problème fut vivement discuté. Une série d'écrits publiés pendant ces années pour et contre la théorie de la diminution des eaux, témoigne de l'intérêt que cette question soulevait. Le nombre des marques de niveau placées pendant ces années augmenta.

Réfutation de la doctrine de la diminution des eaux

Les discussions durèrent jusqu'en 1755, lorsque parut un livre célèbre, écrit par l'évêque d'Åbo-Turkku, Johannes BROWALLIUS (1707-1755). Cet ouvrage contient, à côté de raisonnements plutôt scolastiques, de nombreuses observations originales et il introduit de nouvelles méthodes pour résoudre des questions reliées au problème principal. Un nivellement de l'entrée du château d'Åbo, par Jakob GADOLIN en 1751, au-dessus du niveau actuel de la

mer, montrait que si la valeur de CELSIUS était juste, on aurait dû accéder, pendant longtemps, à cette entrée en pataugeant dans l'eau, ce qui n'était certainement pas le cas. BROWALLIUS cite aussi des observations de son ami Per Adrian GADD (1727-1797), professeur de chimie à l'Académie d'Åbo. Celui-ci avait fait couper des pins enracinés 2 à 4 pieds au-dessus du niveau actuel de la mer, et avait compté les anneaux de croissance, pour en déterminer l'âge. Cet âge, variant entre 232 et 310 ans, montra que si la valeur de CELSIUS était juste, ces arbres auraient poussé pendant une période importante de leur vie, en partie presque deux siècles, dans l'eau. C'est donc en 1744, que *commence la dendrochronologie* et son application pour résoudre des questions géologiques.

RENQUIST (1948) note que ceux qui avaient lu le livre de BROWALLIUS avaient de la peine à croire les affirmations de CELSIUS. La doctrine de la diminution des eaux perdit beaucoup de ses défenseurs. Bon nombre d'entre eux suivaient BROWALLIUS en niant tout simplement un déplacement général de la ligne de rivage tout en admettant des avances et des reculs localisés dus à l'alluvionnement et à l'érosion.

Le discours présidentiel fait à l'Académie royale de Suède en 1765 par Bengt FERNER fut consacré à une vue d'ensemble des discussions concernant la doctrine de la diminution des eaux, et terminait ainsi une période pendant laquelle les mouvements de l'élément mobile et les questions liées à ce sujet formaient le centre de l'intérêt. FERNER mentionne aussi la possibilité de déformation de l'écorce terrestre, mais l'apport le plus important est probablement la distinction suivante : les changements sont récents et actuels, mais ce ne sont pas nécessairement les mêmes que dans les temps plus anciens. C'est ainsi qu'une distinction chronologique, importante par la suite, apparaît.

Les déformations de l'écorce terrestre

Pendant la même année, 1765, parut un ouvrage qui inaugure une nouvelle voie. Le directeur des services cadastraux de Finlande, Efraim Otto RUNEBERG (1722-1770), avait souvent à répartir des terres exondées parmi les prétendants et il avait récolté ainsi de nombreuses observations et mesures ; c'est sur ces mesures qu'il fonda ses vues. Il publia, entre 1765 et 1769, plusieurs travaux montrant que la différence de niveau était plus grande dans le nord du pays que dans le sud. Il en conclut que le socle rocheux se soulève plus rapidement dans les régions septentrionales, mû par une force souterraine. Ce mouvement n'est pas accompagné par des catastrophes, mais se fait *lentement et successivement*. RUNEBERG souligne que la nature travaille avec les mêmes moyens en grand et en petit, c'est-à-dire que les grands mouvements sont dus aux mêmes facteurs que ceux, à peine reconnaissables en quelques années, observés en Finlande. Les diaclases, telles que l'on peut les observer dans les carrières et les mines, jouent un rôle dans ces mouvements. Pour un séisme, une montagne n'est pas un obstacle, mais la même force peut aussi soulever *lentement* le socle rocheux à l'échelle régionale. Celui-ci sort dans certaines régions de l'hydrosphéroïde, dans d'autres, il s'y enfonce.

Mais les résultats et les interprétations de RONEBERG, à savoir que l'élément considéré comme repère solide, le socle rocheux, se déformait sous nos pieds, eut quelques difficultés à s'imposer et il fallut encore beaucoup de discussions, d'observations et de mesures, et divers essais d'interprétation jusqu'à ce que le soulèvement devienne un phénomène reconnu par une majorité de géologues.

Torbern BERGMAN affirme en 1766 que des changements aussi fondamentaux que ceux admis par RONEBERG ne peuvent pas se faire sans des suites catastrophiques. RONEBERG répliqua en 1769.

C'est donc une étape importante, malheureusement sans suites directes, qui a été inaugurée par RONEBERG. C'est un stade de la tectonique vivante, mais aussi de l'*interprétation actualistique des mouvements de l'écorce terrestre*. Pour comprendre l'importance des découvertes de RONEBERG, il a fallu les mettre dans un cadre plus vaste, créé en grande partie par des géologues étrangers. Il n'est pas possible d'exposer cette évolution ici, car il faudrait écrire l'histoire de la géologie dans la seconde moitié du XVIII^e et dans la première moitié du XIX^e siècle. Nous nous contenterons d'esquisser quelques grandes lignes.

L'évolution des hypothèses sur les mouvements de l'écorce terrestre

La dimension du temps joue naturellement un rôle fondamental dans la représentation des mouvements et cela à plusieurs points de vue. Aussi longtemps que la chronologie biblique (cf. p. 136) était considérée comme base, la durée des matériaux et des formes terrestres était limitée et les perspectives historique et géologique se confondaient plus ou moins. C'est seulement petit à petit que les ordres de grandeur ont pu être séparés. Il a fallu de longs efforts pour imposer la notion que l'état présent n'était pas le but de l'évolution, mais seulement un moment dans une série continue de changements.

Les idées sur le temps géologique avaient changé à partir de la seconde moitié du XVIII^e siècle, surtout sous l'influence de BUFFON, de WERNER, de CUVIER, de LAMARCK (1802, p. 75-77) et de beaucoup d'autres. La durée géologique devenait un temps sans limites pour HUTTON, PLAYFAIR et leurs disciples (« on ne voit ni commencement ni fin »).

Trois ordres de grandeur des phénomènes se sont imposés, d'abord d'une façon confuse, mieux délimitée par la suite, quoique avec des passages :

- a) les phénomènes d'ordre géologique,
- b) les phénomènes d'ordre historique ou séculaire,
- c) les phénomènes à périodicité plus courte et les phénomènes annuels.

La prise de conscience de ces distinctions et les cheminements parfois complexes pour y arriver, mériteraient une monographie spéciale. Cette évolution est reliée de diverses manières au problème qui nous occupe, et

cela non seulement par les grandes dimensions, mais aussi par les effets de courte durée, les catastrophes, les cataclysmes et les « révolutions ».

Le concept des temps géologiques de très grande extension, en opposition aux temps historiques, a amené plusieurs savants à l'idée que la terre était arrivée à un état plus ou moins stable de son évolution de sorte que les changements historiques et récents étaient des exceptions, surtout représentées par des catastrophes.

Le monde des géologues avait été acquis à l'idée des bouleversements et des cataclysmes par CUVIER, et à celle des changements plus continus par HUTTON et PLAYFAIR. Les déformations de l'écorce terrestre faisaient de plus en plus partie de la pensée géologique par de nombreux témoignages, comme les transgressions et les régressions des mers du passé et les structures faillées et plissées.

Il y eut de nombreuses hypothèses pour expliquer les déplacements des mers. L'une d'entre elles, celle de LAMARCK (1802), veut que les mers se déplacent continuellement sous l'influence d'oscillations de la terre ferme de telle façon que tous les points du globe ont émergé et ont été immergés à tour de rôle et cela à plusieurs reprises. La question des déplacements des lignes de rivage commençait ainsi à faire partie de problèmes plus vastes. Ceci eut l'avantage d'attirer l'attention d'un public plus étendu, mais aussi le désavantage que *souvent la question fut résolue à partir des concepts généraux sans tenir compte du nombre toujours croissant des observations*. L'ensemble des données, souvent contradictoires à première vue, a eu beaucoup de peine à percer les images cohérentes construites à partir des principes généraux.

Echanges et influences du dehors

Les visites de savants étrangers en Fennoscandie eurent des répercussions importantes : Les voyages de Léopold VON BUCH, pendant les années 1806 à 1808, et la publication de ses observations révélèrent au monde géologique l'importance d'une série de questions qui ne jouaient pas le même rôle en Europe occidentale et centrale et parmi elles, celle des déformations de l'écorce terrestre. Ce sont surtout les régions situées autour du golfe de Bothnie (septembre 1807, à Torneå), qui impressionnèrent Leopold VON BUCH, en ce qui concerne les mouvements récents du socle rocheux.

Le voyage en Scandinavie de l'Ecossois F. W. JOHNSTON en 1833, aurait probablement eu un écho plus large, s'il n'avait pas été suivi, en 1834, par la visite de Charles LYELL. Cette tournée fut décisive par plusieurs prises de position de cet auteur (BAILEY, 1962). En effet, dans sa première édition des « Principles of Geology » (1830), il donne un compte rendu de 5 pages sur le « Celsian controversy with its contestants ». D'abord partisan des oscillations du niveau marin, il abandonna ce point de vue, après son voyage en Suède, en 1834, et publia un travail « sur les preuves d'un soulèvement graduel de la Terre dans certaines parties de la Suède » (1835) et dans la quatrième édition de ses « Principles » (1835), il y voue tout un chapitre (vol. II, chap. 17, de

19 pages) en soulignant qu'il s'agit d'un soulèvement récent plus intense dans le Nord que dans le Sud, en insistant sur le fait que *ces déformations se font sans tremblements de terre*.

Le phénomène fut aussi observé et décrit du côté norvégien, par le géologue KEILHAU (1838) ; mais l'argument le plus important, observé en Norvège, fut porté devant le forum international par Auguste BRAVAIS. Au cours d'une mission dans le Nord (1838-1839), il fit des observations dans l'Altenfjord (Finnmark) et constata que les mêmes lignes de rivage étaient situées plus haut à l'intérieur du fjord qu'à l'extérieur, et il en conclut que le soulèvement était inégal (BRAVAIS, 1840 ; Elie de BEAUMONT, 1842). Les observations furent mises en doute par Eduard SUSS dès 1880, mais confirmées par les mesures plus récentes de Väinö TANNER (1930). L'évolution de la perspective chronologique en géologie apparaît, si on remarque que BRAVAIS semble admettre que les soulèvements observés sont la continuation des mouvements qui ont élevé les montagnes scandinaves.

D'autre part, la théorie du rétrécissement du globe et du ridement de l'écorce, avait trouvé de nombreux adhérents aussi en Fennoscandie, comme par exemple Jakob BERZELIUS (1835), et cette doctrine semblait justifier l'hypothèse des déformations du socle rocheux, en tout cas pour les périodes géologiques. Il devenait nécessaire de distinguer les phénomènes appartenant au passé géologique, de ceux pouvant être démontrés par les témoignages de l'histoire, ou observés directement.

La Société royale des Sciences de Göttingen proposa pour son concours, en 1818 : « des recherches approfondies et étendues sur les changements de l'écorce terrestre, attestés par les sources historiques et la manière d'appliquer ces connaissances à l'investigation des révolutions terrestres survenues avant la période historique » (VON HOFF, 1822, I, p. XIV). Suivant la tradition, ce problème fut proposé par Johann Friedrich BLUMENBACH (1752-1840), le créateur de l'anthropologie physique. La proposition était dirigée contre la doctrine des cataclysmes. Carl Ernst Adolf VON HOFF (1771-1837) qui s'était déjà occupé de ces questions présenta un mémoire et obtint le prix. Les trois volumes ne furent publiés qu'entre 1820 et 1834. L'auteur avait d'abord pris position contre CELSIUS et Leopold VON BUCH, mais s'étant de plus en plus familiarisé avec « les forces agissant lentement », il se rapprochait progressivement de l'idée de la déformation du socle rocheux.

Entre-temps, parut le célèbre ouvrage de Charles LYELL (1797-1875) : « Principles of Geology » (1830). Les principes exposés dans les deux ouvrages mentionnés ouvrirent de nouvelles voies dans presque tous les domaines de la géologie. Les explications par révolutions catastrophiques furent abandonnées et le monde savant fut vite acquis à l'idée « que les forces jadis agissantes pour modeler l'écorce terrestre étaient les mêmes quant à leur nature et leur énergie que celles qui sont à l'œuvre actuellement (LYELL, 1837, I, p. IX). De cette façon, un résultat acquis par RNEBERG en se basant sur de nombreuses observations, fut placé dans un cadre plus grand et faisait partie d'une image

directrice embrassant des domaines beaucoup plus vastes et, de ce fait, ouvrant des voies beaucoup plus diverses.

L'étude des déformations récentes et actuelles, ou la tectonique vivante, a donc plusieurs racines : elle est née, *d'une part, de l'interprétation d'observations coordonnées* (RUNEBERG, BRAVAIS, etc.), et *d'autre part, elle résulte de l'application de principes généraux*, surtout du principe actualistique. Le problème est donc plongé dans une ambiance assez différente, de sorte que sa signification change aussi.

Les deux voies principales (à côté de l'alluvionnement qui a gardé son importance comme explication secondaire), pour l'explication des déplacements des lignes de rivage, furent ainsi de nouveau ouvertes, plus d'un siècle après Urban HJÄRNE, chacune soutenue par de nombreuses observations. En lisant les nombreux auteurs qui se sont occupés de ces problèmes depuis le milieu du siècle passé jusqu'à nos jours, on constate un fait assez curieux : une grande partie d'entre eux semble *croire* que les *deux interprétations s'excluent* et qu'il faut donc *choisir une des causes*, soit les oscillations du niveau marin, soit les déformations de l'écorce terrestre. Plusieurs faits peuvent aider à comprendre cet état de choses.

Le principe des oscillations du niveau marin reçut un soutien important (valable surtout pour les époques glaciaires) de McLAREN (1842). En donnant un compte rendu des travaux d'AGASSIZ sur « l'âge glaciaire », il émit l'idée que le niveau des océans devait être abaissé pendant que de grandes quantités d'eau étaient stockées sur la terre ferme, et que le niveau devait remonter quand les glaciers, en fondant, restituaient leurs eaux aux océans. Ce principe, assez vite accepté, fut pendant longtemps un bon guide pour les recherches sur les terrasses marines et fluviales, puisqu'il donnait un moyen simple de déterminer l'âge et de paralléliser les anciens niveaux marins sur tout le pourtour des mers.

Le camp des déformationnistes reçut aussi des renforts : Thomas F. JAMIESON (1865, 1882) eut l'idée que les régions couvertes par les inlandsis s'affaissaient sous le poids des glaces et se relevaient quand celles-ci avaient fondu. Ce principe s'est montré fertile en applications aussi bien pour les géologues que pour les géophysiciens. C'est le concept de la *glacio-isostasie*.

Plusieurs variétés de la théorie de la contraction ont été appliquées pour expliquer le soulèvement, en esquissant divers mécanismes. Ces essais sont surtout caractérisés par le fait qu'ils *partent d'un mécanisme* et que les observations sont ensuite sélectionnées de telle façon qu'elles soutiennent la manière proposée. On devrait plutôt les classer dans la catégorie des plaidoyers.

D'autre part, la récolte des données a continué, surtout par les levés régionaux des géologues du Quaternaire.

Eduard Suess et la notion des « mouvements eustatiques »

La parution du deuxième volume de l'ouvrage monumental d'Eduard SUESS, en 1888, fut un événement important dans l'histoire de l'interprétation des déplacements des lignes de rivage. Le prestige du grand géologue viennois,

l'étendue de ses connaissances, sa documentation fouillée et le brillant de sa présentation, influencèrent pendant longtemps le monde géologique. Son exposé historique est, à côté de celui d'un autre Viennois, Robert SIEGER (1893), un des plus détaillés. Embrassant les mers et les océans du globe, l'ouvrage dépasse largement le cadre de la Fennoscandie. C'est probablement le plus vaste effort de synthèse dans le domaine de la géologie. Il est donc important pour le but que nous nous proposons, de voir de quelle façon l'auteur désarticule le problème du déplacement des lignes de rivage et comment il incorpore les éléments et les assemblages d'éléments dans sa théorie générale.

La théorie des changements du niveau marin avait vécu pendant des siècles, sous un nom simple et bourgeois. Elle reçut son titre de noblesse scientifique en se voyant octroyer un nom dérivé du grec. Le prestige de tels noms auprès du public scientifique est bien connu, ainsi que les changements d'opinions que des baptêmes de ce genre peuvent opérer ; l'histoire de la géologie et de la pétrographie nous en montre de nombreux exemples, surtout dans les temps modernes. Dans le cas des oscillations marines, le prestige fut encore augmenté par l'autorité de son parrain. SUESS écrit p. 680 (trad. DE MARGERIE, vol. II, p. 841) : « ... Pour analyser avec plus de rigueur des phénomènes de ce genre, nous devons d'abord séparer des modifications diverses auxquelles est soumise la hauteur des rivages, celles qui se traduisent d'une manière à peu près uniforme, dans le sens positif ou dans le sens négatif, sur tout le globe ; nous donnerons à ces mouvements généraux le nom de *mouvements eustatiques*. » Ces oscillations eustatiques font partie de son image directrice (*Ibidem*, p. 680, trad. DE MARGERIE, p. 841) : « *L'écorce terrestre s'effondre ; la mer suit*. Mais tandis que les affaissements de la lithosphère sont limités en étendue, la baisse de la surface des mers affecte le périmètre entier des aires océaniques : il se produit un mouvement négatif général. » « *La formation des bassins océaniques détermine des mouvements négatifs, eustatiques, survenant à de brusques intervalles*. » Ces oscillations ne sont donc pas des données d'observation, mais les conséquences d'une hypothèse générale, celle de l'effondrement des bassins océaniques. Il est utile d'observer que les renseignements sur le sous-sol des océans faisaient défaut à cette époque.

SUESS distingue les ordres de grandeur et ses explications visent d'abord les grandes transgressions et régressions de l'histoire géologique. Des phénomènes semblables, mais à une autre échelle, peuvent avoir des mécanismes différents et leur ressemblance ne peut être qu'apparente, parce que les mêmes termes descriptifs sont employés pour des phénomènes de dimensions différentes. C'est ainsi que la question de la Baltique est détachée du problème général et les plages soulevées de la Norvège sont aussi traitées à part.

En ce qui concerne les plages soulevées de la Norvège, SUESS invoque les contradictions de BRAVAIS avec un de ses collaborateurs, Eugène ROBERT, pour infirmer la valeur des observations dans l'Altenfjord. Après avoir fait le tour des océans et des mers de la terre, en semant le doute sur tous les

témoignages de soulèvement, SUESS (1880, p. 684) arrive à cette conclusion (trad. DE MARGERIE, p. 845) : « Cette récapitulation montre que la *doctrine des oscillations séculaires des continents n'est pas susceptible d'expliquer les submersions et émerSIONS de la terre ferme*. Les changements observés sont beaucoup trop étendus et beaucoup trop uniformes pour pouvoir provenir de mouvements de l'écorce terrestre. »

Le cas de la Baltique est considéré sous un autre angle. Divers auteurs scandinaves avaient étudié les changements de niveau de nombreux lacs. Une des explications faisait intervenir les changements climatiques. Par extension, la Baltique fut considérée comme un lac d'un genre spécial.

La littérature sur les changements climatiques est très vaste, de sorte qu'il n'est pas possible de la traiter ici. Le sujet fut déjà discuté du temps de CELSIUS et de LINNÉ. Les opinions divergeaient sur beaucoup de points. Pour les uns, les conditions climatiques étaient, dans les grandes lignes, immuables, pour les autres, au contraire, elles étaient variables. Dans le dernier parti, on pouvait de nouveau distinguer les optimistes et les pessimistes. Se basant sur des traditions, des chroniques, des ouï-dire, sur les variations des récoltes et d'autres effets secondaires, les uns prouvaient que le climat allait en se détériorant, les autres, au contraire, constataient des améliorations. L'idée du « dessèchement général » (qui a aussi joué un rôle dans l'idée de la diminution des eaux), fut longtemps discutée. Il aurait fallu avoir des séries de mesures, mais comme dans beaucoup de problèmes scientifiques, on essayait de prouver les hypothèses à partir de prémisses théoriques. Il y avait aussi les partisans de certaines périodicités, et ceux qui ne pouvaient admettre qu'une évolution irréversible. Pour les uns, les changements climatiques étaient la cause, pour les autres, ils étaient les effets. On entre donc dans un vrai labyrinthe de théories, la plupart fondées sur peu d'observations certaines, en tout cas jusqu'au milieu du siècle passé.

SUESS a essayé de mettre de l'ordre dans cette confusion des opinions, des observations et des interprétations, en les incorporant à sa synthèse. Il déclare que les changements de niveau de la Baltique ne relèvent pas des oscillations eustatiques constatées sur les côtes océaniques. « Il s'agit là d'une question de climatologie et d'hydrostatique, non de géologie tectonique ; *la Baltique se vide, les côtes ne se soulèvent pas*. A supposer que l'on voulût bien accorder la possibilité d'un soulèvement aussi étendu de la lithosphère, il n'en resterait pas moins absolument incompréhensible que ce soulèvement se trouvât limité aux côtes suédoises et aux parages longés par le courant qui sort de la Baltique, tandis que sur les côtes où s'opère le plus actif échange des eaux, c'est-à-dire sur les côtes danoises et allemandes, il ne se ferait pas du tout sentir. Les moyennes mensuelles, qui varient suivant les saisons, démontrent d'une façon irréfutable que la hauteur du plan d'eau est subordonnée aux influences des apports venant de la terre ; de plus, les moyennes annuelles dénotent une telle uniformité sur la côte est et la côte ouest de la Suède, malgré l'alternance des mouvements positifs et négatifs, qu'on ne saurait en aucune

manière les faire cadrer avec l'hypothèse de mouvements de l'écorce terrestre », (SUESS, 1880, p. 542, trad. DE MARGERIE, p. 667). Et plus loin : « *Ainsi, au regard du soulèvement général et séculaire de la péninsule scandinave, qui est devenu le point de départ de la théorie du soulèvement, on manque de preuves certaines* » (SUESS, 1880, p. 526, trad. DE MARGERIE, p. 670). Après avoir examiné les témoignages des côtes où des inondations et immersions étaient signalées, il conclut : « *De Haparanda jusqu'en Bretagne, il ne s'est produit, depuis l'époque du bronze, aucun soulèvement ou affaissement authentique de la terre ferme* » (SUESS, p. 541, trad. DE MARGERIE, p. 689). Les enregistrements des moyennes mensuelles pour les années 1873 à 1875 provenant de plusieurs stations entre Rönnskär (près de Vasa en Finlande) jusqu'à Nord-Koster (sur la côte suédoise du Kattegat) sont reproduites dans la « Face de la Terre » à l'appui de ces affirmations. Nous aurons à revenir sur l'interprétation de ces diagrammes. Une série des moyennes annuelles de Rönnskär est reproduite fig. 7.

La place qu'occupe dans l'histoire de la géologie le grand maître viennois, justifie la brève esquisse de ses idées et de sa manière de subordonner les données aux structures portantes de sa synthèse. D'autre part, il était important de consulter un document montrant ce que l'un des esprits les mieux informés pouvait savoir dans les années 1880 ; mais ce document est aussi intéressant par ce que l'on pourrait appeler le style du raisonnement ; ce style se trouve certainement aussi avant lui, mais il lui a donné une forme classique.

Une grande partie de ses successeurs ont encore renforcé l'alternative et l'obligation de choisir entre les explications par les oscillations marines ou les déformations de la lithosphère.

En n'admettant que des oscillations eustatiques, on avait l'avantage de pouvoir coordonner et de dater, d'une façon simple, toutes les terrasses marines d'après leur altitude au-dessus du niveau actuel. Puisque les conséquences du changement du niveau de base s'étendent, par l'intermédiaire des réseaux fluviaux, jusqu'à l'intérieur de la terre ferme, les marques chronologiques se propagent sur une partie importante des continents. Ces méthodes ont trouvé de nombreuses applications depuis les remarquables travaux de DEPERRET et de DE LAMOTHE (1911) jusqu'à ceux de PFANNENSTIEL (1944, 1949).

Les déformations de la lithosphère gênent naturellement ces essais de parallélisation et les confinent à des régions plus limitées. Les méthodes modernes servant à explorer les déformations de la lithosphère, seront abordées plus loin. Ce qui importe ici, c'est de constater qu'aussi du côté des partisans des déformations, on semble croire que les deux explications s'excluent. On trouve cette *conception unicausale* jusque dans des travaux tout à fait récents. Mentionnons comme exemple, un intéressant exposé de BOTT et JOHNSON (1966) sur le mécanisme réglant la sédimentation cyclique du Carbonifère. Après avoir exposé « the tectonic and the eustatic hypotheses » et après les avoir discutées, les auteurs se décident pour l'hypothèse tectonique, parce que les propriétés rhéologiques de l'écorce terrestre et du manteau supérieur permettent d'entrevoir des mouvements de ce genre.

Cet état de choses correspond dans l'évolution des hypothèses au stade des explications unicausales.

Continuation de l'évolution en Fennoscandie

Tandis que sur la scène internationale, les deux manières de voir s'opposaient et semblaient s'exclure, les géologues de la Fennoscandie se mirent avec un élan renouvelé à défricher la stratigraphie du Quaternaire Baltique. Les coupes stratigraphiques avec leurs séries de sédiments marins, lacustres et terrestres, avec leurs argiles, gyttjas et tourbes furent étudiées et coordonnées. Plusieurs manières de les interpréter s'en dégagèrent, surtout grâce aux restes de plantes et d'animaux qu'elles contiennent. Ensuite les grandes coupures, celle de la mer à *Yoldia arctica*, celle du lac à *Ancylus* et de la mer à *Litorina*, furent subdivisées. A cette histoire s'ajoutaient, en 1910, les témoins du lac glaciaire, découvert par Henrik MUNTHE, faisant suite au retrait des glaces.

On reconnut que la mer à *Yoldia* couvrait les plus vastes surfaces, tandis que les dépôts de la mer à *Litorina*, occupaient des territoires plus proches de la mer actuelle. On apprit à reconnaître et distinguer de mieux en mieux les différents aspects des anciens rivages et on commença, partout où c'était possible, à déterminer la limite de l'occupation marine. En dessous de cette limite, la couverture morainique est lavée et les produits sont déposés dans les cuvettes. Les rochers sont souvent mis à nu. Cette disposition est encore soulignée dans les régions habitées, par le fait suivant : les prés et les champs s'étendent sur les sédiments vaseux des anciens fonds de mer, laissant les parties supérieures, souvent couvertes de terrains morainiques, aux forêts et à des exploitations de moindre importance. Cet état de choses est toutefois différent en Carélie et en Estonie. En Carélie, les parties basses sont souvent marécageuses ou occupées par des lacs, de sorte que les villages se sont formés sur les hauteurs couvertes de moraines non remaniées, où les champs doivent être dépierrés. Des conditions semblables règnent en Estonie : les régions autrefois immergées sous la mer étant des étendues de roches calcaires lavées, ou de sables, les deux offrant peu de terrains fertiles.

La détermination systématique des anciens rivages a commencé en Suède par les travaux de Gérard DE GEER (1894 *a* et *b*), de A. G. HÖGBOM et de Henrik MUNTHE. La première synthèse de DE GEER (1896) sur l'évolution postglaciaire de la Fennoscandie, est devenue classique. Les lignes de rivage des trois stades sont situées plus haut autour du golfe de Bothnie et s'abaissent de là vers les régions plus périphériques. La région, où les anciennes plages sont situées le plus haut, correspond au maximum de soulèvement séculaire attesté par les marques gravées dans les rochers.

Les travaux exécutés en Suède furent continués en Finlande par Wilhelm RAMSAY (1896) et J. J. SEDERHOLM (1899).

L'image d'un bombement de la lithosphère pendant les temps postglaciaires apparaissait de plus en plus nettement, en tout cas dans ses grandes lignes.

Plusieurs nouvelles méthodes et techniques permirent, par la suite, de franchir une nouvelle étape dans la représentation de plus en plus exacte et détaillée des événements du passé.

La première est la *chronologie absolue* par le *comptage des varves*. Ce travail gigantesque fut commencé et mené à bien par Gérard DE GEER et son école (1905, 1910, 1940 avec historique), en commençant par le sud de la Suède jusque dans l'Ångermanland. Une chronologie semblable fut établie par Matti SAURAMO (1918) en Finlande. Ces recherches permirent, longtemps avant le ^{14}C de dater, avec une petite marge d'insécurité, les formations et événements survenus après la fonte des glaces.

Une seconde méthode importante est celle de l'*analyse pollinique* créée par le Norvégien BLYTT et le Suédois SERNANDER. Elle fut développée et étendue par les travaux de L. VON POST en Suède et de Matti SAURAMO et son école en Finlande. Elle permet de reconstituer le développement et les changements de la végétation et de les relier à la chronologie des varves.

Une troisième méthode importante est l'*étude micropaléontologique*, surtout celle des *diatomées*, par CLEVE-EULER et son école. Ces fossiles permettent de distinguer plusieurs conditions de l'ancien habitat, comme le degré de salinité de l'eau (eaux salées, saumâtres ou eaux douces) et la nature du bassin (mare, étang, petit ou grand lac, etc.).

L'étude détaillée des *tourbières* (ANDERSSON, 1898) avec leurs différents horizons et leurs intercalations a fourni une multitude de renseignements. Les tourbières noyées ou situées sous le niveau de la mer actuelle, ont joué un rôle important dans la discussion des changements de niveau. Les *recherches archéologiques* ont eu, depuis longtemps, des relations intimes avec les études sur les terrains postquaternaires, aussi bien en fournissant qu'en recevant des informations de valeur.

Le développement des méthodes mentionnées et d'autres ont eu comme effet une spécialisation de plus en plus poussée et une moisson de renseignements tellement riche qu'il devient de plus en plus difficile d'embrasser l'ensemble. Mais une des méthodes de cet éventail permet de rassembler toutes ces vues partielles en une nouvelle image ; c'est celle créée par Wilhelm RAMSAY (1865-1928) et son école.

L'analyse des interférences

La nouvelle image directrice abandonne l'opposition et l'exclusivité des hypothèses eustatique et déformationniste, en les combinant. Une série de méthodes originales d'interprétation, permettant de coordonner une grande quantité de mesures et d'observations et de les grouper en une suite cohérente d'événements, est issue de cette image. Ces méthodes ne forment pas seulement la base des recherches modernes sur les lignes de rivage et d'un grand nombre de problèmes annexes, elles ont aussi permis de développer les techniques d'observation et de mesure. Puisque les lignes de rivage sont les plus importantes marques de l'horizontalité et du niveau 0 m pour un certain

moment de l'histoire géologique, leur forme actuelle et leur succession donnent le film des paysages qui se suivent. Les déplacements des lignes de rivage sont, d'après RAMSAY (1924), des *phénomènes d'interférence entre les oscillations du niveau marin et les mouvements de l'écorce terrestre*. Ce principe forme la base des méthodes d'investigation permettant d'obtenir des représentations détaillées des plages soulevées et de leur chronologie.

En abandonnant la recherche d'une *seule cause* et en créant des méthodes pour *reconstituer les événements et leur succession*, la *cinématique* des phénomènes a pu être établie et la part des facteurs enregistrée en de nombreux endroits. C'est probablement l'un des meilleurs exemples dans l'histoire de la géologie où l'*étude approfondie de la cinématique des phénomènes a pu mettre fin à des discussions épiques* et a permis d'arriver à un carrefour important d'où partent de nombreuses voies qui restaient cachées dans la perspective des explications unicausales. Grâce à ce développement, l'étude du Quaternaire et du Postquaternaire nordique est devenue le meilleur exemple d'une stratigraphie détaillée et l'un des modèles type de la tectonique vivante. Il nous semble donc utile d'en esquisser quelques traits se rapportant surtout à l'*étude des interférences*, tout en laissant de côté la partie stratigraphique et les étapes de l'évolution du bouclier Baltique, exposées dans de nombreux ouvrages. Les cartes, les graphiques et tableaux représentant les résultats de ces recherches, prennent une autre signification, si on entrevoit les méthodes par lesquelles ils ont été élaborés. L'exposé de ces méthodes et techniques est fréquemment omis, sauf quelques exceptions, comme l'exposé de Georges DUBOIS (1931).

Les diagrammes et leur interprétation

Pour donner une idée de l'image directrice, nous commencerons par un mouvement simple et nous ajouterons par la suite quelques complications, sans toutefois aller jusqu'aux raffinements des recherches actuelles. L'ordre de grandeur du bouclier Baltique est de plus de mille kilomètres. Une coupe transversale de quelques dizaines ou même d'une centaine de kilomètres, perpendiculairement aux anciennes surfaces de rivage, peut être représentée dans sa position originale par une ligne droite, la courbure pouvant être négligée pour commencer.

Imaginons un fjord ou un archipel offrant la possibilité d'observer en de nombreux endroits les anciennes lignes de rivage. La ligne actuelle fournit une base horizontale, si l'on n'a pas de points cotés à sa disposition. Dans les secteurs présentant des marées, comme sur les rivages de la mer Arctique, la limite supérieure de *Balanus balanoides* est considérée comme point de départ. Des coupes sont ainsi relevées à l'aide d'un niveau et d'une mire.

Les anciennes lignes de rivage peuvent se présenter de façons très différentes, suivant les conditions topographiques du relief et l'exposition (TANNER, 1930; SAURAMO, 1929). Dans un paysage couvert de dépôts glaciaires, ceux-ci peuvent être entièrement enlevés jusqu'à une certaine hauteur, de sorte que

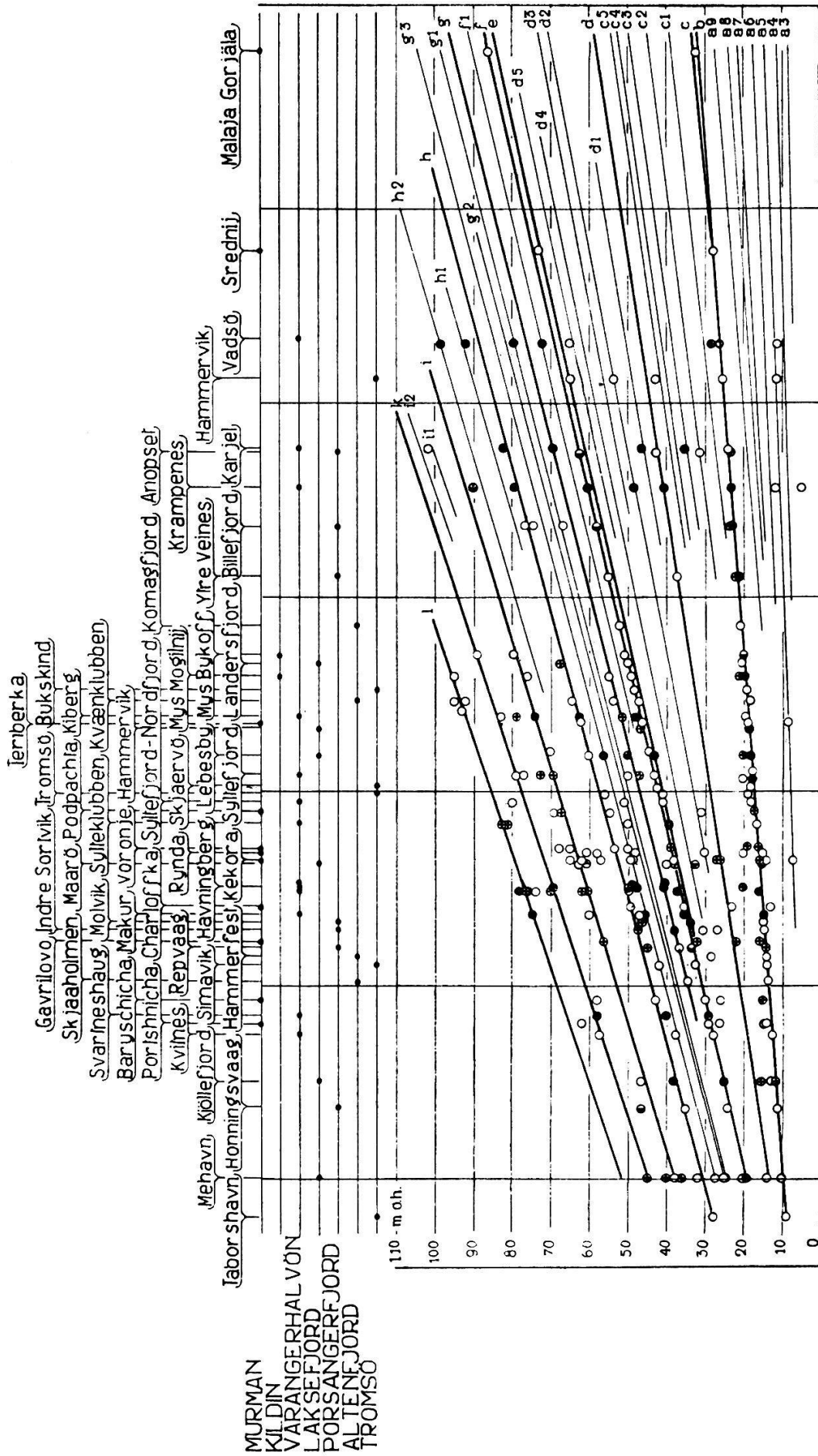
le socle rocheux apparaît. La moraine peut aussi être lavée, de telle manière que les fractions fines sont enlevées. De cette façon, on obtient des champs de blocs, de pavés ou de galets grossiers. La fraction sableuse est transportée le long du rivage et déposée dans les endroits abrités, la partie argileuse se dépose dans les eaux tranquilles. Les galets peuvent former des cordons littoraux, des éperons et des remparts. Les dalles de glace hivernale poussent souvent les blocs et les galets sur le rivage, de sorte qu'ils forment des remparts et des alignements visibles même dans les forêts. De grands et de petits deltas fournissent des données importantes. Les terrasses d'abrasion marine montrent une grande variété de phénomènes souvent décrits dans la littérature depuis les temps de SWEDENBORG, CELSIUS et LINNÉ. Les témoins en forme de colonnes, d'îlots isolés, les corniches causées par le ressac, les formes dues à l'érosion et à la cavitation (TANNER, 1938), des marmites, et d'autres formes caractéristiques, font partie de cet inventaire. Les plages supérieures témoignent souvent d'une abrasion plus intense, parce que les côtes étaient plus ouvertes au commencement.

En récoltant les observations sur le terrain, on s'arrange généralement de telle façon que la zone contenant les coupes mesurées se situe perpendiculairement à l'axe de basculement. Dans ce cas, il est possible de projeter les points mesurés sur un plan vertical passant par la zone. Une telle projection permet d'obtenir des *diagrammes*. On distingue essentiellement deux sortes de ces représentations :

a) Les *diagrammes dits équidistants* : l'axe x donne la distance entre les positions des coupes mesurées, ou de leur projection ; l'axe y indique l'altitude des points. L'échelle verticale est naturellement fortement exagérée par rapport à celle de l'horizontale. Les points correspondants sont reliés et permettent d'obtenir l'intersection des surfaces des anciens niveaux marins ou lacustres avec le plan vertical et la position de cette intersection par rapport au niveau marin actuel (cf. pl. 2).

b) L'autre type est appelé *diagramme des rapports* (relation-diagram) ou *spectre épirogénétique* (TANNER, 1930) : L'axe x donne l'altitude des points mesurés, mais ne donne pas les distances mesurées sur la carte. On trace d'abord une droite, représentant une ligne de rivage bien marquée et bien synchronisée (par des fossiles, des pollens ou d'une autre façon). Puisque c'est une ancienne horizontale, on peut la dessiner comme une droite, mais elle est maintenant inclinée. Les points des différentes coupes sont ensuite placés de telle façon que les altitudes du niveau directeur correspondent à la valeur x de la ligne de référence du diagramme. Les autres points, correspondant à des rivages situés plus haut ou plus bas dans la même coupe, se placent sur une même verticale. L'ensemble est donc axé sur un ancien niveau déterminé, considéré comme une droite (Fig. 2 et Pl. 1).

Dans ses premiers diagrammes des rapports, RAMSAY a utilisé comme niveau de référence, le rivage le plus haut marqué par l'escargot *Litorina*.



Konstr. V. Tanner, 1927.

Fig. 2. — Spectre épirogénétique des côtes fennoscandiques de l'océan Arctique construit par Väinö TANNER (1930), p. 264, fig. 63). — Points noirs = terrasses d'abrasion dans la roche en place ; cercles = terrasses d'abrasion dans les terrains meubles ; cercles avec croix = remparts d'accumulation.

Cette ligne est connue en Fennoscandie sous le nom de « limite de *Litorina* » (*Litorinagränsen*) = L. G. et elle a joué et joue encore un rôle important ; mais en 1924 RAMSAY montra que cette limite n'est pas *synchrone* dans toute la région, c'est-à-dire que ses différentes parties n'ont pas été formées en même temps, étant donné qu'elles correspondent à une transgression. Cet exemple montre un problème important de ces recherches, celui de la *synchro-nisation*. Suivant la terminologie de RAMSAY, la limite de *Litorina* est *métachrone* (son âge n'est pas partout le même) ; elle est une combinaison de plusieurs surfaces, chacune un peu différemment inclinée. Cette inclinaison diminue avec l'âge, quoique peu, ce qui rendait la constatation difficile. La limite supérieure des rivages marins, autrefois considérée comme synchrone, est aussi métachrone, étant par exemple plus ancienne en Finlande méridionale qu'à l'intérieur du pays (RAMSAY, 1921, 1924) (cf. p. 151 et 153).

Les diagrammes montrant les distances sur l'abscisse sont, d'après RAMSAY (1931), plus utiles pour représenter les observations faites sur des territoires limités, montrant peu de lignes, tandis que les diagrammes construits à partir d'une ligne de référence, conviennent mieux pour des régions plus étendues. Les diagrammes établis par Väinö TANNER (1930) pour le nord de la Fennoscandie contiennent des centaines de mesures.

Les méthodes de mesure, de synchronisation et de coordination ont été développées depuis le temps de RAMSAY et sont devenues de plus en plus raffinées. Cet exposé historique ne peut mentionner que les commencements et les traits élémentaires. Notre but n'est pas de remplacer l'étude de la littérature ou de donner un mode d'emploi pour ces méthodes et techniques, mais de montrer de quelle façon la pensée scientifique a cheminé dans un domaine qui semblait parfois sans issue. Cet exposé servira peut-être aussi d'introduction à quelqu'un qui, en dehors de la Fennoscandie, désirerait s'initier à ces méthodes ; il y trouverait les antécédents de ces connaissances fondamentales pour la stratigraphie des séries déposées sous un régime de lignes de rivage mouvantes et de tectonique vivante.

Pour bien saisir la démarche, il est nécessaire de donner une esquisse de l'image directrice servant de guide pour toutes ces recherches. Quelques schémas aideront (fig. 3, 4, 5). Admettons une baie profonde ou un fjord ; la mer crée une première ligne de rivage (L_1) jalonnée par les multiples phénomènes permettant de la reconnaître. Un premier mouvement de bascule soulève la partie interne du territoire et il se formera une deuxième ligne (L_2), et ainsi de suite (L_3 , L_4 , L_5 , etc.). Pour simplifier cette représentation, il est admis que l'axe du mouvement de bascule et le centre du soulèvement restent constants. Pour pouvoir adapter les techniques aux conditions de la nature, il est nécessaire de rester conscient de cette sorte de simplification et de ne pas croire que les possibilités des phénomènes naturels sont épuisées par nos modèles, même les modèles compliqués.

Introduisons maintenant un nouveau facteur : l'inlandsis. Le glacier continental couvre l'intérieur du territoire, mais envoie un émissaire dans le

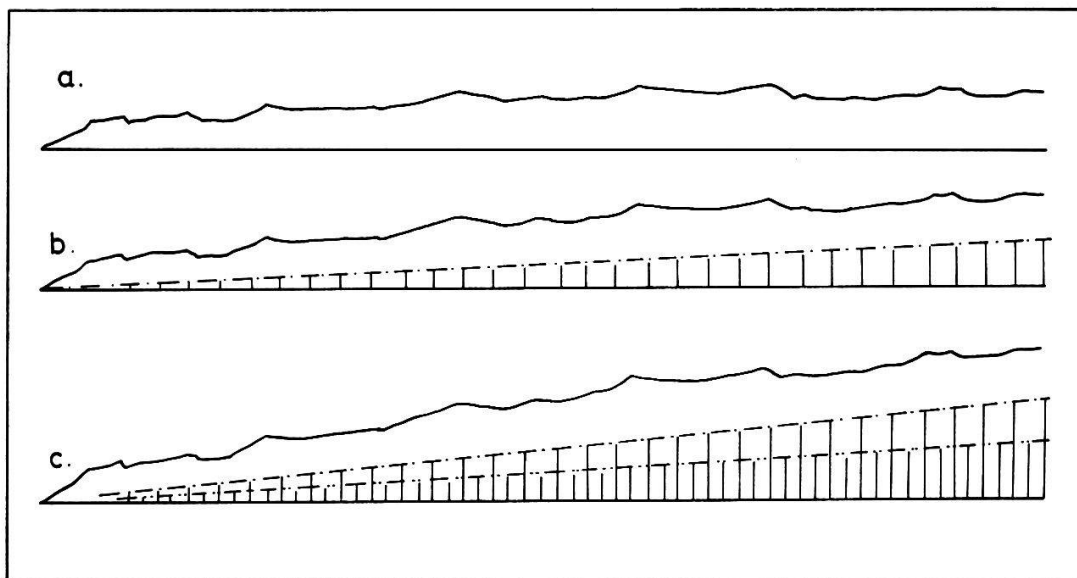


Fig. 3. — Schéma montrant la disposition des lignes de rivage soulevées *a, b, c* dans le cas où le niveau marin reste stable. Les surfaces successives émergées sont marquées.

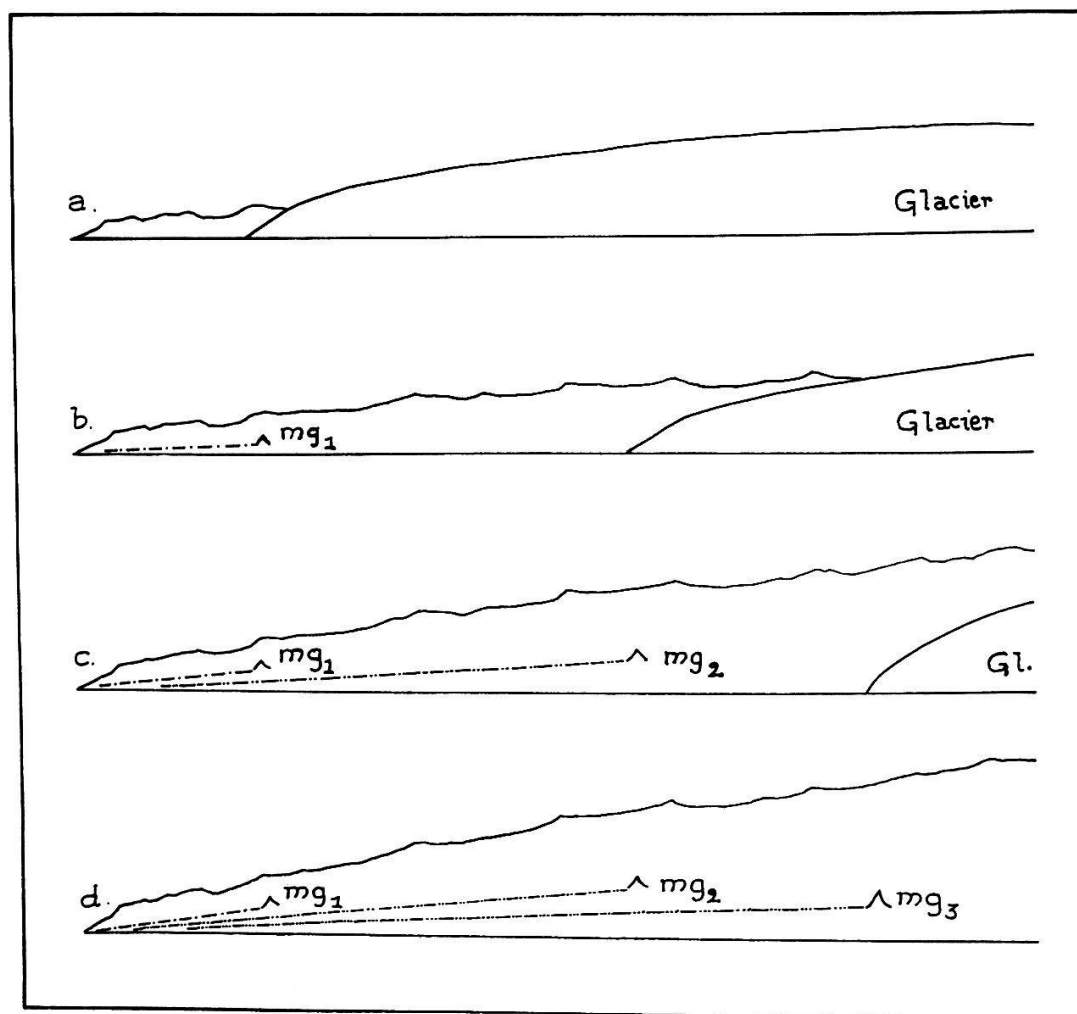


Fig. 4. — Déplacement des lignes de rivage combiné avec le recul des glaciers : *a)* la première ligne de rivage n'est marquée que dans la partie non recouverte par le glacier ; *b)* la première ligne de rivage est soulevée et le glacier a reculé ; limite des traces d'activité marine = mg_1 ; *c)* la deuxième ligne de rivage (mg_2) est soulevée et le glacier a reculé ; *d)* la troisième ligne de rivage (mg_3) est soulevée à son tour. — Les limites supérieures des témoignages de l'activité marine sont métachrones. En reliant ces limites, on n'obtient pas des surfaces d'isobases synchrones.

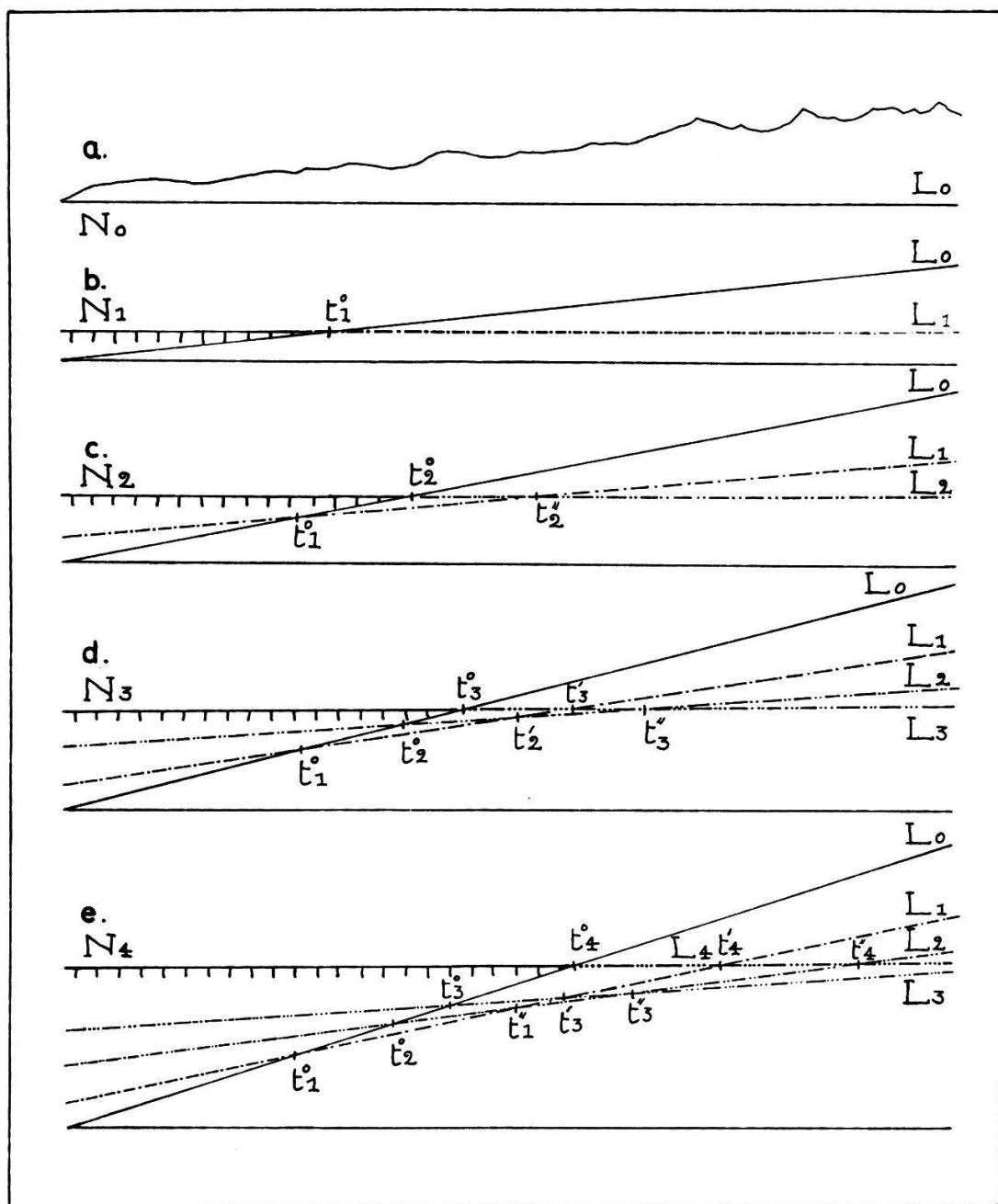


Fig. 5. — Rapport entre les mouvements de bascule des lignes de rivage et la remontée du niveau marin : a) formation de la ligne L_0 ; b) basculement de la ligne L_0 tandis que le niveau marin monte de N_0 à N_1 en formant la ligne L_1 ; la partie supra-aquatique extérieure de la surface L_0 est envahie par les eaux jusqu'au point de transgression t_1^0 ; les dépôts marins y recouvrent les formations subaériennes (dépôts lacustres, marécageux, tourbes, etc... pouvant fournir des fossiles permettant d'en déterminer l'âge) ; c) le niveau marin s'élève de N_1 à N_2 et fait transgresser sur L_0 jusqu'au point t_2^0 et sur la ligne L_1 jusqu'au point t_2' , tandis que la ligne L_2 se forme ; d) le niveau marin atteint N_3 en submergeant les anciennes lignes de rivage, L_0 , jusqu'au point t_3^0 , L_1 jusqu'au point t_3' , et L_2 jusqu'à t_3'' ; e) le niveau marin ayant atteint N_4 , les anciennes surfaces supra-aquatiques sont envahies jusqu'aux points t_4^0 , t_4' , t_4'' et t_4''' (ce dernier situé en dehors du cadre). — Cette évolution montre que la superposition des séries terrestres et marines n'est pas uniforme, mais change d'un secteur à l'autre. — Les schémas ne représentent que quelques stades du développement aidant ainsi à imaginer les mouvements continus. La série ci-dessus ne représente qu'une parmi les nombreuses possibilités des rapports entre les mouvements de l'écorce terrestre et les variations du niveau marin.

fjord. La première ligne ne sera formée que dans les parties extérieures. Lors du recul du glacier, les lignes suivantes peuvent s'étendre de plus en plus vers l'intérieur. Une telle configuration a prêté pendant longtemps à confusion, parce que l'on a considéré la limite de l'influence marine ($MG = \textit{marina-gränsen}$ des auteurs fennoscandiens) comme un niveau de référence. RAMSAY (1921, 1924) a montré que c'est une ligne métachrone. La distinction entraîne des conséquences importantes. Pour ne citer qu'un exemple : en basant l'estimation du soulèvement central du bouclier Baltique sur les valeurs de surfaces métachrones, par exemple sur celles de MG , on obtient nécessairement des valeurs plus petites que si l'on essaie d'extrapoler les séries de surfaces synchrones, puisque les ensembles métachrones sont généralement moins inclinés que les surfaces synchrones.

Il est maintenant nécessaire d'introduire les changements du niveau marin : (fig. 5). Après la formation d'une première ligne (L_0), le niveau de la mer s'élève de l'horizontale N_0 à N_1 . De cette façon, une partie de ce qui était terre ferme est noyé. Des dépôts marins se superposeront aux témoignages de la terre ferme, c'est-à-dire on constatera une *transgression*. On trouvera par exemple dans une coupe stratigraphique au-dessus d'un dépôt de marécage, (déterminé par l'analyse pollinique et l'étude des diatomées), des dépôts marins incontestables ; mais ces dépôts marins ne forment que des lames minces en biseau, qui se terminent à la ligne de transgression (points T de la figure). Les intersections entre les anciennes surfaces (N et L de la fig. 5) ont été utilisées par TANNER (1930, p. 344-356) pour déterminer (par approximations successives) les anciens niveaux de la mer. Pour y arriver, il faut des données de plus en plus exactes.

Pendant un épisode suivant, les deux composantes peuvent interférer d'une façon analogue, mais différente dans le détail. Les transgressions de ce genre peuvent se suivre et former des séries. On distinguera plusieurs sortes de contacts transgressifs.

Ces transgressions et régressions ont été observées depuis longtemps par des observateurs norvégiens et suédois, qui en établirent la succession stratigraphique. On a, pendant longtemps, interprété ces changements comme les témoignages d'oscillations, soit du niveau marin, soit du socle rocheux, en analogie avec les transgressions et les régressions des terrains plus anciens.

Les phénomènes apparaissent donc sous un angle assez différent dans les deux modes d'explication. Dans les hypothèses unicausales, d'immenses volumes, soit d'eau, soit de roches, sont mis en mouvement pour expliquer les oscillations. Dans l'image directrice de RAMSAY, ces mêmes phénomènes revêtent le caractère d'épisodes, dans un enchaînement d'un autre ordre de grandeur, quoique sa durée soit courte en comparaison avec les coupures des étages stratigraphiques préquaternaires.

Plusieurs simplifications ont été admises lors de la construction des schémas, de sorte que ces modèles ne sont que des premières approximations et doivent être corrigés à plusieurs reprises pour mieux s'adapter aux conditions de la

nature. Une première simplification est représentée par la supposition que le niveau de la mer est chaque fois monté et que l'angle d'inclinaison des anciennes surfaces a chaque fois augmenté. Si c'est le cas, dans les grandes lignes, pour la Fennoscandie, il en est certainement autrement pour des périodes plus longues ou pour des régions d'un autre caractère. Une autre simplification consiste à admettre que l'axe de rotation était stationnaire. En réalité, il change de place et les isobases de deux surfaces consécutives peuvent se croiser (RAMSAY, 1927; SAURAMO et AUER, 1928, pl. II; TANNER, 1930, p. 311). Dans les régions les mieux étudiées, des sinuosités plus ou moins locales apparaissent dans le dessin des isobases. Elles affectent surtout les anciennes surfaces, tandis qu'elles semblent disparaître dans les systèmes d'isobases plus jeunes. Ces données peuvent être interprétées de plusieurs manières : on peut les considérer comme les témoignages de la structure interne du socle rocheux, dont différentes parties réagissent différemment lors de la dépression et du soulèvement. Ces témoignages disparaîtraient dans les surfaces plus jeunes, parce que les différences deviennent trop petites pour être décelées par les méthodes actuelles. D'autre part, on les a aussi interprétés comme étant les empreintes de lobes glaciaires, s'attardant plus longtemps sur certains secteurs que dans d'autres. La différente durée du stationnement des glaces a donné lieu à beaucoup de recherches et de discussions : SAURAMO (1939, 1944), a cru découvrir des espèces de charnières en avant des positions de stationnement prolongé des glaces. C'est le problème passablement discuté des « hinge-lines » (SAURAMO, 1955). Il semble que les mesures exécutées actuellement ne permettent pas encore d'affirmer ce phénomène (Pl. I).

Une autre explication est suggérée par l'existence de nombreuses failles postglaciaires observées depuis le Danemark (MILTHERS, 1916) jusque dans les régions de l'océan Arctique (TANNER, 1930), et depuis la Norvège jusque dans les pays baltes. Les sinuosités et les irrégularités de pente pourraient être l'effet de zones de fractures à faible rejet.

Un exemple bien étudié par TANNER (1930, p. 41-188, fig. 59-61, pl. II) est celui de la péninsule des Pêcheurs (Kalastajasaarento, Fiskarhalvön, au NW de la côte Murmane) : le relief de la péninsule est coupé dans une série éocambrienne plissée et faillée, contenant des horizons morainiques (WEGMANN, 1928, 1929). C'est la continuation de la zone de Varanger qui se continue jusqu'à l'île de Kildine. Ce segment calédonien est séparé du vieux socle cristallin du fjord de Petsamo par une faille d'un rejet considérable. Les diagrammes des anciennes lignes de rivage (pl. II) montrent que les anciennes failles ont rejoué quand le socle fut déchargé, après la fonte des glaces. Il est probable que les discontinuités s'étendant jusqu'aux enveloppes mobiles se font sentir sous des différences de charge ou lors de contraintes. Les recherches détaillées sur les déformations récentes permettent donc de déceler et de différencier des discontinuités de ce genre. Ce sont des méthodes d'un grand intérêt pour la géophysique.

Les déformations consécutives sont inscrites dans les diagrammes et leurs mouvements partiels peuvent être déterminés d'une ligne de rivage à l'autre. Il est possible de constater sur chacune des fractures quand et de combien les lèvres se sont déplacées (en tout cas si le rejet dépasse les limites d'incertitude).

Il est naturellement possible, et même probable, que les différentes explications doivent être combinées et que différents exemples montrent différentes combinaisons de mécanismes.

Successions et échelles chronologiques

Les mouvements sont enregistrés par les différences de la configuration géométrique (inclinaison, sinuosités, discontinuités, etc.) des surfaces isochrones. Chacune de ces surfaces forme, pour ainsi dire, *une instantanée* et la séquence de ces instantanées donne *le film du mouvement*. Mais les instantanées ne sont pas prises à des intervalles réguliers. Les différents stades forment une série chronologique relative ; on connaît *leur succession*, mais pas la durée exacte de leurs intervalles. Les recherches combinées ont toutefois abouti à relier ces étapes à d'autres échelles chronologiques, ces échelles étant, soit des successions, soit des chronologies absolues. Les différentes séries de subdivision, sont à leur tour reliées entre elles par de multiples points communs, de telle façon qu'un vrai *réseau de coordonnées chronologiques* a été créé.

Les différentes successions stratigraphiques et paléontologiques sont surtout déterminées par l'évolution climatique, comme celle de la flore et de la faune terrestres, et celle de l'hydroclimat, déterminant les associations biologiques des nappes d'eau. D'autres successions, comme celles des caractères des eaux (lac glaciaire Baltique, mer à *Yoldia*, transgression à *Echineis*, lac à *Ancylus*, d'une durée de quelques siècles, mer à *Mastogloia* et les différents stades de la mer à *Litorina*), dépendent de l'évolution physiographique. Les successions archéologiques sont basées sur la typologie changeante des artefacts (RAMSAY, 1927). La succession des lignes de rivage est naturellement aussi, en dernier lieu, reliée à l'évolution climatique par la disparition des glaces et la libération des eaux (pl. I).

Toutes ces successions furent rattachées à la chronologie absolue basée sur le comptage des varves (DE GEER, 1912, 1940 ; SAURAMO, 1923) et, plus tard, aux déterminations par le ^{14}C .

Chaque événement important est donc inscrit dans un réseau de coordonnées chronologiques. *Les vraies vitesses et les changements de vitesse* au cours de l'évolution, peuvent être déterminés pour de nombreux points, grâce aux diagrammes. La distribution de ces vitesses est représentée par des séries de cartes montrant les isobases. Ces cartes montrent la configuration actuelle d'une ancienne surface de 0 m et permettent ainsi de se faire une idée de la vitesse moyenne de chaque point entre un moment donné et aujourd'hui.

Ceci est une esquisse des grandes lignes. Les opérations commencées par RAMSAY et ses disciples, Matti SAURAMO, Väinö TANNER, Väinö AUER, Thorolf VOGT (1930) et leurs collaborateurs, sont continuées par leurs élèves et leurs

successeurs (HYYPÄ, DONNER, IGNATIUS et beaucoup d'autres espoirs). Les diagrammes et les cartes d'isobases (fig. 6) posent de multiples questions. Ils font voir des écarts entre certaines données de la nature et les modèles, quoique évolués, et montrent ainsi le chemin vers de nouvelles approximations. Des recherches sur le terrain, des prélèvements et des déterminations permettent d'améliorer le réseau des échelles chronologiques de plus en plus détaillées et de corriger la position de chaque série d'observations dans le réseau.

Spectre des vitesses, ordre de grandeur et épirogenèse

Une importante distinction s'était imposée (elle est mentionnée plus haut, cf. p. 138), lorsque la durée et les subdivisions des temps géologiques furent reconnues. Les échelles, géologique, séculaire, et celle des durées plus courtes,

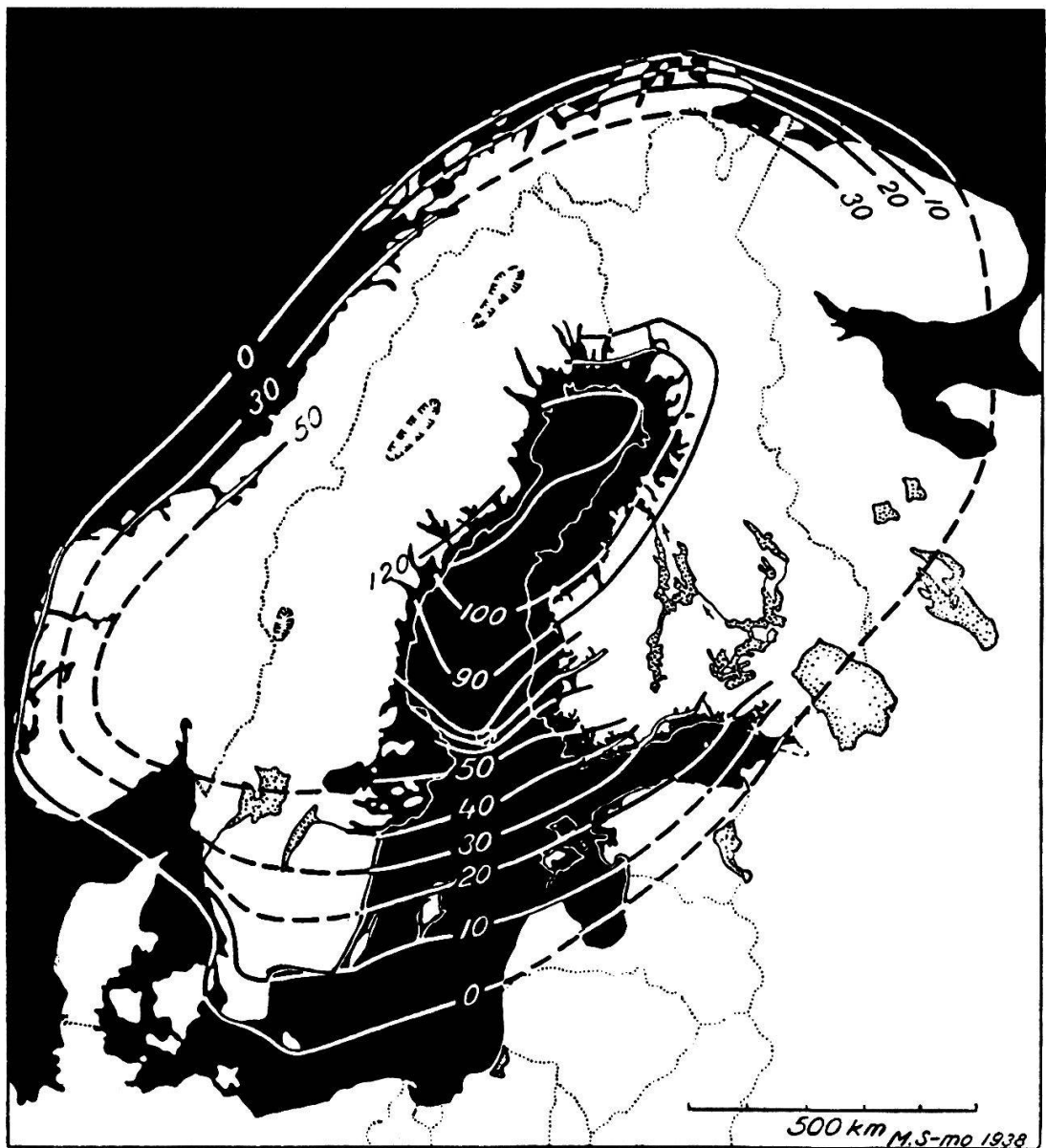


Fig. 6. — Carte des isobases du premier stade de la mer à *Litorina* construite par M. SAURAMO (1939).

furent différenciées. Les résultats des recherches sur la chronologie absolue, n'ont pas seulement confirmé cette manière de voir, mais en donnant la valeur des durées, elles ont permis de déterminer des vitesses de mouvement. Ainsi, on a obtenu tout un spectre (WEGMANN, 1948) et il nous semble utile d'en dire quelques mots, pour pouvoir définir la place que les données de la Fennoscandie y occupent.

Un tel groupement peut être établi de plusieurs façons : les vitesses obtenues de différentes manières peuvent être groupées suivant leur grandeur, par siècle ou par millénaire. Cette façon de faire peut suffire pour une première approximation. En y regardant de plus près, on remarque que ces valeurs ne représentent pas des données homogènes. La comparaison de nombreuses déterminations montre que les moyennes obtenues à partir de grands intervalles sont généralement plus petites que celles déterminées sur des coupures plus limitées. Cette règle empirique signifie probablement qu'un déplacement prolongé peut être entrecoupé par des ralentissements, des arrêts et même des mouvements en sens contraire, ce qui abaisse les moyennes. Les valeurs séculaires ou millénaires, ne sont donc comparables, que si elles sont obtenues pour des intervalles du même ordre de grandeur (WEGMANN, 1955).

Une classification plus évoluée se basera sur les vitesses, en tenant compte de la durée et de l'écart du mouvement positif ou négatif, ayant fourni la moyenne. Une distinction plus adaptée aux conditions de la nature saisira la grandeur des mouvements plus ou moins *continus dans le même sens* et limités par des déplacements du même ordre de grandeur en sens contraire, ou par des arrêts prolongés. On obtient ainsi des *unités de mouvement* ; ces unités peuvent être subdivisées par des ralentissements, des arrêts ou des oscillations en sens contraire, d'un ordre de grandeur inférieur. Un caractère supplémentaire sera fourni par l'extension et la configuration de la masse en mouvement.

Essayons maintenant de placer les mouvements postglaciaires de la Fennoscandie dans ces diverses classifications.

Le soulèvement séculaire actuel de la partie centrale, évalué à 1 m, se place parmi les mouvements verticaux les plus rapides, à l'exception des déplacements catastrophiques. Tous les auteurs sont d'accord pour admettre que la vitesse séculaire en était un multiple pendant les périodes suivant immédiatement la déglaciation, mais les estimations varient. Les plus grandes vitesses pour ce temps, sont mentionnées par SAURAMO (1939, p. 14) ; il admet, pour l'Ångermanland, une remontée de 40 à 50 m par siècle, ce qui correspondrait à une valeur limite de 0,5 p par an.

En ce qui concerne l'avenir, tous les auteurs admettent que le soulèvement se ralentira, mais les estimations varient suivant le modèle géophysique proposé et les valeurs choisies comme base. Mentionnons, comme exemple, l'estimation de WITTING (1928) : après cinq cents ans, la vitesse au centre aurait diminué de moitié, et à partir de ce moment la lithosphère ne se soulèverait plus que de 25 m pour atteindre son équilibre. L'analyse dynamique de NISKANEN (1949) aboutit au résultat que la lithosphère n'atteindra plus la

même position qu'elle avait avant la dépression, mais que le mouvement ascensionnel sera freiné avant. Comme il est difficile de déterminer la position de la lithosphère, avant la dernière ou les autres glaciations, cette affirmation est certainement l'aboutissement d'un bon calcul, mais reste néanmoins hypothétique.

D'autre part, le bouclier a été déchargé ; on le comprend en évaluant les masses rocheuses transportées depuis la Fennoscandie dans les régions périphériques et étalées sur les vastes surfaces de la plate-forme russe, la Pologne, l'Allemagne, les Pays-Bas, la mer du Nord et les régions limitrophes des océans Scandique et Arctique, en formant souvent des dépôts épais. En appliquant le modèle de l'isostasie, on s'attendrait à un soulèvement. Plusieurs autres manières de résoudre le problème sont tout aussi hypothétiques.

Les estimations de l'écart entre la position déprimée et celle d'équilibre (dans l'hypothèse de l'isostasie) varient suivant la méthode de détermination et suivant les valeurs choisies pour le calcul. Aucune méthode ne permet d'obtenir des chiffres exacts ; il ne peut s'agir que d'ordres de grandeur. Les estimations *varient entre 800 et 1000 m* (TANNER, 1930, p. 413 ; SAURAMO, 1939 *b*).

Puisqu'on ne peut pas savoir quand le soulèvement a commencé, les appréciations quant à *la durée du mouvement ascensionnel* varient. Les uns admettent que ce mouvement a commencé lors du recul des glaces, celles-ci diminuant d'épaisseur sur la région centrale, d'autres, pensent que le soulèvement a suivi le recul du front glaciaire (SAURAMO, 1939 *b*). Les estimations basées sur les modèles isostatiques les plus courants varient entre 8000 et 12 000 ans. En évaluant, à partir de ces chiffres, la vitesse séculaire moyenne de la remontée, on obtient une valeur de l'ordre de grandeur de dix mètres. Une telle estimation donne plus de vraisemblance aux grandes vitesses initiales de SAURAMO (1939 *b*, p. 14) .

Toutes ces estimations se rapportent à la partie centrale autour du golfe de Bothnie. A partir de ce noyau, la valeur des écarts entre la position déprimée et l'état actuel va en diminuant jusqu'aux isobases 0 m, et à partir de là, le signe du mouvement devient contraire. La position de l'isobase 0 m ne reste pas constante pendant toute cette période, mais se déplace quelque peu, comme on peut s'en convaincre en comparant les cartes des différents stades. Des changements de vitesses en sont la conséquence, mais ces changements ne sont pas synchrones ; les spectres épirogénétiques montrent ces variations pour chaque point. Mais non seulement les isobases externes ne sont pas parallèles dans tous les secteurs, mais aussi ce que l'on appelle l'épicentre épirogénique semble s'être déplacé pendant le soulèvement (TANNER, 1929, p. 361). Ce phénomène peut être expliqué de plusieurs manières, suivant les hypothèses générales. On peut admettre, comme nous l'avons fait pour le Groenland (WEGMANN, 1939, p. 45), que les lieux des premières grandes accumulations, la répartition des charges lors de l'état stationnaire et celle des stades de recul, n'ont pas été les mêmes ; on peut aussi voir dans ce déplacement

l'indice d'un autre facteur indépendant de l'équilibre isostatique (TANNER, 1929, 1930), la marque d'un plissement de fond (dans le sens d'Emile ARGAND), qui se superposerait aux manifestations de la glacio-isostasie. Un tel plissement, avec un facteur isostatique de moindre importance, fut déjà postulé par REKSTAD (1922), se basant sur ses observations dans les régions montagneuses de la Norvège. Les séries stratigraphiques des régions qui entourent la Fennoscandie témoignent d'une *tendance persistante de remontée du bouclier Baltique* depuis les temps du vieux Paléozoïque jusqu'à la fin du Tertiaire. Des sables provenant de la Fennoscandie se retrouvent dans de nombreux étages et montrent que les différences de niveau rendaient de tels transports possibles et que ces différences de niveau étaient renouvelées à de nombreuses reprises. On peut même aller un pas plus loin et considérer, comme Erich HAARMANN l'a proposé (1930, p. 65, 1935, p. 61), le déroulement des *glaciations comme dépendant des oscillations* de la lithosphère. Un premier stade aurait soulevé les montagnes, fournisseurs des glaces, et créé la vaste cuvette dans laquelle elles se seraient écoulées, en la remplissant jusqu'au niveau où leur surface faisait partie de l'aire d'accumulation. Un soulèvement de la cuvette remplie aurait fait déborder les glaces, déclenchant ainsi les récurrences successives. Ces quelques exemples, choisis parmi de nombreuses autres possibilités, montrent qu'un *vaste éventail d'hypothèses* est à disposition pour relier les différentes données entre elles.

Revenons encore sur les *dimensions du phénomène* : une masse rocheuse de l'ordre de grandeur de 5 millions de km³ a été soulevée au-dessus de la surface atteinte pendant les temps glaciaires, d'abord rapidement, ensuite de plus en plus lentement, pendant une durée d'une dizaine de milliers d'années. Ces chiffres n'ont pas d'autre but que de montrer les dimensions approximatives du phénomène, pour pouvoir le comparer à d'autres.

De nombreux auteurs appellent ce genre de mouvements *épirogenèse*. Il correspond, en effet, à la définition et au type décrit par G.-K. GILBERT (1890), c'est-à-dire au bombement après la disparition du lac Bonneville, dans le NE du « great Basin ». En effet, GILBERT (1890, p. 340), écrit : « Ayant l'occasion de distinguer les phénomènes des ondes géographiques des larges dômes, je prends la liberté d'appeler les mouvements plus larges par l'adjectif *épirogénique*, basant l'expression sur le mot grec ἑπειρος = continent. Le processus de la formation des montagnes est l'orogénèse, le processus de la formation des continents est l'épirogenèse, et les deux ensemble sont le diastrophisme. » Dans le cas du lac Bonneville, le soulèvement suit la disparition des eaux, mais les dimensions du phénomène sont trois à quatre fois plus grandes pour le bouclier Baltique. Il y a aussi d'autres différences, structurales, dont nous ne mentionnerons que les failles, formant une série de horsts et de grabens. Ces mouvements créant des reliefs, sont considérés comme des manifestations de l'*orogénèse*. Ces discontinuités orogéniques n'existent, d'après GILBERT (1890, p. 340), que grâce aux mouvements épirogéniques ; elles se superposent au bombement, et les deux se combinent

« comme les rides sur les vagues de l'Océan » (1890, p. 368). Dans la pensée de GILBERT (1890, p. 340) : « Aucun des processus de déplacement n'appartient exclusivement au passé lointain, mais les deux sont associés à l'histoire du lac. » Il s'agit d'une importante contribution à la tectonique vivante dans le sens de l'actualisme ; ceci est souligné par les remarques de GILBERT (1890, p. 358), qu'il s'agit aussi bien pour le bombement que pour les failles d'un mouvement lent et séculaire, quoique catastrophique dans le détail. L'orogénèse et l'épirogenèse ne s'excluent pas, mais sont combinées. Le terme orogénèse a été employé déjà en 1889, par C. ABBE jr, suivant le « Glossary of Geology » (1962).

Les failles ne manquent pas en Fennoscandie, comme mentionné plus haut (cf. p. 154), mais leur rôle dans l'ensemble et leur importance ne sont pas les mêmes. On peut néanmoins affirmer que les deux phénomènes appartiennent au même type de l'épirogenèse de GILBERT, comme d'ailleurs d'autres boucliers et d'autres lacs quaternaires.

Les termes ont malheureusement subi de nombreuses altérations fondamentales, d'abord dans la littérature allemande, sous l'influence de l'image directrice de STILLE. HAARMANN (1934) a essayé de rétablir le contenu original de ces notions, mais cette tentative est restée sans suite. Nous ne voulons pas décrire les vicissitudes par lesquelles les deux termes ont passé, pour aboutir à une multitude de définitions variant d'un auteur à l'autre. C'est un phénomène assez fréquent dans l'histoire de la géologie et de la pétrographie. Il suffit de constater que les mouvements orogéniques et épirogéniques s'excluent dans la plupart des définitions actuelles. Les deux termes ne peuvent plus être employés pour désigner des phénomènes tels que ceux qui suivirent la disparition du lac Bonneville, ou la déglaciation de la Fennoscandie. De nombreux auteurs emploient le terme quelque peu curieux de « mouvement isostatique » (s'il y a mouvement, il n'y a pas d'équilibre), mais sa définition fait intervenir un mécanisme, pour le moment tout à fait hypothétique, qu'il s'agirait d'élucider avant de l'affirmer.

Des termes descriptifs sont nécessaires pour pouvoir se retrouver dans cette confusion et pour développer les recherches dans le domaine de la tectonique vivante. Pour pouvoir y arriver, il s'agira de grouper les divers phénomènes de la tectonique vivante, en se basant sur leurs multiples caractères principaux et accessoires. Il sera utile de ne pas se tenir à un seul système de hiérarchie des caractères, mais de changer la succession des catégories, pour arriver à saisir les divers liens de parenté.

Les deux exemples peuvent être réunis dans un type : dans les deux cas, l'écorce continentale se soulève rapidement (durant un espace de temps de l'ordre de grandeur de dix mille ans), en un large dôme après être déchargé. Les types de bombement de ce genre sont des *unités de mouvement* dans une classification esquissée ci-dessus, en ce sens qu'ils sont limités, soit par des déplacements en sens contraire, soit par des positions de repos prolongé. Ce sont des *événements de courte durée* que l'on pourrait appeler *épisodiques*

pour les distinguer dans l'échelle des durées, d'une part des événements séculaires (dans le sens propre du mot), d'autre part des événements durant des millions, des dizaines, voire des centaines de millions d'années. Ces différents ordres de grandeur peuvent être distingués dans les boucliers et dans ce que l'on appelle les vieux massifs, comme le Massif Central de France, ou le massif jumelé des Vosges et de la Forêt-Noire.

Le bouclier fennoscandique s'est bombé depuis les temps du vieux Paléozoïque jusqu'à nos jours, et cela à de nombreuses reprises, en changeant de forme et d'amplitude. Il est probable que ce mode de mouvement, bien documenté pour plusieurs étages du Tertiaire, s'est continué pendant le Quaternaire, de telle sorte que les oscillations épisodiques des temps glaciaires et postglaciaires se superposent *au mouvement persistant*. Ces mouvements de très longue durée se composent d'une série de pulsations, comme la disposition des sédiments périphériques (CLOOS, 1939, p. 502-503), leur succession et l'évolution morphologique le montrent.

Si l'on veut étudier la *phénoménologie* de ces différentes sortes de mouvements, il ne suffit pas d'affirmer que la même force était agissante, aussi bien pour les unités d'ordre supérieur que pour les épisodes ; on peut accepter un principe de ce genre comme guide pour les recherches, comme l'avait fait RUNEBERG en 1765, mais ce n'est pas une donnée de la nature. On peut aussi essayer, dans la mesure du possible, d'individualiser chacun de ces types de mouvement, en comparant les analogies et les différences. On définira ainsi les exigences auxquelles les modèles des mécanismes doivent suffire.

De nombreux auteurs distinguent actuellement les mouvements rapides périodiques des segments plissés des déplacements lents, non périodiques, des aires continentales. Aux premiers, on a donné, en suivant STILLE, le nom de mouvements orogéniques, les seconds sont appelés épirogéniques. Nous avons essayé de montrer *qu'il y a aussi des mouvements rapides, même plus rapides* que dans beaucoup de zones plissées, *dans des aires continentales*. Les mouvements de l'ordre de grandeur épisodique n'appartiennent ni à l'une ni à l'autre des grandes catégories mentionnées. Ce n'est pas le lieu de traiter ici le vaste ensemble de problèmes présenté par les unités de mouvements d'ordre supérieur. SUESS, avant de connaître les dimensions chronologiques, avait déjà l'intuition que les grandes transgressions et régressions appartenaient à une catégorie d'événements différents des accidents épisodiques (cf. p. 142).

Depuis JAMIESON (1865), on a fait intervenir l'isostasie dans les explications des mouvements épisodiques. Ce principe est certainement un bon guide pour les recherches, mais le mécanisme un peu simpliste le plus souvent proposé, quoique utile pour les calculs, n'est certainement qu'une première approximation. On peut se demander pourquoi l'équilibre est rapidement rétabli (en une dizaine de milliers d'années), lors de la formation et de la disparition d'un glacier continental ou d'un lac, alors que cet état n'est pas atteint pendant des millions ou des dizaines de millions d'années dans d'autres régions soulevées ou déprimées, comme les chaînes de montagnes jeunes ou

rajeunies, les vieux massifs, les géosynclinaux et d'autres phénomènes de ce genre. On a essayé à plusieurs reprises de calculer la viscosité des masses qui se déplacent en profondeur lors du rétablissement de l'équilibre (GUTENBERG, 1941 ; NISKANEN, 1949), en cherchant ainsi à expliquer les phénomènes par les propriétés rhéologiques et élastiques. Il est probable que la structure spéciale des boucliers et larges massifs joue aussi un rôle. Une autre circonstance, en tout cas pour la Fennoscandie et les autres boucliers couverts par les inlandsis, est le fait que le soulèvement postglaciaire est *la fin d'une série d'au moins trois glaciations accompagnées de dépressions et de soulèvements*. Il est probable que les conditions subcrustales ont évolué différemment sous une plate-forme ayant seulement subi les lents soulèvements répétés, au cours des périodes géologiques, et un bouclier soumis à une *série d'oscillations de plus grande envergure et cela à une cadence rapide* (en tout cas à l'échelle géologique). L'influence de voilements répétés est connue en technologie. En géologie tectonique, une telle influence est peu connue, parce que les recherches se concentrent surtout sur des déformations irréversibles. Une explication plus évoluée devra tenir compte de ces facteurs, et probablement aussi d'autres, et les faire intervenir dans ses modèles.

Dans les pages précédentes, nous avons évoqué quelques questions concernant les unités de mouvements postglaciaires et nous avons essayé de montrer comment les recherches sur ce vaste sujet se sont séparées des études entreprises, pour fixer la vitesse séculaire des déplacements récents. Ces vitesses ne sont que des coupures dans l'ensemble, mais l'histoire des travaux entrepris pour saisir les détails de leur cinématique est un complément important pour la connaissance de la tectonique vivante. Il nous semble donc utile d'en esquisser brièvement quelques traits essentiels.

Evolution des études sur les mouvements séculaires

L'observation des déplacements récents de la ligne de rivage avait déclenché les recherches scientifiques (cf. p. 133), et la détermination de la vitesse par siècle a été un des buts principaux depuis les travaux de CELSIUS (cf. p. 135) ; la multiplication des marques gravées dans les rochers en était une suite importante. Mais les variations journalières et saisonnières dues aux conditions météorologiques et hydrographiques sont parfois si impressionnantes que les mouvements séculaires de la lithosphère restèrent douteux jusqu'à la fin du siècle passé. Toutefois il apparut que sans un vaste réseau d'observations suivies, il ne serait pas possible d'éliminer les changements à court terme et d'obtenir des moyennes permettant de dégager le soulèvement, si soulèvement il y avait.

A partir du milieu du siècle passé, les stations de pilotes en Suède et en Finlande se virent octroyer l'obligation d'observer et de noter chaque jour le niveau marin. La qualité de certaines observations et leur homogénéité laissèrent au commencement à désirer, de sorte qu'il fallut du temps et de la patience pour obtenir des valeurs comparables. Une autre difficulté se présenta

lorsqu'une multitude de chiffres, telle une vague toujours grandissante, commença à se déverser dans les offices. A. E. NORDENSKIÖLD (1832-1901), le vainqueur du passage du Nord-Est, mit au point et organisa les calculs des moyennes annuelles. Pour montrer l'efficacité de sa méthode, il publia une vue d'ensemble sur les observations faites à Stockholm entre 1774 et 1852 (NORDENSKIÖLD, 1858). Les premiers essais faits avec les séries des différentes stations n'étaient pas encourageants, car les moyennes des années consécutives ne se plaçaient pas, comme on s'y était attendu de certains côtés, sur des lignes plus ou moins continues. La figure 7 montre dans sa partie supérieure les moyennes annuelles de la station de Rönnskär, située dans l'archipel de Vasa, en Finlande ; les points représentent les moyennes annuelles entre 1870 et 1930. On constate des sauts d'une dizaine de centimètres (voire de 16 cm) d'une année à l'autre. La comparaison entre différentes stations et diverses coupures montre encore moins de régularité. Même après un second traitement mathématique (ligne continue de la figure 7), le tracé ne devient pas continu, mais la tendance générale apparaît. La multitude des données augmenta encore avec la mise en service des marégraphes. La nature des données n'est plus homogène, comme RENQUIST (1948) le souligne, parce que les moyennes de Rönnskär sont basées sur 365 observations journalières,

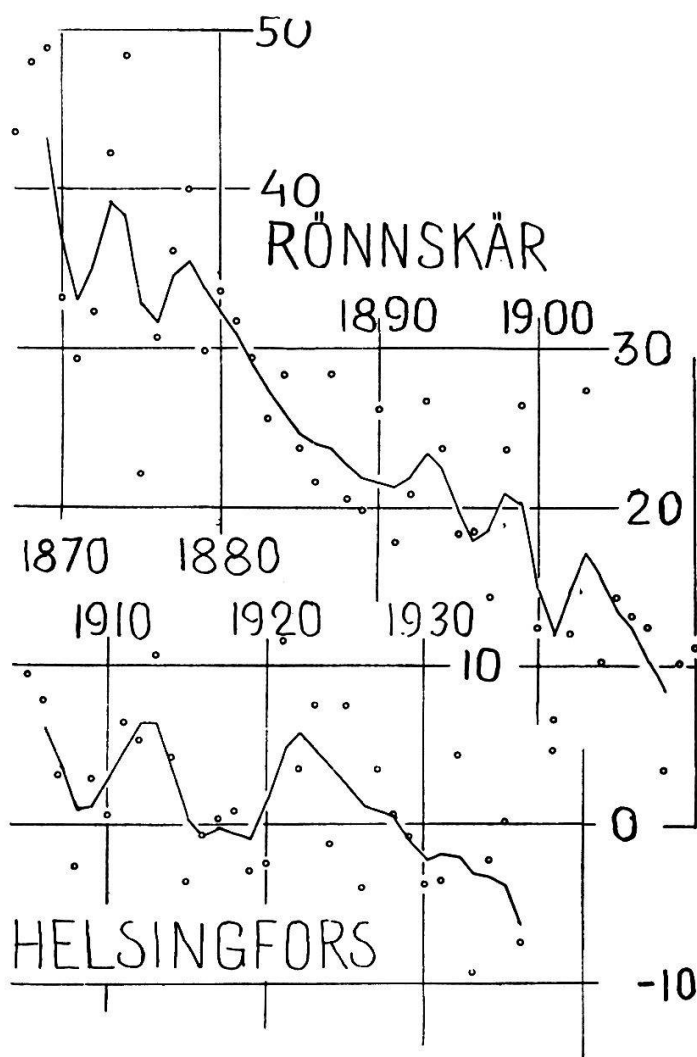


Fig. 7.

Séries de moyennes annuelles du niveau marin, en haut de la station de pilotes de Rönnskär (golfe de Bothnie, une observation journalière) et, en bas, les moyennes des huit enregistrements journaliers des marégraphes de Helsingfors. La ligne continue est le résultat d'un second traitement mathématique. RENQUIST, 1948.

tandis que les marégraphes (fig. 7, Helsingfors = Helsinki) fournissent six enregistrements par jour ; le point représentant la moyenne annuelle correspond donc à environ 2200 mesures.

L'examen des moyennes publiées vers 1880 et reproduites par E. SUESS dans le deuxième volume de la « Face de la Terre » semble justifier les opinions assez répandues en ce temps-là, que le soulèvement du bouclier Baltique n'était qu'une chimère. Plusieurs stations cessèrent de faire des observations, parce que les résultats furent jugés trop décevants.

Les impulsions décisives allaient de nouveau venir du dehors, mais la pénétration de ces idées ne fut que lente. Plusieurs courants d'idées postulaient une mobilité relativement grande de l'écorce terrestre. James HALL admettait que le sous-sol rocheux pouvait s'affaisser sous la charge des sédiments et former des bassins contenant des séries épaisses, créant ainsi le modèle des géosynclinaux. D'autre part, Thomas F. JAMIESON publia (1865) l'image directrice de l'isostasie glaciaire, qu'il explicita en 1882. Il fut suivi par James CROLL et plusieurs autres auteurs anglo-saxons, mais ces vues ne soulevaient qu'un enthousiasme très tempéré en Fennoscandie. Leonhard HOLMSTRÖM (1888) déclare, dans les comptes rendus de l'Académie royale de Suède, que la question des déplacements de la ligne de rivage a augmenté d'intérêt par l'acceptation de plus en plus répandue de l'hypothèse des oscillations du niveau marin, mais que, en revanche, les idées de John PLAYFAIR et de Leopold VON BUCH sur les soulèvements et les affaissements, émises au commencement du siècle, étaient de plus en plus abandonnées. Ce courant fut renforcé, comme mentionné (cf. p. 143) par l'ouvrage d'E. SUESS. Ainsi, on arriva de nouveau à une espèce de « théorie de la diminution des eaux » (cf. p. 135).

Des opinions opposées, quoique d'abord en minorité, se firent aussi entendre et réussirent à entretenir un champ de tension favorable aux recherches et aux entreprises préposées aux enregistrements.

Le retour du courant s'annonce par la publication de la *première carte des isobases séculaires*, par le professeur viennois Robert SIEGER (1893) ; un exposé historique détaillé, une analyse poussée des données et de nombreuses observations originales font de ce travail un document important. Pour construire ses isobases, SIEGER emploie aussi bien les observations faites sur les rivages des grands lacs qu'autour de la Baltique. Il a essayé d'éliminer les facteurs météorologiques, mais les sources de renseignements accessibles à ce temps-là n'étaient pas encore suffisantes pour une telle entreprise (fig. 8).

De nouvelles cartes d'isobases furent éditées en 1914, par RENQUIST et BLOMQUIST (fig. 8), en utilisant les observations accumulées pendant quatre-vingts ans en Finlande et en Suède. Toutes les séries furent réduites à la même période, 1889 et 1912, et les courbes obtenues, comparées avec celles de quelques stations allemandes situées sur la Baltique, en admettant que celles-ci aient subi les mêmes variations météorologiques, car entre-temps on s'était persuadé que les principaux facteurs dispersant les moyennes annuelles étaient les perturbations météorologiques.

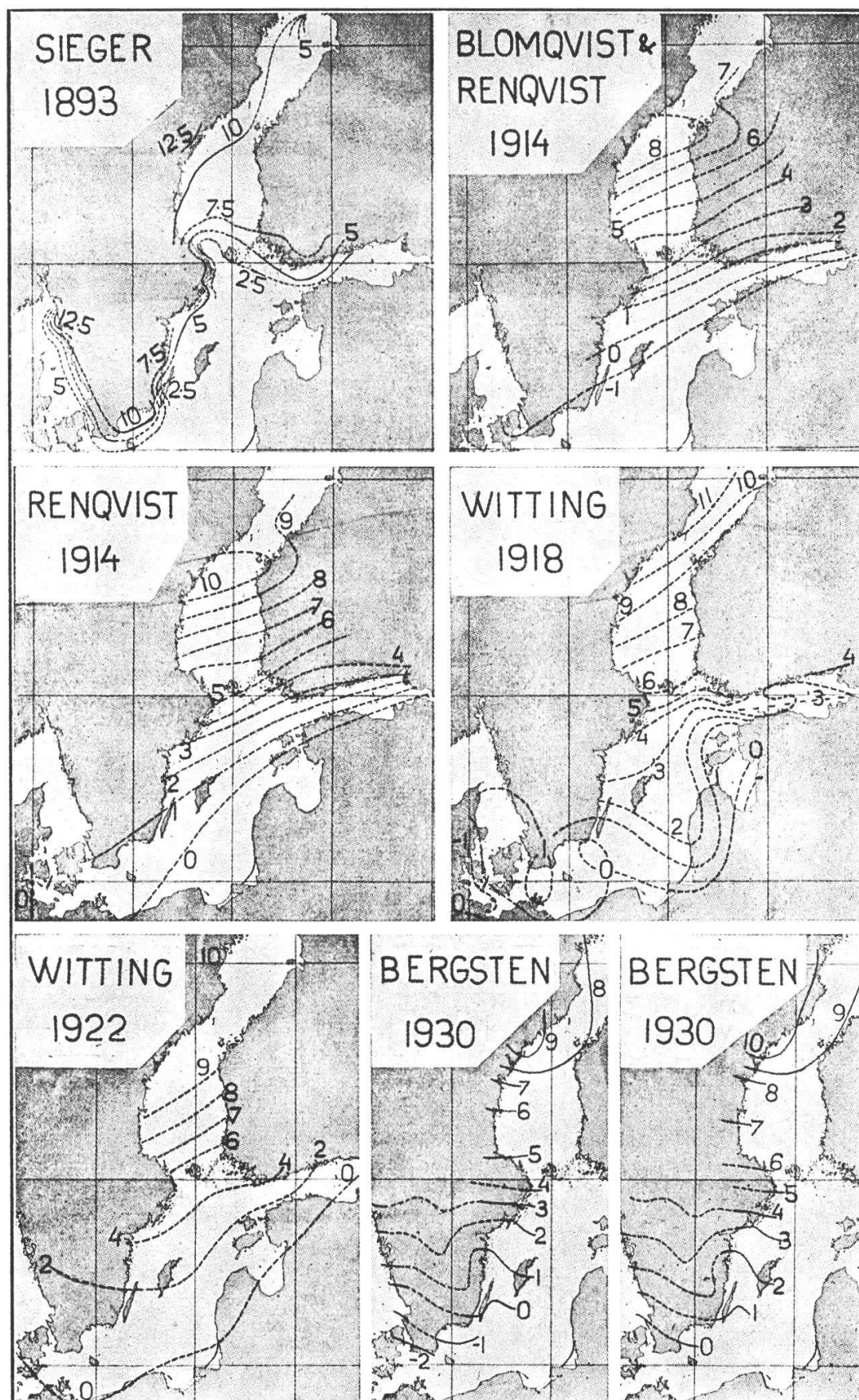


Fig. 8. — Evolution des représentations des isobases du mouvement récent depuis SIEGER, 1893, jusqu'à BERGSTEN, 1930.

Ces facteurs furent soumis à une analyse très serrée dans l'ouvrage fondamental de ROLF WITTING (1918). WITTING se limite à une période de quinze ans, mais il s'efforce de déceler et d'étudier l'influence de chaque élément perturbateur ; les vents et leur direction, la distribution des pressions barométriques, l'affluence et la disposition changeante des eaux douces, le bilan des échanges d'eau à travers les détroits danois, et d'autres facteurs de moindre importance ; il essaya d'en évaluer l'action et de ramener les moyennes annuelles au seul déplacement séculaire. Mais même ces opérations ne permettaient pas d'obtenir une ligne droite. On arrive ainsi à la limite de ce que cette méthode peut résoudre. Ce fait a été expliqué de plusieurs manières : en admettant que tous les facteurs perturbateurs aient été saisis, la dispersion des moyennes serait due au mécanisme du soulèvement ; l'écorce terrestre serait composée d'une mosaïque de pièces reposant sur un matelas plus mobile ; les pièces se déplaceraient à des vitesses inégales et changeantes. Les enregistrements séismologiques parleraient en faveur de cette image. D'autres pensent que des facteurs inconnus se cachent encore dans cette dispersion.

L'extension du traitement à des séries plus longues (WITTING, 1922, 1943), n'a pas beaucoup changé le tracé des isobases (fig. 9). Les cartes de BERGSTEN

Fig. 9.
Isobases
des
mouvements
récents
d'après
WITTING,
1943.



(1930), basées sur les données suédoises, montrent une évolution semblable, en ce sens que les moyennes de 1887 à 1927 et celles de 1826 à 1927 ne diffèrent que par les détails. Les observations anciennes ont été comparées à celles de Stockholm, où les mesures se sont poursuivies pendant un siècle. La carte de WITTING (1943), représente probablement la meilleure approximation possible par la méthode hydrographique.

Extension des mesures à l'intérieur de la terre ferme

Les déplacements constatés dans les franges côtières de la Baltique peuvent être poursuivis à l'intérieur de la terre ferme. Deux voies s'ouvrent : l'étude des lacs et les méthodes de la géodésie et de la géophysique moderne.

Les *grands lacs* fournissent des marques horizontales étendues, utilisables aussi bien pour les études géologiques que pour les mesures limnologiques. Leur étude a attiré l'attention depuis longtemps, puisque le professeur RUDBECK déjà, le maître de LINNÉ, publia un travail sur le lac Mälaren. Les observations sur les lacs jouent un rôle important dans l'ouvrage de SIEGER (1893).

On avait remarqué depuis longtemps que les parties basses des rivages méridionaux des grands lacs de Finlande avaient la tendance d'envahir les prés et les forêts, en les transformant en marécages, tandis que les prairies humides des rivages septentrionaux se desséchaient. Ce phénomène s'insère dans une évolution de longue durée : les grands lacs de Finlande, comme Saima, Päjanne et Näsijärvi, avec leurs dépendances, ainsi que bon nombre d'autres lacs, étaient encore des bras de mer dépendant du golfe de Bothnie à l'époque de la mer de *Litorina*. Ils furent isolés pendant des siècles aux environs de 4000 ans avant J.-C. et envoyèrent leurs eaux vers le NW. Le soulèvement plus intense dans le NW basculait les vases contenant ces nappes d'eau douce. (Les géologues qui n'ont confiance que dans les expériences et ne se fient pas aux observations dans la nature, peuvent reproduire ce basculement avec un verre d'eau ou de vin.) Les eaux envahirent les parties basses des rivages S et SE, ennoyèrent des forêts et trouvèrent pour finir des exutoires vers le golfe de Finlande. Ces cours d'eau sont donc relativement jeunes ; les rapides d'Imatra datent d'environ 3000 ans avant J.-C., ceux du Vuolenskoski d'environ 400 ans avant J.-C. Ils n'ont pas encore réussi à régulariser leur profil en long, où des parties à forte inclinaison alternent avec des pentes plus douces. Les rapides ont attiré depuis longtemps les industries et jouent de ce fait un rôle important dans la géographie humaine.

Le basculement des bassins lacustres a eu parfois des suites catastrophiques aussi bien pendant les temps préhistoriques que pendant l'ère historique. La rupture de l'ås de Kangasala, en 1830, abaissa le niveau du lac Längelmävesi de 2 m et diminua sa surface de 30 km². La surface du lac Höytiäinen, en Carélie, fut abaissée de 9 m en 1859 et réduite de 200 km². Les restes d'une forêt, noyée lors du basculement, furent mis à sec à cette occasion (SAURAMO et AUER, 1928), ce qui montre que le lac avait envahi la forêt. Ces changements de la végétation, bien connus actuellement pour une grande partie des lacs, sont

enregistrés dans les dépôts lacustres et dans les tourbières. La succession stratigraphique de détail n'est donc pas la même aux deux extrémités d'un grand lac ; seuls l'ensemble des coupes et leur mise en place dans l'image directrice générale peuvent en fournir la clef. Les forêts noyées, les divers dépôts lacustres et les restes fossiles des différentes associations végétales des marécages représentent des archives précieuses pour qui sait les déchiffrer. Les recherches sur ces dépôts ont donné lieu à une littérature abondante. L'évolution du style de ces travaux est un chapitre caractéristique de l'histoire des recherches sur les temps postglaciaires, en commençant par les essais d'une classification et d'une stratigraphie (ANDERSON, 1898) en passant à la reconstitution de la série des événements des temps classiques, comme par exemple l'histoire du lac Vanajavesi (AUER, 1924) ou du Höytiäinen (SAURAMO et AUER, 1928), jusqu'aux temps modernes, où la spécialisation est de plus en plus poussée, chacun des experts dirigeant son attention sur la facette qui lui semble être la plus intéressante. La succession des instantanés des différentes associations floristiques et des forêts dans leurs paysages en transformation avec, comme fond, les changements du climat, forme une espèce de film qui ne représente pas seulement l'histoire récente de la Fennoscandie, mais offre des modèles détaillés pour l'interprétation de nombreuses formations du passé.

Le partage des eaux s'est donc déplacé assez rapidement (géologiquement parlant) à travers le pays, parfois par transition, parfois par des ruptures catastrophiques, abaissant brusquement le niveau. Certaines situations catastrophiques, préparées par la nature, ont été déclenchées par l'imprudence des hommes. Une série de phénomènes analogues est connue en Suède.

Les mouvements mis en évidence par les géologues, continuent encore actuellement et ils sont enregistrés par les *limnigraphes* (SIRÉN, 1951, 1963). Les différences entre les mesures aux deux extrémités des nappes d'eau donnent la mesure du basculement. Les réseaux de nivellement permettent de placer ces données dans le tracé général des isobases, à l'exception du lac Inari, où les mesures restent relatives pour le moment.

Avec l'entrée en scène des méthodes *géodésiques et géophysiques*, commence une nouvelle étape dans la marche vers des mesures de plus en plus précises. Le bombement étant admis, les nivellements de précision répétés ont permis, d'une part, de relier les données limnologiques au réseau général, d'autre part, en comparant les déterminations anciennes avec les récentes, d'obtenir les différences (HELA, 1953 ; KÄÄRIÄINEN, 1953, 1963 ; KUKKAMÄKI, 1954, 1963) et de construire des isobases à l'aide de ces valeurs. Les travaux géodésiques sont complétés par des mesures gravimétriques (NISKANEN, 1943, 1949 ; KUKKAMÄKI, 1963). De nouvelles méthodes pour découvrir et mesurer des détails jusqu'ici insaisissables furent proposées lors du dernier Symposium pour l'étude des mouvements récents, tenu à Aulanko (Finlande), en août 1965.

Ce n'est plus une nouvelle image directrice qui se crée, mais les traits de l'ancienne se dessinent d'une façon de plus en plus précise. Dans plusieurs

secteurs, on assiste déjà à la chasse aux fractions de millimètre (SIMONSEN, 1946, 1949, 1960).

Les auteurs de la génération de l'après-guerre semblaient avoir de la peine à admettre l'image de WITTING (1918) « d'une mosaïque soudée d'une façon semi-plastique », dont les éléments avaient une certaine liberté de déplacement autonome. Ils pensaient que le soulèvement est plus régulier (HELA, 1953 ; KÄÄRIÄINEN, 1953). Mais l'image d'un pavement inégalement soulevé commence de nouveau à hanter les esprits, ramenée sur la scène, d'une part par la géologie (HÄRME, 1963), d'autre part par la géophysique, puisque des recherches ont été proposées pour découvrir, localiser et mesurer les failles actives (KUKKAMÄKI, 1963, p. 59).

Quelques incidences du soulèvement sur les phénomènes géographiques, sédimentaires et géochimiques

Le paysage de la région centrale du bouclier Baltique se transforme à un rythme beaucoup plus rapide que la majorité des régions d'Europe occidentale ou centrale. Des rochers et des îles apparaissent ; des détroits et des passages deviennent de moins en moins profonds et cessent d'être navigables, avant d'être asséchés (fig. 1). Le partage principal des eaux en Finlande centrale s'est déplacé de plusieurs centaines de kilomètres en quelques milliers d'années. Ce qui se passe dans des pays plus lentement déformés pendant des centaines de milliers, ou des millions d'années, est survenu ici pendant les derniers millénaires et continue actuellement. Une comparaison avec d'autres régions et surtout avec des exemples d'enregistrement fossiles, vaudrait la peine d'être établie d'une façon plus explicite, mais dépasserait le cadre de cet exposé. Quelques cas seulement, à titre d'exemples, peuvent montrer l'intérêt de ces recherches et le nouvel angle de vue sur les diverses formations et leur manière de se former et transformer.

Une série de phénomènes est étalée sous nos yeux, soit en activité, soit en des enregistrements frais, à peine transformés, tandis que les exemples fossilisés des formations préquaternaires montrent les témoignages d'événements semblables, mais dans une perspective très raccourcie.

RENQUIST (1948) a essayé d'établir une carte (fig. 10), montrant d'une part les isobases du soulèvement séculaire en décimètres, et, d'autre part, la séparation du pays en deux sortes d'aires : des régions où *la pente des cours d'eau actuels diminue*, à cause du basculement du sous-sol (en noir sur la carte), et des contrées où l'inclinaison du réseau de drainage augmente ou reste stable (en blanc). Dans les secteurs où le pouvoir du drainage diminue, la superficie des marécages augmente de telle façon que dans certains districts, voisins du golfe de Bothnie, elle constitue les 40 % à 50 % du territoire. Le basculement joue donc un rôle important dans l'extension, dans la croissance et l'évolution des tourbières. Des couches épaisses peuvent s'accumuler à certains endroits ; ailleurs, elles sont entrelardées de sédiments minérogènes, et à d'autres places les tourbières se dessèchent et se tassent sous l'influence

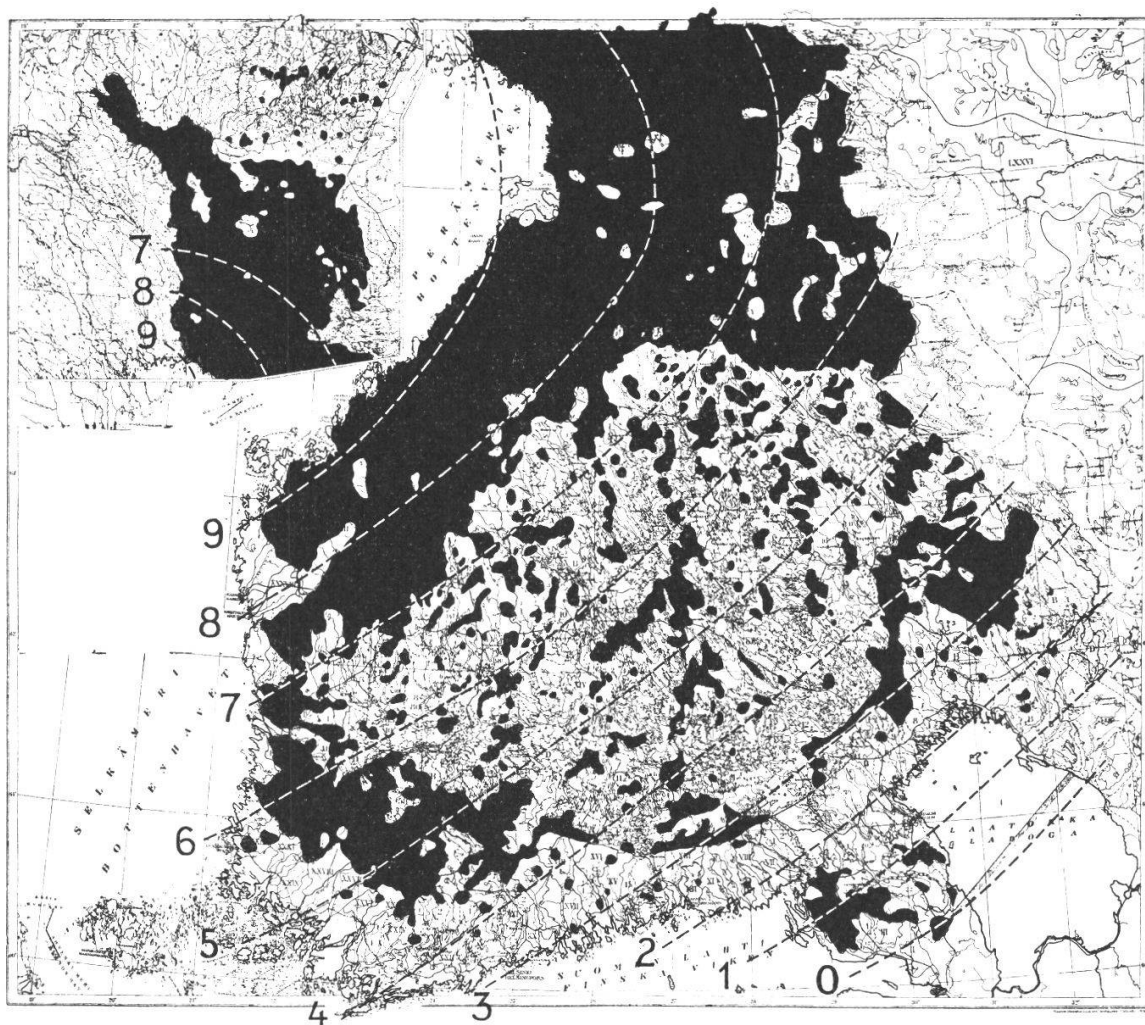


Fig. 10. — Carte de la Finlande centrale montrant les isobases des mouvements récents en décimètres par siècle. Les surfaces noires indiquent les régions où, à cause du soulèvement, la pente des cours d'eau diminue. Une comparaison avec la carte de la distribution des marécages (cf. *Atlas de Finlande*, 1925, N° 18, 8) montre que la diminution de l'écoulement est un des facteurs les plus importants dans la formation des marais et des sols humides dans le pays (RENQUIST, 1948).

de l'abaissement du niveau des eaux souterraines. En faisant abstraction du paysage de roches moutonnées, beaucoup de ces phénomènes rappellent des cas semblables dans certains bassins houillers, tels que des augmentations ou des réductions d'épaisseur des couches (*étreintes*), leur dédoublement (*splits*) ou leur disparition locale (*wash-out*). L'évolution en Fennoscandie représente, pour ainsi dire, une prise au ralenti d'événements dont on ne voit que l'enregistrement raccourci dans beaucoup de formations houillères.

Dans d'autres régions, sous l'influence de l'abaissement du niveau de base, les cours d'eau recouperont plus ou moins profondément les matériaux meubles étalés et accumulés relativement peu avant, en vastes nappes, et ensuite soulevés. Une telle érosion entraîne aussi un abaissement du niveau des eaux souterraines et change ainsi les conditions de stabilité. Des ravine-ments étendus d'un caractère spécial s'ensuivent. C'est surtout le cas dans

plusieurs régions de la Suède (Dalarna, Norrland). Des situations instables se créent petit à petit et se déclenchent parfois brusquement, soit par des événements naturels, soit par l'imprudence humaine. Le mécanisme des glissements sur des surfaces cylindriques, souvent en compartiments qui se suivent en formant des crêtes, a été reconnu pour la première fois en Suède (« Hamnstyrelse Göteborgs » 1916) et a donné naissance, par la suite, au remarquable développement des recherches géotechniques dans les pays nordiques (BRENNER, 1928).

Lors de la fonte des glaces, la majeure partie du pays fut recouverte par des moraines de plusieurs sortes, mais une grande partie de ces matériaux fut retravaillée par les eaux glaciaires, par le drainage normal et l'érosion côtière des nappes d'eau, les mers et les diverses sortes de lacs. Les matériaux furent ainsi triés et les différents calibres en partie séparés. Les gros calibres restèrent sur place ou furent peu déplacés, formant des champs de blocs, de pavés ou de gros galets. Les masses de sable se rassemblèrent à d'autres endroits ; après l'émersion, les vents s'en emparèrent pour former des champs de dunes. Les poussières et autres matériaux fins, déposés dans les eaux tranquilles puis émergés, furent souvent emportés par les vents et formèrent par-ci par-là des dépôts superficiels, analogues aux loess, importants pour la pédologie.

Les tourbières et les marécages ne représentent pas seulement des concentrations importantes de matières organiques, se transformant sur place, mais ils déversent aussi de grandes quantités de substances humiques dans les réseaux hydrographiques. Le chimiste finlandais Adolf Ossian ASCHAN (1906, 1932) s'est occupé des substances humiques en solution ou en suspension dans les eaux douces de Finlande, qu'il a groupées sous le nom d'humus d'eau (*vattenhumus*). Il a mesuré la teneur des sept plus importants fleuves de Finlande, pour pouvoir estimer les quantités déversées dans la Baltique : ces sept fleuves de Finlande apportent à eux seuls environ 1,4 million de tonnes de ces composés humiques à la mer ; l'apport total peut être estimé comme étant de l'ordre de grandeur de 4 à 5 millions de tonnes. La sédimentation dans la Baltique, très active dans le passé, est tombée à 0,2 à 2 mm par an (IGNATIUS, 1958). Les apports de substances humiques forment des composants importants des sédiments, non peut-être au point de vue du volume, mais certainement en ce qui concerne l'activité chimique ; une partie est oxydée, une autre est mélangée au sédiment et commence à se transformer.

Toute personne qui a voyagé dans les pays nordiques connaît les rochers blanchis par les eaux humeuses. Les constituants colorés ont été attaqués et les composants métalliques d'une mince couche de la roche sont véhiculés par certains composés organiques contenus dans les eaux, surtout les chélates, comme A. F. PAULI (1966) vient de le souligner. Une partie de ces noyaux métalliques, surtout le fer et le manganèse, est précipitée en cours de route dans certains lacs. Ces dépôts, une fois raclés, se renouvellent au cours de quelques dizaines d'années, comme le savaient déjà les Vikings et les bardes

du Kalevala. Les résultats de nombreuses recherches scientifiques permettent de saisir de mieux en mieux les mécanismes de ces formations. La majeure partie des composés métalliques complexes continue à s'acheminer vers la mer, y est précipitée et subit des transformations encore peu élucidées. Le soulèvement, en changeant les conditions hydrographiques, en influençant la production et les accumulations de matière organique et en renouvelant de plusieurs manières les possibilités d'attaque, dirige l'évolution géochimique par des voies spéciales et caractéristiques, quoique encore peu connues dans les détails. La continuation des recherches sur ce sujet attirera certainement l'attention de plusieurs secteurs des sciences de la terre, d'une part pour mieux connaître les mécanismes de libération, de transport et de dépôt, et d'autre part pour comparer ces étapes aux exemples fossiles, surtout aux oligo-éléments des sédiments, dont l'interprétation est, dans beaucoup de cas, vivement discutée. Les résultats de ces recherches, en caractérisant un type parmi les nombreuses possibilités, permettront probablement de jeter de la lumière sur d'importants documents qui manquent dans les archives géologiques : ce sont les *caractères des surfaces aujourd'hui érodées*, qui ont livré, lors de leur soulèvement, les couronnes sédimentaires qui les entourent et remplissent les bassins à leur périphérie. Il est clair que bon nombre de ces surfaces ne correspondent pas à l'exemple de la Fennoscandie ; mais ce cas représente un pas pour les différencier et pour élaborer des caractères distinctifs permettant de reconnaître celles, parmi les anciennes surfaces, qui ont fourni des produits semblables. Ces exemples sont nombreux depuis les formations périphériques des anciens massifs de l'hémisphère septentrional jusqu'aux séries succédant aux glaciations permocarbonifères de l'hémisphère austral.

Les incidences du soulèvement sur l'évolution géochimique ont déjà attiré l'attention de A. G. HÖGBOM (1922). L'importance géochimique de la farine de roche des moraines et de la série de leurs produits de remaniement a été souvent soulignée par V. M. GOLDSCHMIDT (Oslo).

Les différentes facettes dont se compose la connaissance de l'évolution climatique pendant les temps postglaciaires, grosso modo pendant les dix mille dernières années, ont été brièvement mentionnées plus haut. Les changements de climat pendant les derniers siècles ont fait l'objet d'études intéressantes et peuvent compléter cette vue d'ensemble (HUSTICH, 1952). Ces exposés donnent un vaste panorama des influences climatiques et de leurs éléments changeants sur la nature inorganique et organique, depuis les glaces saisonnières, en passant par les différentes branches de la biologie jusqu'à l'agriculture et aux pêcheries.

Quelques questions concernant l'individualisation des lignes de rivage

Depuis que les marques de rivage et les terrasses superposées ont fait l'objet de recherches scientifiques, la question de ce que signifiait leur individualisation s'est posée. En général, on a admis que les marques des anciennes lignes de rivage étaient accumulées ou creusées pendant la durée d'un état

stationnaire et que l'intervalle entre deux positions correspondait à un changement brusque ou rapide, soit du niveau marin, soit de la lithosphère.

Parmi les hypothèses basées sur l'eustatisme, on distinguera le groupe des explications climatologiques : les premières faisaient intervenir des échanges importants avec l'atmosphère (cf. p. 133) ; à partir de 1865, l'emmagasinement des eaux dans les glaciers continentaux jouait un rôle de plus en plus important. La plupart de ces hypothèses ne se prononcent guère sur l'individualisation des lignes de rivage. Un certain nombre d'auteurs préfèrent encore actuellement relier les systèmes de terrasses aux fluctuations climatiques. L'autre branche des explications eustatiques fait intervenir les changements du vase océanique. Dans l'image directrice d'Eduard SUESS (cf. p. 142) et de ses disciples, les sauts d'une ligne à l'autre étaient dus aux affaissements brusques de la lithosphère et à l'adaptation de l'hydrosphère (cf. p. 162). Après chaque série d'effondrements, une nouvelle ligne de rivage s'est formée sur toutes les côtes du globe et le changement du niveau de base s'est répercuté dans les réseaux fluviaux.

Dans l'image directrice de RAMSAY, les états stationnaires et les sauts sont dus à des interférences : admettons que le niveau marin monte pendant un certain temps avec une vitesse donnée V_n ; dans ce cas, on trouvera presque toujours sur la surface de la lithosphère en train de basculer, un alignement de points qui se soulèvent avec la même vitesse V_n . Dans ces lieux, le rapport entre la terre ferme et le niveau marin reste stationnaire et si cet état dure un certain temps, une ligne de rivage peut se marquer dans la topographie. En réalité, il ne s'agit pas seulement d'un alignement de points, mais d'une zone plus ou moins large, d'une part parce que les petites différences restent dans la marge entre les hautes eaux et les basses eaux, c'est-à-dire dans la zone d'action des vagues et, d'autre part, la vitesse angulaire du mouvement de bascule est très petite près de l'axe de pivotage. Si l'une des deux vitesses change, positivement ou négativement, la zone d'état stationnaire se déplace. Si le déplacement est progressif, la nouvelle zone sera la continuation de l'ancienne. Si l'écart est prononcé, une nouvelle série s'amorce. Sur une surface en train de basculer, il y a, à côté des zones stationnaires, des parties caractérisées par de petites transgressions ou régressions. L'ensemble d'une telle surface n'est donc pas strictement synchrone.

Ce fait apparaît dans les régions arctiques couvertes d'une végétation clairsemée (Groenland, côte Murmane) ; des douzaines de petits cordons littoraux d'une hauteur de vingt à trente centimètres remplissent souvent l'intervalle entre deux lignes principales. Les parties des anciens rivages, constituées de graviers et de sables, conservent leurs formes, souvent jusque dans les détails, tandis que les mélanges granulométriques gélifs ont coulé sous l'influence de la « tjäle » et se déplacent encore chaque été. La documentation géologique n'est donc pas partout complète ; les lacunes doivent être remplies par interpolation. Les exemples bien conservés ont donc une importance particulière.

Le géologue finlandais Väinö AUER (1957, 1959, 1964, avec bibliographie p. 84-85) a transplanté les méthodes et techniques développées en Finlande, en Argentine méridionale et en Patagonie et a fait pendant une trentaine d'années des recherches étendues et détaillées dans ces pays. La dispersion des cendres volcaniques provenant des grandes éruptions volcaniques, lui a permis de développer une nouvelle technique : *la tephrochronologie* (AUER, 1959). Celle-ci ne représente pas seulement une échelle chronologique indépendante de l'évolution climatique, mais elle permet aussi de tracer avec une plus grande précision les lignes de rivage. Ces données améliorent d'une façon sensible la courbe représentant les changements de la composante eustatique (AUER, 1957). La comparaison avec les résultats fennoscandiques permet de montrer, par une autre voie, la transgressivité et la métachronie de certains événements groupés dans une isobase (AUER, 1964). La courbe montrant les changements du niveau marin, ne montre pas seulement des montées et des arrêts, mais des *oscillations* avec des hauts et des bas. Ces oscillations sont, comme AUER l'a montré, influencées par les reculs et les avancées des glaciers continentaux, mais d'autres *facteurs* apparaissent encore dans leur tracé, de sorte que la courbe est le résultat d'une interférence, d'une part entre le prélèvement et la restitution des eaux par les glaciers continentaux, et d'autre part par des facteurs dont le plus important est probablement *la déformation du vase océanique* (AUER, 1957).

L'interférence avec un *mouvement oscillant* du niveau marin donne un nouveau relief aux questions concernant l'individualisation des formations conservées dans la nature, marquant les lignes de rivage d'une certaine durée. Par la distinction de l'influence des déformations du vase océanique, le problème reçoit une assise beaucoup plus vaste et l'ensemble des données qui doivent être considérées s'étend des déformations de la terre ferme à la tectonique vivante du vase océanique, et fait ainsi apparaître une nouvelle étape des investigations. Si les oscillations ne changent pas seulement de vitesse, mais aussi de signe, tandis que le basculement continue dans le même sens, les sauts d'une ligne de rivage à l'autre deviennent plus compréhensibles. Une image synthétique plus vaste et plus complexe sera nécessaire pour contenir la multiplicité des variables et de leurs combinaisons.

Les analogies entre les parties méridionales de l'Amérique du Sud et la Fennoscandie ont permis d'appliquer les méthodes et techniques élaborées en Finlande, mais ce sont les différences qui ouvrent un vaste panorama sur les recherches de l'avenir.

Stades d'évolution dans la vie des théories

Les idées sur le déplacement des lignes de rivage ont subi de nombreuses métamorphoses depuis le début des recherches scientifiques. Il nous semble intéressant de retracer le cheminement et la diversification de la pensée et de dégager quelques-uns des facteurs qui ont influencé les transformations qui en ont élargi ou rétréci le champ. Puisqu'il n'est pas possible de suivre les

nombreux fils qui relient ce groupe de questions aux multiples domaines des recherches géologiques et géophysiques, nous nous contenterons d'en esquisser quelques particularités que l'on peut considérer comme des nœuds : *le début des investigations et le départ sur les différentes voies, la détermination des dimensions, la différenciation des milieux participant au déroulement des événements* (et qui en déterminent la succession), et pour terminer, quelques mots sur *la démarche des divers esprits* qui ont essayé de résoudre les problèmes. Il ne sera pas toujours possible de tenir séparées les différentes lignes de l'évolution, puisqu'elles s'anastomosent continuellement, mais une telle subdivision facilitera l'exposé.

Le début des recherches scientifiques est marqué par les questions d'Urban HJÄRNE et les réponses (cf. p. 134). Le questionnaire représente ce qui fut appelé plus tard, par CHAMBERLIN, le principe des hypothèses multiples, ouvrant ainsi plusieurs voies possibles. Les correspondants étaient encouragés à dégager les critères distinctifs de chacune des hypothèses, et à les vérifier par des observations. L'œuvre d'Urban HJÄRNE est plus importante par les questions qu'elle pose que par les réponses qu'elle propose.

Plusieurs raisons s'y opposaient, de sorte qu'il fallait effectuer une partie du chemin sur chacune des diverses voies. On avait à choisir entre les solutions générales et la solution des changements locaux par érosion et alluvionnement. La solution générale la plus naturelle était la doctrine de la diminution des eaux. CELSIUS, tout en adoptant cette image directrice qui liait le phénomène à la création du monde, reconnut la nécessité de connaître les dimensions du changement et il s'appliqua à déterminer la *vitesse séculaire*. En interprétant les observations et les traditions, il obtint une première approximation ; pour l'améliorer dans l'avenir, il fit graver dans les rochers les marques de niveau. De cette façon, il a donné le départ au développement des *méthodes hydrographiques* pour les changements séculaires du niveau marin. Les facteurs perturbateurs reconnus, les uns tôt, les autres plus tard, et éliminés par la suite, faisaient entrevoir les limites de cette méthode. Le développement de la métrologie, surtout dans les domaines de la géodésie et de la géophysique, a ouvert d'autres chemins permettant d'obtenir des valeurs séculaires aussi à l'intérieur de la terre ferme. Des mesures pour des durées relativement petites, leurs variations dans l'espace et leurs caractères de détail (continuité ou discontinuité), représentent les buts des recherches actuelles.

Le problème de la durée des mouvements montre un côté assez différent de cette évolution : aussi longtemps que la chronologie biblique était considérée comme base, la perspective ne pouvait s'étendre au delà de l'année 4004 avant J.-C. L'audacieuse extrapolation de la valeur de CELSIUS par Olof DAHLIN montra aux contemporains les possibilités et les conséquences de la théorie et des mesures faites dans le but de lui donner une forme quantitative. Cette tentative était encore limitée par la chronologie biblique. Diverses circonstances ont coopéré à faire disparaître cette limitation et à ajouter aux temps historiques la perspective des périodes géologiques d'une très

grande longueur. La chronologie géologique ne fut d'abord que relative, c'est-à-dire une succession d'événements. Divers essais furent faits pour placer les déplacements des lignes de rivage dans l'échelle chronologique. L'établissement d'une limite inférieure marque une étape importante. Cette limite est représentée par les terrains contenant des blocs erratiques, dépôts interprétés de plusieurs manières (cf. p. 178), avant la théorie glaciaire. Les déplacements se situent donc dans une coupure de temps entre la dernière des ères géologiques et les temps historiques. Les temps postglaciaires, à cheval sur le Pléistocène et le Holocène, d'abord subdivisés grâce à des échelles paléontologiques, furent les premiers, parmi les époques géologiques, à être dotés d'une *chronologie absolue* (DE GEER, 1912 ; SAURAMO, 1918), ce qui permit de placer les événements dans un système de référence quantitatif. Plus tard, la radiochronologie est venue compléter ce système. Même si la place exacte de certains événements est encore discutée, les différentes échelles chronologiques, relatives et absolues, semblent désormais assez bien reliées entre elles pour représenter la meilleure approximation actuelle. Les dimensions dans le temps de cet épisode sont ainsi délimitées, en bas, par le retrait des glaces et en haut par le ralentissement et l'arrêt de la remontée calculée sur des bases théoriques.

La détermination des dimensions dans l'espace, suit des voies assez différentes, suivant qu'il s'agit de déterminer l'extension géographique ou les différences d'altitude.

Pour les adhérents de la doctrine de la diminution des eaux et de l'eustatisme, le phénomène est global ; pour les partisans du soulèvement, il est régional. En admettant l'interférence des deux changements, il faut déterminer (par approximations successives) l'importance des deux facteurs (SAURAMO, 1928). Les systèmes d'isobases synchrones, de plus en plus précises et détaillées, sont une des préoccupations importantes des géologues nordiques (HYYPPÄ, 1963 ; DONNER, 1965), parce qu'ils permettent de délimiter le phénomène. Les tracés des différents systèmes, ainsi que de l'isobase 0 m et de celles situées sous le niveau actuel de la mer ne sont pas parallèles et donnent, de ce fait, la configuration changeante.

Les altitudes des surfaces soulevées sont inscrites dans les cartes et les diagrammes, en tout cas pour les régions où les niveaux sont enregistrés par des nappes d'eau (mers ou lacs). Ces données manquent dans la partie centrale pour le début des mouvements, parce qu'elle était encore couverte par les glaces. On a essayé de combler cette lacune de plusieurs manières : en extrapolant judicieusement les surfaces isochrones anciennes, d'une part, et d'autre part par un détour : en déterminant le tracé des moraines latérales des glaciers émissaires de l'inlandsis dans les montagnes de Norvège. Les glaciers continentaux prennent une forme analogue à celle d'une goutte sur une surface horizontale. Les courbures d'une telle surface peuvent être estimées, grâce aux mesures faites sur les calottes glaciaires actuelles. Ces données permettent d'extrapoler les fragments de courbes obtenus dans les montagnes

norvégiennes (TANNER, 1930, p. 413-417) et de déterminer ainsi l'altitude du sommet de la calotte glaciaire. En se servant du modèle isostatique et en se basant sur le poids des glaces, on obtient une valeur pour la dépression maximale. Ce résultat est naturellement approximatif.

Les coordonnées dans le temps et dans l'espace permettent d'estimer les *vitesse*s globales et partielles. Les changements de vitesse pour un point déterminé peuvent être déduits des diagrammes.

L'image du déroulement des événements et des conditions changeantes qui l'accompagnent suit encore une autre voie, comme nous allons brièvement l'esquisser :

L'image qui s'offrait du temps de CELSIUS et de LINNÉ était naturellement celle du déluge. Les deux auteurs l'ont toutefois adaptée à leurs besoins. Un premier amendement était l'idée des eaux couvrant le globe, lors de la création, à l'exception de la petite île destinée à recevoir un ou deux exemplaires de toutes les espèces primitives. Ces espèces se dispersèrent sur les terres au fur et à mesure qu'elles émergeaient. Une autre pensée nouvelle était l'hypothèse que la diminution des eaux, encore en cours, était un processus mis en marche lors de la création. Une telle vue était opposée à la doctrine suivant laquelle la création était terminée le septième jour et avait atteint son état définitif. Ces deux tendances ont continué à interférer, puisque ce sont deux modes de penser archétypiques. On en trouve des traces jusque dans les temps modernes. L'idée que l'état actuel est le *but* de l'évolution et non pas seulement un instantané entre le passé et l'avenir, se retrouve dans un certain nombre de publications scientifiques. La tendance de certains auteurs de ne tenir compte que des dernières publications datant de leur entrée dans le monde scientifique, témoigne de la même tournure d'esprit.

La doctrine de la diminution des eaux fut partiellement réfutée, mais elle a continué à trouver des partisans. Elle a pu être insérée dans une image de plus grande envergure, tout à fait différente, résultat de la perspective géologique, dans l'hypothèse de la contraction du globe.

Les déformations de l'écorce terrestre n'étaient connues au XVIII^e siècle que sous la forme de catastrophes volcaniques ou sismiques. Il était difficile de penser que le sous-sol rocheux pouvait lentement changer de forme, parce que, dans ce cas, les points de repère devenaient aussi mobiles. RNEBERG (1765, 1769) ayant constaté des différences de déplacement, se décida à en tirer les conséquences et à proposer une nouvelle image, celle des *déformations lentes de l'écorce terrestre*. Elle n'eut que très peu de résonance.

Pour faire admettre cette vue dans le monde savant, il fallait qu'elle fasse partie d'un panorama plus vaste et qu'elle soit garantie par le prestige des grands noms de la géologie ; car c'est à la suite du développement de l'histoire géologique et du principe de l'actualisme, que l'idée de la mobilité plus ou moins continuelle s'est infiltrée dans l'image du monde. Ce n'est pas notre intention de décrire ici les multiples changements et les importants apports de ces idées, qui leur permettaient de prendre racine.

Mentionnons encore brièvement quelques autres apports géologiques nécessaires au problème qui nous occupe : les progrès de la paléontologie n'entraînaient pas seulement une diversification de l'échelle stratigraphique, mais donnaient aussi la possibilité de déterminer, mieux qu'avant, les conditions de formation de leurs milieux et d'établir des rapports entre les caractères des sédiments et leur contenu.

Les dépôts meubles furent d'abord considérés comme les restes du déluge et appelés « diluvium ». Ces sédiments récents, groupés par Charles LYELL en 1839 sous le nom de Pléistocène, contenaient une formation énigmatique souvent bourrée de blocs erratiques. Ces dépôts, déjà observés par Horace-Bénédict DE SAUSSURE et par Leopold VON BUCH, furent interprétés de différentes manières, d'abord par des catastrophes, suivant l'esprit de l'époque, ensuite par des processus moins violents. Pour Charles LYELL, ces matériaux étaient charriés par des glaces flottantes en dérive, d'où le nom de « drift » encore employé aujourd'hui. Cette explication avait l'avantage de combiner des effets multiples : ceux de l'eau, des glaces, les transports lointains, le polissage des roches et les restes fossiles caractéristiques des eaux froides ; mais cette vue n'incitait pas à différencier cet ensemble de dépôts. L'hypothèse du « drift » eut une large diffusion ; elle se maintint en Allemagne septentrionale, jusqu'en 1875.

Il a fallu une nouvelle image directrice aboutissant à un arbre généalogique beaucoup plus différencié de ces matériaux pour servir de fil conducteur dans le labyrinthe des terrains meubles. Cette image prit naissance dans les Alpes et elle eut une influence décisive dans les pays nordiques. PLAYFAIR, PERRAUDIN, VENETZ, DE CHARPENTIER et AGASSIZ, reconnurent la nature des terrains erratiques et l'extension plus grande des glaciers, correspondant à une période plus froide. Celle-ci fut définie par AGASSIZ comme l'âge glaciaire (1837). Les connaissances de plus en plus approfondies du milieu glaciaire donnèrent les moyens d'établir, d'une part, les divers types de moraines et les différentes lignées de succession des produits de remaniement, et, d'autre part, de relier les caractères de ces dépôts aux formes du terrain. Le développement entraînait la création de corollaires importants : le principe de l'eustatisme glaciaire (McLAREN, 1842) et celui de l'isostatisme glaciaire (JAMIESON, 1865, 1882). La majorité des observations fut ainsi groupée autour des changements climatiques et de leurs effets primaires et secondaires. Les enregistrements des saisons offerts par les varves fournirent la première chronologie absolue (DE GEER, 1912, 1940).

Il est intéressant d'observer comment, après de nombreux essais et une série d'erreurs, l'histoire de ces événements a pu être de mieux en mieux établie, et d'examiner les divers *apports nécessaires* pour guider les recherches dans une direction utile, tout cela sur la toile de fond changeante des théories générales. Mais cette évolution montre encore d'autres particularités, dont l'une est ce que l'on pourrait appeler la *démarche ou l'allure de l'esprit scientifique*.

La plupart des explications, depuis CELSIUS et LINNÉ, étaient des *théories unicausales*. Une seule circonstance (les changements du niveau marin, ou, les déformations de l'écorce terrestre) était choisie parmi l'enchevêtrement des états successifs et elle devait suffire pour faire comprendre un ensemble d'observations ; elle fut déclarée cause agissante. Aussi longtemps que le nombre des observations est petit, l'hypothèse sert à combler les lacunes. Par la suite, il faut sélectionner et arranger les données. Les exposés se changent en plaidoyers. Ceci montre les avantages et les défauts des hypothèses unicausales : chacune d'entre elles fait apparaître un secteur où elle devient de plus en plus plausible et un autre où elle est impuissante.

Il s'est souvent trouvé des esprits synthétiques qui, ayant reconnu cet état de choses, ont essayé de combiner les secteurs utiles en une *explication bicausale*. L'image des interférences des déformations du socle et des changements du niveau marin, proposée par Wilhelm RAMSAY, est un modèle typique d'une hypothèse bicausale. Elle n'essaie pas seulement de faire comprendre les multiples rapports possibles, mais elle est aussi à la base d'une série de méthodes et de techniques permettant de résoudre des questions partielles et d'en présenter les résultats. Un autre trait remarquable des recherches de RAMSAY et de son école est le suivant : il s'agit pour eux, en premier lieu, d'analyser l'interférence de deux facteurs pour obtenir une description aussi exacte que possible du déroulement des événements. La connaissance détaillée des phénomènes de ce genre doit donner les moyens d'interpréter les vestiges d'événements semblables du passé et de constituer ainsi une série d'exemples semblables par certains côtés. Ces exemples pourront être comparés et permettront d'entrevoir les mécanismes. La question des causes immédiates et lointaines est donc abandonnée pendant un premier temps, pour faire place à l'établissement d'une image aussi détaillée que possible du déroulement historique. La connaissance des modalités d'action permettra de confirmer ou d'éliminer un certain nombre de mécanismes endogènes proposés.

Les phénomènes endogènes sont certainement aussi complexes, puisqu'ils doivent rendre compte aussi bien des mouvements de longue durée que des oscillations épisodiques, et de composantes qui commencent à se dessiner dans le réseau de plus en plus serré des données.

En étudiant l'histoire des différentes branches des sciences de la terre, on peut distinguer plusieurs types d'évolution. Le développement des recherches sur le déplacement des lignes de rivage, représente un de ces types : pendant une première phase, des hypothèses unicausales voient le jour et rassemblent des partisans et des arguments. On cherche, on choisit, on organise et essaie de combler les lacunes, car le nombre des observations est minime par rapport à la richesse de la nature. Ensuite, les hypothèses unicausales s'affrontent. Des discussions, des polémiques et parfois des querelles en sont la conséquence. Chacune des écoles tend à tout élucider, puis prétend y avoir réussi.

Le début de la seconde phase est marqué par l'apparition d'une image bicausale. Celle-ci évolue à son tour et finit par céder la place à des *explications*

tricausales ou *multicausales*. Chacun de ces stades est caractérisé par l'interférence d'un nombre grandissant de groupes de variables eux-mêmes de plus en plus différenciés.

En étudiant l'histoire de la géologie, on voit que divers ensembles de problèmes sont arrivés à des stades très différents, mais aussi que les auteurs ont atteint des phases d'évolution assez diverses. Il est curieux d'observer que des chercheurs regardant les phénomènes de la nature par l'optique unicausale semblent avoir de la peine à comprendre une argumentation multicausale ; d'où leur question souvent répétée : Lequel des facteurs « est maintenant la vraie cause » ?

Plusieurs lignes de développement de l'histoire de la géologie et de la pétrographie appartiennent à ce type. Mais il en existe d'autres et c'est un des grands attraits de ces études historiques de les différencier et d'en chercher les raisons.

Hommages et remerciements

Pendant mes années d'étude en Finlande et aussi par la suite, par des contacts continus, j'ai pu assister en spectateur à l'un des épisodes passionnants de l'histoire de la géologie. J'ai eu le privilège d'être initié par ceux-là mêmes qui ont accompli cette œuvre, d'assister à leurs recherches au laboratoire et sur le terrain. Ils ont bien voulu m'expliquer les problèmes, les projets et la signification des données et des résultats. La majeure partie de ces amis : J. J. SEDERHOLM, Wilhelm RAMSAY, Matti SAURAMO, et Väinö TANNER, n'est plus parmi nous. Il nous reste Väinö AUER, qui nous ouvre un magnifique panorama sur l'avenir (1964). Il m'a semblé que je devais retenir quelques traits de ces années fertiles, traits peu connus dans le domaine de la langue française. Les points de vue de mon exposé paraîtront peut-être à certains lecteurs comme un peu trop marqués par mes souvenirs de Finlande. Il serait certainement possible de décrire cette histoire en dirigeant son attention davantage vers les travaux suédois (DE GEER, 1940), norvégiens (ROSENDAHL, 1953) ou danois, mais il serait toujours nécessaire de revenir à la source d'inspiration, à Wilhelm RAMSAY. Qu'il me soit permis d'adresser un souvenir reconnaissant à cette grande génération de Finlande.

Le « Nordenskiöld-Samfundet » en Finlande et le « Geologinen Tutkimuslaitos » (Service géologique de Finlande) m'ont autorisé à reproduire les figures qui accompagnent ce texte et ont même fourni certains clichés, facilitant ainsi sa publication. Qu'ils en soient remerciés.

Que la Société vaudoise des Sciences naturelles veuille trouver ici l'expression de ma gratitude pour l'hospitalité qu'elle a bien voulu m'accorder.

Zusammenfassung

Wechselnde Deutungen der Strandlinienverschiebungen (Ursprünge in Fennoskandia)

Die Verschiebungen der Strandlinien und die damit zusammenhängenden Erscheinungen haben die Menschheit seit Jahrtausenden beschäftigt. Wissenschaftliche Untersuchungen über ihren Verlauf, ihr Ausmass und ihre Deutung wurden aber erst seit Ende des XVII. Jahrhunderts angestellt, und zwar hauptsächlich in Fennoskandia. Verschiedene Erklärungen wurden vorgeschlagen: Schwankungen des Meeresspiegels infolge der Ab- oder Zunahme der Wassermengen, oder als Folge der Verlagerung der Wassermassen, oder, als andere Möglichkeit, als Wirkung der Verbiegungen der Erdkruste. Eine erste Periode ist gekennzeichnet durch den Meinungs-austausch zwischen den Anhängern verschiedener Lehren innerhalb von Fennoskandia. Er förderte viele wertvolle Beobachtungen, neue Methoden und mancherlei interessante Argumente. Die verschiedenen Erklärungsweisen schienen, wie auch in der folgenden Periode, sich auszuschliessen. Ein weiterer Umgang, vom Anfange des letzten Jahrhunderts bis zu unserer Zeit, wurde auf internationaler Ebene ausgetragen. Auch diesmal standen sich die unikausalen Erklärungen gegenüber, aber in einer, gegenüber dem vorigen Jahrhundert völlig veränderten Welt von geologischen Beobachtungen, Begriffen und Leitbildern. Die Gegensätze verschärften sich.

Infolge der Ausweitung der geologischen Zeitmessung teilte sich die Untersuchung der Strandverschiebungen in zwei Gruppen: Die eine widmete sich hauptsächlich der Erforschung und Deutung der Zeugnisse der jüngsten geologischen Vergangenheit; die andere versuchte die jetzigen Bewegungen so genau als möglich zu erfassen.

Mit der geologischen Erforschung beginnt eine dritte Periode, welche durch die möglich genaue Erfassung des Ablaufes der Ereignisse und das Prinzip der *Interferenz der Krustenbewegungen und Meeresspiegelschwankungen* gekennzeichnet ist. Die neuen Leitbilder, die zur Sammlung der Beobachtungen und ihrer Einfügung in ein deutbares Geschehen dienten, stammen von WILHELM RAMSAY, seinen Mitarbeitern und Nachfolgern. Dies ist das bikausale Stadium. Eine neue Ausweitung zur multikausalen Erklärungsweise wird durch die Ergebnisse VÄINÖ AUER's aus Südamerika, und durch die daraus zu ziehenden Schlüsse eingeleitet.

Die Untersuchung der jetzigen Bewegungen (säkulare) hat seit der Zeit ROBERT SIEGER's immer genauere Isobasenkarten der Verbiegungen gezeitigt. Diese Karten zeigen ähnliche Züge wie diejenigen der geologischen Entwicklung und dürften aus diesem Grunde die Fortsetzung der nacheiszeitlichen Entwicklung darstellen. Die ersten Bestimmungen beruhten hauptsächlich auf hydrographischen Beobachtungen an der Ostsee und den Inlandgewässern. Die Aufzeichnung, ihre Deutung und Bearbeitung gaben zuerst wenig deutliche Zeugnisse, bis die Störfaktoren analysiert und erfasst werden konnten.

Neuere und feinere Messmethoden geodätischer und geophysischer Art sind inzwischen ausgearbeitet worden und werden in Zukunft eine Rolle spielen. Die Landhebung und Kippung zeitigen mancherlei Folgen: Vermoorung durch Abnahme des Gefälles in weiten Gewässernetzen, Verlegung des Ausflusses der grossen Seen, und Verlegung der Wasserscheiden, manchmal auf katastrophale Weise, sowie mancherlei Züge der Natur- und Kulturgeographie.

Die ganze Entwicklung der Strandlinienforschung zeigt, wie die unikausalen Leitbilder sich zuerst als Gegensätze gegenüberstanden und sich, nach damaler Ansicht, auszuschliessen schienen bis die gegensätzlichen Prinzipien durch RAMSAY auf einer höheren Ebene zu einem bikausalen Erklärungsversuche zusammengefasst wurden, der bereits anfängt einem multikausalen Leitbilde zu weichen. Wie in der jetzigen Natur alte und neue Tier- und Pflanzentypen nebeneinander leben, so existieren in der Literatur alte und neue Erklärungsweisen nebeneinander.

Abstract

Changing ideas about moving shore lines

The displacements of the shore lines and related phenomena have puzzled man since ancient times. Scientific research on the dimensions and rate of these movements and their interpretation began towards the end of the XVIIth century, mostly in Fennoscandia. Several explanations were proposed: on the one side the rise or fall of the sea-level as a consequence of diminution or increase of oceanic waters or of their displacement; on the other side the deformations of the Earth's crust. During a first period discussions were mostly limited to Fennoscandia. They brought to light many valuable observations, methods and interesting reasonings. Measurements were started. The different explanations were considered, as in the next century, as excluding one another. There existed no background of geological concepts and the chronological scale was limited by theological doctrines.

At the beginning of the last century a new discussion began, this time on an international level. Two unicausal hypotheses continued to be opposed, but the debates took place in a very different setting of geological knowledge, chemical and physical discoveries, geographical information and general scientific concepts, especially on chronology. The antagonism was sharpened.

As a consequence of the development of Earth-sciences, research on the displacements of the shore lines branched out into two groups: one directed its attention towards the observation, synthetic treatment and interpretation of the records of the recent geologic past; the other tried to measure as exactly as possible the present-time movements.

Geological investigation starts a new period soon characterized by the bicausal concept of interference between crustal movements and the changing sea-level. It had a marked tendency to reconstruct, first of all, as exactly as possible the succession of the events. The search for immediate and ultimate

causes had to follow when the space-time picture was exactly established. The collection of data and their insertion into a picture of evolution was greatly influenced by these concepts. They are due to WILHELM RAMSAY, his collaborators and successors. New views were recently to open the way for multicausal explanations. They are mostly due to VÄINÖ AUER and to his comparative studies in South America and Finland.

Results on present-time movements were laid down in more and more accurate isobase-maps. The systems of recent and fossil isobases are similar, so that they can be considered as belonging to the same event. In the beginning research was mostly based on hydrographic recordings, their synthetic treatment and interpretation. Later new geodetical and geophysical methods were introduced and they will play an important rôle in the future.

The land-upheaval has many and varied effects : areas whose drainage gradient diminishes are changed into swamps and marshes ; this is the case over wide areas in the NW of Finland ; lakes shift their outlets, sometimes in a catastrophic way ; the watersheds change rapidly over great distances. Many characteristics of physical, biogeographical and human geography are connected with the tilting of the crust.

The evolution of research on moving shore lines shows several important stages : in a first stage unicausal explanations are opposed and seem to exclude one another. At a later stage the opposed concepts are united into a bicausal model which is the precursor of multicausal hypotheses.

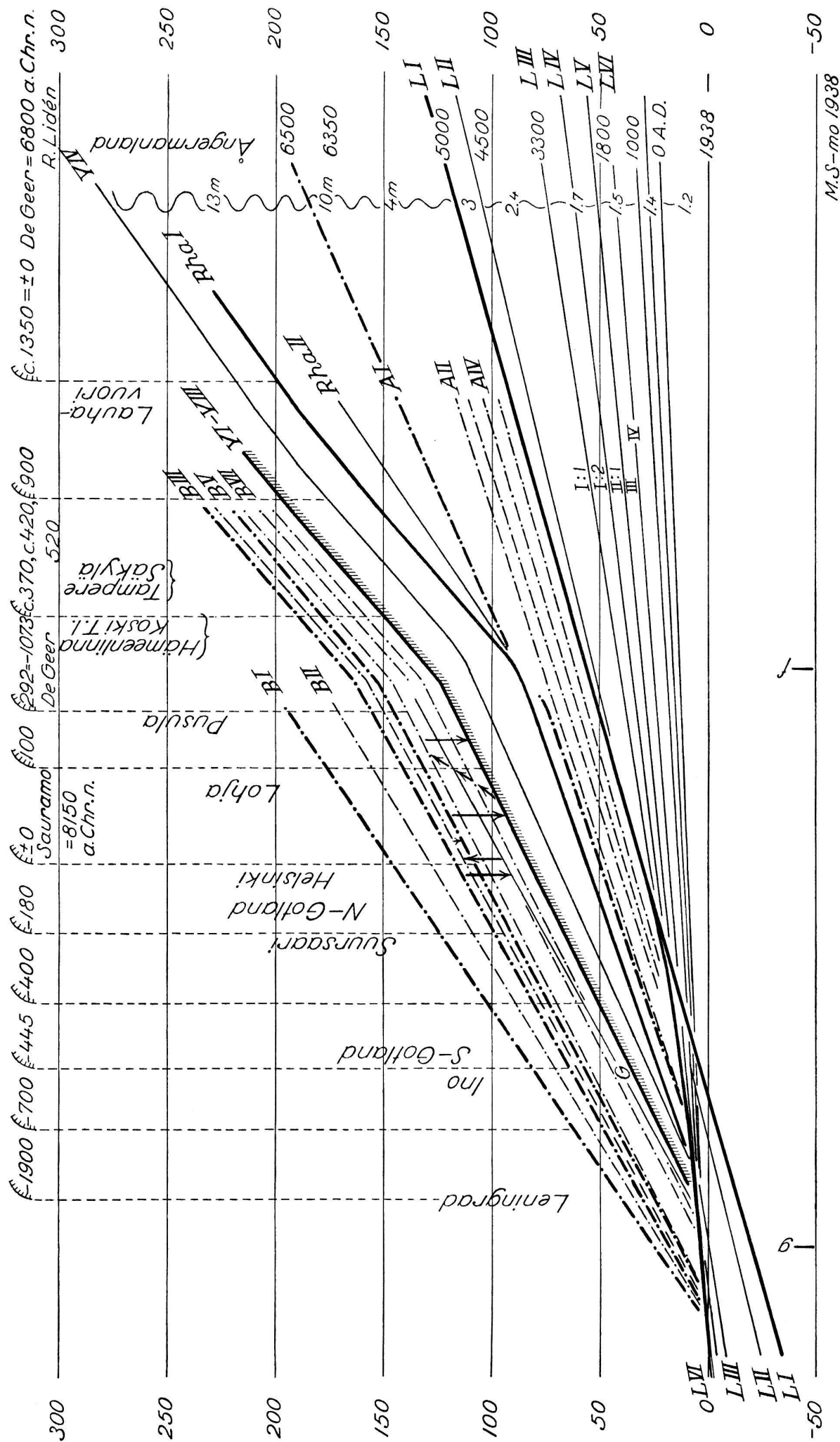
LÉGENDES DES PLANCHES

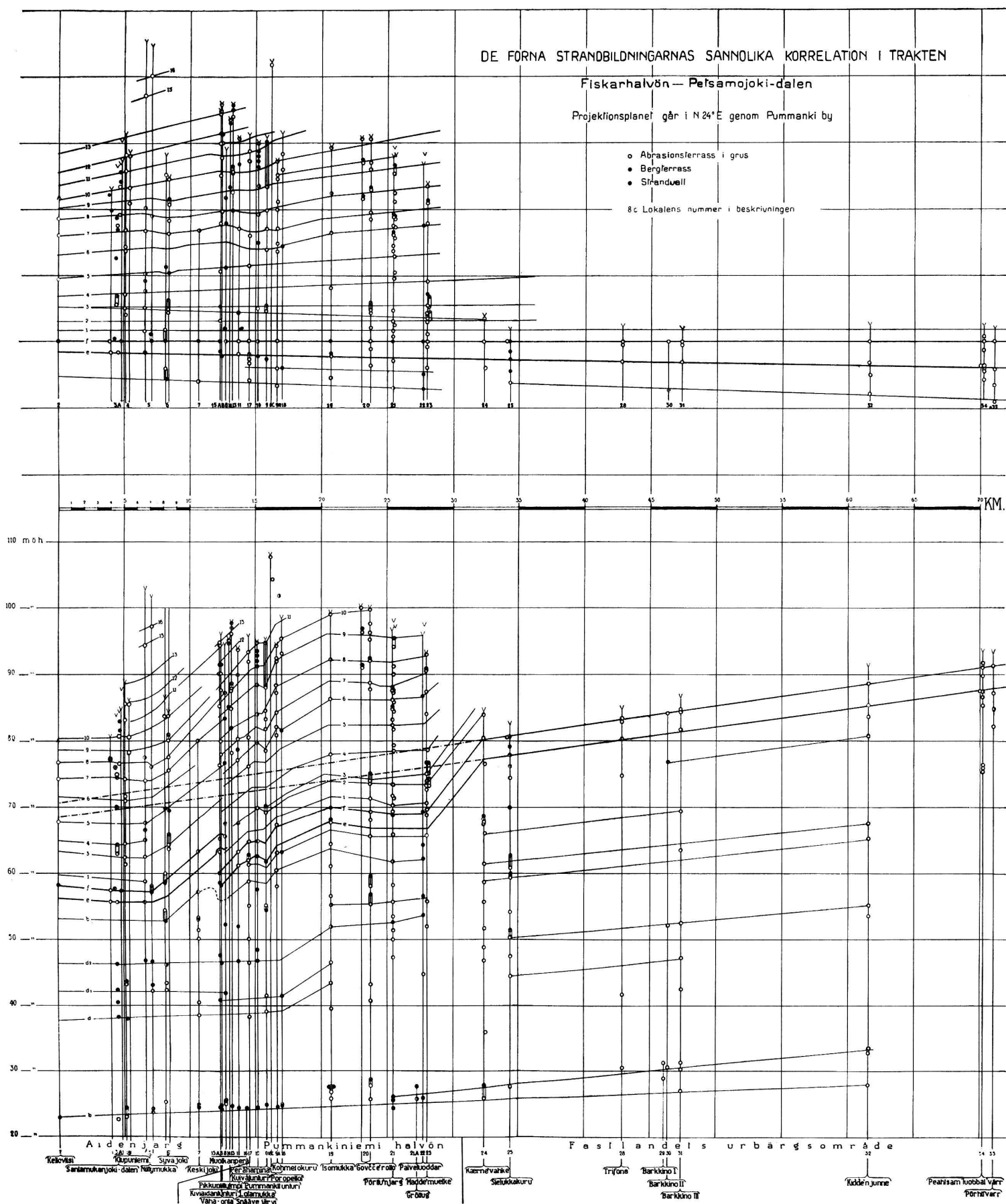
PLANCHE I

Diagramme des lignes de rivage les plus importantes de la Baltique, d'après Matti SAURAMO (1939, pl. I). — Les chiffres inscrits sur la marge supérieure donnent l'âge des différentes lignes suivant la chronologie de SAURAMO basée sur les varves de la Finlande et celle de DE GEER et de LIDÉN et leurs rapports avec la chronologie historique. Les étapes d'eau douce de la Baltique sont représentées par des lignes points et traits. Les flèches montrent les changements de niveau successifs survenus pendant l'évolution complexe du lac barré par les glaces. Les traits ondulés à droite et les chiffres qui les accompagnent montrent l'allure de la régression des eaux dans la province suédoise d'Ångermanland la plus proche du centre de soulèvement (d'après LIDÉN et FROMM). — BI à BVII niveaux du lac baltique barré par les glaces (G = stade gothiglaciaire) ; YI à YIV rivages de la mer à *Yoldia* ; Rha I-II stade à *Rhabdonema* ; AI à AIV lac baltique à *Ancylus* ; LI à LVI mer à *Litorina* ; certaines lignes de la mer à *Litorina* sont datées par des séries de restes archéologiques ; I-IV représentent les styles successifs de céramique et les artefacts qui les accompagnent.

PLANCHE II

Diagramme équidistant des lignes de rivage de l'océan Arctique dans la péninsule des Pêcheurs (Fiskarhalvön = Kalastajasaarento) sur la côte Murmane établi par Väinö TANNER (1930, pl. II). — Dans le diagramme inférieur, les diverses lignes ne sont pas continues, mais recoupées par des zones de mouvement. Les déplacements ne sont pas égaux pour tous les niveaux, parce que les failles ont été actives entre les différents stades. Il est possible de reconstruire l'horizontalité de certains niveaux et de mesurer ainsi les déplacements survenus entre les moments de formation de différents niveaux (cf. diagrammes supérieurs). On obtient ainsi une image détaillée des mouvements et de leurs différences dans les divers secteurs. — Le socle cristallin du vieux précambrien est à droite (*fastlandet*), à partir de Pummanki, les formations éocambriennes affleurent. — Les cercles remplis représentent les terrasses d'abrasion dans les matériaux meubles, les cercles ouverts correspondent aux lignes creusées dans la roche en place, et les cercles avec une croix, aux remparts.





BIBLIOGRAPHIE

- AGASSIZ, Louis. 1837. — Des glaciers, des moraines et des blocs erratiques. *Actes Soc. Helv. Sc. Nat.*, 22^e Sess., Neuchâtel, V-XXXII.
- ANDERSSON, Gunnar. 1898. — Studier öfver Finlands torfmossar och fossila kvar-
tärflora. *Fennia*, 15 (3), 210 p., 21 fig., 4 pl.
- APPELROTH, Eric. 1948. — Några av landhöjningen betingade skogliga särdrag inom
den österbottniska skärgården. Skärgårdsboken, utg. av. Nordenskiöld-Samf. i
Finland (= Skärgårdsboken), 292-304, fig. 170-181.
- ASCHAN, A. O. 1906 (1908). — Humusämnen i de nordiska inlandsvattnen och deras
betydelse, särskilt för sjömalternas daning. *Finska Vetensk. Soc.*, Bidrag 66, 1-176.
- 1932. — Om vattenhumus och dess medverkan vid sjömalmsbildningen. *Arkiv
för kemi, mineralogi och geologi*. 10 A (15), 1-143, 3 fig.
- AUER, Väinö. 1924. — Die postglaziale Geschichte des Vanajavesisees. *Bull. Comm.
géol. de Finlande*, 69, 134 p., 10 fig., 10 pl.
- 1957. — Ueber die eustatische Bewegung des Meeresspiegels in Feuerland-Pata-
gonien und anschliessende Fragen. Lautensach-Festschr., Stuttgart, 407-418, 2 fig.
- 1959. — Wie die auf vulkanische Ausbrüche gegründete geologische Zeitrechnung
entstand. *Sitz.-Ber. Finn. Akad. der Wiss.* (Festvortr.), 37-50.
- 1963. — Late glacial and postglacial shoreline displacements in South America
as established by tephra-chronology, compared with displacements of the Baltic
shorelines. *Fennia*, 89, 51-55, 1 pl.
- 1964. — Finländsk geologisk forskning i Sydamerika. *Nordenskiöld-Samfundets
Tidsskr.* Årg. 24, 3-20, 12 fig.
- BAILEY, Edward. 1962. — Charles Lyell. *British men of science*, x + 214 p.,
20 fig., 24 pl.
- DE BEAUMONT, Elie. 1842. — Rapport sur un mémoire de M. A. Bravais relatif aux
lignes d'ancien niveau de la mer dans le Finmark. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 15,
817-849.
- VAN BEMMELEN, R. W. 1959 (1960). — Die Methode in der Geologie. *Mitt. geol.
Ges. Wien*, 53, 35-52.
- BERGSTEN, Folke. 1930. — Den nutida landhöjningen vid Sveriges kuster. *Ymer*, 59,
131-149, 6 fig.
- BERZELIUS, Jakob. 1847. — On the polished rocks of Sweden. Extract from a letter
to Professor LEONHARD from J. BERZELIUS, dated Stockholm, 12 jan. 1847.
Quart. Geol. Soc. London, 3, 76.
- BLOMQUIST, E. et RENQUIST, H. 1914. — Wasserstandbeobachtungen an den Küsten
Finnlands : Bearbeitung und Zusammenstellung des Beobachtungsmaterials von
Helsingfors (1879-1912), Wiborg, Lemström Räfsö, Brändö, Yxpila, Toppila
(1888-1912), Lawola (1896-1912), Strömma (1899-1912), Skuru (1900-1912),
Kotka (1908-1912) und Mäntyluoto (1910-1912). *Fennia*, 37, (1).
- BOTT, M. H. P. et JOHNSON, G. A. L. 1966. — The controlling mechanism of Carbo-
niferous cyclic sedimentation. *Geol. Soc. Circ. London*, 132, 1-2.
- BRAVAIS, Auguste. 1840. — Sur les lignes d'anciens niveaux de la mer dans le Finmark.
C. R. Acad. Sc., Paris, 10, 691.

- BRENNER, Thord. 1928. — Beispiele von Massenverdrängung durch Bodenbelastung. *Fennia*, 50 (19), 12 p., 2 fig., 2 pl.
- 1948. — Finlands kuster. Skärgårdsboken, 14-29, Fig. 4-10.
- BRUNBERG-SCHWANK, Brita et BÄRLUND, Ulla. 1948. — Vegetation och landhöjning. En analys av växtligheten på några nybildade små öar i mellersta Österbotten och på Åland. Skärgårdsboken, 257-291, Fig. 145-169.
- VON BUBNOFF, Serge. 1950. — Die Geschwindigkeit in der Sedimentbildung und ihr endogener Antrieb. *Abh. zur Geotektonik*, Berlin, 2, 1-33, 4 fig.
- CLOOS, Hans. 1939. — Hebung - Spaltung - Vulkanismus. Elemente einer geometrischen Analyse irdischer Grossformen. *Geol. Rundschau*, 30, 401-527, 60 fig., 6 tabl.
- DE GEER, Gerard. 1888. — Om Skandinaviens nivåförändringar under kvartärperioden. *Geol. För. Förh.*, 10, 366-379, 1 pl.
- 1890. — Om Skandinaviens nivåförändringar under kvartärperioden. *Geol. För. Förh.*, 12, 61-111.
- 1894 a. — Om Strandliniens förskjutning vid våra insjöar. *Sver. geol. Unders. Afh. ser. C*, 141 (1), 1-15.
- 1894 b. — Om kvartära nivåförändringar vid Finska Viken. *Sver. geol. Unders. Afh.*, ser. C, 141 (2), 1-17.
- 1896. — Skandinaviens geografiska utveckling efter istiden. Stockholm, 160 p., 29 fig.
- 1905. — Bidrag till istidens kronologi och klimatlära. *Geol. För. Förh.*, 27, 219-222.
- 1912. — A geochronology of the last 12 000 years. C. R. XI^e ses. Cong. géol. internat. Stockholm, 241-253, 2 pl.
- 1940. — Geochronologia Suecica. Principles. *Kgl. Svenska Vet. Akad. (III)* 18, N^o 6, 367 p., 65 fig., 90 pl.
- DONNER, J. J., 1965. — Shore-line diagrams in finnish Quaternary research. *Baltica*, Vilnius, 2, 11-20, 5 fig.
- DUBOIS, Georges. 1931. — Les méthodes de recherche dans l'étude des anciennes lignes de rivage quaternaires. C. R. Congr. Internat. Géogr. Paris, t. II, fasc. 1, sect. II, 32-41.
- GILBERT, Karl Grove. 1890. — Lake Bonneville. *U. S. Geol. Surv. Monograph*. 1. XX + 438 p., 51 pl., 1 carte.
- GLOSSARY OF GEOLOGY. 1962. — Published by The American Geological Institute, Washington. 3th. edition.
- GUTENBERG, Beno. 1941. — Changes in sea-level, postglacial uplift, and mobility of the Earth's interior. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 52, 721-772, 5 fig.
- HAARMANN, Erich. 1934. — Die Zeitlichkeit der Erdkrustenbewegungen. *N. Jhb. Beil.*, 71, 48-87, 2 fig., 1 pl.
- 1935. — Um das geologische Weltbild, Mente et Malleo. Stuttgart, XI + 119 p., 23 fig., 1 pl.
- HAGBERG, Knut. 1939. — Carl Linnaeus. Stockholm, 324 p., 14 pl.
- HAMNSTYRELSE GÖTEBORGS 1916. — Handlingar rörande 1916 års Kajkommission. 62 p., 5 fig., 9 pl.
- HÄRME, Maunu. 1963. — On the shear zones and fault lines in Finnish Pre-Cambrian strata. Symposium on Recent Crustal Movements in Finland. *Fennia*, 89 (1), 29.

- HELA, Ilmo. 1953. — A study of land upheaval at the finnish coast. *Fennia*, 76 (5), 38 p., 14 fig.
- VON HOFF, Karl Ernst Adolph. 1822-1834. — Geschichte der durch Ueberlieferung nachgewiesenen natürlichen Veränderungen der Erdoberfläche. Gotha, 3 volumes.
- HÖGBOM, A. G. 1922. — Ueber einige geologisch und biologisch bemerkenswerte Wirkungen sulfathaltiger Lösungen auf humose Gewässer. *Bull. geol. Inst. Univ. Upsala*, 18, 239-261, 5 fig.
- HOLMSTRÖM, Leonard. 1888. — Om strandlinjernas förskjutning vid Sveriges kuster. *Kgl. Vet. Akad. Handl., Stockholm*, 22, 1-99.
- HOLTEDAHL, Olaf. 1935. — Den norske landmasses begrensning mot havet. *Norsk. geogr. Tidskr.*, 5, 453-466, 3 fig.
- HUSTICH, Ilmari. 1952. — The recent climatic fluctuation in Finland and its consequences. A symposium. *Fennia*, 75, 128 p., 52 fig., 1 pl.
- HYYPÄ, Esa. 1963. — On the late-quaternary history of the Baltic Sea. *Fennia*, 89, 37-48, 4 fig., 1 pl.
- IGNATIUS, Heikki. 1958. — On the rate of sedimentation in the Baltic Sea. *Bull. Comm. géol. Finl.*, 180, 135-142, 2 fig.
- JAMIESON, Thomas, F. 1865. — On the history of the last geological changes in Scotland. *Quart. geol. Soc. London*, 21, 161-203, 10 fig.
- 1882. — On the cause of the depression and re-elevation of the land during the glacial period. *Geol. Mag. N. S.* 9, 400-407 et 457-466.
- KÄÄRIÄINEN, Erkki. 1953. — On the uplift of the Earth's crust in Finland. *Fennia*, 77 (5), 106 p., 17 fig.
- 1963. — Land uplift in Finland computed by the aid of precise levellings. *Fennia*, 89 (1), 15-18, 1 fig., 1 pl.
- KEILHAU, A. M. 1838. — Undersøgelser om hvorvidt i Norge, saaledes som i Sverrig, findes tegn til en Fremstigning af Landjorden i den nyere og nyeste geologiske tid. *Nyt Mag. for Naturvid.*, 1, 105-254.
- KUKKAMÄKI, T. J. 1954, 1955. — The land uplift in Finland determined with two levellings as well as with water level observations. Proc. sect. of levelling, Rome sept. 1954, Copenhagen 1955, 27-29, 1 fig.
- 1963. — Symposium on recent crustal movements in Finland with bibliography. *Fennia*, 89 (1), 69 p.
- LAMARCK, J. B. 1802. — Hydrogeology (translated by Albert V. CAROZZI). Urbana 1964. VII + 152 p., 4 fig., 1 pl. (original paru en l'an X à Paris, 186 p.).
- DE LAMOTHE, L. 1911. — Les anciennes lignes de rivage du Sahel d'Alger et d'une partie de la côte algérienne. *Mém. Soc. géol. de France* (4), 6, t. 1, 288 p., 1 pl., 1 carte.
- LISITZIN, Eugénie. 1963. — Land uplift as sea-level problem. *Fennia*, 89, 7-10, 1 fig.
- 1964. — Contribution to the knowledge of land uplift along the Finish coast. *Fennia*, 89 (4), 1-22, 3 fig.
- LYELL, Charles. 1837. — Principles of geology, being an inquiry how far the former changes of the Earth's surface are referable to causes now in operation. 5th. edition, London, 4 vol.
- MACLAREN, Charles. 1842. — The glacial theory of Prof. Agassiz. *Amer. J. of Sc.*, 42, 346-365, 9 fig.

- MILTHERS, V. 1916. — Spaltedale i Jylland. *Danm. geol. Unders.* (IV) 1, (3), 16 p., 3 fig., 1 pl.
- MUNTHE, H. 1910. — Studies in the Late-Quaternary history of southern Sweden. *Geol. För. Förh. Stockholm*, 32, 1197-1210.
- NANSEN, Fridtjof. 1921. — The strandflat and isostasy. *Christ. Vid. Selsk. skr. mat.-nat. kl.*, 313 p., 170 fig.
- 1928. — The Earth's crust, its surface forms, and isostatic adjustment. *Avh. Norsk. Vid. Ak. ad. Oslo, I. mat.-nat. kl.* 12, 120 p., 27 fig.
- NISKANEN, E. 1943. — On the deformation of the Earth's crust under the weight of a glacial ice-load and related phenomena. *Ann. Acad. Sc. Fennicae*, ser. A. III. 7, 59 p., 2 fig.
- 1949. — On the elastic resistance of the Earth's crust. *Ann. Acad. Sc. Fennicae*, ser. A. III. 21, 1-22, 3 fig., 2 tabl.
- NORDENSKIÖLD, A. E. 1858. — Beräkning af fasta landets höjning vid Stockholm. *Öfv. af kongl. vet. Akad. Handl.*, 15, 269-273.
- PASTIELS, A. 1963 (1964). — La distribution stratigraphique des Lamellibranches non marins du Namurien et du Westphalien A de la Belgique. V^e Cong. de Strat. et de Géol. du Carb., Paris, 619-629, 3 fig.
- PAULI, F. W. 1966. — Some recent developments in biochemical research. *Bull. serv. carte geol. Alsace-Lorraine*, 19, 221-240.
- PFANNENSTIEL, Max. 1944. — Die diluvialen Entwicklungsstadien und die Urgeschichte von Dardanellen, Marmarameer und Bosphorus (Ein Beitrag zu den klimatisch bedingten eustatischen Spiegelschwankungen des Mittelmeeres). *Geol. Rundsch.*, 34, 341-434, 2 fig., 7 pl.
- 1949. — Klimatisch bedingte Spiegelschwankungen des Mittelmeeres im Quartär und die paläolithischen Kulturen. *Mitt. geol. Ges. Wien*, 36-38, 357-363.
- RAMSAY, WILHELM. 1896. — Till frågan om det senglaciala hafvets utbredning i södra Finland. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 3, 1-44, 1 pl.
- 1898. — Ueber die geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quartärzeit. *Fennia*, 16 (1), VI + 152 p., 5 pl., 1 carte.
- 1917. — De s. k. marina gränserna i södra Finland. *Fennia*, 40 (7), 8 p., 1 fig.
- 1920. — Litorina-gränsen i sydliga Finland. *Geol. För. Förh. Stockholm*, 42, 243-262, 2 fig.
- 1921. — Strandlinjer i södra Finland. *Geol. För. Förh. Stockholm*, 43, 495-497.
- 1924. — On relations between crustal movements and variations of sea-level during late Quaternary time, especially in Fennoscandia. *Fennia*, 44 (5), 39 p., 10 fig. (également : *Bull. Comm. géol. de Finl.* 66).
- 1926. — Dränkta länder och kulturer. *Soc. Scient. Fennica. Årsbok-Vuosikirja*, 4, 1-15, 8 fig.
- 1927. — Nivåförändringar och stenåldersbosättning i det baltiska området. *Fennia*, 47 (4), 1-68.
- 1931. — Changes of sea-level resulting from the increase and decrease of glaciations. *Fennia*, 52, 1-62, 3 fig.
- REKSTAD, J. 1922. — Norges hevning efter istiden. *Norges geol. Unders.* 96, 27 p., 8 fig., 1 carte.
- RENQUIST, Henrik. 1923. — Vasatraktens topografi, landhöjning och geografiska namn. *Fennia*, 44 (3), 1-10, 1 pl.
- 1927. — Några gamla skrifteskartors vittnesbörd om landhöjning och abrasion. *Fennia*, 47 (10), 1-24, 2 fig.
- 1948. — Landhöjningen vid våra kuster. *Skärgårdsboken*, 74-94, 18 fig.

- ROSENDAHL, Halvor. 1953. — *Geochronologia Norvegica*. Actes du IV^e Cong. Intern. du Quatern., Rome-Pise, 8 p.
- RUNEBERG, E. O. 1765. — Anmärkningar om några förändringar på Jordytan i allmänhet och under de kalla klimat i synnerhet. *Kgl. Svenska Vet. Akad. Handl.*, 26, 81-115.
- 1769. — Förklaring på några omständigheter, rörande frågan om vattuminsknin-gen. *Kgl. Svenska Vet. Akad. Handl.*, 30, 177-197.
- SAURAMO, Matti. 1918. — Geochronologische Studien über die spätglaciale Zeit in Südfinnland. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 50, 44 p., 5 fig., 4 pl.
- 1923. — Studies on the Quaternary varve sediments in southern Finland. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 60, 149 p., 10 pl. (également *Fennia*, 44 (1)).
- 1928. — Der Anteil der eustatischen Komponente an den Niveauverschiebungen in Fennoscandia. *Fennia*, 50 (10) p. 2 fig.
- 1929. — The Quaternary Geology of Finland. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 87, 1-110, 39 fig., 25 pl., 1 carte.
- 1934. — Zur spätquartären Geschichte der Ostsee. *C. R. Soc. géol. de Finl.*, 8, 1-60, 18 fig., 6 pl.
- 1939 a. — Aus der Erforschungsgeschichte der Ostsee. *Schriften der phys.-ökonom. Ges. zu Königsberg*, 71 (1), 11-36, 9 fig.
- 1939 b. — The mode of the land upheaval in Fennoscandia during late-Quaternary time. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 125, 1-26, 9 fig., 1 pl.
- 1943 (1944). — Der Mechanismus der Landhebung. *Sitz.-Ber. der Finn. Akad. der Wiss.*, 93-114, 4 fig.
- 1946 (1947). — Waldgeschichtliche Gliederung des Spätglacials. *Sitz.-Ber. der Finn. Akad. der Wiss.*, 231-235, 2 fig.
- 1954. — Das Rätsel des Ancylussees. *Geol. Rundsch.*, 42, 197-233, 17 fig.
- 1955. — Land Uplift with Hinge-Lines in Fennoscandia. *Ann. Acad. Scient. Fennicae*, ser. A. III, 44, 5-23, 11 fig.
- SAURAMO, M. et AUER, V. 1928. — On the development of the Lake Höytiäinen in Carelia and its ancient flora. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 81, 1-140, 20 fig., 4 pl.
- SEDERHOLM, J. J. 1899. — Les dépôts quaternaires en Finlande. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 10, 1-28, 2 fig., 1 carte.
- SIEGER, ROBERT. 1893. — Seenschwankungen und Strandverschiebungen in Skandinavien. *Zschr. f. Erdkunde*, Berlin, 28, 1-116 et 393-488, 1 pl., 23 tabl.
- SIMONSEN, O. 1946. — Orienterende Bemaerkninger om Nivellements-nul i Danmark. *Matem. Tidsskr. B.* 53-60.
- 1949. — Nivellements-nul paa Sjaelland, Mön og Lolland-Falster med saerligt henblik paa Köbenhavn og Frederiksberg 1845-1945. Thèse, Köbenhavn. 183 p., 19 fig., 5 pl.
- 1960. — Report from the International Commission for European Levelling for the period September 1957 — July 1960. Submitted to the General Assembly of the Internat. Union of Geodesy and Geophysics, Helsinki, 2-35, 3 tabl.
- SIRÉN, Allan. 1951. — On computing the land uplift from the lake water level records in Finland. *Fennia*, 73 (5), 181 p., 37 fig.
- 1963. — Recent land uplift in Finland computed from lake water level records. *Fennia*, 89 (1), 11-13, 3 fig.
- SUESS, Eduard. 1888. — Die Meere der Erde, Bd. II. Das Antlitz der Erde. Wien, VI + 704 p., 42 fig., 3 pl.

- TANNER, Väinö. 1929. — Några synpunkter angående de senkvartära nivåförändringarna i Fennoskandia. *Medd. f. Dansk. geol. For.*, 7, 359-362.
- 1930. — Studier över kvartärsystemet i Fennoscandias nordliga delar. IV. Om nivåförändringarna och grunddragen av den geografiska udvecklingen efter istiden i Ishavsfinland samt om homotaxin av Fennoscandias marina avlagringar. *Bull. Comm. géol. de Finl.*, 88, II + 589 p., 84 fig., 4 pl.
- 1938. — Die Oberflächengestaltung Finnlands. Eine übersichtliche Darstellung der Morphographie und Morphologie sowie der Morphogenie in chronologischer Beziehung. Bidrag till Kännedom af Finlands Natur och Folk, utg. af *Finska Vet.-Soc.* H. 86, 762 p., 520 fig.
- VOGT, Thorolf. 1930. — Strand-lines as interference phenomena. *Det. kgl. Norske Vid.-Selsk. Forh.*, 3 (10), 40 p.
- WANLESS, H. R. et SHEPARD, F. P. 1936. — Sea-level and climatic changes related to late-paleozoic cycles. *Bull. geol. Soc. Am.*, 47, 1177-1206, 3 fig.
- WEGMANN, C. E. 1928. — Sur un nouveau gisement de roches morainiques préquaternaires. *C. R. somm. S. géol. de France*, 274-276.
- 1929. — Zur Kenntnis der tektonischen Beziehungen metallogenetischer Provinzen in der nördlichsten Fennoscandia. *Zschr. f. prakt. Geol.*, 193-202, 3 fig.
- 1939 (1940). — Einleitung zur Vortragsreihe über die Geologie von Grönland. *Mitt. Nat. Ges. Schaffhausen*, 16, 29-46, 1 fig.
- 1948. — Le spectre des mouvements de l'écorce terrestre et leur enregistrement dans les sédiments. Internat. Geol. Congr. XVIII Sess. London, Part. IV, 223-238.
- 1950. — Diskontinuität und Kontinuität in der Erdgeschichte. *Geol. Rundsch.* 58, 125-132, 1 fig.
- 1953. — Ueber gleichzeitige Bewegungsbilder verschiedener Stockwerke. *Geol. Rundsch.*, 41, 21-33, 4 fig.
- 1955. — Tectonique vivante. *Geol. Rundsch.*, 43, 273-306.
- 1957. — Tectonique vivante, dénudation et phénomènes connexes. *Rev. géogr. phys. et géol. dynam.* (2), 1, 3-15, 4 fig.
- 1958. — Das Erbe WERNER's und HUTTON's. Vol. commém. Serge von BUBNOFF, Geologie, Berlin, 531-559.
- 1961. — Anatomie comparée des hypothèses sur les plissements de couverture (le Jura plissé). *Bull. geol. Inst. Univ. of Upsala*, 40, 169-182, 2 fig.
- WITTING, Rolf. 1918. — Hafsyttan, geoidytan och landhöjningen utmed Baltiska Hafvet och vid Nordsjön. *Fennia*, 39 (5), 346 p., 25 fig., 2 pl.
- 1922. — Le soulèvement récent de la Fennoscandie. *Geogr. Annal. Stockholm*, 4, 458.
- 1928. — Ueber den Ablauf der fennoscandischen postglazialen Landhebung. *Fennia*, 50 (30), 1-7.
- 1943 (1945). — Landhöjningen utmed Baltiska Havet under åren 1898-1927. *Fennia*, 68 (1), 1-40, 8 fig.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Introduction	129
Les buts de cet exposé	132
Les déplacements de la ligne de rivage	132
Début des recherches scientifiques	133
Celsius et Linné	135
Application de la géologie à l'histoire	136
Réfutation de la doctrine de la diminution des eaux	136
Les déformations de l'écorce terrestre	137
L'évolution des hypothèses sur les mouvements de l'écorce terrestre	138
Echanges et influences du dehors	139
Eduard Suess et la notion des « mouvements eustatiques »	141
Continuation de l'évolution en Fennoscandie	145
L'analyse des interférences	146
Les diagrammes et leur interprétation	147
Successions et échelles chronologiques	155
Spectre des vitesses, ordre de grandeur et épigénèse	156
Evolution des études sur les mouvements séculaires	162
Extension des mesures à l'intérieur de la terre ferme	167
Quelques incidences du soulèvement sur les phénomènes géographiques, sédimentaires et géochimiques	169
Quelques questions concernant l'individualisation des lignes de rivage	172
Stades d'évolution dans la vie des théories	174
Hommages et remerciements	180
Zusammenfassung	181
Abstract	182
Bibliographie	185

