

605.

INSTITUTO DE INVESTIGACION DE RECURSOS MINERALES
"CORFO"

INVENTAIRE DES RESSOURCES MINERALES

METHODES PERMETTANT DE LE REALISER

Raoul Giret



SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
I. INTERET DE L'INVENTAIRE DES RESSOURCES MINERALES	<p>1. — Le caractère stratégique des substances minérales perturbe l'évolution de leur consommation. Un inventaire minier peut permettre de faire face aux irrégularités du développement de cette consommation.....</p> <p>2. — La notion de gisement exploitable est étroitement liée à la conjoncture économique régionale et mondiale. L'inventaire des ressources minières d'un pays aide son gouvernement à faire face aux variations de cette conjoncture.....</p> <p>3. — Influence économique régionale d'une exploitation minière, son interférence sur l'exploitabilité d'un gisement...</p> <p>4. — Intérêt politique de l'inventaire minier d'un pays neuf.</p> <p>5. — Intérêt politique de l'inventaire minier des pays industrialisés.....</p> <p>6. — L'accroissement des besoins mondiaux justifie un inventaire minier généralisé.....</p>	<p>3</p> <p>4</p> <p>5</p> <p>5</p> <p>6</p> <p>7</p>
II. ETAPES DE LA REALISATION DE L'INVENTAIRE MINIER	<p>1. — Etapes de la réalisation de l'inventaire minier.....</p> <p>2. — Modalités de l'exploration.....</p>	<p>9</p> <p>11</p>
III. METHODES D'EXPLORATION	<p>1. — Géologie régionale et photogéologie.....</p> <p>2. — Géophysique aéroportée</p> <p>3. — Magnétisme aérien</p> <p>4. — Radiométrie aéroportée</p> <p>5. — Electromagnétisme aéroporté.....</p>	<p>15</p> <p>15</p> <p>16</p> <p>17</p> <p>18</p>
IV. PROGRAMME TYPE D'EXPLORATION MINIERE	<p>1. — Première phase : Exploration régionale.....</p> <p>2. — Deuxième phase : Interprétation et choix des zones de détail</p> <p>3. — Troisième phase : Etude de détail.....</p> <p>a) Méthodes aéroportées et héliportées</p> <p>b) Géophysique (et géochimie) au sol</p>	<p>19</p> <p>20</p> <p>21</p> <p>21</p> <p>22</p>

INTRODUCTION

Dans les quinze années qui se sont écoulées depuis la fin de la dernière guerre mondiale, nous avons assisté au développement très rapide de nombreuses techniques. Les découvertes liées à l'énergie atomique, aux recherches spatiales sont suffisamment spectaculaires pour avoir retenu l'attention générale. Il n'en est pas de même des techniques qui permettent d'avoir une meilleure connaissance du sol et du sous-sol de notre planète.

Les publications de toute nature sur la situation des pays sous-développés sont nombreuses qui conseillent la mise en œuvre de « plans » de développement des divers pays d'Asie, d'Afrique, d'Amérique du Sud auxquels elles se rapportent. Mais peut-on vraiment envisager de mettre en valeur les richesses d'un pays avant d'en avoir fait l'inventaire ? De la qualité de cet inventaire dépend la valeur du plan qui doit avoir des bases scientifiques objectives.

Plusieurs techniques se sont développées depuis 1945 qui permettent de faire maintenant un inventaire objectif. Leur amélioration constante, l'apparition de nouvelles méthodes permettent d'espérer que dans un proche avenir il sera possible de connaître les ressources principales d'un pays dans tous les domaines : minier, hydraulique, agricole, forestier.

Depuis la dernière guerre il est généralement admis que la cartographie

systématique d'un pays soit nécessaire à sa mise en valeur.

Pendant cette guerre les théâtres d'opérations militaires éventuels furent couverts de photographies aériennes prises à haute altitude, grâce auxquelles on prépara les cartes dont furent dotées toutes les unités qui opérèrent ultérieurement dans la région.

La paix revenue, on exécuta des couvertures photographiques dans de meilleures conditions techniques. Ces photographies ont permis d'établir des cartes précises avec une main-d'œuvre plus réduite que celle nécessaire pour faire les mêmes cartes avec les méthodes antérieures. Une partie importante du travail est faite au bureau, ce qui accélère et facilite le travail et réduit son prix de revient.

L'amélioration régulière des méthodes employées réduit toujours davantage le travail de terrain et le prix de revient, en augmentant le rendement par opérateur, la rapidité d'exécution et la précision.

Les besoins cartographiques des militaires ont servi la photogrammétrie techniquement et psychologiquement en en familiarisant l'emploi.

Les découvertes de pétrole faites récemment au Sahara Algérien furent trop souvent considérées comme l'effet de la chance des chercheurs français. Mais c'est, en fait, l'application systématique de méthodes d'exploration géophysiques qui permit la découverte d'importants gisements de pétrole que rien ne signalait en surface.

Peut-on transposer ces méthodes aux gisements miniers ? Leur faible dimension exige une telle densité de mesures que les méthodes géophysiques utilisées dans les recherches pétrolières ne sont pas

applicables à l'exploration minière de grandes surfaces en raison de leur prix de revient. La Géophysique est depuis plusieurs décades appliquée avec succès à des problèmes miniers limités en surface, mais seules les méthodes aériennes récentes ont les caractères extensifs et économiques qui conviennent à l'exploration de vastes surfaces.

Les méthodes de géophysique aéroportée mises au point au cours des deux dernières décades bénéficièrent de recherches faites à des fins militaires. Le magnétomètre aéroporté fut développé pour la chasse aux sous-marins avant d'être appliqué aux recherches pétrolières et minières. Le caractère stratégique de la recherche de l'uranium contribua au développement des scintillomètres.

Ces méthodes récentes en plein essor sont peu connues et seuls quelques spécialistes réalisent ce que leur application rationnelle et systématique pourrait apporter au développement de l'économie minière, tant des pays neufs que des pays industrialisés.

Nous avons essayé de montrer l'intérêt présenté par l'inventaire des ressources minérales d'un pays et indiqué rapidement les méthodes permettant de réaliser cet inventaire en insistant plus particulièrement sur les méthodes aériennes qui sont habituellement moins connues.

Ces techniques sont jeunes et nous pouvons espérer que de nouveaux instruments seront mis au point au cours des années à venir qui accroîtront leur efficacité, en souhaitant que l'intérêt de l'inventaire des richesses minérales et celui des techniques aériennes soit compris en temps de paix et qu'il ne soit pas nécessaire qu'une nouvelle guerre développe des outils militaires auxquels on puisse ensuite trouver une utilisation pacifique.

I. INTÉRÊT DE L'INVENTAIRE DES RESSOURCES MINÉRALES

1. Le caractère stratégique des substances minérales perturbe l'évolution de leur consommation. Un inventaire minier peut permettre de faire face aux irrégularités du développement de cette consommation.

La civilisation industrielle moderne exige chaque jour des matières minérales dont le volume et la variété s'accroissent : charbon, pétrole, uranium, cuivre, titane, tantale...

Charbon et fer furent longtemps les bases de l'industrie occidentale. Peu à peu le pétrole prit une place importante à côté du charbon. La dernière guerre et la crise de Suez ont montré combien l'économie est maintenant tributaire du pétrole. Les récentes découvertes nucléaires ont donné un grand essor à l'uranium. Il est considéré comme la source d'énergie des prochaines décades et ses applications militaires sont connues.

Pour ces raisons des efforts importants ont été faits pour la recherche de pétrole et d'uranium qui ont donné des résultats spectaculaires.

La recherche simultanée, en de nombreux points de la terre, de gisements de pétrole et d'uranium ne s'explique pas par le désir de satisfaire les besoins globaux de l'humanité, mais par la volonté de chaque peuple de s'assurer sur son territoire ou sur des territoires voisins amis, des réserves de ces produits, afin d'asseoir sur une indépendance énergétique, son indépendance politique et économique.

Ce raisonnement devrait être étendu à toutes les autres matières premières minérales. En effet, l'industrie d'un pays qui ne pourrait disposer du cuivre ou de l'aluminium, dont elle a besoin, serait asphyxiée, aussi sûrement que par manque d'énergie.

L'évolution des techniques modernes est marquée par la recherche des matériaux les mieux appropriés à chaque usage. L'emploi de nouveaux alliages permet à l'homme de dominer chaque jour davantage les phénomènes naturels (aciers inoxydables pour lutter contre la

corrosion, aciers spéciaux permettant d'exploiter le gaz de Lacq, alliages légers, base de l'industrie aéronautique, etc.). Cet essor est très rapide. Dans un pays industrialisé tel que la France, la consommation d'aciers inoxydables et réfractaires double tous les 5 ans (augmentation moyenne de 15% par an). Il est pratiquement irréversible, l'industrie s'adaptant très étroitement à ses propres fabrications pour diminuer leur prix de revient.

L'essor de ces alliages conduit à considérer comme « stratégiques » un nombre chaque jour croissant de substances minérales. Il est entretenu par les études des laboratoires de recherches (recherche scientifique pure et recherche appliquée, laboratoires d'Etat et laboratoires privés). Ces laboratoires travaillent dans toutes les directions et leurs résultats souvent étonnants peuvent modifier considérablement l'intérêt porté à un métal. Deux exemples sont remarquables : celui de l'uranium qui n'était, avant guerre, qu'un colorant de verrerie, celui du germanium dont l'essor récent est lié à celui des transistors.

Le développement d'une nouvelle technique liée à un matériau donné est tributaire des possibilités d'extraction et de la métallurgie de celui-ci. En contrepartie le développement de l'extraction et de la métallurgie est accéléré par les besoins de l'industrie (cas récent du titane).

Il est difficile de prévoir l'évolution des consommations des différentes matières premières, dans un délai de 10 ans. L'incertitude est d'autant plus grande que la consommation actuelle du produit considéré est plus faible, autrement dit, les consommations d'aciers ordinaires en 1975 peuvent être prévues avec une cer-

taine précision, alors que les prévisions des besoins en titane ou en niobium peuvent être entachées d'erreurs dépassant 100%.

La mise en valeur des richesses minérales

d'un pays doit donc être faite en tenant compte de cette incertitude des besoins à venir, ce qui conduit logiquement à une reconnaissance systématique de toutes les ressources minérales potentielles du pays.

2. La notion de gisement exploitable est étroitement liée à la conjoncture économique régionale et mondiale. L'inventaire des ressources minières d'un pays aide son gouvernement à faire face aux variations de cette conjoncture.

La mise en valeur des richesses minérales d'une région est l'ensemble des opérations qui conduit à l'exploitation de tous les gisements exploitables que renferme le sous-sol de cette région.

L'analyse de cette définition évidente et simple montre la complexité pratique du problème.

Qu'est-ce qu'un gisement exploitable ? C'est une accumulation d'un minéral utile dont l'extraction est économiquement possible. On ne peut dissocier la notion de gisement exploitable de critères économiques. Un gisement est exploitable si l'extraction de son contenu et la transformation du produit extrait donne une matière première « intéressante », autrement dit dont le prix de revient est compatible avec l'usage que l'on peut en faire.

La notion de gisement exploitable est donc fluctuante. La modification des techniques d'extraction ou d'élaboration du minerai d'un gisement peut réduire le prix de revient du concentré offert à la métallurgie et lui faire ainsi franchir le seuil « intéressant » rendant ce gisement exploitable.

Par ailleurs, l'évolution des techniques consommatrices d'un produit peut élargir brusquement son usage et rendre ainsi exploitable des gisements très importants à faible teneur, dont la mise en valeur exige des capitaux considérables qui ne peuvent être amortis que sur un marché très large.

L'apparition d'usages de caractère stratégique peut bouleverser un marché en offrant des prix d'achat élevés inconcevables pour les usages antérieurs. Ce fut le cas du marché de l'uranium lorsqu'apparurent les applications nucléaires.

En outre, les minerais métalliques sont souvent mixtes et l'évolution du marché d'un constituant peut, non seulement rendre un gisement exploitable, mais en baissant le prix de revient des autres constituants, compromettre la rentabilité d'autres exploitations de ceux-ci. Par exemple, le gisement de gaz de Lacq donne comme sous-produit un tonnage très important de soufre à bas prix de revient, la mise en exploitation de ce gisement de gaz a ainsi une répercussion importante sur le marché du soufre et de ses dérivés.

On peut donc seulement affirmer **qu'aujourd'hui** tel gisement est exploitable et que tel autre ne l'est pas. Mais l'exploitation d'un gisement doit amortir les

installations sur une durée de 20, 30 ans, parfois plus. Financièrement, la mise en exploitation d'un gisement exigerait une prévision du marché. Nous avons vu qu'elle était très difficile.

D'autre part, on ne peut pas assurer que la mise en valeur des richesses minérales d'une région soit faite et bien faite tant que tous les gisements minéraux de la région ne sont pas connus.

S'ils ne sont pas tous connus, peut-on dire que cette mise en valeur ait été faite rationnellement et qu'il n'existe pas des gisements non encore connus plus intéressants que ceux dont l'exploitation est décidée ? Demain, leur découverte ne risque-t-elle pas d'interrompre certaines exploitations ? Cela se traduirait par un gaspillage financier, puisque celles-ci n'auraient pu être poursuivies jusqu'à l'amortissement des installations. Ne pas exploiter les nouveaux gisements découverts pour ne pas compromettre les exploitations antérieures serait, si ces nouveaux gisements justifient économiquement l'arrêt de celles-ci, un gaspillage encore plus important.

Ce risque est variable avec les produits, il est d'autant plus grand que le volume des investissements nécessaires pour l'installation de l'exploitation est plus important. Pour juger sainement ce risque, il faut considérer les investissements directs et indirects attachés à cette exploitation : installations minières et industrielles, voies de communication nécessaires pour le transport des autres matières premières, telles que charbon, carburant..., et pour l'évacuation des produits de l'exploitation (route, chemin de fer, pipe-line), logement du personnel et services publics correspondants, etc. Ils peuvent être considérables pour de grosses exploitations dans un pays neuf (gisement de fer de Tindouf, par exemple), ou très faibles pour de nouvelles exploitations dans des régions industrielles (pétrole du Bassin Parisien).

Pour éviter ces deux écueils majeurs : fluctuation de la notion de gisement exploitable et choix défectueux des exploitations intéressantes, il est également nécessaire de posséder un inventaire complet des ressources minérales de la région, inventaire de toutes les accumulations minérales intéressantes ou susceptibles de le devenir avec leurs caractéristiques essentielles permettant de planifier leur mise en valeur et d'utiliser ainsi au mieux les capitaux et la main-d'œuvre disponibles.

3. Influence économique régionale d'une exploitation minière, son interférence sur l'exploitabilité d'un gisement.

L'incidence de l'exploitation des substances minérales sur l'économie régionale varie avec la nature de la substance exploitée.

Au début du siècle, d'importantes prospections furent faites en Afrique, Asie, Amérique, pour y rechercher de l'or dans les alluvions de rivières. Les gisements découverts étaient exploités avec de faibles investissements sans installations fixes importantes. Souvent, la rivière étant en même temps la voie de communication, aucune infrastructure ne devait être mise en place. Cette exploitation ne nourrissait que le personnel directement employé à l'extraction, très réduit dans l'exploitation par dragage, et après abandon ou épuisement du gisement, il ne restait rien. Les exploitations aurifères filoniennes ont demandé des installations plus importantes pour l'extraction du minerai et son traitement pour obtenir l'or, mais elles n'ont pas enrichi de façon permanente les régions où elles se trouvaient, car l'or est un métal spéculatif ne servant de matière première à aucune industrie qui aurait pu s'installer sur place. C'est également le cas de toutes les matières précieuses (diamants, platine, etc.).

Par contre, l'exploitation de substances telles que le charbon, le fer, matières premières de base de l'industrie, transforme profondément les structures économiques régionales. Les tonnages extraits doivent être importants pour obtenir des prix de revente faibles. Leur transport développe le réseau de voies de communications. Ayant intérêt à valoriser le plus possible les produits extraits avant de les transporter, des industries de transformation (métallurgie, mécanique) s'installent sur place faisant vivre une population de plus en

plus importante. Finalement, le personnel directement attaché à l'exploitation minière proprement dite est très réduit, comparé à la population qui vit autour d'elle. Cette activité économique lorsqu'elle dépasse un certain niveau présente un caractère permanent. Elle devient indépendante de l'exploitation minière qui l'a provoquée. En cas de cessation de celle-ci on importera des matières premières pour alimenter l'industrie de transformation qui constitue alors la véritable base de l'économie régionale.

Il est donc possible que les critères financiers de l'exploitabilité d'un gisement soit secondaires comparés à l'expansion économique régionale que l'on espère provoquer. La décision d'exploitation devient alors un problème politique. Le gouvernement peut prendre à sa charge tout ou partie des investissements nécessaires, il peut ne pas rémunérer directement ces investissements, il peut accorder des subventions à l'exploitant. Dans tous les cas, les taxes et impôts qu'il retire du développement économique régional doivent compenser les rémunérations de capital qu'il n'a pas perçues, les subventions versées ou le capital investi.

Dans une telle économie dirigée, il est difficile au technicien de prévoir quels gisements doivent être exploités. Il doit établir un inventaire aussi complet que possible des ressources minérales des diverses régions, qui sert de base à un « plan ». Celui-ci recherche le développement économique optimum en combinant la mise en valeur des diverses ressources minérales, forestières, agricoles et les industries qu'elles peuvent alimenter. Seul un inventaire complet et sérieux peut permettre une planification efficace.

4. Intérêt politique de l'inventaire minier d'un pays neuf.

Dans un pays peu industrialisé, une planification est indispensable pour obtenir un développement au rythme le plus rapide pour le coût le moins élevé. Les capitaux et les techniciens sont rares et à employer au mieux. Un choix est nécessaire et la qualité de ce choix dépendra de la valeur des documents dont disposera le gouvernement qui devra le faire. Un inventaire minier sérieux est indispensable car certaines richesses minérales peuvent constituer des « germes » de la cristallisation d'une nouvelle économie.

Si des capitaux étrangers reçoivent des garanties suffisantes, ils peuvent financer la mise en valeur de gisements qu'ils jugent rémunérateurs. Des indices sérieux peuvent également attirer des capitaux étrangers qui assureront leur reconnaissance et leur mise en exploitation éven-

tuelle. Ces exploitations financées partiellement ou totalement par des capitaux étrangers visent généralement l'exportation des minerais. Cette exportation peut constituer pour le pays une source de devises intéressante.

Cette exploitation n'emploiera que quelques techniciens étrangers de haute qualification et fera vivre des ouvriers et employés autochtones. Elle accroîtra le revenu brut régional bien au-delà des salaires versés. Avec ceux-ci les ouvriers achèteront des aliments aux paysans voisins; ouvriers et paysans feront également vivre artisans et commerçants qui leur procureront vêtements, outils, etc. Cette « injection » de salaires, du fait de la circulation monétaire aura donc un effet régional important, estimé par les spécialistes à quatre fois le montant des salaires initialement versés.

La formation de techniciens locaux est souvent prévue dans les contrats d'investissements étrangers : elle accroît le potentiel technique du pays.

En outre, une industrie pourra naître et se développer autour de cette exploitation, soit pour exporter des produits semi-finis, soit pour satisfaire les besoins du pays en produits finis.

Pour être rentable, une extraction minière doit avoir une production suffisante qu'une industrie locale naissante ne saurait absorber. L'exportation d'une part de la production permet donc l'exploitation minière économique et le démarrage d'une industrie naissante. Celle-ci peut souvent utiliser des produits de second choix et faciliter ainsi l'exploitation minière en favorisant l'exportation de produits de premier choix.

Progressivement, l'industrie locale absorbera une part de plus en plus importante des produits de l'exploitation minière, donnant ainsi une plus grande stabilité à celle-ci, dont le fonctionnement sera moins tributaire des cours mondiaux.

Le but recherché par les pays neufs est d'assurer leur indépendance politique sur des bases économiques. L'exploitation des richesses de leur sous-sol leur permet de le faire en développant leur industrie progressivement et en exportant des matières premières ou des produits finis qui constituent une monnaie d'échange pour importer les autres matières dont cette industrie a besoin.

Mais en planifiant le développement d'un pays ce serait une erreur de ne considérer que les gisements ayant une importance mondiale et intéressant les pays industrialisés comme source de matières premières. En raison de leur importance, ils exigent des capitaux considérables pour la mise en valeur que l'on ne peut trouver que dans ces pays industrialisés.

De petits gisements à forte teneur peuvent intéresser un pays peu développé industriellement. Les fortes teneurs permettent une mise en valeur avec des moyens rudimentaires. Les faibles volumes de minerai à extraire sont compatibles avec une mécanisation réduite, avec une main-d'œuvre peu qualifiée. Il ne sera pas nécessaire de concentrer beaucoup ce minerai déjà riche pour qu'il puisse être transporté, des installations de concentration très simples suffiront, parfois même on pourra se contenter d'un triage à la main après concassage.

L'exploitation de tels gisements pourra donc employer une main-d'œuvre peu qualifiée assez nombreuse et sa mise en œuvre n'exigera que de faibles investissements, à l'échelle du pays. Elle pourra néanmoins avoir une influence économique locale très importante et servir de base à une industrie naissante. L'accroissement progressif de ces exploitations peut entraîner une amélioration également progressive de l'infrastructure des voies de communications qui pourra se faire avec les moyens locaux.

Ces exploitations permettront en outre au pays considéré de réduire ses importations de matières premières, objectif politique qui peut justifier un soutien gouvernemental.

En conclusion, dans un pays neuf, on doit examiner l'exploitabilité des petits gisements à haute teneur qui peuvent avoir un intérêt économique régional et des gros gisements à teneur moyenne ou faible, qui peuvent présenter un débouché international s'ils sont exploités à grande échelle.

Un inventaire complet des accumulations minérales du pays peut permettre une mise en valeur plus rapide en combinant au mieux l'exploitation de ses diverses ressources et ceci en étroite corrélation avec le développement agricole, forestier, etc.

5. Intérêt politique de l'inventaire minier des pays industrialisés.

L'industrie des pays européens est assise sur des exploitations locales de fer et de charbon. Mais la majorité de leurs autres matières premières est importée des pays peu développés.

Une étude statistique russe de septembre 1959 soulignait que :

« Les pays de l'Europe capitaliste n'ont pas de réserves prospectées des minerais les plus importants, comme le pétrole (0,6% des réserves mondiales), le gaz naturel (3%), ceux de manganèse (1%), de chrome (0,5%), d'uranium (5%), d'étain (1%), de nickel (0,5%), de wolfram (5%), de molybdène (1%), de lithium, de beryllium, les phosphates, l'asbeste, le graphite, etc. », alors que sa

population représente environ 10% de celle du monde entier.

Durant la phase coloniale, les pays industrialisés allaient chercher dans les pays neufs les matières premières nécessaires à leur industrie et leur vendaient les produits manufacturés.

Ces pays neufs cherchent à développer leurs industries de transformation pour n'exporter que des produits valorisés au maximum. Mais ceci n'est pas sans perturber l'industrie des pays industrialisés. La crise du textile en Europe est due en partie à l'installation de filatures et tissages en Asie. L'installation de complexes métallurgiques aux Indes, en Amérique du Sud, doit s'étendre à un

plus grand nombre de pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud, ce qui transformera profondément le marché mondial des matières premières minérales.

En outre, des raisons strictement politiques peuvent conduire des pays à interdire l'exportation de certaines matières premières vers des pays industriels sur lesquels ils veulent faire pression. L'exemple de l'affaire de Suez et son incidence sur l'approvisionnement pétrolier de l'Europe est caractéristique. Les intérêts politiques sont complexes et on ne peut prévoir les raisons qui inciteront demain un ou plusieurs pays à une véritable guerre économique. Les pays les plus industrialisés sont les plus sensibles lorsqu'ils sont tributaires de pays étrangers (surtout lointains), pour leurs approvisionnements en matières premières.

Tous les anciens pays industrialisés (en particulier ceux d'Europe) ont donc intérêt à connaître aussi bien que possible leur potentiel minier. Même s'ils n'exploitent pas tous les gisements, ils pourront le faire en cas de besoin pour éviter une pression étrangère.

Les découvertes de pétrole, de gaz naturel, d'uranium, de wolfram faites en France depuis la dernière guerre

montrent que l'inventaire minier de ce pays est très incomplet.

Les recherches modernes de pétrole ne sauraient se concevoir sans utilisation intensive de diverses méthodes géophysiques qui permettent au géologue d'avoir une véritable connaissance du sous-sol dans les trois dimensions. Pour la plupart des minerais métalliques, on se limite à l'étude du voisinage des indices connus depuis l'antiquité.

Une exploration méthodique avec les moyens techniques modernes élargirait certainement cet inventaire pour le plus grand bien des économies locales.

Notons que l'industrie de ces pays européens est très concentrée et que de larges régions ont un important retard économique, ce sont des régions sous-développées, comparables par certains côtés aux pays sous-développés. Les régions cristallines (en France : Bretagne, Massif Central, Pyrénées) sont parmi les plus défavorisées, alors qu'elles renferment peut-être des gisements dont l'exploitation permettrait l'essor de l'économie régionale. La pauvreté de leurs ressources agricoles accroît l'importance relative de leurs ressources minérales éventuelles.

6. L'accroissement des besoins mondiaux justifie un inventaire minier généralisé.

On peut craindre qu'une concurrence entre les exploitations minières des divers pays compromette certaines d'entre elles par un effondrement des cours mondiaux. Le dirigisme des économies planifiées peut diminuer l'incidence des cours mondiaux sur les économies locales.

En outre, il est important de remarquer que les Etats-Unis d'Amérique consomment de 30 à 60% des matières premières produites dans le monde, avec seulement 6% de la population mondiale. Ce n'est certes pas demain que tous les habitants de la terre auront le standard industriel des Américains, avec la même consommation spécifique de chaque matière première, mais les conditions de vie américaine et européenne ont suscité chez les peuples moins riches le désir de les rejoindre. Ce désir est un moteur puissant du développement rapide de la consommation.

Le coefficient de développement doit être particulièrement élevé pour les métaux d'emploi récent tels que niobium, tantalum, titane, etc., qui sont actuellement consommés à plus de 50% par les U.S.A., car les pays neufs bénéficient immédiatement des progrès techniques et leur industrie n'est pas obligée de suivre toute l'évolution qui fut celle de l'industrie des U.S.A. Par exemple les aciers inoxydables ont une large application immédiate dans tous les pays tropicaux où la corrosion est très active.

Si nous retenons le chiffre le plus faible, 6% de la population mondiale consommant 30% des matières premières du monde, il faudrait multiplier par 5 la production pour que tous les hommes aient la même part.

Il faut la multiplier par un facteur 2 du fait de l'accroissement de la population mondiale dans les 30 prochaines années. Enfin, il faut tenir compte de l'augmentation de consommation par évolution de la technique. Rappelons que la consommation française d'aciers inoxydables et réfractaires double tous les 5 ans et ceci depuis 20 ans du fait de l'action conjuguée de l'évolution de la technique et de l'industrialisation de la France. Un tel taux d'accroissement représenterait en 1990 une consommation égale à 64 fois celle de 1960.

On serait tenté de multiplier tous ces chiffres pour obtenir un coefficient sur 30 ans qui serait compris entre 100 et 1000! En fait on remarque déjà aux Etats-Unis un phénomène de saturation qui se marque au cours des dernières années par une diminution de la consommation de certains métaux par habitant. Ce phénomène est net pour le fer et semble également apparaître pour le nickel. Il peut s'expliquer par la concurrence mutuelle des divers métaux.

Si l'on admet que la consommation des métaux par habitant de la terre tende asymptotiquement vers cette valeur de

consommation « saturée » par tête d'Américain, on trouve des coefficients d'accroissement sur 30 ans variant entre 5 et 20, ce qui correspond à un taux annuel d'accroissement de 5% et 10%.

Cela n'exclut pas des taux beaucoup plus élevés pour des métaux d'utilisation industrielle récente : titane, beryllium, tantale, etc. et des taux plus faibles pour ceux dont la consommation par habitant dans les pays industriels est en nette régression : plomb, zinc, etc.

Ne retenons que les taux de 5% et 10% par an. Quelle sera dans 30 ans la consommation cumulée, en prenant comme unité la consommation annuelle actuelle ?

Elle sera de 70 fois la consommation actuelle avec un taux de 5% et de 180 fois la consommation actuelle avec un taux de 10%.

Considérons maintenant les réserves explorées des différents minerais telles qu'elles ressortent d'une étude publiée par un périodique russe. Le premier chiffre est le nombre d'années nécessaires pour l'épuisement des réserves certaines du monde capitaliste au rythme de consommation actuel et le second est le nombre d'années nécessaires pour l'épuisement des réserves probables :

charbon	200-700 ans
pétrole	40-100 ans
gaz naturel	40-100 ans
fer	150-300 ans
manganèse	25-100 ans
chrome	20-80 ans
cuivre	30-60 ans
plomb	12-30 ans
zinc	15-35 ans
bauxites	25-120 ans
nickel	5-12 ans
cobalt	90 ans
étain	15-30 ans
molybdène	50 ans
tungstène	10-20 ans
mercure	10-70 ans
or	10-30 ans
uranium	30-300 ans
beryllium	20 ans
tantale	80 ans

Ces chiffres sont très approchés, mais ils permettent néanmoins en les comparant avec les précédents, c'est-à-dire à la consommation cumulée en 30 ans rapportée à la consommation actuelle suivant les différents taux d'accroissement, de se rendre compte qu'il est urgent d'intensifier la prospection de la plupart de ces matières premières si on veut éviter une pénurie dans un proche avenir. Cette pénurie serait un facteur de tension internationale en augmentant la compétition autour des sources de matières premières.

Pourra-t-on dans l'avenir se procurer ces matières premières ailleurs que dans les mines ? Certains savants envisagent l'extraction des sels dissous dans les océans où ils constituent d'importantes réserves malgré leur faible teneur, du fait du volume considérable de ceux-ci. Cette exploitation est probable mais la mise au point de procédés économiques de traitement de millions de mètres cubes

d'eau de mer demandera probablement plusieurs dizaines d'années. Celle-ci ne risque guère d'inquiéter les mineurs de la fin du XX^e siècle, elle sera probablement la bienvenue quand on craindra l'épuisement des gisements connus.

De même des produits synthétiques, tels que les matières plastiques, ne peuvent-ils se substituer à des matières premières naturelles ? Il est difficile de donner une réponse globale et une étude détaillée de chaque matière première serait nécessaire, mais néanmoins il semble que la plupart d'entre elles ne pourront pas être remplacées économiquement par des produits de synthèse avant la fin du siècle. L'expérience des dernières années montre que la plupart du temps les nouveaux produits s'ajoutent aux précédents sans les remplacer. Le meilleur exemple est celui de l'évolution des sources d'énergie ; charbon, hydro-électricité, pétrole, gaz, s'ajoutent l'un à l'autre et les centrales atomiques, bien qu'étudiées depuis la guerre, n'ont pas encore atteint le seuil économique.

On peut donc raisonnablement conclure que jusqu'à la fin du siècle la consommation de matières premières minérales croîtra à un rythme variable suivant la substance, mais qui peut être très rapide pour certaines. C'est plutôt le danger d'épuisement des réserves minières qui poussera l'homme à chercher d'autres sources ou d'autres produits. Mais dans l'immédiat, tant que l'inventaire minier ne sera pas fait dans le monde entier, ces réserves ne seront pas connues.

Il est donc souhaitable que l'inventaire minier soit fait à très grande échelle dans le monde entier et que les recherches ne soient pas concentrées autour des gisements actuellement connus.

Une meilleure répartition des gisements des diverses substances minérales dans le monde entier serait favorable à la paix mondiale en diminuant les possibilités de pressions politico-économiques des pays producteurs sur les pays consommateurs. Les découvertes de pétrole saharien et libyen en réduisant l'importance relative des gisements du Moyen-Orient ont atténué les jeux politiques dans cette région. Elles ont rendu l'Europe plus indépendante, et réduit l'intérêt d'une lutte russo-américaine pour le contrôle du Moyen-Orient.

La dispersion des gisements exploités, contemporaine de la généralisation des consommations liées au développement des pays neufs, devrait réduire les transports, diminuer les prix de revient et faciliter l'expansion.

Un inventaire mondial des richesses minérales permettrait d'organiser les exploitations en fonction des consommations et favoriserait le développement accéléré des économies en retard. La multiplicité des richesses minérales des États-Unis et du Canada fut certainement un facteur favorable à leur développement économique rapide.

II. ÉTAPES DE LA RÉALISATION DE L'INVENTAIRE MINIER

1. Etapes de la réalisation de l'inventaire minier.

Cet inventaire, qu'il serait souhaitable de préparer dans tous les pays, quel que soit leur développement, n'existe pratiquement nulle part, car les connaissances sont partout fractionnaires.

La première raison en est l'orientation des recherches par un objectif déterminé : pétrole, ou uranium, ou nickel, ou fer, etc. La vocation des sociétés ou organismes de recherche et la spécialisation des chercheurs en sont responsables.

D'autre part, les méthodes de recherche appliquées ne donnent pas un inventaire complet. On part « d'indices » dont la découverte fut généralement fortuite. Les pétroliers sont les premiers à s'être libérés des « indices » pour étudier systématiquement

des régions très larges. Les résultats des travaux géologiques et géophysiques permettent alors de classer par ordre d'intérêt décroissant les « structures » probables et de forer sur les meilleures pour y rechercher du pétrole. Les découvertes remarquables du Sahara Algérien sont une illustration de cette recherche systématique, car les gisements découverts n'étaient pas signalés à l'attention des prospecteurs par d'importants indices comme ceux du Moyen-Orient.

D'abord la photogéologie a donné une vue d'ensemble très rapide de toute la zone dans des conditions économiques. Le climat désertique et les grandes dimensions des structures recherchées ont accru l'efficacité de cette étude. Ensuite, une prospection gravimétrique et sismique à large maille fut placée d'après les indications de la photogéologie. Enfin, des études sismiques détaillées furent faites sur les points intéressants. Parfois, d'autres méthodes géophysiques vinrent compléter cette étude et aider à localiser les forages d'exploration. Les résultats furent des découvertes très rapides avec des moyens limités en personnel et en capitaux. Les circonstances favorables n'expliquent pas tout, le travail méthodique est à la base de la réussite.

La recherche d'uranium en France fut également très systématique, mais elle fut orientée par des hypothèses géologiques pour réduire la surface des recherches. Les circonstances étaient moins favorables que dans l'exemple précédent. Cultures et forêts masquent généralement le sous-sol rendant une étude géologique détaillée très difficile dans les zones cristallines. D'importants gisements filoniens peuvent n'avoir qu'un volume très limité et surtout ne donner à

la surface du sol que des indications restreintes. Heureusement, l'uranium est radioactif et émet un rayonnement qui peut être détecté à distance, distance faible d'ailleurs, en raison de l'absorption rapide de ce rayonnement.

Néanmoins, c'est cette radioactivité qui permet au COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE de se libérer des indices connus et de prospector systématiquement des zones étendues dépourvues d'indices. Le processus resta dans les grandes lignes le suivant :

exploration : prospection radiométrique, à pied ou en voiture, avec une maille assez large, puis étude détaillée (plan compteur) de toute anomalie radioactive découverte ; dans certaines zones exploration géochimique stratégique directe ; ensuite étude plus complète des indices retenus (prospection géochimique, prospection électrique et éventuellement tranchées peu profondes), les résultats de cette étude permettant d'implanter des sondages ;

enfin, après les sondages, si leurs résultats le justifient, des travaux miniers (puits et galeries).

Cette recherche d'uranium en France diffère de celle du pétrole au Sahara parce qu'on ne disposait pas avant 1955 de méthode d'exploration extensive rapide et que l'exploration faite était lourde, exigeant un personnel nombreux sans donner l'assurance d'un inventaire complet. Néanmoins, ce travail systématique donna des résultats spectaculaires. Malgré les différences dans les objets et les conditions d'exécution, on peut noter que dans la recherche du pétrole au Sahara et dans la prospection de l'uranium en France, on a recueilli les fruits d'une méthode de travail rationnel et démontré qu'il était justifié de ne pas rester attaché aux indices connus.

La mise en valeur rationnelle de toutes les ressources minérales devrait se faire en plusieurs étapes, dans des conditions comparables qu'il est intéressant d'analyser.

La recherche traditionnelle qui part d'indices connus constitue la seconde étape : la **Reconnaissance**. Elle est **localisée** et **intensive** par nature, c'est-à-dire qu'elle applique sur chaque indice des méthodes diverses d'investigation pour réunir les renseignements permettant de déterminer les possibilités d'exploitation du gisement éventuel auquel il est lié.

Mais auparavant, il faut découvrir les indices de la région au cours d'une première étape : l'**Exploration**. Celle-ci est par essence **régionale** et **extensive**. Elle doit donner des documents complets et homogènes sur la région. Tous les indices possibles doivent apparaître. La reconnaissance ultérieure trie dans la récolte d'indices de l'exploration ceux qui peuvent être liés à un gisement, mais

le gisement qui n'est pas signalé par l'exploration est perdu.

La Reconnaissance est suivie de la préparation de l'Exploitation des gisements découverts, cette phase comprenant tous les investissements annexes : installations de traitement, de concentration, de transport, constructions nécessaires pour le logement du personnel.

Cette Préexploitation est en général la phase la plus coûteuse et il est important de bien marquer la frontière entre elle et la Reconnaissance, concrétisée par la décision d'Exploitation. Le risque couru au cours des deux phases est différent. Dans la Préexploitation, si la Reconnaissance a été bien faite, et la décision prise à bon escient, c'est le risque financier normal de gestion d'une affaire industrielle. Dans la Reconnaissance, c'est au contraire un risque par tout ou rien. Il reste possible jusqu'à la fin que les résultats démontrent que le gisement n'est pas exploitable et que toutes les dépenses faites soient perdues.

On réduit ce risque en décomposant la Reconnaissance en étapes qui mettent en œuvre sur l'indice (ou la structure) étudié des moyens de plus en plus coûteux, au fur et à mesure que les résultats acquis accroissent la probabilité de succès. En recherche pétrolière un sondage profond coûte plus cher que l'étude sismique qui précisera la qualité de la structure. La géophysique cherche à réduire le nombre des forages nécessaires pour étudier les structures d'une région. En recherche minière, les sondages coûtent moins cher que les puits et galeries, une étude par sondages est donc souhaitable chaque fois qu'elle est possible, le nombre des sondages devant être réduit par des études géologiques et géophysiques préalables.

Dans l'Exploration, c'est sur le caractère extensif que portent les étapes. Une première étape très générale couvrira toute la région pour choisir les zones présentant un intérêt sur lesquelles porteront les études plus détaillées de la seconde étape.

Le risque financier attaché à l'Exploration est d'autant plus réduit que la surface explorée est plus grande. Le coût global est proportionnel à la surface étudiée, mais la probabilité d'existence de zones minéralisées intéressantes croît rapidement quand elle augmente. Il est évident que si l'on considère l'Afrique entière, la présence de gisements exploitables à découvrir est une certitude, tandis que cette présence est très improbable sur une surface de 100 km² prise au hasard en Afrique.

Pour quelle surface une quasi-certitude est-elle atteinte ? Il semble que dans le cas général on puisse citer un ordre de grandeur de 1 000 000 km². Pour éviter un risque important d'échec il ne faudrait considérer que des unités d'exploration dont la surface ne soit guère inférieure

à 100 000 km². Se limiter, en première phase, à l'exploration de surfaces trop restreintes, présente un risque plus grand que celui qui ressortirait du simple calcul des probabilités. Il est en effet toujours humainement difficile de porter un jugement catégoriquement négatif qui classerait une étude d'exploration et le chercheur tendra, à défaut de zones favorables, à sélectionner les zones les moins défavorables sur lesquelles il concentrera un effort ultérieur, donc une dépense inutile qui peut être parfois importante. Dans le cadre d'une étude plus large ces zones n'auraient pas retenu l'attention du fait de la découverte de zones vraiment intéressantes.

Lorsque les gisements recherchés sont de petites dimensions, la première étape présente un caractère de sondage statistique car il serait trop coûteux de couvrir toute la région avec une densité suffisante pour que tous les gisements soient certainement découverts.

Le choix de cette densité est fait en fonction des groupements habituels d'indices, de la dimension minimum d'un gisement exploitable dans les conditions économiques locales, et de la probabilité que l'on accepte de ne pas découvrir un tel gisement. Autrement dit, l'expérience montrant que les gisements sérieux isolés sont rares et que les indices sont fréquemment groupés en taches, on choisit la densité des mesures (intervalle entre profils, distance entre stations) de telle façon que l'on soit certain de découvrir de telles taches en rencontrant un ou plusieurs indices. Dans cette méthode, on

resserre au cours d'une seconde phase la densité des mesures autour de chaque indice découvert, pour mieux définir la tache, le groupe auquel cet indice appartient et découvrir tous les indices du groupe, la Reconnaissance portant sur les indices considérés individuellement.

Lorsque l'on connaît des relations génétiques, courantes entre des gisements et certains caractères géologiques ou géophysiques, on peut considérer ces caractères comme équivalant à des indices et faire une exploration détaillée des zones où ils sont présents.

En résumé, la mise en valeur des ressources minérales d'un pays doit être décomposée en trois phases qui conduisent à l'Exploitation des gisements reconnus :

1. L'Exploration systématique de toutes les régions du pays pouvant contenir des gisements, cette exploration se faisant par étapes successives, chaque étape concentrant les travaux sur les zones les plus intéressantes de l'étape précédente ;
2. la Reconnaissance des indices retenus à la fin de l'Exploration permettant de déterminer les caractéristiques de ces indices dont la connaissance est nécessaire pour juger de la possibilité d'exploitation ;
3. la Préexploitation limitée aux gisements reconnus comme étant exploitables.

L'inventaire des ressources d'un pays est établi à la fin de la Reconnaissance. Son établissement comprend donc l'Exploration et la Reconnaissance.

2. Modalités de l'exploration.

L'Exploration est maintenant courante dans la recherche du pétrole et de l'uranium, mais pour les autres substances minérales, les recherches régionales systématiques sont très rares.

Sont-elles possibles ? Comment furent découverts les gisements connus ? Le pétrole étant excepté, on pense habituellement à l'**Exploration directe**, au cours de laquelle on recherche un minerai grâce à ses caractères particuliers : aspect, densité, couleur des affleurements, caractères magnétiques, radioactivité, etc.

De nombreux gisements furent découverts d'après l'aspect des affleurements qui en Europe attira l'attention des bergers, des chasseurs, des ramasseurs de champignons. En Afrique, les surfaces à prospecter sont telles que la probabilité de découverte d'un gisement est très réduite

sans la collaboration des autochtones. Certains d'entre eux connaissent toutes les roches de leur région et guident les prospecteurs, d'autres ne s'y intéressent pas ou même, pour des raisons religieuses, entravent les recherches. Il ne s'agit donc plus d'une exploration mais d'une découverte aléatoire. Seule la prospection alluviale de l'or (et du diamant) est une exploration systématique du cours des rivières, les prospecteurs connaissant les lois de formation des gisements alluvionnaires.

Depuis plusieurs siècles, les propriétés magnétiques des minerais de fer permirent d'explorer leurs gisements hors des affleurements. C'est ainsi que furent recherchées les extensions des gisements américains du Lac Supérieur. Actuellement, le magnétomètre aéroporté permet l'exploration systématique des régions

susceptibles de contenir des gisements de fer, ainsi que certains gisements de nickel.

L'exploration des gisements d'uranium en utilisant des compteurs Geiger et scintillomètres est également une exploration directe. Celle-ci peut depuis quelques années être rendue plus systématique et plus rapide par l'utilisation de scintillomètres enregistreurs montés à bord d'avions ou d'hélicoptères.

L'exploration directe à vue est limitée par les masques que constituent le sol, les latérites, les cultures, la végétation et en particulier les forêts, et les méthodes géophysiques directes n'intéressent qu'un nombre restreint de métaux (fer, nickel, uranium). Les pétroliers ont montré la voie à suivre en développant l'**Exploration indirecte**.

Les géologues recherchent les gîtes minéraux par analogie, c'est-à-dire que, d'une part, ils étudient soigneusement les gisements connus en essayant de déterminer les relations existant entre les minerais et les roches voisines et de connaître les conditions dans lesquelles ces gisements se sont formés. D'autre part, ils font une carte géologique systématique des régions dont on leur confie l'étude, c'est-à-dire qu'ils cartographient les roches qui affleurent en interpolant sous les recouvrements superficiels. Connaissant ainsi les roches de la région, ils localisent leur exploration dans les secteurs dont les caractères géologiques sont comparables à ceux des gisements connus. C'est ainsi que furent découverts les gisements d'étain de l'Aïr par analogie avec ceux de la Nigéria dont on connaissait la liaison avec des granites spéciaux qui furent retrouvés dans l'Aïr.

Mais les découvertes uniquement appuyées sur des caractères géologiques sont rares et la plupart du temps un indice découvert fortuitement est à l'origine des gisements.

L'explication se trouve probablement dans les limitations propres aux méthodes d'investigation.

Généralement, le géologue ne peut donner qu'une carte imparfaite : les cultures, la végétation, les recouvrements récents (dunes, alluvions, etc.) lui cachent la majeure partie du sous-sol et les itinéraires qu'il parcourt peuvent passer à côté des affleurements.

De plus, l'altération superficielle est irrégulière, les roches tendres sont profondément altérées tandis que les dures subsistent et ce phénomène peut donner aux roches dures une importance exagérée sur la carte.

Les roches sédimentaires marines sont souvent homogènes, mais ce n'est pas le cas des roches cristallines ou de celles qui se sont formées par sédimentation continentale. Lorsque les affleurements sont rares, l'image qu'ils donnent du sous-

sol est très imparfaite, l'échantillonnage que ces affleurements constituent étant faussé par la sélection due à l'irrégularité des phénomènes d'altération.

Pour que l'exploration indirecte soit plus efficace et systématique, il faut donner au géologue des antennes lui permettant de connaître la structure réelle du sous-sol, sous les recouvrements et en profondeur. La recherche pétrolière a généralisé l'emploi de la géophysique à cette fin. Les méthodes employées ne recherchent pas directement le pétrole, elles donnent au géologue une image à trois dimensions du sous-sol grâce à laquelle il peut implanter des sondages qui cherchent directement le pétrole.

C'est dans le même esprit qu'il faut concevoir l'emploi de la géophysique pour l'exploration minière. Il faut demander à ces méthodes de préciser la nature des roches, le tracé précis de leurs contacts (sous les recouvrements), leur tectonique et de donner ainsi au géologue une image plus fidèle du sous-sol sur laquelle il pourra localiser les zones favorables à certains métaux, zones dont on fera ensuite l'étude détaillée. De même que les pétroliers ont trouvé des gisements importants au Sahara et en Libye dans des régions dépourvues d'indices en appliquant systématiquement des méthodes géophysiques d'exploration indirecte, l'application de méthodes similaires en exploration minière doit conduire à la découverte de gisements qui n'affleurent pas.

L'analyse des conditions de travail des pétroliers devrait permettre d'adapter leurs méthodes à l'exploration minière.

Celles-ci ne peuvent être en effet directement appliquées au domaine minier et elles ne doivent pas être considérées comme immuables. Leur évolution est également intéressante et peut nous renseigner sur leur avenir.

Remarquons que l'Exploration appliquée à de petites régions entourant des gisements ou des indices connus, n'est pas une véritable exploration, mais ressort plutôt de la Reconnaissance étendue. Dans les régions recouvertes de masques (végétation, latérites, alluvions) les gisements ou indices connus sont ceux qui possédaient accidentellement des caractères favorables (zone découverte, érosion d'une vallée, zone riche recoupée par la surface d'érosion, affleurements le long d'une voie de communication...). L'explorateur doit donc considérer ces indices ou gisements comme des points singuliers, déborder très largement et apporter des renseignements intéressants sur toute la région, pour mettre en place les points en question dans le contexte géologique et géophysique. L'exploration doit rester régionale et les indices ou gisements connus aident ou guident l'interprétation.

III. MÉTHODES D'EXPLORATION

Ces méthodes ne sont pas utilisées simultanément. En général, l'exploration se contente des études géologiques et photogéologiques et d'une ou de deux méthodes géophysiques, principalement gravimétrie ou magnétisme d'une part, sismique de l'autre. En effet, le but à atteindre est de rechercher les zones favorables sur lesquelles des études plus détaillées seront faites et des forages implantés.

Les méthodes sismiques ont l'avantage, quand le terrain s'y prête, de donner directement une image des couches sédimentaires, de dessiner leurs mouvements et de mettre en évidence les structures éventuelles, mais leur prix limite la densité des profils au cours de la première reconnaissance pour réduire la dépense par unité de surface.

La gravimétrie donne des indications sur la forme d'un bassin et sur les structures qu'il peut contenir au niveau du socle ou des séries sédimentaires. D'un coût moins élevé, mais d'une interprétation moins précise, la gravimétrie est, en prospection pétrolière, la phase préliminaire normale d'une étude sismique détaillée.

Le prix de revient très réduit du magnétisme aéroporté explique son essor en recherche pétrolière. Il permet de faire des mesures denses et d'obtenir une carte détaillée homogène pour une faible dépense.

Gravimétrie et magnétisme donnent des cartes de champs qui ne sont pas aussi facilement et directement utilisables que les coupes sismiques. Le magnétisme applique des méthodes dont la mise en œuvre est plus longue et plus coûteuse par unité de surface : photogéologie sur photographies à grande échelle, géochimie, méthodes hélicoptères.

Les pétroliers emploient les méthodes suivantes :

- la géologie de terrain ;
- la photogéologie ;
- le magnétisme aéroporté ;
- la gravimétrie ;
- le magnétisme au sol ;
- les sondages électriques et études telluriques ;
- la sismique (réflexion et réfraction).

aéroporté peut donner des résultats assez détaillés et précis mais son emploi récent explique que l'on ne sache pas encore tirer de cette méthode tout ce qu'elle peut apporter. Actuellement, elle est habituellement utilisée pour l'exploration de bassins sédimentaires mal connus.

L'interprétation faite en corrélant les résultats du magnétisme ou de la gravimétrie avec ceux de la sismique et en s'aidant des connaissances géologiques et photogéologiques, donne un document plus sûr que celui provenant de chaque méthode considérée séparément.

L'utilisation intensive de la sismique s'explique surtout par la recherche d'une plus grande efficacité des sondages. Cette efficacité se traduit par une accélération des recherches et une réduction de leur coût.

Les autres méthodes : gravimétrie, magnétisme et méthodes électriques, sont utilisées en principe par certains pétroliers pour localiser les zones les plus intéressantes où la prospection sismique doit être faite et réduire le coût de celle-ci. Ce processus est justifié dans les larges bassins sédimentaires vierges, car il permet d'éliminer de vastes régions sans intérêt où les sédiments sont trop peu épais, mais dans les phases ultérieures des cartes gravimétriques et magnétiques détaillées peuvent éclairer les résultats de la sismique. C'est indiscutablement l'interprétation comparée de plusieurs méthodes qui est la plus efficace et on ne peut que regretter que fréquemment cette interprétation ne soit pas assez poussée.

L'exploration minière peut comprendre les méthodes suivantes :

géologie régionale et photogéologie ;

méthodes géophysiques aéroportées et héliportées :

magnétisme,
radiométrie,
électromagnétisme ;

géologie détaillée avec cartographie des indices ;

géochimie ;

magnétisme au sol ;

gravimétrie ;

méthodes électriques et électromagnétiques au sol ;

sismique et divers.

En principe, ces méthodes devraient être utilisées dans un ordre défini par leurs caractères propres. Seules, géologie, photogéologie, méthodes aéroportées et certaines formes de géochimie devraient

être employées en grande exploration, c'est-à-dire appliquées directement sur de très grandes régions. Elles permettent de faire un premier choix de surfaces plus restreintes sur lesquelles on pourra Sismique, gravimétrie, magnétisme au sol, méthodes électriques et électromagnétiques constituent la dernière étape préparant directement les travaux de sondages.

Il s'agit là d'un schéma qui doit être adapté à chaque problème, des connaissances particulières géologiques ou minières sur certaines zones pouvant modifier ce programme, par exemple en justifiant l'application directe de géochimie détaillée ou de méthodes héliportées sur certains massifs intrusifs. Néanmoins, on ne saurait trop insister sur la nécessité de décomposer le travail en étapes pour réduire le coût total en augmentant l'efficacité. Chaque étape a pour but le choix des surfaces sur lesquelles portera le travail de l'étape suivante. Multiplier les méthodes appliquées à chaque stade accroît le volume des renseignements recueillis, mais le prix de revient augmente également, aussi faut-il rechercher si, en ajoutant une nouvelle méthode, le choix des surfaces à étudier au stade ultérieur serait sensiblement modifié.

Il est important de remarquer que les premières étapes de l'exploration d'une région conduisent rarement à la découverte directe de gisements, les cas les plus fréquents étant relatifs au fer (magnétisme) ou à l'uranium (radiométrie).

Généralement, l'exploration est indirecte et les renseignements apportés par les méthodes géophysiques éclairent la structure de la région et guident ainsi le géologue dans le choix des zones les plus intéressantes. C'est donc dans le but de réunir aux moindres frais le plus grand nombre possible de renseignements structuraux sur une région qu'il faut choisir les méthodes à mettre en œuvre dans les premières étapes.

Par contre, les dernières étapes qui préparent les campagnes de sondages ont un apport direct plus important. Par exemple, la géochimie détaillée localisera les concentrations du métal recherché, la prospection électrique précisera la position du filon présumé minéralisé. A ce stade, l'application d'une méthode répond à une question précise, cette réponse conditionnera le programme de sondages ou de recherches par puits et galeries.

En fait, l'exploration minière systématique en est à ses premiers balbutiements, ce qui explique le manque de méthode, l'emploi anarchique des diverses méthodes et l'interprétation très incomplète de leurs résultats.

Les quelques indications que nous donnons ci-après sur certaines de ces mé-

thodes ont pour objectif d'éclairer le lecteur de cette note sur les caractères particuliers de ces méthodes qu'il peut

ignorer en raison de leur développement récent. Elles n'ont pas la prétention d'être exhaustives.

1. Géologie régionale et photogéologie.

Toute exploration minière exige l'établissement d'une carte géologique couvrant toute la région à explorer, le géologue travaillant par analogie et recherchant dans une nouvelle région des caractères pétrographiques ou structuraux dont il connaît l'association à des gisements connus en d'autres lieux.

L'examen des photographies aériennes au stéréoscope par un géologue expérimenté dans ce travail permet de dessiner une carte géologique précise et économique.

Cette carte est plus précise que les cartes géologiques traditionnelles établies par des géologues au sol. Les observations de ceux-ci sont limitées à une étroite bande de terrain le long des itinéraires parcourus, ils n'ont pas une vue d'ensemble. Le dessin de la carte finale par interpolation entre les observations d'itinéraires présente un caractère spéculatif d'autant plus important et dangereux que l'échelle est plus petite. En Afrique les itinéraires parcourus pour établir une carte géologique au 1/200 000 sont distants en moyenne de 10 km.

Au contraire, le photogéologue, grâce aux différences de teintes, de tonalités, de végétation, voit les limites entre les couches, entre les roches de nature différente. Il a toujours une vue d'ensemble de la région qui lui permet de faire un tracé continu de ces lignes de contact. Toutes les différenciations, tous les filons, si leurs dimensions sur la photographie sont supérieures au pouvoir séparateur de l'objectif de la caméra, sont visibles au stéréoscope et peuvent être reportés sur la carte. Seule l'échelle de prise de vue limite l'investigation.

Une méthode rapide, très intéressante pour les grandes reconnaissances dans

les pays neufs, donne une carte photogéologique au 1/200 000, en utilisant des photographies à petite échelle (1/40 000 à 1/60 000). L'exécution rapide (100 000 à 200 000 km² par géologue et par an, suivant l'échelle et la nature du terrain) d'un document d'ensemble couvrant de vastes régions, permet d'organiser les recherches sur l'ensemble du territoire considéré avec l'efficacité maxima et de localiser dès le début les études les plus importantes dans les régions les plus intéressantes.

L'étude photogéologique à l'échelle directe des photographies avec redressement et mise à l'échelle sur une triangulation par fentes radiales donne une carte très précise des régions intéressantes : structures pétrolières, massifs minéralisés. L'échelle choisie suivant le problème posé varie du 1/50 000 au 1/10 000. Quelques problèmes très particuliers justifient une échelle plus grande.

Le contrôle de ces cartes détaillées sur le terrain est indispensable, mais sa durée est de l'ordre du dixième de celle des travaux de terrain nécessaires pour établir la même carte suivant les méthodes traditionnelles, ce qui explique le prix moindre pour une qualité supérieure.

L'étude photogéologique est intéressante sous tous les climats et quelles que soient la nature et l'importance de la végétation et des terrains superficiels. Aisée en zone désertique où les roches sont dénudées, elle est plus difficile dans les zones de savanes ou de cultures des pays civilisés, mais un technicien expérimenté peut exécuter dans tous les cas des cartes très intéressantes même lorsque le géologue au sol ne trouve que de rares affleurements. Ceci est particulièrement remarquable dans les pays couverts de forêts.

2. Géophysique aéroportée.

La prospection aérienne constitue la première étape dans le domaine de la géophysique. Trois méthodes sont actuellement employées :

la magnétométrie, mesurant les variations du champ magnétique terrestre ;

la radiométrie, mesurant la radioactivité des terrains survolés ;

l'électromagnétisme donnant des résultats liés à la conductibilité des roches.

L'installation des appareils à bord d'un avion donne à ces méthodes des avantages incontestables sur les méthodes au sol.

L'avion survole indifféremment les régions habitées ou désertiques, couvertes de forêts vierges ou de marais en suivant

le plan de vol régulier prévu, alors que des prospecteurs au sol rencontreraient des difficultés parfois insurmontables.

Les lignes de vol sont parallèles et leur écartement est fixé en fonction des problèmes à résoudre et non de la nature du sol. Le canevas ainsi tracé permet de réaliser un **document homogène** en toutes circonstances.

Le long de chaque ligne de vol on obtient un enregistrement continu. En chaque point du terrain survolé la valeur mesurée peut être définie. Les interpolations nécessaires à l'établissement des cartes sont celles permettant de corréliser les profils voisins alors que dans les méthodes au sol, où les mesures sont ponctuelles, une interpolation plus importante est indispensable pour construire une carte d'isonomales à partir des valeurs à chaque point. Il n'est pas toujours aisé pour le prospecteur d'établir une maille régulière : il se heurte à des difficultés de repérage et de cheminement, en fonction

des documents cartographiques ou photographiques existants et du recouvrement végétal qui constitue souvent un obstacle.

La prospection aérienne surmonte ce handicap et après chaque vol il est possible de restituer le passage de l'avion à bord duquel est montée une caméra.

La navigation se fait en général à vue lorsque l'on possède des photos aériennes ou des cartes détaillées. Dans le cas contraire, on emploie des systèmes radio-électriques qui donnent en chaque instant la position de l'avion et permettent d'en restituer l'itinéraire.

La prospection aérienne, quelle que soit la méthode choisie, peut se faire en avion ou en hélicoptère. On utilise principalement l'avion dont le prix de revient est moins élevé. réservant l'hélicoptère à des études de détail à altitude très basse (35 mètres) ou au survol de zones de relief très tourmenté où il serait dangereux d'utiliser un avion.

3. Magnétisme aérien.

Les études magnétiques aéroportées donnent rapidement une carte des variations du champ magnétique terrestre.

Le magnétisme évoque d'abord la recherche d'anomalies importantes correspondant à des minéraux très magnétiques (magnétite et pyrrhotine) auxquels peuvent être liés d'autres minéraux intéressants (amiante, platine, chromite, ilménite, sulfures).

Le magnétisme est également employé pour la recherche des gisements liés à une roche basique (nickel, chrome, platine, cuivre, diamant).

Ces deux emplois courants du magnétisme aéroporté ne doivent pas faire perdre de vue une autre application intéressante l'exploration minière : l'établissement des cartes structurales.

Les caractères magnétiques des différentes formations sont reflétés par l'allure générale des variations du champ, ce qui permet d'établir ou de préciser la carte géologique structurale utilisée pour orienter la recherche minière.

En général, les régions faisant l'objet d'études magnétiques à caractère structural sont constituées en majorité, sinon en totalité, de roches cristallines (grands boucliers précambriens, zones métamorphiques, zones d'intrusions plus ou moins récentes).

Dans les zones cristallines, les anomalies magnétiques sont le reflet des différen-

ciations magnétiques existant dans le sous-sol. L'expérience montre — c'est le principe même de l'emploi du magnétisme pour de telles études — que ces différenciations magnétiques sont elles-mêmes le reflet de différenciations pétrographiques liées à la structure géologique de la région. On conçoit donc que l'étude des anomalies magnétiques conduise à des résultats concernant la structure géologique.

Dans les régions où affleurent des formations sédimentaires, non métamorphiques, les anomalies magnétiques sont liées aux différenciations existant dans le socle métamorphique constituant le fond du bassin sédimentaire, aux couches magnétiques interstratifiées (roches volcaniques basiques), aux dykes qui traversent certains sédiments. L'étude des anomalies conduit donc à des résultats intéressants la structure de ces roches magnétiques et non des sédiments eux-mêmes.

Mais l'expérience montre que les accidents majeurs du socle métamorphique ont joué plusieurs fois au cours de la vie du bassin sédimentaire, si bien que la connaissance de la structure du socle intéresse la géologie des sédiments qui le recouvrent. De même la structure des couches basaltiques interstratifiées est liée à celle des sédiments qui les encadrent. Quant aux dykes, ils traversent tous les sédiments qui étaient en place lorsqu'ils se sont formés mais sont recouverts par ceux qui se sont déposés ensuite. La

mesure, grâce au magnétisme, de la profondeur des têtes de ces dykes, renseigne donc sur l'épaisseur des sédiments qui se sont déposés postérieurement à la mise en place des dykes. De même, la mesure de la profondeur du toit des formations métamorphiques indique l'épaisseur des sédiments du bassin.

Ces mesures de profondeur sont précises, l'erreur variant de 10 à 20% suivant la forme et l'amplitude des anomalies; elles constituent la base de l'interprétation des cartes magnétiques levées par les pétroliers. Elles peuvent intéresser au même titre les géologues qui étudient des bassins miniers sédimentaires (charbon, fer, gisements métalliques stratiformes).

L'intensité et la fréquence des anomalies ainsi que leur direction permettent de différencier les unités structurales sur lesquelles viennent se surimposer les accidents tectoniques qui apparaissent de plusieurs façons :

- dans les zones à fort relief magnétique, ils sont souvent indiqués par des ruptures ou des décalages dans les directions des axes d'anomalies. Un tracé très soigné des axes de maxima et de minima permet dans ce cas de les déceler ;
- dans des zones à faible relief magnétique, les accidents peuvent se marquer par des anomalies en général peu intenses et parallèles à la direction de l'accident ;

● lorsque l'accident coïncide avec le contact entre deux unités structurales différentes, il peut se marquer, soit par un changement brutal dans le relief magnétique, soit par un gradient important et régulier reliant deux niveaux moyens différents ;

● enfin, le cas des filons de roches magnétiques (dolérites) très bien marqués par le magnétisme, est à joindre aux cas précédents, car il est probable qu'un réseau de tels filons correspond à un réseau de fractures que l'on peut ainsi particulièrement bien dessiner.

Il convient de noter, d'une manière générale, que le mode d'utilisation d'une telle carte dépend des connaissances géologiques déjà acquises sur la région. Dans un pays vierge, la carte magnétique servira à orienter les levés géologiques préliminaires dont les résultats, reportés sur la carte magnétique, permettront d'en tirer de nouveaux renseignements, ce mode de travail conduisant de proche en proche et toujours aux moindres frais, à une connaissance approfondie et détaillée de la zone. Si, au contraire, la zone est déjà connue géologiquement, la carte magnétique fournira une vue plus synthétique et facilitera souvent le choix entre différentes hypothèses formulées par les géologues. Une étude récente effectuée en France dans une région bien connue des géologues, a montré l'existence d'un grand réseau de failles qui avait échappé.

4. Radiométrie aéroportée.

La mise au point de scintillomètres sensibles a permis le développement rapide des études aériennes de radio-activité. Outre la recherche des minéraux radioactifs courants (uranium, thorium), la radiométrie peut être employée à des fins structurales.

Les roches ont des teneurs en éléments radioactifs (U, Th et K) variables. Un scintillomètre permet donc d'établir une différenciation entre les radioactivités moyennes de ces roches et de dresser une carte mettant en évidence les grandes lignes géologiques de la région survolée. De telles études effectuées en France et en Afrique ont donné des résultats très satisfaisants.

On peut craindre que l'absorption du rayonnement gamma mesuré ne limite le champ d'investigation à une très faible épaisseur de terrain et, dans le cas où la roche est recouverte même faiblement de terre végétale, que les renseignements obtenus ne correspondent pas à la réalité. L'existence d'une auréole géochimique donnant une image plus ou moins représentative de la composition

des roches sous-jacentes atténue les effets néfastes de l'absorption. L'altération des roches et le transport d'ions vers la surface du sol dans lequel ils se fixent sous forme de composés insolubles, créent des accumulations superficielles au-dessus des roches en place. L'intensité du rayonnement de ces auréoles superficielles est inférieure à celle des roches sous-jacentes, mais sa mesure permet de connaître la radio-activité relative des différents terrains. Ce phénomène étant général, on dresse une carte de radio-activité des auréoles géochimiques.

La circulation des ions est perturbée par la fracturation des roches et la carte géochimique obtenue est déformée par les accidents tectoniques.

De nombreuses failles sont des voies de circulation privilégiées et peuvent ainsi être décelées par la radiométrie. Une étude radiométrique systématique permet donc de dresser une ébauche de carte structurale où les principaux accidents et les grandes lignes géologiques apparaissent. Pour donner à cette carte toute l'exactitude souhaitable il est recom-

mandé de faire en même temps une étude photogéologique de la région. Les zones alluvionnaires font écran et il est utile de les délimiter afin de les éliminer et d'effectuer les interpolations entre séries bien définies. La photogéologie permet aussi de tracer les contacts géologiques, failles, filons et alignements visibles sur les photographies. Une étude comparative des deux documents ainsi établis conduit à des conclusions intéressantes l'établissement

ment de la carte géologique et la recherche minière.

Des appareils à discrimination ont été mis au point ces dernières années. Ils distinguent les rayonnements des éléments radioactifs principaux : uranium, thorium, potassium. Les caractéristiques actuelles de ces appareils militent en faveur de leur emploi dans les études hélicoptérées de détail, à basse altitude.

5. Electromagnétisme aéroporté (méthode électroaérienne des Russes).

De nombreux dispositifs différents sont utilisés que l'on peut classer en trois groupes :

1. Un émetteur monté à bord d'un avion émet un champ électromagnétique. Ce champ induit dans les terrains conducteurs des courants qui provoquent un nouveau champ électromagnétique de même fréquence, déphasé par rapport au champ inducteur. Un récepteur à bord de l'avion permet d'étudier ce champ induit.

Dans ce premier groupe, émetteur et récepteur ont une position relative fixe, ce qui donne une grande sensibilité et permet d'étudier les composantes du signal reçu, en phase et en quadrature avec le signal émis.

La distance entre émetteur et récepteur étant faible, la profondeur d'investigation l'est également, ce qui exige un vol à basse altitude. Aussi ces équipements sont-ils surtout utilisés sur hélicoptère pour des études de détail. Certains sont néanmoins montés sur avion pour diminuer le coût de la prospection.

2. L'émetteur est à bord de l'avion et le récepteur dans une torpille tractée. La position relative mobile accroît le bruit de fond et ne permet de mesurer que le déphasage entre signaux émis et reçus. On utilise plusieurs fréquences différentes (les Russes en utilisent 5) pour couvrir une large bande de résistivités. L'effet des couches conductrices superficielles est gênant et l'interprétation des résultats difficile. La profondeur d'investigation est limitée par la longueur du câble de traction de la torpille contenant le récepteur. Enfin, l'utilisation de basses fréquences exige une forte puissance d'émission, donc un équipement lourd qui ne peut être monté que sur un avion assez gros. Ceci limite l'emploi de la méthode aux pays plats, un gros avion ne pouvant voler près du sol dans une région accidentée.

Un système accroît la profondeur d'investigation en plaçant le récepteur dans un avion et l'émetteur dans un second avion suivant le premier à 200-300 m. Le champ émis est un champ tournant.

L'utilisation de deux avions est une lourde sujétion. Les résultats sont également d'une interprétation délicate.

3. Dans le système du « câble infiniment long » le champ alternatif est émis par un câble posé sur le sol. L'équipement récepteur est à bord d'un avion léger ou d'un hélicoptère qui vole des lignes perpendiculaires au câble. Les Russes utilisent couramment des câbles de 25 km de long, les lignes de vol ayant 15 à 20 km de longueur de part et d'autre du câble.

Cette méthode plus efficace, car on n'est pas limité au sol dans la puissance d'émission, est utilisée dans des études de détail ;

Les méthodes électroaériennes ont montré leur efficacité dans les études de détail ; elles remplacent alors plus économiquement les mesures électromagnétiques qui seraient faites au sol lorsque la zone à étudier est assez grande pour justifier le déplacement d'un équipage.

Mais les systèmes actuels ne sont pas pleinement satisfaisants pour l'exploration de grandes surfaces. En ajoutant cette méthode aux mesures magnétiques et radiométriques, on accroît de 70% environ le coût unitaire de la prospection sans que les résultats obtenus justifient cette dépense supplémentaire. L'expérience montre que le choix des zones à étudier en détail après l'Exploration n'est pas sensiblement différent quand on utilise trois méthodes (magnétisme, radiométrie et électromagnétisme) ou seulement les deux premières. Il est donc économiquement préférable de se limiter pendant la première Exploration aux deux premières méthodes et d'employer les trois dans les études de détail, si le contexte géologique le justifie.

Il est probable que dans les années à venir l'amélioration de ces méthodes ou la mise au point de méthodes nouvelles permettra d'étudier systématiquement par avion les caractéristiques électriques du sol et du sous-sol aussi efficacement que l'on étudie aujourd'hui leurs caractéristiques magnétiques et leur radioactivité.

IV. PROGRAMME TYPE D'EXPLORATION MINIÈRE

1. Première phase : Exploration régionale.

Essayons de donner à titre indicatif un programme d'exploration d'une région assez large, afin de montrer comment les opérations peuvent se succéder. Il ne s'agit pas d'un cadre rigide applicable à toute exploration, car chaque programme régional doit être mis au point en tenant compte des connaissances déjà acquises.

Nous considérons une surface assez grande de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés.

Une couverture photographique aérienne de la région est indispensable ; si elle n'existe pas, elle doit être exécutée en premier lieu. Le choix de l'échelle dépend de considérations économiques et techniques contraires. Cette échelle peut être comprise entre 1/15 000 et 1/100 000. Le prix de revient de la prise de vues et celui des techniques ultérieures qui exploitent les photographies croissent rapidement avec l'échelle, ce qui explique que les couvertures systématiques de grands ensembles soient généralement faites à une échelle voisine du 1/50 000.

Mais dans les régions géologiques complexes, une échelle plus grande accroîtra l'efficacité de la photogéologie et il peut donc être préférable de choisir une échelle voisine du 1/25 000.

Vient ensuite l'exploration proprement dite : les **méthodes préconisées** à ce stade sont la **photogéologie**, la **magné-**

tométrie et la **radiométrie aéroportées**.

Une mosaïque est exécutée avec les photographies aériennes. Cette mosaïque sert de plan de base à la photogéologie et de plan de vol à la géophysique aéroportée. S'il existe une bonne carte, elle permet d'établir une mosaïque homogène en calant celle-ci sur des points caractéristiques dont la carte donne les coordonnées. S'il n'y a pas de carte précise, on établit une mosaïque contrôlée à l'aide d'une triangulation par fentes radiales. Ce procédé permet d'obtenir un document homogène où les erreurs sont régulièrement réparties. On peut ainsi compenser les effets de variations d'échelle, etc. On ne saurait trop insister sur l'utilité d'avoir une mosaïque de bonne qualité, car tout le travail ultérieur en sera facilité.

Les plans de vol habituellement adoptés sont constitués par des lignes parallèles équidistantes dont la direction est choisie pour recouper sous le plus grand angle possible les directions structurales de la région étudiée. Ce choix est souvent délicat car, dans une région donnée, il y a fréquemment plusieurs directions intéressantes réparties dans des secteurs d'orientation différents, qu'il faudrait recouper transversalement : direction des roches métamorphiques ou sédimentaires, grandes fractures, réseaux de filons, etc. La solution idéale est alors de voler un réseau carré, de telle façon que tout axe intéressant soit recoupé par l'une des deux directions de vol sous un grand angle. Ce sont des considérations de prix de revient qui font généralement rejeter cette solution.

Il faut donc choisir une direction de compromis, éventuellement après quelques vols d'essai.

L'intervalle des lignes est également un compromis car pour obtenir des cartes représentant complètement le champ magnétique ou les variations de radio-activité à une altitude donnée, l'intervalle devrait être compris entre 1 et 2 fois l'altitude de vol au-dessus du sol. Lorsque l'on veut combiner magnétisme et radiométrie, l'altitude ne peut être, pour éviter une trop grande atténuation de la radio-activité, supérieure à 150 m, ce qui correspond à un intervalle de 150 à 300 m.

Très fréquemment les structures recherchées ont un grand allongement et elles se développent sur plusieurs kilomètres de longueur. Si les lignes de vols ont une direction perpendiculaire à cet allongement il est possible d'avoir une bonne corrélation entre les anomalies magnétiques ou radiométriques enregistrées sur les profils successifs, lorsque ceux-ci ont un intervalle supérieur aux chiffres ci-dessus. Il faut alors s'aider de la géologie et de la photogéologie pour dessiner les cartes géophysiques.

Un intervalle de 1 km est couramment utilisé dans de telles études. Des expériences récentes ont montré que l'on pouvait se contenter dans une première phase d'un intervalle de 2 km. Dans certaines zones les anomalies étant moins allongées, la corrélation est difficile ou impossible entre lignes voisines. On vole alors des lignes intermédiaires portant l'intervalle à 1 km ou même à 500 m. Dans d'autres zones la corrélation est rendue difficile par la présence d'accidents structuraux très obliques, il est alors préférable de voler des lignes complémentaires transverses. Un examen rapide des enregistrements sur le terrain, en s'aidant de la géologie connue, permet de décider en cours de campagne des lignes complémentaires à ajouter. L'expérience montre que l'on ajoute ainsi en moyenne un tiers des lignes volées en première phase, ce qui porte la densité des vols à 0,75 km de profil par km² de surface prospectée, y compris les transverses, au lieu de 1,1 km/km² dans le cas d'une maille kilométrique systématique, soit une économie de 32%.

Mais il ne faut pas oublier, en exploitant

ces cartes, que les courbes sont interpolées entre les profils et que l'intervalle de ceux-ci étant trop grand, compte tenu de l'altitude, des anomalies de quelques centaines de mètres d'allongement peuvent passer inaperçues.

Il est important de remarquer que dans la prospection aéroportée tout est enregistré : un film pris pendant le vol donne la position réelle des lignes de vol. Les renseignements géophysiques : champ magnétique et radio-activité sont enregistrés, ainsi que la distance au-dessus du sol, donnée par une radiosonde. Enfin, un intervallo-mètre envoie des signaux électriques sur tous ces documents, ce qui permet de les synchroniser et de replacer dans l'espace les mesures faites. On peut donc revoler ultérieurement des lignes complémentaires, intermédiaires ou transverses et recompiler ensemble anciens et nouveaux documents. On peut également reprendre compilation et interprétation à plusieurs années d'intervalle pour tenir compte de nouvelles données, les documents originaux conservant indéfiniment leur objectivité. Seule l'évolution des techniques peut les rendre caducs.

Dans les bassins sédimentaires de grande surface on peut se contenter d'un premier réseau de profils moins dense. On détermine ainsi, rapidement et aux moindres frais, l'épaisseur des sédiments ; on sépare, grâce au magnétisme, les zones profondes de celles où le cristallin est peu profond ; on repère par la radiométrie les zones susceptibles de contenir des gisements de phosphates, etc. Il ne s'agit là que d'une exploration très succincte permettant de choisir dans une région de plusieurs centaines de milliers de km², les premières zones à étudier. Le plan de vol est à définir dans chaque cas particulier en fonction des connaissances géologiques et des problèmes posés. On pourra envisager, soit des profils parallèles distants de 10 ou 20 km, soit une maille carrée correspondant au même intervalle, soit des bandes de 2 ou 3 profils, les bandes étant distantes de 20 à 50 km et les profils dans la même bande de 2 km.

2. Deuxième phase : Interprétation et choix des zones de détail.

EN QUOI CONSISTE CETTE INTERPRÉTATION ?

L'interprétation présente deux aspects majeurs :

Sur les zones cristallines expliquer toutes les anomalies rencontrées et toutes les variations de radioactivité ou de magnétisme en fonction des caractères géologiques et ceci en s'appuyant sur des docu-

ments géologiques existants et sur une étude photogéologique. Tout ne peut pas être expliqué et souvent les points qui restent obscurs méritent une investigation sur le terrain, car il ne faut pas oublier qu'un gisement minéral est une accumulation anormale, qui peut donc produire des anomalies géophysiques, c'est-à-dire qui possède des caractères inexplicables par la géologie locale.

Il en est de même pour les anomalies radiométriques en zone sédimentaire. **Dans les bassins sédimentaires** outre l'interprétation directe qualitative des anomalies magnétiques qui permet de localiser des dykes basiques, des failles, des affleurements basaltiques et des anomalies radiométriques localisant des couches uranifères, phosphatées, certaines formations bitumineuses, l'analyse quantitative des anomalies magnétiques permet de faire les déterminations de profondeur des masses magnétiques qui sont très intéressantes quand il s'agit de gisements magnétiques (fer, nickel), mais également pour connaître l'épaisseur des sédiments et leur structure.

QUELLES ZONES RETIENDRONT L'ATTENTION ?

- a. Les massifs magnétiques et les anomalies magnétiques, abstraction faite de celles qui ont des causes évidentes et sans intérêt économique (coulées basaltiques, dolérites, etc.), ces dernières pouvant généralement être éliminées par un examen photogéologique et des particularités du champ magnétique.
- b. Les massifs radioactifs et les anomalies radioactives pouvant être liées à des formations uranifères ou thorifères.
- c. Des failles de contact entre roches montrant une certaine radioactivité ou des anomalies magnétiques même faibles.
- d. Des associations de caractères géologiques et géophysiques même négatifs peuvent attirer l'attention sur certaines roches (par exemple des taches photogéologiques liées à des trous de radioactivité).
- e. Les zones sédimentaires dont les caractères sont favorables aux gisements-recherchés.

CONTROLE GÉOLOGIQUE

L'interpréteur formule des hypothèses sur la nature des roches, sur les causes des anomalies, qu'il est nécessaire de vérifier sur le terrain. L'expérience montre que ce contrôle doit être exécuté par un géologue connaissant les méthodes géophysiques utilisées, afin qu'il apprécie la valeur des renseignements que ces méthodes peuvent apporter. Le contrôle le plus efficace est fait par une équipe comprenant un géologue connaissant bien la géologie locale et un géophysicien qui vérifiera rapidement les anomalies les plus caractéristiques et éclairera le géologue sur leur cause. Le géologue est le chef d'équipe. Ce contrôle est généralement rapide, car il est localisé en un certain nombre de points bien définis. C'est habituellement après ce contrôle géologique que géologues et géophysiciens peuvent déterminer le programme de la prospection géophysique de détail (géologie, géophysique, sondages).

Ce contrôle géologique peut être fait par un géologue transporté par hélicoptère lorsque les points à vérifier sont assez dispersés dans une région d'accès difficile. Outre son prix de revient plus faible dans de telles régions, cette méthode présente un avantage technique, celui de donner au géologue une vue d'ensemble de la zone à étudier, à une certaine altitude, et de préciser ainsi les caractères photogéologiques précédemment relevés au bureau. Il est préférable que ce géologue ait auparavant fait l'étude photogéologique.

Lorsqu'il s'agit de contrôler des anomalies radiométriques, l'installation sur l'hélicoptère d'un scintillomètre permet en même temps au géologue de préciser les anomalies à basse altitude, ce qui peut éviter une étude radiométrique détaillée ultérieure.

3. Troisième phase : Etude de détail.

a) Méthodes aéroportées et héliportées

Ces méthodes ne doivent pas être employées systématiquement. À ce stade, elles répondent à des problèmes particuliers et ne constituent pas une phase nécessaire de l'exploration minière de la région. Le rôle essentiel de la géophysique aéroportée ou héliportée détaillée est d'éviter la dispersion des travaux au sol sur des surfaces trop grandes et dans une région contenant de nombreuses anomalies, de concentrer l'attention sur les plus intéressantes. Leur emploi est préconisé dans les cas suivants :

- Lorsque l'on a détecté des anomalies radioactives bien définies qui semblent liées à des gisements uranifères possibles,

il est nécessaire de faire une prospection radiométrique aéroportée ou héliportée à basse altitude (50 m environ) avec un intervalle entre les lignes inférieur ou égal à 250 m. On augmente ainsi la résolution de la carte, c'est-à-dire que l'on évite que deux anomalies voisines ne soient confondues et on obtient un document directement exploitable sur le terrain.

- Lorsque l'exploitation a mis en évidence des anomalies magnétiques de faibles dimensions liées à des minéralisations possibles (kimberlites, serpentines, etc.), il est nécessaire également de resserrer les lignes. Lorsque les anomalies sont de

faible amplitude, il est préférable de voler plus bas, ce qui justifie alors l'emploi de l'hélicoptère, car l'amplitude des anomalies ponctuelles varie rapidement avec l'altitude.

- Lorsqu'il existe des couches magnétiques voisines les unes des autres, il peut être intéressant d'exécuter des vols à plus basse altitude pour distinguer les effets de chaque couche.

- Lorsque sur un filon ou un contact pétrographique de faibles anomalies locales sont apparues, il est recommandé de voler à basse altitude des lignes serrées pour rechercher les effets magnétiques éventuels d'une minéralisation associée à un gisement filonien, ces effets ayant pu être trop faibles pour pouvoir être détectés à l'altitude de l'exploration.

- Les méthodes électromagnétiques aéroportées ou héliportées seront surtout intéressantes dans les régions où la

photogéologie a mis en évidence de nombreuses fractures, filons, etc. qui n'apparaissent ni sur les documents magnétiques, ni sur les documents radiométriques. La prospection électromagnétique permet alors de savoir s'il existe ou non des accumulations conductrices liées à ces accidents, et leur localisation.

Les documents ainsi obtenus devront être interprétés, vérifiés au sol dans des conditions comparables à ceux de l'exploration. Il est important de souligner la nécessité pour faire de telles études et, pour les interpréter, de disposer d'une couverture photographique à moyenne échelle (1/10 000 - 1/15 000). Lorsque celle-ci n'existe pas, il est préférable d'en faire la prise de vues avant d'entreprendre des études détaillées. Il est à noter que ces photographies agrandies au 1/5 000 sont une aide précieuse aux géologues et géophysiciens chargés d'études détaillées au sol.

b) Géophysique (et géochimie) au sol

De nombreuses méthodes sont utilisables, et dans chacune des méthodes, plusieurs techniques sont souvent disponibles. L'énumération exhaustive de ces méthodes et de ces techniques alourdirait trop notre exposé et nous nous bornerons à fournir quelques renseignements sur les conditions de leur application et leurs possibilités pratiques.

La **prospection géochimique** est un élément fondamental de l'exploration car elle permet de savoir s'il existe des accumulations de métaux associés à des anomalies géophysiques ou à des massifs géologiques singuliers.

La géochimie constitue le moyen pour passer de la prospection indirecte à la prospection directe chaque fois que les minerais recherchés n'ont pas de caractères physiques permettant aux méthodes géophysiques d'en faire la prospection directe.

La géochimie peut se présenter sous deux formes différentes :

Dans une zone que l'on suppose intéressante, mais sans savoir a priori quels métaux on peut y rencontrer, on a intérêt à exécuter des prélèvements systématiques à large maille ; ces prélèvements étudiés par des méthodes spectrographiques donnent des ordres de grandeur de la teneur des formations superficielles pour les différents métaux.

Lorsque l'on connaît la présence d'un ou de plusieurs métaux sur une surface restreinte, une étude géochimique systématique limitée à l'analyse de ces métaux permet de localiser les zones de plus fortes concentrations.

A noter que, dans certains cas, les traces d'éléments recueillis en surface sont révélatrices de la présence de gisements

enfouis très profondément (plusieurs centaines de mètres). Les processus de migration n'étant pas exactement connus, la géochimie est un excellent « moyen d'approche », mais l'interprétation des résultats reste empirique et, en particulier, il n'y a pas de corrélation possible entre le résultat des analyses et la teneur du minerai, origine de la diffusion.

Pratique, légère, simple et rapide, la prospection géochimique est un auxiliaire précieux du géologue ; mais on a pu l'appeler une « version très améliorée du vieux procédé de la battée ». Comme toute méthode d'application assez récente, elle se perfectionne chaque jour et son rôle peut s'amplifier encore. Actuellement, elle intervient couramment dans les recherches de cuivre, plomb, zinc, chrome, nickel, tungstène, molybdène, vanadium, cobalt, or, niobium, antimoine, arsenic...

Le **magnétisme au sol** est une phase nécessaire avant l'implantation des forages et travaux miniers dans les prospections de magnétite, pyrrhotine ou toute substance reconnue associée à elles (chromite, hématite, sulfures).

Il intervient indirectement dans les recherches de gisements liés à des venues éruptives basiques (péridotites, serpentines, etc.), ces dernières présentant, comme nous l'avons déjà signalé, une susceptibilité magnétique élevée.

Les appareillages utilisés (balances magnétiques et surtout les magnétomètres modernes à protons) sont très légers, les mesures sont rapides, l'interprétation peut être très élaborée et très précise.

Si le magnétisme est la plus ancienne des méthodes géophysiques, on doit lui reconnaître le mérite d'avoir les plus belles références et réussites dans le domaine minier.

Le domaine embrassé par les **méthodes électriques et électromagnétiques** est immense et les études poursuivies dans de nombreux pays en reculent les limites sans cesse.

On imagine aisément les nombreuses possibilités de localisation directe et indirecte de minerais par des méthodes qui, au prix d'équipements assez modestes d'ailleurs, étudient le potentiel naturel du sol (polarisation spontanée), le potentiel du sol lors de la mise sous tension d'un gisement conducteur (mise à la masse), la chute du potentiel au voisinage d'une électrode (potential drop ratio des Anglo-Saxons), le potentiel du sol sous l'effet d'une émission momentanée de courant (polarisation provoquée), la résistivité apparente en courant continu ou pulsé ou alternatif (profils ou traînés de résistivités, sondages électriques, rectangles « AB »), le champ électrique naturel dans ses variations (tellurique), le champ électromagnétique au voisinage d'une boucle ou d'une ligne émettrice : direction, intensité, déphasage, etc. (électromagnétisme).

Suivant que l'on aura en vue le « battage » ou le « ratissage » d'un secteur reconnu intéressant par l'exploration aéroportée ou que l'on s'attachera à localiser l'extension d'un gisement déjà signalé et reconnu, la densité des observations peut varier largement et, par conséquent, les dépenses engagées également.

Quoi qu'il en soit, la prospection électrique ou électromagnétique est rapide et économique pour implanter les premiers forages, au moins dans les cas suivants :

- Localisations directes de pyrites, pyrrhotine, failles et zones broyées, chalcoppyrite et tous autres sulfures conducteurs, filons de quartz, filons à gangue différenciée (au point de vue électrique) des éponges, graphite, poches d'argile, poches d'altération, sel gemme, contacts géologiques.
- Localisations indirectes de gisements par l'étude de la roche magasin (applications très nombreuses à des niveaux, couches, amas, filons de cuivre, plomb, zinc, or, nickel, chrome, fer, charbon, calcaire à ciment, argiles spéciales, etc.), de la tectonique locale, des formes d'altération ou d'érosion, etc. (uranium, gîtes remaniés, placers).
- Etudes géologiques des zones recouvertes (« écorchés géologiques »).

La sismique peut intervenir dans les recherches minières au même titre que dans la recherche pétrolière pour étudier les structures profondes ou semi-profondes.

Différents niveaux du primaire ont été suivis par sismique réflexion jusqu'à des profondeurs importantes dans des bassins charbonniers. Plus modestement, des déterminations par sismique réfraction de

thalwegs enterrés, de profils de bedrock, de failles, sont classiques (application à des recherches de cassitérite, or, uranium). D'autre part, la relation qui existe entre la vitesse de propagation des ondes élastiques et le degré de fissuration de certaines roches a pu être utilisée.

La gravimétrie est sensible aux contrastes de densité et peut être utilisée comme méthode indirecte (recherche de failles, de contacts) ou directe (dômes de sel, minerais lourds). En prospection minière, sa mise en œuvre est minutieuse car une grande précision est nécessaire pour les mesures elles-mêmes et pour les levés topographiques, mais elle fournit des cartes d'une lecture relativement facile, pourvu que les contrastes de densité et les volumes mis en jeu soient suffisants pour donner des anomalies.

Pratiquement, les études gravimétriques de détail des anomalies provoquées par des causes peu profondes demandent une grande densité de mesures, des corrections précises, un soin extrême dans les levés topographiques et, dans ces conditions, sont handicapés par leur prix de revient et leur lenteur.

La radioprospection au sol (autoportée ou à pied) mérite d'être mentionnée car, à côté de son application bien connue à la recherche des gisements d'uranium et de thorium, nous avons vu qu'elle peut rendre de grands services dans les études structurales. De plus, par mesure des rayonnements secondaires après bombardement neutronique, on a un excellent moyen de déterminer des couches de potasse, de charbon dans les forages. Enfin, les niveaux phosphatés sédimentaires sont généralement radioactifs, ce qui permet au prospecteur de les étudier par radioprospection.

La thermométrie terminera notre liste. Bien que la température ou la conductibilité thermique soient des propriétés physiques assez rarement utilisables, la thermométrie peut rendre, à très bas prix, des services intéressants dans les régions à volcanisme récent (vapeur naturelle, eaux thermales, gisements de soufre, de bore).

Pour conclure ce chapitre de la géophysique au sol, nous rappellerons quelques considérations générales :

La conduite d'un programme de recherches et l'adaptation des procédés impliquent toujours une coopération suivie entre géologue, géophysicien et mineur. La géophysique n'est qu'un aspect spécialisé de la géologie et la synthèse des renseignements (souvent originaux et parfois inattendus) obtenus par les différentes voies est d'essence géologique ; comme nous l'avons déjà signalé, le géologue responsable devra posséder une formation géophysique, de même que le géophysicien spécialisé sera géologue de formation et de « pensée ».

Les pièges (assez fréquents) seront évités, de même que les interprétations trop rigoureuses ou abusives ; la « tactique » la plus avantageuse sera employée, appuyée sur le choix judicieux des méthodes et leur superposition, si nécessaire ; les problèmes seront clairement posés et les limitations de la géophysique bien connues, ce qui évitera des tâtonnements coûteux.

Ainsi sera préparée dans les meilleures conditions la phase ultérieure de reconnaissance par sondages mécaniques et travaux miniers. Bien que les techniques géophysiques soient généralement au point, tout en étant toujours perfectibles, rappelons qu'elles ne possèdent qu'une « vision floue mais pénétrante » qui atteint les propriétés majeures des terrains plus aisément que les points de détail ; elles ne sont en aucune manière une panacée pour la reconnaissance. Leur intervention aura lieu d'ailleurs sous une forme plus précise au cours de la période des forages dans diverses opérations (carottages électriques, sismique, magnétique, neutron logs, corrélations, détermination des pendages, analyse des porosités et perméabilités, etc.). Ce dernier domaine d'application, riche en possibilités et sources d'économies appré-

ciables, ne sera pas traité dans cette note qui s'est donnée pour objet essentiel l'examen approfondi de la phase d'exploration seule.

Nous espérons avoir montré comment il est possible actuellement d'organiser l'exploration systématique d'une région assez vaste, indépendamment des indices connus antérieurement. Lorsqu'il en existe, ces indices permettent d'étalonner les résultats obtenus par les méthodes géologiques et géophysiques et facilitent l'interprétation. Il est important de souligner encore le rôle des interpréteurs, car la qualité des résultats obtenus dépend essentiellement des conditions dans lesquelles cette interprétation est faite. Il faut laisser aux géologues et géophysiciens le temps de réfléchir sur les documents obtenus et pour cela étaler cette exploration dans le temps et prévoir plusieurs mois entre exploration et études détaillées. Pour des raisons économiques, il peut être intéressant de combiner l'exploration de plusieurs régions de telle façon que les équipes puissent se déplacer de l'une à l'autre et laisser aux interpréteurs le temps de travailler sur la première zone pendant qu'on exécute les mesures sur la seconde ou la troisième.