

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg
Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles
Band: 56 (1966-1967)
Heft: 2: Rapport annuel = Jahresbericht

Vereinsnachrichten: Les conférences en 1966 - 1967

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: 28.01.2026

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

Les conférences en 1966-1967

Mineralogie, die unbekannte Wissenschaft

A. Geschichtliches

Die Mineralogie ist eine Tochter des Bergbaus. Seit einigen tausend Jahren schürften die Menschen nach Edelsteinen, nach den Edelmetallen Gold, Silber und Kupfer, die in gediegener Form vorkommen. Aus Eisenerzen erschmolz man das Eisen, aus Zinn- und Kupfererzen die Bronze. Ganze Kulturepochen erhielten nach ihnen ihre Namen. Lange Kriege wurden um den Besitz von Erzvorkommen geführt. Doch das Wissen um die Eigenschaften der mineralischen Rohstoffe blieb lange Zeit – bis in das Mittelalter hinein – dürftig und mit mythologischem Ballast behaftet. Erst als mit rasch steigendem Bedarf an Metallen das Suchen und Finden der begehrten Mineralien nicht mehr länger ein Zufallsergebnis sein durfte, beschäftigte man sich intensiver mit den speziellen Eigenschaften der *Mineralien*. (So nennt man die Gesamtheit der in der Erdkruste vorkommenden, in sich gleichartigen, d.h. stofflich homogenen, einzelnen Bestandteile.) Es war wohl zuerst *Agricola* (1450–1550), der das Wissen seiner Zeit über die Erze zusammentrug und etwas systematischer gliederte. Die vertiefte Kenntnis der Eigenschaften der Mineralien brachte auch die Erkenntnis, daß die Erze in ihrer Lagerstätte in charakteristischer Weise miteinander vergesellschaftet sind. Man begann mit der Errichtung systematischer Sammlungen («Mineraliencabinette»), die also durchaus praktischen Zwecken dienten. Ebenso lernte man die Gesteine, in denen die Erze steckten, durch Bestimmung ihrer Komponenten in ein System zu bringen. So entstand nach und nach ein Lehrgebäude der Mineralien und Mineralassoziationen (Gesteine und Erzkörper). Noch heute heißen die zuständigen Forschungsinstitutionen «Institute für Mineralogie und Petrographie».

Als eine äußerst spezifische Eigenschaft der Minerale lernte man die «Kristallgestalt» erkennen. Der Däne *Niels Stensen* (*Nicolaus Steno*, geb. 1638) fand das Gesetz der Winkelkonstanz ¹, und damit begann die *Kernwissenschaft der Mineralogie*, nämlich die Lehre von den Kristallen. Man entdeckte die Arten der

¹ Das Gesetz der Winkelkonstanz besagt, daß die Flächen der Kristalle in ganz bestimmten Winkeln zueinander geneigt sind. Für alle Kristalle einer Mineralart haben die entsprechenden Winkel denselben Wert, gleichgültig, wie groß die Flächen der einzelnen Kristalle derselben Art auch sein mögen.

Symmetrie (Spiegelebenen, Drehungsachsen und Inversionszentren) und erkannte so die Gesetze, nach denen die Kristalle aufgebaut sind. Durch Kombination der einzelnen Symmetrieelemente gelangte man zu 32 Symmetrieklassen, in die sich alle Kristalle einordnen lassen. Nun hatte man einen deduktiven Zugang zur Vielfalt der Symmetrie, denn es war möglich, für die Kombierbarkeit der Symmetrieelemente (in der anorganischen Welt) eine geschlossene Theorie abzuleiten (Hessel 1829, Bravais 1849, Schönflies 1892). Der kristallisierte Zustand in der Natur war durch die messende und rechnende Mineralogie «durchschaut».

Da nun quasi die gesamte feste Materie kristallisiert vorliegt, also nicht nur die Gesteine, sondern z.B. auch Gips und Zement, nicht nur die Erze, sondern auch die Metalle (die ebenfalls Kristallaggregate sind), fand die Kristallographie Eingang in viele Nachbardisziplinen. Denn mit dem Entstehen und den Eigenschaften der Festkörper haben es Chemie und Physik ebenso zu tun wie ihre Anwendungsgebiete, seien es Kunstdüngerfabriken oder Stahlwerke.

Entsprechend dem wachsenden Interessenkreis vervielfachten sich auch die Forschungs- und Untersuchungs-Methoden. Die Röntgen-Strukturanalyse (Untersuchung der Kristalle mittels Beugung von Röntgenstrahlen) erbrachte die glänzende Bestätigung der Theorien der Symmetrieforscher: Materie besteht in ihrem stabilen, d.h. kristallisierten Zustande aus regelmäßig aneinandergereihten Bauelementen (Ionen, Atomen usw.), so wie eine Mauer regelmäßig aus aneinandergesetzten Ziegelsteinen aufgebaut ist. Das Baumuster und die Bindungsart bestimmen die Eigenschaften des Stoffes.

Der Name Mineralogie deckt also heute *nur einen Teil* des Arbeitsgebietes. Es gibt daher Institute, die ihren Namen geändert haben in «Institut für Kristallographie» (so z.B. das der Universität und ETH gemeinsame Zürcher Institut). Aber auch mit dieser Namensgebung wird man dem Gesamtanliegen nicht gerecht, denn inzwischen ist auch die *Petrographie* methodisch über ihre Ufer getreten: Man bescheidet sich nicht mit Beobachtung und Beschreibung von Gesteinen, sondern sucht diese genetisch zu verstehen. Mit Gesteinssynthese und Geochemie haben physikalisch-chemische Methoden im weitesten Sinne Eingang gefunden.

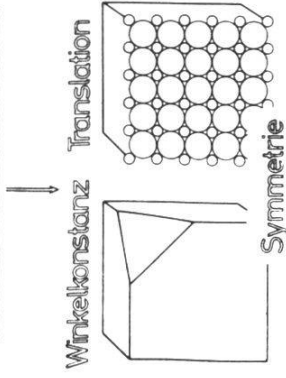
Wie also soll man das Fach «Mineralogie» abgrenzen? Das nachfolgende Schema (Abb. 1) will einen Leitfaden geben und die Stellung der Mineralogie zwischen den anderen Disziplinen bestimmen.

B. Verflechtung mit anderen Wissenschaften

Alle feste Materie liegt kristallisiert vor (Gläser und verwandte Körper sind eigentlich unterkühlte, quasifeste Flüssigkeiten, also keine Festkörper). Kristalle wachsen aus Lösungen oder Schmelzen durch Anlagerung der Materie an einen «Keim», und zwar so, daß die atomaren Bausteine sich, regelmäßig wiederholt (translatorisch), nach einem ganz bestimmten «Muster» assoziieren. Der makroskopische Vielflächner ist ein Abbild des inneren Aufbaus (Feinbau, Raumgitter). Daher ist der Stoff auch dann «Kristall», wenn die äußere Entwicklung (Kristallflächen) durch Behinderung im Wachstum nicht zur Geltung kommen kann; die

GEOPHYSIK – GEOLOGIE – GEOGRAPHIE

FESTE MATERIE



MUSEUM

Systematik der Minerale
 Elemente (Au, Hg) Oxide (SiO_2)
 Sulfide (FeS_2) Halate (NaCl)
 weitere Salze (BaSO_4 , CaCO_3)
 incl. Silikate (KAlSi_3O_8)
 Meteoriten (Stein- u. Eisen-M.)

KRISTALLOGRAPHIE

KRISTALLE → MINERALE →

Symmetrietheorie
 Strukturforschung

Kristallisieren
 Analysieren

Anisotropie der kristallisierten Materie

Theorie der
 Raumgruppen
 u. Kristallklassen

Röntgen-
 Struktur-
 Analyse

Physikal. Eigenschaften

Mineralsynthesen

PETROLOGIE

Experimentelle
 Petrographie
 Gesetze
 Synthesen
 Theorien

MINERAL ≠ PARAGENESEN <

Minerale Gesteine
 Erze Erdkruste
 Altersbestimmung

GEOCHEMIE

Mehrphasensysteme Fließvorgänge Deformation

Gesteinssynthese

Dünnschliff
 Anschliff

Polarisationsoptik

Erzmikroskopie

PETROGRAPHIE

Magmat. Gesteine – Ergussgest. (Basalt – Liparit)
 Tiefengest. (Gabbro – Granit)
 Sediment-Gesteine (Sand-, Ton-, Kalksteine)
 Metamorphe Gesteine (Schiefer, Gneise, Marmore)

GESTEINE

ERZE KOHLEN SALZE

Magmat. Vorkommen (z. B. Gänge)
 Sedimentäre Lager
 † metamorphosiert

LAGERSTÄTTENKUNDE

MATHEMATIK – PHYSIK – PHYSIKALISCHE CHEMIE – CHEMIE – BERGBAU

Abb. 7 Stellung der Mineralogie im Rahmen der Nachbarwissenschaften

Eigenschaften der Kristalle sind ja vom Raumgitter (also der Anordnung der atomaren Bausteine) her bestimmt. Die Untersuchungsmethoden werden unter dem Begriff *Kristallographie* zusammengefaßt.

Diese Gesichtspunkte bilden den *Ausgangspunkt des Schemas* links oben; sie führen den Beschauer der Abbildung zum ersten der sechs im Schema unterschiedenen Sektoren. – Ein Teil der Kristalle sind Minerale, also Bestandteile der Erdkruste¹. Diese werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung in verschiedene Abteilungen gegliedert. Wenn es sich um ansehnliche, «schöne» oder auch typische Exemplare handelt, werden sie in Sammlungen ausgestellt. Daher ist oberhalb des Sektors Kristallographie als weiterer Sektor *Museum* abgetrennt.

Die Minerale treten zu Assoziationen (Mineralparagenesen) zusammen: Im Schema bewegen wir uns auf der Mittelachse den Pfeilen nach – von links nach rechts – und erreichen zwei weitere Sektoren, die *Petrographie* und die *Lagerstättenkunde*. In der Petrographie befaßt man sich mit den Gesteinen und ihrem Aufbau, z.B. mit Graniten, Basalten, Laven, Schieferen usw. Dagegen behandelt die Lagerstättenkunde die Erzvorkommen, Kohlenflöze und Salzlager.

Die beiden letztgenannten Sektoren führen den Forscher hinaus ins Gelände; die Natur selbst ist das große Laboratorium, und der Mineraloge deutet «die Experimente der Erdkruste». Beobachtung und Hypothese bedürfen auch hier der Verifikation im Labor und der quantitativen Untersuchung. Daher schließen sich (nach links zu) zwei weitere Sektoren an: Zur Petrographie tritt die *Petrologie*, zur Lagerstättenkunde die *Geochemie*. Diese beiden Sektoren wurden nach links angeschlossen, weil ihre Methoden denen der Kristallographie verwandt sind: sie kommen in unserem Schema in die Nachbarschaft der Kristallographie.

Unterhalb der sechs Sektoren sind noch einige Methoden einzeln aufgeführt, deren man sich in den (darüberstehenden) Sektoren bedient.

Schließlich ist im Schema dargestellt, wie die Nachbarwissenschaften die mineralogischen Arbeitsgebiete umrahmen. Wie man sieht, gibt es eine ganze Skala von wohldefinierten Disziplinen, mit denen die Mineralogie verzahnt ist. Vom Hauptnenner des kristallisierten Zustandes her verbindet sie so unterschiedliche Bereiche wie Geologie und Physik, Mathematik und Lagerstättenkunde.

Mineralogen sind – wie die Heinzelmännchen der Sage – ein wenig überall. Hier «getarnt» als Strukturchemiker, dort mit dem Titel eines Aufbereitungsingenieurs. Man findet den Mineralogen als Polarisationsoptiker in der Industrie, als Staublungenspezialisten im Hygiene-Institut. Man findet ihn im Halbleiterlabor ebenso wie im Walzwerk, und dann natürlich dort, wo er gemeinsam mit dem Geologen und Geophysiker in Lagerstätten tätig ist.

C. Die Sektoren der Mineralogie

Stichwortartig seien nun noch einige Bemerkungen zu den sechs Sektoren unseres Schemas gemacht. Sie lehren uns den Aufbau eines heutigen mineralogischen Institutes verstehen.

¹ Im Gegensatz zu den künstlich hergestellten Kristallen, wie z.B. den künstlichen Edelsteinen, der synthetischen Soda oder den Düngemitteln, die zwar kristallisiert, aber keine Mineralien sind.

In der Symmetriellehre wird die Mannigfaltigkeit des Zusammentretens von Bausteinen zu einem Kristall abgehandelt. Für den Unterricht wählt man eine halb induktive, halb deduktive Herleitung der Kristallsysteme und Kristallklassen, sowie der Raumgruppen des Feinbaus.

Ein typisches Detail sei hier erwähnt: Ein wohlausgebildeter Kristall zeigt sich als ein allseits durch ebene Flächen begrenzter Körper. Gleichartige Flächen werden zu «Formen» zusammengefaßt. Der Kristall erweist sich also z.B. als eine Kombination von Pyramiden, Prismen, Rhomboedern usw. In der Natur (wie auch im Laboratorium) kommen die Kristalle aber meistens «verzerrt» vor, d.h. die Flächen der gleichen Form sind verschieden groß. Um solche Kristalle der Symmetrie-Untersuchung allgemein zugänglich zu machen, müssen sie «entzerzt» werden durch eine geometrische Vereinheitlichung. Zu diesem Zwecke denkt man sich den Kristall in eine Kugel hineingestellt. Vom Mittelpunkt aus errichtet man nun das Lot auf jede einzelne Fläche und führt es bis zur «Kugelschale» weiter. Man erhält so statt der Flächen einen «Sternenhimmel» (jetzt spielt die Größe einer Fläche keine Rolle mehr). Die «Sterne», also die Durchstichpunkte der Flächenlote auf der Kugel, werden durch eine winkeltreue Projektion in die Ebene überführt. Die Kristalle sind «entzerzt». Dieser Abstrahierungsprozeß erlaubt auch die «Indizierung» der Flächen, (bzw. im Raumgitter der Atomlagen) durch Koordinatenfestlegung.

In der Röntgen-Strukturuntersuchung erfolgt die Anwendung auf den konkreten Fall. Während die mathematisch hergeleiteten Baumuster (Punktgruppen, Strukturen) sich auf ideale Fälle beziehen, bedarf es für die Untersuchung des realen Aufbaus der Kristalle aus den chemischen Elementen neben der Kristallphysik noch der kristall-chemischen Behandlung. Denn die Eigenschaften der Kristalle sind – bei gleichem Bautyp – noch von der Art der Atome etc. abhängig.

Die Synthese der Kristalle (aus Schmelze oder Lösung) ist ein für Forschung wie Industrie gleich wichtiges Unternehmen. Man denke nur an die Bedeutung der Korundsynthese (*rubis* der Uhren). Hier zeigt sich, daß unsere Laboratorien der Natur überlegen sind: die künstlichen Edelsteine sind schöner, größer, fehlerfreier – und billiger – als die Natursteine.

Als ein anderes Beispiel sei die Quarzsynthese genannt. Die natürlichen Bergkristalle sind «verzwillingt», dadurch geht eine Symmetrieeigenart verloren. Man ist deshalb gezwungen, künstliche Quarze zu züchten, wenn man sie als Frequenzstabilisatoren (Schwingquarze) verwenden will. ¹

Damit man weiß, wie am besten Kristalle zu züchten sind, muß man die

¹ Hier liegt ein typisches Beispiel von Wechselbeziehung zwischen Kristallgeometrie und Kristalleigenschaften vor: Der Quarz hat quer zur Hauptachse sogenannte polare Symmetrieachsen, die für den Piezoeffekt (Umwandlung mechanischer in elektrische Schwingungen und umgekehrt) notwendig sind. Durch die Verzwillingung wird die Polarität aufgehoben, der Dipolcharakter (und damit der Piezoeffekt) des Quarzes verschwindet.

Wachstumsvorgänge kennen. Daher werden in den Forschungslabors Geräte oder Räume mit konstanten Bedingungen (z.B. Klimakammern mit konstanter Temperatur und Feuchtigkeit) gebaut, um die Feinheiten des Wachstums ermitteln zu können.

Alles in allem: es ist der Feinbau der Kristalle, die Anisotropie¹ der festen Materie, durch den die Mineralogie zu einer eigenständigen Wissenschaft im Kranze der anderen Disziplinen wird.

2. Museum

Die Systematik der Mineralien erfolgt nach chemisch-strukturellen Gesichtspunkten (Elementen, Oxyden, Sulfiden, Salzen usw.). Beispielsweise sind im Schema eingetragen: Gold, Quecksilber, Quarz, Pyrit, Kochsalz, Baryt, Calcit, Kalifeldspat. Die Silikate sind eigens genannt, weil die Gesteine zumeist aus silikatischen Komponenten bestehen und weil es (bedingt durch die Stellung des Siliziums im Periodischen System der Elemente) eine eigene Silikatchemie gibt.

In der petrographischen Abteilung eines Museums sind die Gesteine untergebracht. Da aber diese Sammlungen zumeist gemeinsam mit denen der Geologie ausgestellt sind, wurden sie in unserem Schema nicht besonders erwähnt.

Hingegen sind die Boten aus dem Weltall, also die Meteoriten, hier aufgezählt, weil man sie meist im «Mineralienkabinett» findet.

Aus unserem Schema geht hervor, daß ein mineralogisches Museum die Breite der Mineralogie nicht wiedergeben kann. Es ist hier nur ein spezieller Sektor des Faches darstellbar. Doch auch dieser enttäuscht oft die Besucher, die ausschließlich ästhetische Gesichtspunkte bei der Betrachtung der Mineralstufen anlegen. Die wahre Schönheit erschließt sich erst dem, der sich mit dem Wesen der Symmetrie vertraut gemacht hat.

Der wissenschaftliche Wert von Museumssammlungen darf jedoch nicht unterschätzt werden: Gute Exemplare benötigt man für die morphologischen, kristallmessenden Studien. Sie sind auch die Grundlage vergleichender Untersuchungen, stellen Belege für bestimmte Fundpunkte dar und sind dem Interessenten unentbehrlich zur Kenntnis der Minerale (und Erze!) überhaupt.

3. Petrographie

Das Schema zeigt die genetische Einteilung der Gesteine. Die Erdkruste ist durch Erstarrung eines silikatischen Glutflusses entstanden. Einmal erstarrt, haben seitliche Drucke die Krustenteile verbogen, verschoben und verfaltet (Gebirgsbau). Während an der Oberfläche der Erdkruste die einsetzende Verwitterung das Material in die Täler und Senken verfrachtet, erfolgt zugleich im Untergrund das Aufschmelzen der Gesteine. Diese Schmelzmassen können erneut wieder in die Fugen der Erdkruste eindringen.

Motor des Geschehens ist also der heiße mobile (bewegliche) Untergrund. Ihm

¹ Anisotropie bedeutet unterschiedliches physikalisches Verhalten (Lichtdurchgang, Wärmeleitung, Spaltbarkeit etc.) der Kristalle in den verschiedenen Raumrichtungen.

entstammen die magmatischen Gesteine. Den beim Eindringen in der Tiefe steckengebliebenen Massen (Tiefengesteine) stehen jene ehemals glutflüssigen Gesteine gegenüber, die den Weg an die Erdoberfläche gefunden haben (Ergußgesteine, «Lava»). Je nach dem Mineralinhalt (bedingt durch die Ausscheidungsfolge der Kristalle) gibt es unterschiedliche Gesteine, einige Namen sind genannt.

Das Verwitterungsmaterial verfestigt sich zu Sedimentgesteinen, Hauptabsatzraum ist der Randbereich der Meere. In diesem Randbereich entstehen infolge der geophysikalischen Sonderbedingungen auch die großen Kettengebirge: Die vorliegenden Gesteine werden bis in große Höhen gehoben; der erhitzte Untergrund rekristallisiert und hier entstehen die metamorphen (= umgewandelten) Gesteine.

4. Lagerstättenkunde

Zwischen den magmatischen Gesteinsmassen und in den überlagernden Schichten finden sich auch jene Absätze aus Lösungen und Dämpfen, die sich von der erstarrenden magmatischen Schmelze getrennt haben und auf Rissen nach oben gewandert sind. Diese Adern und Lager enthalten die Erze. – Im Sedimentgestein finden sich die nutzbaren Komponenten (oft erneut angereichert) wieder. Salzlager sind Meeres-Sedimente, die als Ganzes nutzbar abgebaut werden können. Kohlenflöze, durch sog. «Inkohlung» ehemaliger Sumpfwälder entstanden, liegen zwischen tonig-sandigen Sedimentgesteinen. – Schließlich können auch die Erze metamorph überprägt werden.

3a und 4a. Eine Zwischenbemerkung zur Untersuchungs-Methodik

Wie werden Gesteine und Erze untersucht? Geologische und chemische Methoden bieten sich zunächst an und werden auch ausgiebig angewandt. In innerem Zusammenhang mit diesen stehen die Methoden bei der Aufbereitung der Proben (Schlämmen, Flotieren, Ausfällen usw.).

Aber *eine* Methode ist ganz spezifisch für die Mineralogie, nämlich die Untersuchung mit dem Polarisationsmikroskop. Von Gesteinsproben kann man durch Sägen und Schleifen so dünne Scheibchen herstellen, daß sie unter dem Mikroskop durchscheinend sind (Dünnschliffe). Bei den undurchsichtig bleibenden Erzen wird eine Fläche angeschliffen (Anschliff) und im reflektierten Licht beobachtet. Die Untersuchung erfolgt im polarisierten Licht, denn dieses ist besonders geeignet, die individuellen Anisotropien der Kristalle wiederzugeben. Bei Betrachtung zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren (sog. Nicolschen Prismen) erscheinen in der Materialprobe (Dünnschliff, Anschliff) unter dem Mikroskop Interferenzfarben. Der Mikroskopiker ist mit Hilfe der Gesetze der Optik in der Lage, diese Phänomene zu interpretieren und die Kristallsymmetrie der Objekte zu ermitteln. Die Polarisationsmikroskopie ist also eine der großen Hilfen, die die Mineralogie den Nachbarwissenschaften anzubieten hat.

Für die Petrographie wurde eine Spezialmethodik entwickelt, um die Raumlage der Mineral-Körner im Gestein systematisch zu erfassen. Infolge der De-

formationen bei der Gebirgsbildung haben nämlich viele Gesteine eine sogenannte Paralleltexur, und durch die Lagenstatistik können Fragen der Gesteinsbildung und Gebirgsbildung beantwortet werden. Der Gefügekundler benutzt einen sog. Universaldrehtisch (Gerät nach Art eines Theodolithen), der auf den Objektisch der Polarisationsmikroskope montiert wird.

5. Petrologie

Die experimentelle Petrographie ist eine auf Gesteine angewandte physikalische Chemie. Man studiert die Ausscheidungsfolgen (= Reihenfolge der auskristallisierenden Mineralien) von Mehrstoffsystemen in Lösungen und Schmelzen, also z.B. Salzausscheidungen aus Meerwasser, Gesteinssynthesen im Autoklaven oder man stellt fest, wie sich kristallisierte Gesteins-Phasen unter Druck verändern (Rekristallisation); hier wenden der Metallurge und der Petrologe ganz gleichartige Untersuchungsmethoden an.

Schließlich kann man «Modelle» des Verhaltens von Gesteinen entwickeln. Solche Analogie-Experimente sollen über Verformung, Intrusion, Fließverhalten von Schmelzen, Regelung von Kristallen in Laven usw. Aussagen erlauben.

6. Geochemie

Die chemische Bilanz der Erdkruste addiert sich aus Einzeluntersuchungen. Hier wird mit sehr speziellen Apparaten und Methoden gearbeitet. Die Kenntnis der Verteilung der Elemente in der Erde und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren ist auch von großem *praktischen* Nutzen. Deshalb steht dieser immer stärker selbständig werdende Sektor in unserem Schema neben der Lagerstättenkunde. Die Verflechtung mit den anderen Sektoren ist recht komplex.

Heute beginnt man, getrennte Institute für Kristallographie, Petrographie, Geochemie, Lagerstättenkunde usw. einzurichten. Gleichwohl bleibt die Mineralogie, so wie wir sie hier vorgestellt haben, eine zusammenhängende Disziplin. In einem «kleinen» Institut, das also noch nicht spezialisiert ist, finden wir natürlich noch am ehesten die einzelnen Abteilungen gleichberechtigt und aufs Ganze bezogen nebeneinander vor.

D. Besuch eines Institutes

Bei einer Institutsbesichtigung werden wir zunächst den Hörsaal betreten und die Übungsräume gezeigt bekommen. Hier findet der Besucher neben Tafeln und Demonstrationsgerät viele Pappmodelle von Kristallen sowie Raumgittermodelle aus Holzkugeln und Draht; alles dient der Symmetriellehre. Die «Lehrsammlungen» (Minerale, Gesteine) verhelfen dem Studenten dazu, sich mit den Eigenheiten der Kristalle, Minerale und Gesteine vertraut zu machen.

Von den Übungsräumen für die Studenten zu den eigentlichen Labors ist nur ein kleiner Schritt. Die optischen Räume sind mit zahlreichen Geräten ausge-

rüstet. Man findet hier Mikroskope, Goniometer, Refraktometer und Projektionsbänke. Es folgen das photographische Atelier und das Zeichenzimmer. Getrennt davon liegt das Röntgenlabor.

Von den physikalischen Räumen geht man zu den mehr chemisch eingerichteten Laboratorien. Neben mineralanalytischen und geochemischen Labors liegen die präparativen Räume (mit Magnetscheider, Schlämmanlagen usw.). Besonderer Aufmerksamkeit erfreuen sich Kristallzüchtungsanlagen (z.B. Klimäräume). Im Mineralogisch-Petrographischen Institut in Freiburg gibt es außerdem noch ein spezielles Labor für rheologische Untersuchungen (Modellversuche über das Fließverhalten von Magmen). Wie jedes naturwissenschaftliche Institut benötigt auch unseres eine feinmechanische Werkstatt, damit Reparaturen vorgenommen und einfachere Geräte und Versuchsvorrichtungen nach eigenen Entwürfen angefertigt werden können. Noch nicht genannt sind die – zumeist im Keller untergebrachten – Räume für grobpräparatives Arbeiten (Zerkleinern von Gestein, Sieben, Aufbereiten, etc.), die Depotsammlungen, sowie die systematischen Arbeitssammlungen.

Neben dem «bürokratischen Herzen» eines Institutes, also dem Sekretariat, gibt es noch das «Institutsgedächtnis», nämlich die Zeitschriften- und Handbücherbibliothek, ohne die heute keine wissenschaftliche Arbeit mehr denkbar ist.¹

Wer zum Schluß noch das dem Publikum zugängliche Museum betritt, wird nun vielleicht die Stücke mit mehr Verständnis betrachten. Die Schönheit stammt von innen her: vom kunstvollen symmetrieerfüllten Aufbau der Materie.

Schon Goethe hatte der Mineralogie einen hohen *Bildungswert* zuerkannt. Diese Aussage trifft – obwohl sich der Blickwinkel ganz geändert hat – auch heute noch zu: Unser Schema konnte zeigen, wie in der Mineralogie von einem einheitlichen Gesichtspunkt aus eine Vielfalt von Bereichen und Methoden gesehen wird. Beispielhaft kann in der Mineralogie das Wechselspiel zwischen Induktion und Deduktion, zwischen Beschreibung und Theoriebildung gezeigt werden. Hier ist in der Tat auch noch die Ästhetik ein heuristisches Prinzip für die Forschung, die Symmetrie ein Leitfaden für die Erkenntnis dessen, «was die Welt im Innersten zusammenhält».

Labor- und Außentätigkeit stehen in einem guten Gleichgewicht, die Berufsausbildung kann in sehr unterschiedlicher Weise spezialisiert werden. Die Mineralogie bietet diese Vorteile auch schon dem Studierenden im Nebenfach, oder dem späteren Lehrer als Ergänzung für Geographie und Geologie, Chemie und Physik.

So war und ist die Mineralogie noch immer eine ganze Welt im Kleinen, ihre Institute verkörpern einen letzten Rest von Universalität. Langsam bricht frei-

¹ Abgesehen von Einzelarbeiten wurden am Freiburger Institut die folgenden Studien veröffentlicht, die zu Publikationsserien (des Institutes) gehören:

- a) Studien über die Freiburger Binnentalsammlung I–VII (Sektor: Erze und Kristallographie)
- b) Gefügestudien in Odenwaldgneisen I–III (Sektor: Petrographie)
- c) Beiträge zur Tektonik von Fließgefügen I–V (Sektor: Petrologie)

lich diese Universalität auseinander. Solange aber mineralogische Institute an Universitäten existieren – und nicht bloß an Fachschulen, Bergbauhochschulen –, sollten sie etwas von ihrer Eigenschaft als *einigende Klammer* bewahren: jene Einheit aus Anschauung und Abstraktion, von Naturnähe und Experimentierkunst, auf die die Mineralogen immer stolz gewesen sind.

ERWIN NICKEL

Mineralogisches Institut der Universität Freiburg (Schweiz)

La Géologie, une science quantitative?

Parmi les sciences de la Terre qui ont été présentées durant cet hiver aux conférences de la Société fribourgeoise des Sciences naturelles, il en est une dont l'objet doit être précisé quelque peu. C'est la géologie. D'après l'étymologie de son nom, il s'agit de la science de la Terre. Mais la géographie peut prétendre à une définition analogue: la description de la Terre, de même que la géodésie, ayant pour but de mesurer et de donner la forme de cette même Terre.

Il faut donc mettre un peu d'ordre dans toutes ces notions. La Terre, ce corps solide sur lequel nous vivons, a une place dans l'Univers. Elle est la troisième planète du système solaire. Sa distance au Soleil, son mouvement de translation autour du Soleil, son mouvement propre de rotation sont définis par l'astronomie. Par cette science, nous savons que la forme de son orbite autour du Soleil est celle d'une ellipse d'excentricité 1:60 et dont le demi-grand axe mesure environ 149 500 000 km. Nous savons que l'axe de rotation de la Terre fait avec la normale au plan de son orbite un angle de 23° 27'. L'astronomie nous renseigne enfin sur la place et les mouvements du satellite de la Terre: la Lune.

La forme précise de la Terre nous est donnée par la géodésie. Cette forme est celle d'un ellipsoïde de révolution aplati dont le diamètre équatorial est de 12 756 km environ et le diamètre polaire de 12 713 km. L'aplatissement polaire est donc de 1:296. Les récentes précisions tirées des données fournies par les satellites artificiels permettent de dire que l'aplatissement est plus sensible au pôle Nord, ce qui donne à cet ellipsoïde de révolution une légère déformation en forme de poire. Le volume de la Terre est de $1\,083\,320\,10^6\text{ km}^3$, sa masse est de 6.10^{21} tonnes, soit une densité moyenne de 5,5 environ.

La géographie physique nous renseigne sur la surface de la Terre. Elle nous fait connaître la répartition des terres (29 %) et des mers (71 % de cette surface), les plus hautes élévations du relief (Everest: 8 847 m), les fosses les plus profondes des océans (Iles Mariannes: 10 900 m), simples rugosités de l'ordre de 1:1 000 sur notre Terre dont le demi-méridien mesure 20 000 km. Mais la géographie physique étudie également les phénomènes qui affectent la surface de la Terre: répartition et causes des climats, étude des océans, des cours d'eau, de la répartition de la vie. Enfin, la géographie doit tenir compte du facteur important que constitue la présence de l'Homme sur la Terre, sous l'angle de la géographie hu-

maine et économique. Tous ces aspects peuvent être envisagés de façon générale ou régionale.

Sur l'intérieur de notre planète, nous avons des indications fournies par la géophysique. Cette science s'occupe de la physique du globe. Elle tire ses renseignements de l'étude des variations des caractéristiques physiques de notre planète: intensité de la pesanteur, vitesse de propagation des ondes sismiques, résistance au passage de courants électriques, distribution des champs électriques et magnétiques. C'est par elle que nous savons que la Terre présente des propriétés physiques qui s'expliquent si on la considère comme un emboîtement de couches aux propriétés différentes. Une première couche, d'épaisseur variable, la croûte terrestre ou lithosphère, mesure en moyenne une trentaine de kilomètres d'épaisseur (jusqu'à soixante sous les continents, parfois dix sous les océans). Le manteau terrestre s'étend ensuite jusqu'à 2 900 km. Ici commence le noyau terrestre qui présente une «graine» interne allant de 5 000 km au centre de la Terre, soit jusqu'à 6 350 km environ. Ces couches se différencient par des densités toujours croissantes en allant vers le centre de la Terre, ce qui explique que la densité globale de la Terre est d'environ 5,5, alors que la moyenne de la densité des roches de la surface n'est que de 2,7 approximativement. Par des données tirées de la radioactivité naturelle, on peut admettre pour la Terre un âge de 4,5 milliards d'années.

On peut désigner encore la géographie physique ou l'étude des phénomènes superficiels (érosion) qui modifient la surface de la Terre sous le nom de géodynamique externe. En opposition, on appellera alors du nom de géodynamique interne l'étude des phénomènes affectant l'intérieur de la Terre, lents mouvements de masses semi-fluides, où il faut chercher la cause des modifications importantes du relief terrestre (surrection des chaînes de montagnes, mouvements des continents).

Que reste-t-il donc à la géologie, après l'énumération de toutes ces sciences qui s'occupent de la Terre et de toutes les données qu'elles nous ont fournies? C'est assez modestement, l'étude des roches et des sols qui forment la croûte terrestre ou, de façon plus modeste encore, la partie observable, inorganique, de cette croûte terrestre. Mais, là encore, la géologie s'appuie sur de nombreuses sciences, soit indépendantes, qui sont les auxiliaires de la géologie, soit annexes, qui sont les spécialisations de la géologie. En effet, les roches, ces éléments en général inorganiques et en général solides qui constituent la croûte terrestre sont elles-mêmes constituées de minéraux, cristallisés ou non. La géologie recourra donc à la pétrographie ou lithologie pour décrire et inventorier les roches, à la minéralogie pour en connaître les éléments constitutifs (minéraux), à la cristallographie pour connaître les lois de la formations de cristaux. Les minéraux, cristallisés ou non, sont composés d'éléments chimiques. La géologie s'adresse à la géochimie pour connaître la répartition de ces éléments sur la Terre et les lois de leurs associations.

Une partie des roches se sont formées par le refroidissement de masses en fusion qui se sont cristallisées lentement ou au contraire se sont figées sous forme de laves vitreuses quand le refroidissement a été rapide. Parfois, de gros cristaux sont pris dans une masse vitreuse en donnant naissance aux roches porphyriques.

Par l'action de l'érosion, ces roches qui se sont formées les premières (les plus anciennes ont probablement 3,5 milliards d'années) ont été détruites. Les débris, fins ou grossiers, fournis par cette destruction, ont donné naissance à de nouvelles roches, formées en milieu aquatique (mers, lacs, rivières, tourbières, milieu glaciaire) ou en milieu continental (déserts, plateaux secs, etc.), les roches sédimentaires. C'est ici le domaine propre du géologue d'étudier la répartition dans l'espace de ces roches et, d'après leur constitution, de rechercher les phénomènes qui ont présidé à leur formation. Un auxiliaire précieux de la géologie est la sédimentologie. Appliquant les résultats de l'étude des sédiments actuels à la formation des roches anciennes, elle retrace les conditions dans lesquelles ces roches sont nées. C'est ainsi qu'on peut se représenter le plateau suisse au Tertiaire comme un bras de mer peu profond entre les Alpes naissantes et le Jura à peine soulevé, où se déposaient des sables de plage, continuellement remaniés par les courants, donnant naissance aux grès de la molasse. Par endroits, et à plusieurs reprises durant ce Tertiaire, des sédiments plus fins se déposaient dans des étendues d'eau coupées de la mer, formant ainsi les marnes de la molasse. Ailleurs, les fleuves venus des Alpes constituaient des deltas de graviers grossiers, les conglomérats de la molasse. Dans d'autres séries géologiques marines, on enregistre les mouvements du fond marin, sur lequel les vases à peine consolidées ont glissé et se sont plissées en circonvolutions, les slumpings. Ces phénomènes sont nettement visibles dans le Secondaire de certaines régions du Tessin (rivière Breggia). Parfois, des cendres volcaniques sont intercalées entre des dépôts franchement marins, ce qui révèle au géologue l'existence de volcans proches, qui ont produit des nuages de cendres tombant peu à peu au fond de la mer. On peut également observer ce phénomène au Tessin (Monte San Giorgio).

Mais le géologue ne se contente pas d'inventorier cette répartition des roches dans le sens latéral et de faire une sorte de géographie des roches. L'un de ses buts essentiels est de classer les roches dans le sens vertical, et de reconstituer la répartition par provinces des roches à chaque époque de l'histoire de la Terre. Il atteint ainsi une vue sur la croûte de la Terre dans trois dimensions. Les deux premières sont purement horizontales, géographiques, ce sont les coordonnées du gisement. La troisième est verticale et, par là même, temporelle, puisqu'elle donne la succession dans laquelle les roches se sont formées. Le résultat est la situation dans un réseau de coordonnées à trois dimensions, dont deux représentent l'espace et la troisième le temps, des roches de la croûte terrestre. C'est le travail de la géologie historique ou stratigraphie.

Pour classer dans le sens vertical (superposition, ou situation dans le temps), des repères sont nécessaires au géologue afin de corréliser les roches de même âge. Ces repères, véritables chronomètres géologiques, ont été fournis par la paléontologie. En effet, les êtres vivants, plantes ou animaux, ont pu laisser leurs restes dans les roches, quand les conditions présidant à leur enfouissement ont été favorables à la conservation de ces restes : les fossiles. Les lois de l'évolution ont montré que les organismes aujourd'hui disparus se sont modifiés au cours des âges de la Terre et que certaines formes bien déterminées caractérisent sans aucun doute possible l'âge relatif des couches géologiques qui les contiennent. Citons, parmi les microfossiles, les Fusulines connues seulement au Primaire su-

périeur, les Orbitolines, connues seulement au Secondaire supérieur ou les Nummulites, ces Foraminifères constituant les pierres des Pyramides d'Égypte, connues seulement au Tertiaire inférieur.

D'autres chronomètres, basés sur la radioactivité, ont permis d'articuler les âges absolus de certaines roches. C'est ainsi qu'on sait, par recoupements, que les roches affleurant à la base du Moléson (Trias de Pringy) sont vieilles d'environ 170 Mio d'années, alors que celles qui en constituent le sommet (Crétacé) ont environ 90 Mio d'années. La finesse des divisions de temps fournies par l'étude des successions de formes en paléontologie reste cependant actuellement encore plus grande que la marge d'imprécision des datations par radioactivité, qui reste de 5 à 10 %. La paléontologie continue donc à fournir, grâce à la succession des fossiles, une échelle de la succession des terrains précise et détaillée. C'est ainsi qu'on trouve des microfossiles, dont les coquilles minuscules ($\frac{5}{10}$ de mm à 1 mm) constituent 80 à 90 % des « Couches rouges » des Préalpes (roches crétacées marno-calcaires). Le nombre de ces coquilles, dans l'ensemble des roches de cet âge de la Haute Gruyère, entre Gruyères et Montbovon, est constitué par un chiffre suivi de 27 zéros ! Les différentes espèces de ces coquilles permettent de subdiviser certains des étages du Crétacé supérieur en plusieurs zones de microfossiles dont chacune a duré environ 1 Mio d'années. La datation par la radioactivité permet de caler ces étages dans le temps : en gros, entre -85 et -65 Mio d'années, à environ 3 ou 4 Mio d'années près. On ne connaît donc qu'à 3 ou 4 Mio d'années près l'âge de ces zones de fossiles dont chacune permet d'individualiser des tranches de terrain qui se sont formées en 1 Mio d'années seulement.

Lorsque les diverses couches géologiques ont été ainsi identifiées par la lithologie (nature de leurs roches), datées grâce à l'aide de la paléontologie et calées dans le temps absolu, lorsque le mécanisme de leur formation a été reconnu par la sédimentologie, le géologue peut retracer l'histoire de la Terre, époque par époque, en établissant la répartition des terres et des mers, la nature des bassins géologiques, celle des faunes ou des flores qui occupaient chaque région en un temps donné. C'est la synthèse stratigraphique, se traduisant par une image paléogéographique, paléobiologique et même paléoclimatique pour chaque région et pour chaque époque.

Les roches ainsi reconnues ne sont en général pas restées horizontales après leur dépôt. Les grandes cassures ou les plissements de l'écorce terrestre les ont déformées, soulevées, affaissées ou plissées. La tectonique s'efforce de reconnaître la nature de ces déformations, en attribuant aux mouvements tectoniques verticaux des anciens socles les déformations par grandes cassures comme celles du fossé d'Alsace ou en débrouillant l'enchevêtrement des nappes de recouvrement du système alpin. Cette tectonique d'ensemble a laissé des traces dans la structure même des roches, produisant leur schistosité ou alignant les minéraux. L'étude tectonique à l'échelle des bancs et des formations géologiques peut donc s'accompagner d'une étude minutieuse à l'échelle des éléments composant les roches, déformés eux aussi par les plissements. Lorsque les efforts exercés sur les roches ont été particulièrement intenses, ces roches ont pu être transformées au point que leur nature a changé, avec formation de nouveaux cristaux : ce sont les roches métamorphiques ou cristallophylliennes, en général schisteuses.

L'application des données acquises en géologie va pouvoir servir dans le domaine technique. C'est le rôle de la géologie appliquée. Utilisant la connaissance des roches, de leur âge, de leurs conditions de formation, de leur déformation et disposition dans l'espace, elle va se mettre au service de la recherche technique. C'est le domaine de la géologie minière, pétrolière, de l'hydrogéologie, de la géologie appliquée aux travaux du génie civil. Elle travaille de plus en plus en liaison, dans ces domaines, avec la géophysique appliquée à l'étude des couches superficielles (gravimétrie, sismique, magnétométrie, géoélectrique), ainsi qu'avec une technique spéciale du génie civil: la géotechnique ou étude des roches et des sols de fondation. La connaissance des propriétés physiques des roches (résistance à la compression, à la flexion, à l'abrasion, etc.) ou des sols (densité, teneur en eau, plasticité, cohésion, angle de cisaillement, etc.) permet de prévoir leur comportement. En liaison avec la géologie qui identifie les roches et les sols et reconnaît leur disposition, la géotechnique permet de conditionner au mieux les fondations d'immeubles et d'ouvrages d'art (ponts, viaducs), le percement de tunnels et de galeries, l'édification de digues et de remblais, de barrages. Dans la recherche d'eau souterraine, de gisements de minerais, de graviers ou d'autres minéraux utiles, la géophysique peut également être combinée avec l'emploi de la géologie appliquée.

La géologie est certainement l'une des sciences les plus anciennes. L'homme préhistorique cherchant le filon de silex pour préparer ses pointes de flèches ou le gisement d'obsidienne pour polir une hachette n'était-il pas géologue avant la lettre? Longtemps restée qualitative, la géologie, grâce aux sciences annexes dont elle utilise les résultats, est à même actuellement de formuler des chiffres sur l'épaisseur des dépôts, le temps qu'ils ont mis à se former, leur ancienneté, la direction et la durée de transport des éléments qui ont formé les roches. C'est en sédimentologie, principalement, que les travaux d'analyse chimique ou de statistique des éléments constitutifs des roches se généralisent et fournissent des notions quantitatives. Les caractéristiques physiques des roches et des sols, étudiées par la géophysique ou la géotechnique, permettent de mieux les connaître et de prévoir leurs réactions. La paléontologie, elle aussi, recourt à la rigueur mathématique, pour chiffrer les paramètres caractérisant les espèces et différenciant deux espèces voisines. Elle peut ainsi mieux délimiter les groupes de population indépendants qui constituent une faune par leur association, en l'absence du test d'interfécondité, qui n'est pas utilisable pour le paléontologue. Plusieurs travaux, menés à bien dans cette voie à l'Institut de géologie de Fribourg, ont montré la possibilité d'utiliser ces méthodes à grande échelle, sur des populations nombreuses de fossiles microscopiques.

JEAN KLAUS

Institut de Géologie de l'Université de Fribourg (Suisse)

La géographie vue par un géographe

La méconnaissance du contenu précis de la géographie, jusque dans les milieux universitaires, tient en partie aux structures de l'enseignement secondaire et gymnasial qui ne permettent pas en effet d'en donner une approche complète sinon même parfois conforme. Mais elle provient également, et ceci est plus intéressant, d'une certaine difficulté qu'a cette science, physique et humaine à la fois, à se situer par rapport aux autres branches du savoir.

Si l'on s'essaye à la définir, la géographie apparaît bien d'abord comme possédant un domaine propre : celui que constitue la mince mais vaste zone de contact qui existe entre les différentes sphères enveloppant notre planète. La préoccupation du géographe consiste à rechercher les interférences nombreuses, constantes, complexes, qui régissent les relations de la lithosphère avec l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'anthroposphère. Plus que toute autre discipline, la géographie s'intéresse aux relations de l'homme avec le milieu naturel, et également d'ailleurs aux modifications de celui-ci par celui-là. Elle est écologie. Elle appartient à la catégorie des sciences humaines autant qu'à celle des sciences naturelles.

Cela ne va pas, au demeurant, sans poser des problèmes délicats. Etendant son observation du minéral au spirituel, le géographe doit, d'un point de vue méthodologique, jouer sur deux registres différents : le comportement des eaux de ruissellement diffère sensiblement de celui de l'homme créateur des complexes urbains... Mais surtout, contraint de recourir conjointement à de multiples spécialités – de la géologie à la sociologie voire à la psychologie en passant par l'hydrologie, la météorologie, la botanique, l'histoire, l'économie politique etc..., – il se trouve placé devant un dilemme proprement tragique. Car s'il veut se tenir au courant de toutes ces branches de la connaissance et d'abord simplement s'y initier, il se condamne à la superficialité et se discrédite. S'il cherche, pour parer à ce dernier inconvénient, à se spécialiser, alors il s'ampute, il se nie lui-même puisque, par définition, son souci spécifique est de considérer l'interdépendance des différents phénomènes qui se manifestent à la surface du globe.

Mais la géographie ne se réduit pas à avoir un domaine, un domaine dont le trait original consiste à recouper les champs d'investigation de plusieurs disciplines. Elle est, tout autant, un regard qui localise toute chose, une problématique de l'espace.

Le géographe est celui qui sait « où se trouvent les mers, les fleuves, les villes, les montagnes et les déserts », celui qui repère l'emplacement de chaque détail du visage de la Terre. Il va également plus loin. Il étudie la distribution spatiale des phénomènes physiques ou humains considérés chacun séparément, et cherche à en expliquer l'irrégulière répartition. Et l'on touche là à un point majeur. Tous les faits (climatiques, topographiques, ... ethniques, économiques) constituent inévitablement, par leur groupement, des entités spatiales : les régions. Sans entrer dans les développements auxquels se prête cet aspect fondamental, disons qu'il est plusieurs manières d'appréhender la notion de région selon que l'on

s'attache à en définir surtout les facteurs, les modalités ou les conséquences. La perspective la plus couramment retenue, à l'heure actuelle, est celle qui oppose des espaces homogènes (du type région thermique, région montagneuse, région agricole, région industrielle... etc...) à des espaces polarisés (ou «fonctionnels»), organisés quant à eux autour de centres urbains.

Ce regard spatial du géographe présente plusieurs caractères. Il est objectif d'abord. Les limites d'un bassin hydrographique, le relevé des types de maisons ne dépendent pas de celui qui les établit. Mais il est subjectif aussi. L'adoption du critère ou des critères sur lesquels on s'appuie pour définir une articulation régionale dépend d'un choix personnel de l'observateur. Et trop souvent, certes, les géographes ont prêté le flanc à la critique quand ils se sont laissé aller à la jouissance mandarine de constructions abstraites, séduisantes pour l'esprit, mais décrochées des faits. Enfin ce regard, parce qu'il s'intéresse au présent, sectionne en quelque sorte le flux d'un monde en devenir. Pour être exhaustive, la vision géographique doit donc se tourner à la fois vers l'amont et vers l'aval: se faire historique et prospective. La géographie est science des possibles, c'est à dire des virtualités qui n'ont pas abouti, mais qui, d'autres hasards aidant, auraient pu voir le jour. Et comme chaque morceau de la surface terrestre équivaut à un champ de forces en mouvement, elle cherche à dégager par l'analyse ce qui, dans le monde d'aujourd'hui, est en puissance de se réaliser demain.

Il manquerait encore quelque chose d'essentiel à notre approche si nous nous en tenions aux lignes qui précèdent. Une idée sous-tend en effet toute démarche du géographe. Celle-ci: chaque portion de la planète est douée d'une originalité irréductible à celle de toute autre portion. Sans doute nous efforçons-nous d'établir des corrélations entre tous les phénomènes que nous étudions et de relever chaque indice déterministe. Mais ce n'est là qu'un premier temps. Un second mouvement nous porte à retrouver le spécifique des différents lieux et, en cela, nous nous reconnaissons une deuxième fois du même sang que les historiens. L'opposition entre géographie générale et géographie régionale, loin de signifier un schisme interne, s'inscrit au contraire dans une perspective dialectique de notre discipline.

A la base de cet axiome sur l'originalité de chaque endroit, il y a l'observation maintes fois répétée que les divers points de vue que nous appliquons à notre exégèse de l'espace terrestre ne coïncident pas, qu'ils se chevauchent au contraire inextricablement, et que la fidélité à ce qui nous entoure nous impose pourtant de n'en éliminer aucun. L'on peut considérer par exemple que, puisque chaque parcelle du paysage physique et humain est marquée par l'époque qui l'a façonnée, le manteau de notre globe porte l'empreinte d'âges et de rythmes de croissance multiples. Mais l'on peut – et l'on doit également – envisager la double tendance à l'uniformisation et à la différenciation qui affecte l'ensemble de notre planète: l'érosion nivelle les reliefs, les genres de vie tendent à se confondre sous l'effet de la technique..., et, simultanément, les contrastes s'accusent entre régions riches et régions pauvres, entre grandes et petites villes etc... Il convient en outre de tenir compte et des nombreux éléments qui contribuent à articuler l'espace: la topographie, le climat, l'hydrographie... les civilisations,

les activités économiques etc..., et les différents niveaux scalaires auxquels se manifeste cette articulation: plan local, plans micro-régional, régional, continental... La somme de toutes ces composantes confère à chaque localité des caractères qui lui sont propres.

Moins armée pour établir certaines corrélations que l'une ou l'autre des multiples disciplines auxquelles elle fait constamment appel, mais plus sensible qu'aucune d'elle à l'unicité de chaque fraction du globe, à la régionalisation en entités de tailles variables, comme à l'imbrication de toutes les enveloppes épidermiques de notre planète, la géographie pourrait se définir comme la science de l'organisation (telle qu'elle est, telle qu'elle pourrait être) de l'espace terrestre. Elle apporte à notre connaissance du réel une approche qu'elle est seule à fournir. Elle n'est donc vaine ni au plan du savoir pur, ni à celui de la construction d'une société plus humaine.

JEAN-LUC PIVETEAU

Institut de Géographie de l'Université de Fribourg (Suisse)

Weißer Mann auf schwarzem Grund **(Südafrikanische Reiseindrücke eines Mineralogen)**

Aus Anlaß einer Studienreise in die Südafrikanische Republik und nach Rhodesien wird über die geologische Struktur des Subkontinents, seine Lagerstätten, die klimatischen Verhältnisse und die sich daraus ergebenden Lebensbedingungen für die schwarze und weiße Bevölkerung berichtet. Die genannten Faktoren bilden den bestimmenden Hintergrund für die gegenwärtige soziologische Struktur. Da die Beobachtungen während einer wissenschaftlichen Forschungsreise gemacht wurden, sind sie lediglich als Eindrücke eines Europäers zu verstehen; denn die verwickelte Situation würde keine definitive Stellungnahme zulassen. An Hand von Lichtbildern werden einzelne Komplexe aufgezeigt.

Ausgangspunkt und erste Station war die Universität Kapstadt. Lebens- und Studienbedingungen des Kapgebietes werden ausschließlich von Engländern geprägt. An der 80 km entfernt liegenden Universität Stellenbosch wird dagegen nur in Afrikaans gelehrt; sie gilt als die Landesuniversität des Bevölkerungsteiles niederländischer Herkunft. Die liberale und demokratische Studentenschaft Kapstadts – ebenso wie die von Johannesburg – versucht, mit den ihr möglichen Mitteln, wie Umzügen und Protesten, die Zulassung eingeborener, d.h. schwarzer Studenten an den englisch sprechenden Universitäten zu erreichen. Diese Tendenzen stehen im Gegensatz zu der Kulturpolitik der Regierung, nach der es Universitäten für Weiße und Schwarze geben soll. Allerdings befinden sich die für den schwarzen Bevölkerungsteil (ca. 80 %) erst im Stadium des Entstehens.

Der südliche Teil des afrikanischen Kontinents besteht aus einem großen inneren Hochplateau – 40% des Gebietes liegen im Durchschnitt ~ 1300 m hoch – und aus einem verschieden breiten, im ganzen schmalen Küstenstreifen, der das

Plateau vom Meer trennt. Das Plateau stellt eine große Ebene dar, aus der einzelne Hügel und Berge emporragen. Weitaus die größten Teile des Landes nehmen Schiefer und Sandsteine der Kapschichten und der Karroo- (Kreide)-Formation ein, die einem uralten Sockel diskordant aufliegen.

Von Kapstadt aus konnten die bis 2000 m mächtigen Schichten von kontinentalen Sandsteinen und Schiefen mit marinen Fossilien des Unterdevons, aufgesucht und insbesondere der zwischen die beiden Serien intrudierte Kap-Granit mit seinen Kontaktbereichen studiert werden.

Der aus den verschiedensten Schichtgruppen aufgebaute Gesteinssockel hat präkambrisches Alter und ist wegen seiner reichen Bodenschätze gut erforscht. Das 7500 m mächtige, aus klastischen Gesteinen aufgebaute Witwatersrand-System ist wegen seiner Goldführung von besonderer Bedeutung.

Zu dem diskordant auflagernden Transvaal-System gehört der gewaltige in EW-Richtung 500 km lange und in NS-Richtung 250 km breite Eruptivkörper des Bushvelds, einer der bemerkenswertesten geologischen Komplexe der Welt, der mit der Vielfalt seiner Gesteinstypen den Geologen vor eine Reihe hochinteressanter, aber z.T. noch ungelöster Probleme stellt. Nicht weniger wichtig ist seine wirtschaftliche Bedeutung mit ungeheuren Reserven an Chrom, Eisen, Vanadium, Edelmetallen, Titan, Magnesit, Flußspat, Zinn und anderen Erzen. Wenn man die an anderen Orten vorkommenden Bodenschätze wie Diamant, Kupfer, Uranerze, Mangan, Asbest miteinbezieht, stellt Südafrika eines der reichsten Länder der Erde dar. Damit eng verbunden sind die gesellschaftlichen Spannungen zwischen Weißen (Unternehmer) und Schwarzen (Arbeiter), mit denen der Besucher im Lande konfrontiert wird. Einerseits stellt man fest, wie groß die Kluft der Lebensbedingungen ist, andererseits läßt sich nicht übersehen, daß von Seiten des Staates und der Unternehmer viel für die eingeborene Arbeiterschaft getan wird. Man versucht, sie seßhaft zu machen und siedelte sie z.B. in 21 Vorstädten, sogenannten townships, in der Umgebung von der Industriemetropole Johannesburg an. Dort wurden 12 Kliniken, 114 Schulen und 5 Hochschulen errichtet; die zu mietenden Häuschen sind billig und für Verkehrsmittel zu den Arbeitsstätten ist gesorgt. Diese Gründungen scheinen vielversprechende Anfänge in kultureller und sozialer Hinsicht zu sein, zumal wenn man die Lebensbedingungen der schwarzen Bevölkerung anderer afrikanischer Staaten damit vergleicht.

In dem ebenfalls geologisch interessanten und an Bodenschätzen (Kohle, Asbest, Gold, Chrom, Graphit) reichen Rhodesien versuchen die zahlenmäßig geringen Weißen (ca. 250 000 gegenüber ca. 4 Millionen Eingeborenen) Lebensstandard und Erziehung des schwarzen Bevölkerungsteils mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln zu heben. Dabei helfen europäische Religionsgemeinschaften durch Einrichtung und Unterhaltung von Schulen und Krankenhäusern tatkräftig mit. Abschließend seien die faszinierende Vegetation, die Naturschutzgebiete mit ihren Wildbeständen und die angenehmen klimatischen Bedingungen großer Teile der beiden besuchten Länder erwähnt.

PAULA HAHN-WEINHEIMER

Abteilung für Geochemie an der Technischen Hochschule, München

Les éléments de la prévision du temps

Grâce à la radio, aux journaux, à la télévision, la météorologie se fait chaque jour mieux connaître. De plus en plus nombreuses sont les professions qui ont recours à elle. Les agriculteurs, les hôteliers, les pilotes, les touristes attendent souvent ses prévisions avec anxiété. Certains d'entre eux voudraient même qu'elle modifie le temps à leur convenance et ne retiennent, de ce fait, que ses pronostics erronés; ils oublient vite ses succès, car ils ignorent les difficultés de la prévision. La télévision, en présentant d'une manière accessible à un très large public les conclusions d'une analyse très complexe contribue peut-être un peu à cette ingratitude.

La météorologie, qui apparaît aujourd'hui comme une science toute nouvelle, plonge ses racines bien loin dans le temps.

Si Aristote connaissait déjà la présence de l'eau dans l'atmosphère, ce n'est qu'avec Torricelli et Pascal que furent ouvertes les études météorologiques. Les notions physiques et chimiques indispensables ont été apportées par Gay Lussac, Mariotte, Laplace et Lavoisier. Mais c'est avec Le Verrier, en 1854, que naquit la météorologie moderne. C'est lui qui, le premier, étudia la trajectoire d'une tempête: celle qui anéantit la flotte française dans la mer Noire lors de la guerre de Crimée. Par la suite, grâce au télégraphe, il établit un réseau d'alerte sur l'Europe occidentale. Après lui, les météorologues se contentèrent d'analyser statistiques et moyennes. Ce n'est qu'avec la guerre 1914/18 et le développement de l'aviation qu'on ressortit, pour le développer, le «plan Le Verrier».

1927, date importante, vit le premier radiosondage atmosphérique effectué par le Français Bureau. La transmission des renseignements par radio permit un bond en avant, et aujourd'hui, le radar, la télévision, les satellites font de la météorologie une science qui avance à grands pas.

A. L'objectif de la météorologie

L'objectif essentiel de la météorologie est la prévision du temps à courte, moyenne ou longue échéance. Pour réussir dans cette entreprise, elle doit: étudier les phénomènes qui l'intéressent, suivre leur évolution,

les expliquer, les décrire et (qui sait?) peut-être pourra-t-elle, un jour, les modifier.

Il importe donc pour le météorologue de bien connaître le milieu propre aux phénomènes météorologiques et de s'attacher surtout aux facteurs déterminant l'évolution du temps:

La pression atmosphérique

la température

l'humidité et les précipitations

l'étude des masses d'air.

1. *La pression atmosphérique* mesurée en mm. de mercure ou en millibares (3/4 de mm.) nous renseigne sur la densité d'une masse d'air. Elle varie selon

Un nuage est constitué par des sphérules d'eau ou des cristaux de glace inférieurs à 0,02 mm. de diamètre maintenus dans l'atmosphère par de très faibles mouvements ascendants. Si le diamètre de la gouttelette d'eau atteint 0,1 mm., la vitesse de chute (environ 1 m/s) est trop grande, les courants ascendants ne peuvent l'annuler, et il pleut.

Les pluies qui tombent dans notre pays proviennent essentiellement des perturbations qui circulent entre les principales masses d'air qui tour à tour recouvrent nos régions (air tropical, polaire ou arctique).

On appelle *air polaire* des masses d'air froides ou très froides originaires de 60° ou 70° de latitude.

Quand cet air s'avance vers le Sud, il devient de plus en plus instable parce qu'il se réchauffe par la base. Son gradient s'élève de 0,6° à 0,9°. Il n'apporte que peu de précipitations, et nous vaut une atmosphère très claire et un beau temps éphémère en été, et une brume plus ou moins épaisse en hiver.

L'air tropical est originaire des environ du 30° de latitude; il est chaud et sec ou chaud et humide, selon qu'il est continental ou océanique.

Quand il se déplace vers le Nord, il devient de plus en plus stable. Son gradient s'abaisse aux basses altitudes de 0,6° à 0,3°. Il nous vaut en été le beau temps durable et un ciel brumeux.

L'air arctique, originaire de l'Océan glacial arctique, est très froid et devient très instable s'il atteint nos régions. Il nous apporte une atmosphère limpide, mais provoque fréquemment de violentes tempêtes.

Ces masses d'air sont séparées entre elles par des surfaces de discontinuité: les fronts polaires, tropicaux ou arctiques (fig. 2).

L'air tropical chaud est animé d'un mouvement général SW/NE et l'air polaire d'un mouvement NE/SW.

De ces mouvements généraux et de la différence de densité des deux masses d'air en contact naissent des ondulations le long du front (fig. 3).

L'air froid, plus dense, se glisse sous l'air chaud, le soulève et engendre une

5. *Perturbation*, appelée aussi cyclone, tourbillon ou tout simplement centre de basse pression.

Le déplacement général de l'air chaud en direction de l'E/NE entraîne l'ondulation dans la même direction. Le contraste thermique avec l'air plus froid qui l'entoure à l'W, au N et à l'E, et bientôt au Sud par le vent, fait que la zone couverte par l'air chaud aura bientôt une pression plus faible et deviendra un centre de basse pression.

L'air froid sis à l'Est étant plus dense recule avec une vitesse inférieure à celle de l'air chaud qui est soulevé et voit ainsi sa zone se rétrécir au niveau du sol. Quand il ne touche plus le sol, il y a occlusion (fig. 7).

Il est possible qu'une deuxième, voire une troisième onde froide suive la première, apportant autant de refroidissements successifs (fig. 4).

La structure d'une perturbation cyclonique est bien connue et varie peu d'un tourbillon à l'autre. La fig. 3 montre ce qui se passe au niveau du sol sur une région traversée par une dépression. La fig. 6 montre ce qui se passe en altitude au travers de la basse pression. La fig. 5 nous laisse deviner l'importance qu'aura

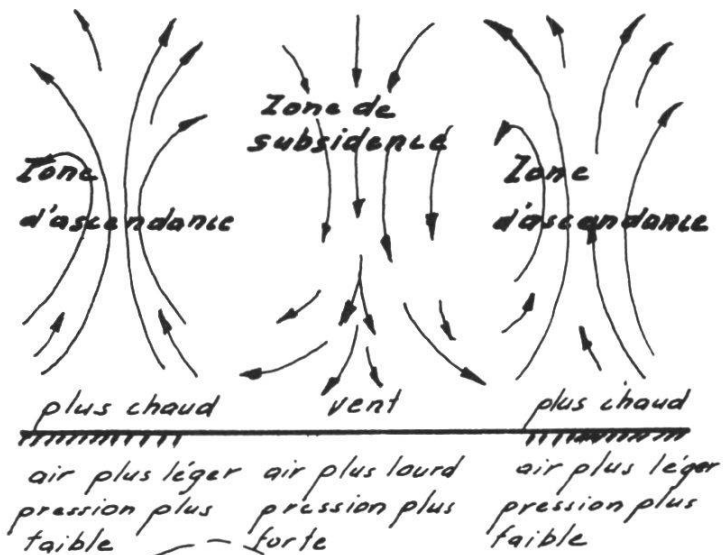
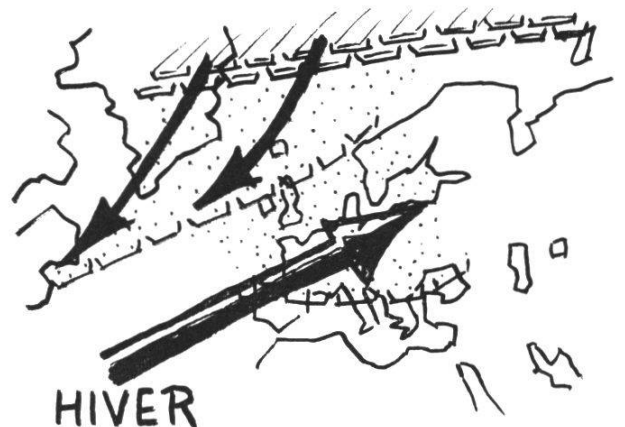
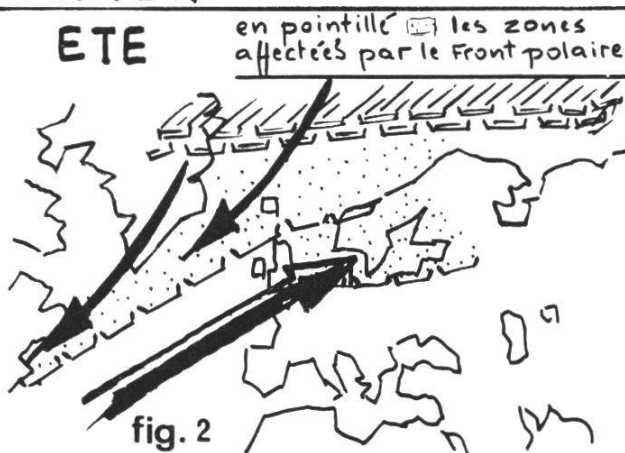


fig. 1

Naissance d'une perturbation sur le front polaire. fig. 3



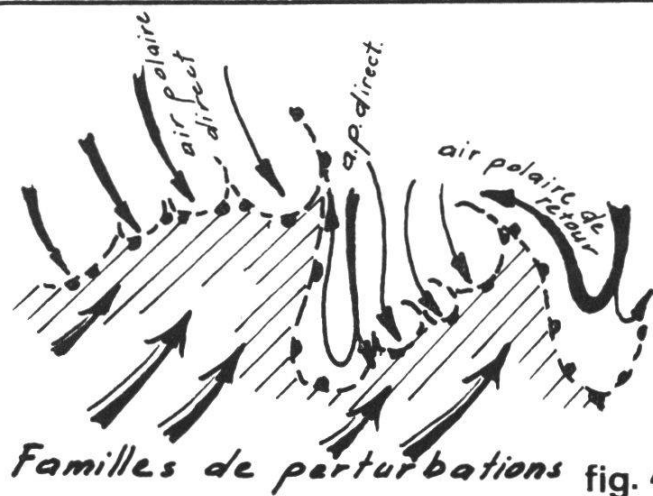
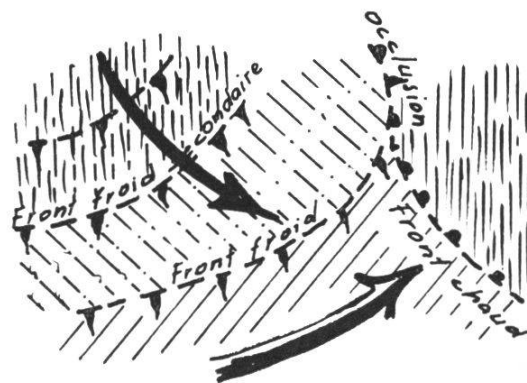
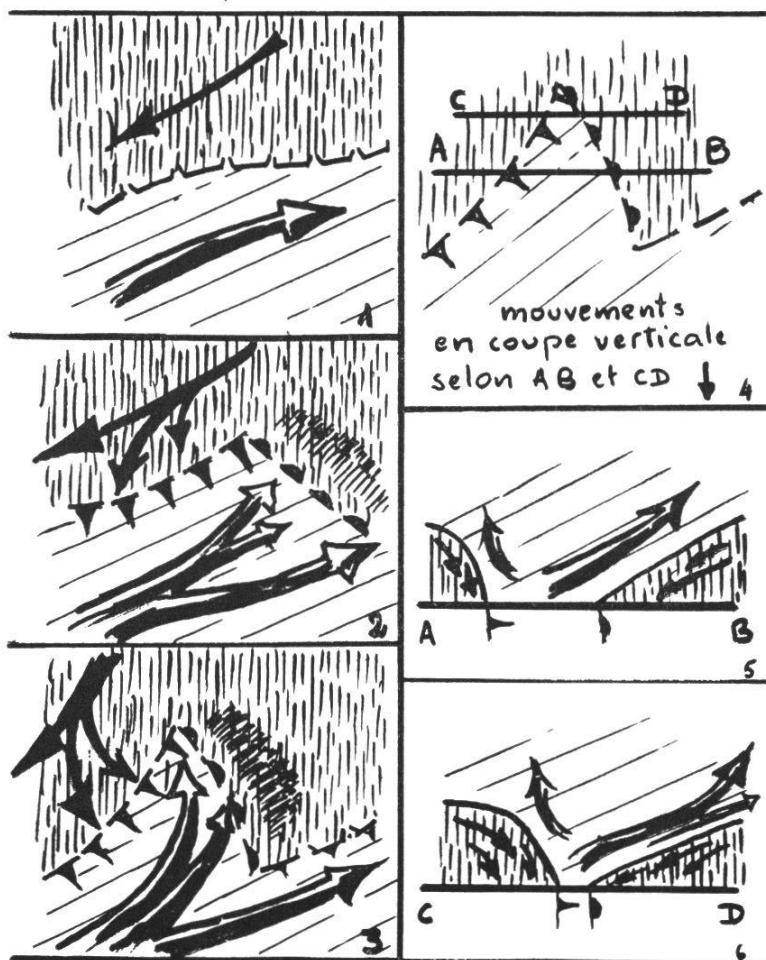
HIVER



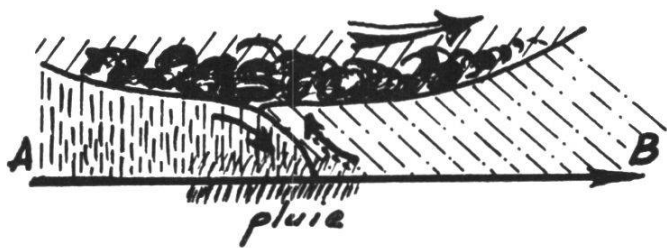
ETE

en pointillé les zones affectées par le front polaire

fig. 2



Familles de perturbations fig. 4



Hauteur barométrique fig. 5

Légendes

- Front froid
- Front chaud
- Front polaire
- Front arctique
- zone affectée par le front polaire
- air chaud
- air froid
- air très froid
- zone de précipitations

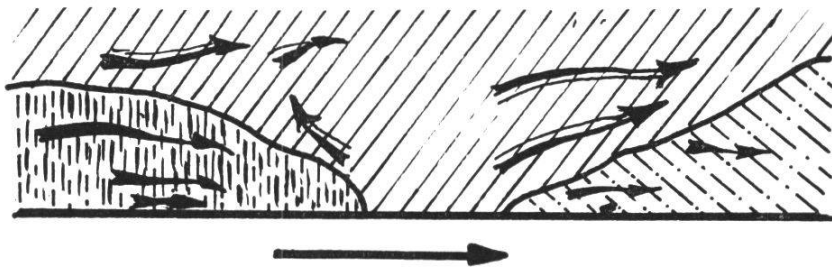


fig. 6

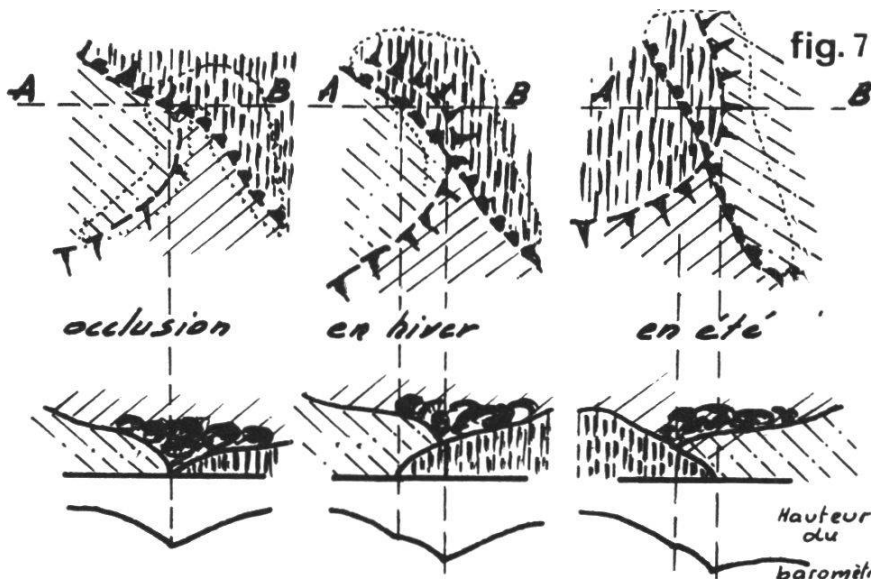


fig. 7

- direction des vents chauds
- direction des vents froids

Hauteur du baromètre

pour le météorologue la détermination de la trajectoire probable du centre de la basse pression. Ce mouvement dépend surtout de la répartition générale des Pressions.

En pays plat, cette prévision est moins difficile. Dans nos régions de montagnes, il faut compter avec le relief qui peut dévier, retarder, arrêter ou modifier la structure de la perturbation.

L'influence du relief est surtout marquée sur les lignes de grains, c'est-à-dire au passage des fronts froids.

Un cyclone ne provoque pas les mêmes phénomènes en hiver qu'en été. L'air froid qui est à l'avant de la dépression et celui qui la suit sont généralement de températures différentes. L'évolution du temps au passage du cyclone, et surtout après son passage, dépendra des caractères thermiques de cette deuxième masse (la fig. 7 montre les deux possibilités selon les saisons).

En conséquence, après le passage d'une dépression, nous avons ordinairement un réchauffement en hiver, et un rafraîchissement en été.

Ces éléments responsables du temps qu'il fait et du temps qu'il fera étant déterminés, une tâche essentielle des services météorologiques sera de récolter les documents chiffrés.

B. L'efficacité de la prévision

L'efficacité de la prévision sera fonction de la précision et de l'abondance des renseignements obtenus, ainsi que de la rapidité avec laquelle ils seront transmis et utilisés.

1. *La Diffusion* des renseignements est fort bien organisée en Europe et aux Etats-Unis; une collaboration très étroite joue entre la plupart des Etats. Les documents sont échangés par «télèx»: 20' suffisent pour l'expédition d'un bulletin journalier ou pour la réception d'une photo du satellite ESSA.

Pour notre pays, Cointrin est le centre collecteur des renseignements et aussi, depuis peu, le centre de la prévision à court terme. L'Institut Suisse de météorologie à Zurich se réserve la prévision à moyenne et à longue échéance.

Les renseignements nécessaires au météorologue viennent de partout, en Europe et aux Etats-Unis. Plusieurs laboratoires se trouvent en plein Océan, sur des îles ou des bateaux météorologiques, désignés par les lettres A B C...M. Ce réseau donne des renseignements sur:

la nébulosité; la pression et ses variations récentes; les vents, leur direction et leur force; la température et les précipitations; les fronts de masses d'air.

L'aviation contribue aussi à la récolte des documents généraux, surtout au repérage des fronts. D'autre part, sur terre, chaque poste se trouve au centre d'un réseau plus dense, aux dimensions nationales.

L'observation au sol est toutefois insuffisante; c'est pourquoi un autre réseau s'ajoute au premier: celui des sondages atmosphériques qui donnent une idée précise de l'état atmosphérique jusqu'au-delà de 12 km, qui renseignent sur les vents, leur force, leur direction, et qui signalent les variations de la pression, de la température et de l'humidité relative.

Cette observation en altitude est nécessaire pour déterminer l'importance des

centres d'action atmosphérique (haute et basse pressions). En effet, une haute pression froide continentale peut, en hiver, au-dessus de 4000 mètres, être une zone dépressionnaire et par conséquent attirer de l'air océanique vers le continent alors qu'au sol cela paraît impossible.

Les renseignements étant rassemblés, météorologues et dessinateurs procèdent à l'établissement du Bulletin météorologique journalier, publié par les soins de l'I.S.M.Z. Ce bulletin comporte une carte au sol et une au niveau de 500 mb (env. 5 km). Les météorologues en établissent encore, pour leur usage, une à 800 mb, et une à 200 mb). Un colloque les réunit ensuite, duquel sortira la prévision.

Actuellement (depuis janvier dernier) les photos prises par le satellite *Essa* et diffusées à l'intention des pays européens sont également utilisées pour la formulation définitive de la Prévision. Elles permettent surtout de repérer les lignes frontales perturbées.

La multiplication des photos prises par les satellites météorologiques et surtout l'habileté croissante des météorologues dans leur lecture nous vaudront sans doute, dans un proche avenir, une amélioration importante des prévisions et, espérons-le, un intérêt croissant des jeunes chercheurs pour cette discipline scientifique toute nouvelle.

MICHEL ROTEN

Institut de Géographie de l'Université de Fribourg (Suisse)

Aspect actuel des recherches sur l'origine des systèmes biologiques

Le problème de l'origine de la vie est un sujet bien trop vaste pour être traité dans le cadre restreint d'une conférence. Aussi, nous tâcherons de situer la question en considérant, dans une première partie, les différentes conceptions qui ont conduit à sa formulation actuelle, les confirmations expérimentales de certaines théories qui ont été proposées, enfin, dans la dernière partie, nous insisterons sur les divers domaines dans lesquels se poursuivent actuellement les recherches consacrées à l'un des plus grands problèmes qui soit posé à l'esprit humain.

I— Situation de la biogénèse sur le plan historique

Trois noms marquent, avant notre siècle, les étapes fondamentales de la progression des idées sur l'origine de la vie: *Aristote*, *Pasteur*, *Darwin*.

— Selon *Aristote*, les êtres vivants naissent en permanence de la matière inerte par génération spontanée: vermisseaux à partir de boues en décomposition ou mouches à partir de viandes avariées. Il fallut attendre le 17^e siècle et les expériences de Reddi pour que l'on se rende compte que la théorie de la génération spontanée reposait sur de grossières erreurs d'observation.

— *Pasteur* démontra de manière rigoureuse en 1862 que les microorganismes

que l'on croyait voir naître dans les bouillons de culture provenaient en réalité de l'air ambiant dans lequel ils pullulaient. Les germes étaient apportés dans les milieux nutritifs, sur les ustensiles ou les appareils dont se servaient les expérimentateurs.

– Presque à la même époque, en 1859, *Charles Darwin* publiait son fameux ouvrage sur l'origine des espèces. Selon la théorie de l'évolution, les espèces vivantes complexes qui existent actuellement sur la terre proviennent, par mutations et sélection naturelle, d'organismes plus simples, ancêtres du monde vivant. L'origine de la vie était donc à rechercher parmi les êtres les plus rudimentaires qui peuplèrent notre planète dans son lointain passé. Comme les expériences de *Pasteur* conduisaient de manière quasi inéluctable à la conclusion que «la vie ne peut sortir que d'une vie préexistante», on se trouvait ramené à l'origine de cette «première cellule» dont serait sorti tout le règne vivant.

II– Les théories de l'origine de la vie et l'approche expérimentale du problème

Trois théories principales se trouvaient en présence dans la première moitié du 20^e siècle pour tenter d'expliquer l'origine de la vie: la panspermie, le hasard, l'évolution.

– *La Panspermie.* – Selon de nombreux auteurs, la «première cellule», bien trop complexe pour naître sur Terre par génération spontanée, avait du être amenée sur notre planète par des météorites porteurs de germes résistants ou par des poussières cosmiques contenant des spores et mues dans l'espace par la pression des radiations (*Arrhénius*). – Cette théorie ne faisait évidemment qu'éluder le problème de l'apparition de la vie en n'importe quel point de l'univers.

– *Le hasard.* – Selon cette conception encore en faveur aujourd'hui, une première molécule géante auto-reproductible ou un premier virus se seraient constitués dans les océans primitifs à la faveur d'un arrangement fortuit entre certains composés chimiques se trouvant dans les proportions requises. Un tel hasard, si miraculeux, permettrait d'expliquer pourquoi la vie n'est apparue qu'une seule fois sur la Terre. – En «laissant sa chance au hasard», c'est-à-dire en attendant suffisamment longtemps, «l'impossible devient possible, le possible probable, et le probable virtuellement certain» (*G. Wald*). Mais, comme la panspermie, le hasard escamote le véritable problème de l'origine de la vie. L'évolution de la matière organique est étroitement liée à l'évolution sidérale et géochimique de la Terre et apparaît par conséquent comme un phénomène déterminé que l'on doit pouvoir étudier dans le cadre du laboratoire, et non comme un événement improbable, «imprévisible avant, injustifiable après» et indépendant de l'espace et du temps.

– *L'Evolution.* – Avec les progrès de l'astrophysique, de la géochimie, de la biochimie, il est apparu à de nombreux auteurs de la première moitié de ce siècle que le problème de l'origine de la vie ne pouvait se concevoir qu'étroitement lié à l'évolution de la matière organique abiotique à la surface de la terre primitive. Cependant, pour que la vie puisse apparaître, à la suite d'une telle évolution, il fallait expliquer l'origine abiotique des principaux constituants

organiques qui composent aujourd'hui les êtres vivants (protéines, acides nucléiques, sucres, graisses), et en l'absence desquels aucun organisme ne pouvait se former. On se trouvait enfermé dans un véritable cercle vicieux : comment expliquer l'origine des molécules organiques en l'absence de la vie, puisqu'aujourd'hui, de tels composés sont exclusivement fabriqués par des êtres vivants ?

C'est, en grande partie, grâce au biochimiste soviétique *A. I. Oparin* qu'il fut possible de sortir d'un tel cercle vicieux. Ses théories, exposées pour la première fois en 1924, reprises en 1938 et constamment remises à jour depuis, serviront de cadre général à toute la suite. C'est dans cette optique que sont effectuées la plupart des expériences que nous envisagerons plus loin.

Première hypothèse – L'atmosphère entourant la terre primitive était probablement très différente de celle dans laquelle nous vivons aujourd'hui : en particulier, elle ne contenait pas d'oxygène ou d'azote, mais du méthane, de l'ammoniac, de la vapeur d'eau et de l'hydrogène. Dans cette atmosphère réductrice et sous l'effet des radiations ultra-violettes intenses provenant du soleil, une grande quantité de substances organiques *abiotiques* ont pu se former.

2^e hypothèse. – Ces composés organiques se sont accumulés, au cours d'immenses durées, dans les océans primitifs en constituant une sorte de milieu de culture, riche en matières organiques qui servirent d'aliments aux premiers systèmes hétérotrophes («soupe chaude primitive»).

3^e hypothèse. – Cette masse diffuse de matière organique a pu se concentrer localement et s'agglomérer en formant des unités individuelles, distinctes du milieu environnant, dont elles étaient séparées par une membrane rudimentaire. *Oparin* a particulièrement étudié la formation de *coacervats* en tant que modèles de systèmes prébiologiques. Les systèmes polymacromoléculaires complexes, capables d'évoluer dans le milieu primitif, sont généralement appelés des *protobiontes*.

4^e hypothèse. – Ces protobiontes ont pu évoluer et se complexifier sous l'effet de la sélection naturelle qui agissait à ce niveau par un mécanisme de tout ou rien : seuls les systèmes possédant les structures et les mécanismes chimiques *capables d'assurer leur propre conservation* duraient et évoluaient, tandis que les autres étaient détruits et ne jouaient plus aucun rôle dans la suite de l'évolution.

De telles hypothèses, si fécondes, ne tardèrent pas à être confirmées par les expérimentateurs. En 1953, *S. L. Miller*, élève de *H. C. Urey*, Prix Nobel de Chimie, démontra, à l'aide d'un appareil très simple dans lequel il recréa les conditions de la terre primitive, que l'on pouvait assez facilement obtenir des acides aminés (constituants essentiels des protéines, matériau fondamental des êtres vivants) en faisant éclater des étincelles de 60 000 volts dans une «atmosphère primitive» composée de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et d'hydrogène. *Miller* ouvrit la voie à toutes les synthèses abiotiques ultérieures de molécules organiques d'intérêt biologique, réalisées par simulation des conditions de la terre primitive. Il démontra que l'*évolution chimique prébiologique*, postulée par *Oparin*, pouvait, dans une certaine mesure, être expérimentalement reconstituée en laboratoire.

Les recherches se poursuivent actuellement dans quatre voies principales.

1^o — *Synthèses abiotiques de molécules et de macromolécules organiques d'intérêt biologique.* — Depuis *Miller*, de nombreuses équipes de chercheurs se sont attaqués à cette question. Ils ont fait varier les conditions expérimentales, utilisant, en plus des décharges électriques, des radiations ultra-violettes, des radiations ionisantes produites par un cyclotron, de l'énergie thermique, etc... On peut considérer, en 1967, que la plupart des biomolécules jouant un rôle important chez les êtres vivants ont pu être synthétisées dans des conditions abiotiques: Acides aminés, hydroxy acides, urée, ribose, désoxyriboses (sucres, constituants de l'A.R.N. et de l'A.D.N.), acides gras; bases nucléiques, telles que l'adénine, l'uracil, la guanine; nucléosides, nucléotides, polynucléotides; peptides, polypeptides; porphyrines... De nombreux chercheurs, parmi lesquels il faut citer *M. Calvin* et son équipe de Berkeley, *S.W. Fox* de l'Université de Miami, *J. Oro* de l'Université de Houston, *C. Ponnamperna* de la N.A.S.A., *C. Schramm* du Max Plank-Institut, *L.E. Orgel* du Salk Institute de San Diego, ont attaché leur nom à ces synthèses abiotiques qui permettent de confirmer la théorie de l'évolution chimique prébiologique.

Certains points se dégagent d'une telle masse de résultats expérimentaux. En particulier, il faut signaler le rôle primordial joué par l'acide cyanhydrique (HCN) dans les synthèses qui viennent d'être rapidement passées en revue. L'acide cyanhydrique peut se polymériser et conduire à des molécules cycliques, précurseurs de certaines bases nucléiques; ou linéaires, précurseurs de polypeptides. Cependant, l'origine des protéines est encore très mal connue. Certains auteurs, comme *S. W. Fox*, ont obtenu des *protéinoïdes* par chauffage à 170° d'un mélange sec d'acides aminés, dont certains (l'acide glutamique et l'acide aspartique) se trouvaient en plus forte proportion que d'autres. En refroidissant une solution de ces protéinoïdes dans de l'eau légèrement salée, *Fox* a constaté la formation d'une très grande quantité de petites unités sphériques d'environ 2 microns de diamètre, ressemblant à des cocci, et qu'il a appelées *microsphères*. Ces globules sphériques peuvent servir de modèles dans l'étude des systèmes pseudo-biologiques.

2^o — *Recherche de trace de vie fossile dans les sédiments anciens.* — Au lieu de synthétiser des molécules d'intérêt biologique, d'autres chercheurs tentent de retrouver des traces effectives de ces molécules, témoins des processus biologiques, dans des sédiments précambriens. Certains hydrocarbures (pristane, phytane) considérés comme des molécules fossiles ou des «marqueurs biologiques» (*Calvin*) ont pu être isolés dans des sédiments âgés de plus de 2 milliards d'années. Mais il est encore plus intéressant de rechercher dans ces sédiments des microfossiles de bactéries ou d'algues, vestiges d'une vie primitive. Grâce aux travaux de *E. S. Barghoorn* de l'Université de Harvard, on sait aujourd'hui que les plus anciens fossiles connus sont, jusqu'à présent, des bactéries et des algues unicellulaires retrouvées dans des roches sédimentaires provenant du Fig. Tree System de Swaziland en Afrique du Sud, et qui seraient âgées

de 3,1 milliard d'années. Si ces découvertes sont confirmées (on ne peut exclure en effet la contamination, toujours possible), des formes vivantes déjà complexes, telles que des bactéries ou des algues, seraient apparues 1,5 milliard d'années «seulement» après la formation de la terre. (On considère généralement que la terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années.)

3^o – *Cosmochimie organique*. – Ce terme a été proposé par J. Oro pour désigner la discipline qui s'efforce d'étudier les molécules organiques et les réactions de chimie organique dans l'univers. L'observation spectroscopique des planètes du système solaire, des comètes ou l'analyse des météorites permettent de mieux comprendre les processus de formation des composés organiques dans l'univers et par là d'en déduire les conditions de formation de tels composés lors de la constitution de la terre à partir du nuage préplanétaire. On considère ainsi que sur Jupiter (atmosphère de méthane et d'ammoniac) ou sur Vénus, des synthèses abiotiques de molécules organiques relativement complexes pourraient être actuellement en train de s'effectuer. Ce qui justifie l'intérêt porté à ces planètes par les responsables de l'astronautique. Par ailleurs, l'analyse d'un échantillon du sol lunaire que doivent rapporter les astronautes du projet Appolo fera, sans aucun doute, progresser de manière considérable les recherches sur l'origine de la vie.

En effet, si notre satellite a été émis par la terre ou même capturé par notre planète, comme le pense H. C. Urey, il est possible que des quantités importantes de matériaux aient pu être transportés sur la lune au cours de ce cataclysm. Ces matériaux ont pu, selon Urey, contenir des matières organiques prébiologiques ou même des microfossiles, vestiges d'une vie très rudimentaire.

IV – Recherches d'ordre théorique

Des données récentes, d'ordre théorique et dues en grande partie à I. Prigogine et ses collaborateurs de l'Université de Bruxelles, viennent éclairer d'un jour nouveau le problème de l'apparition de structures improbables, telles que les structures biologiques, dans un milieu soumis à divers types de contraintes physico-chimiques.

La thermodynamique classique, dont découlent les lois des réactions chimiques, considère exclusivement des processus se réalisant à l'intérieur d'un système isolé, au sein duquel toute réaction spontanée, hors d'équilibre, ne peut se produire que dans la direction de la plus grande entropie ou du plus grand désordre. La thermodynamique des processus irréversibles considère, par contre, des réactions se produisant au sein de *systèmes ouverts*, c'est-à-dire de systèmes échangeant en permanence matière et énergie avec le monde environnant. Dans de tels systèmes, les lois classiques, permettant d'interpréter la formation des structures les plus probables ou les plus stables – et dans le cadre desquelles la formation de macromolécules complexes ou de systèmes biologiques élémentaires apparaissait comme un véritable scandale thermodynamique (C. E. Guye, *Lecomte du Nouy*) –, ne peuvent plus s'appliquer.

Grâce au flux d'énergie qui les traverse, les systèmes ouverts peuvent maintenir leur entropie interne à un niveau relativement bas, malgré l'accroissement irréversible de l'entropie de l'environnement. Ces systèmes pourront même évoluer vers des états de plus haute complexité. Considérons deux exemples de systèmes ouverts: la terre primitive et une gouttelette de coacervat.

La terre primitive, entourée de son atmosphère, est baignée dans un flux d'énergie «noble» provenant du soleil. Cette énergie est dégradée en chaleur que la terre rayonne dans l'espace environnant. Mais, à la surface du globe, des molécules complexes pourront se former au profit de ce flux continu d'énergie et se complexifier davantage en agissant, par exemple, comme catalyseurs dans les chaînes de réaction qui conduisent à *leur propre formation*. Par autocatalyse ou catalyse croisée, certains types de molécules organiques pourront s'imposer à la suite de l'évolution de la matière organique et par conséquent *s'auto-sélectionner*.

Il en est de même de l'apparition des structures «improbables» (dans le cadre de la thermodynamique classique) et hautement organisées, telles que les membranes périphériques des gouttelettes de coacervats. Un coacervat est un système ouvert. Des substances organiques, riches en énergie, peuvent pénétrer dans la gouttelette et libérer leur énergie par relaxation; cette énergie chimique pourra se coupler avec des réactions de synthèse, conduisant par exemple à la régénération de la membrane. Le coacervat acquiert ainsi un certain avantage évolutif.

La thermodynamique des systèmes ouverts permet ainsi d'expliquer la formation de *structures* et l'apparition de *fonctions* jadis considérées comme allant à l'encontre du deuxième principe de la thermodynamique.

Conclusion

On peut considérer à l'heure actuelle que deux voies complémentaires, mais traduisant malgré tout deux «philosophies» fondamentalement différentes, se dessinent parmi les chercheurs qui se préoccupent de l'origine de la vie.

- Les chimistes, surtout, cherchent à fabriquer des produits d'intérêt biologique dans des conditions abiotiques, mettant ainsi l'accent sur l'aspect purement *structurel* de la vie.

- Tandis que les physico-chimistes et les thermodynamiciens cherchent à comprendre les *processus fonctionnels* les plus élémentaires qui ont permis, sur un plan énergétique, l'apparition des systèmes biologiques.

Pour les uns, lorsque l'on aura compris comment une macromolécule d'acide nucléique a pu apparaître dans le milieu primitif et se coupler par catalyse croisée avec la synthèse de macromolécules protéiques, on aura, en grande partie, résolu le problème de l'origine de la vie. En effet, l'association acide nucléique-protéines est généralement considérée comme le système le plus rudimentaire sur lequel peuvent jouer les mutations et la sélection naturelle.

Pour les autres, des processus élémentaires utilisant, comme aujourd'hui, l'énergie solaire, l'eau, des catalyseurs d'oxydo-réduction (tels que des ions

métalliques) représentent la base énergétique fondamentale des *fonctions* vitales, même les plus primitives.

Pourquoi la vie n'est-elle apparue qu'une seule fois sur la terre et pourquoi ne continue-t-elle pas de naître aujourd'hui sous nos yeux ? Comme l'a suggéré *Darwin*, puis *Oparin*, la vie détruit irréversiblement les conditions de sa propre apparition en modifiant le milieu dans lequel elle a pris naissance. Ainsi, des protobiontes évoluant lentement dans les océans seraient aujourd'hui inconcevables, car ils seraient détruits par les êtres vivants existants, avant même de parvenir à un état de complexité compatible avec les fonctions vitales les plus élémentaires.

La théorie de l'évolution chimique prébiologique permet de raccorder l'évolution sidérale et géochimique de notre planète à l'évolution biologique et humaine, au cours de laquelle sont apparus des êtres suffisamment curieux pour se pencher un jour sur le mystère de leurs origines.

JOËL DE ROSNAY

Attaché de recherche ENSPCI et Institut Pasteur, Paris



Installations électriques en tous genres

Appareils électriques

des meilleures marques

Concession « B » des téléphones

Renseignements et devis sans engagement

ENTREPRISES ÉLECTRIQUES FRIBOURGEOISES