

SOCIÉTÉ
GÉOLOGIQUE
DU
NORD

GÉOLOGIE APPLIQUÉE
AUX PROBLÈMES
D'ÉNERGIE ET DE MATIÈRES PREMIÈRES

ANNALES

Tome CII

1982

2^{me} trimestre

VOLUME SPÉCIAL PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS DE
L'ÉTABLISSEMENT PUBLIC RÉGIONAL NORD - PAS-DE-CALAIS

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ

SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

Extraits des Statuts

Article 2.

— Cette Société a pour objet de concourir à l'avancement de la géologie en général, et particulièrement de la géologie de la région du Nord de la France.

— La Société se réunit de droit une fois par mois, sauf pendant la période des vacances. Elle peut tenir des séances extraordinaires décidées par le Conseil d'Administration.

— La Société publie des Annales et des Mémoires. Ces publications sont mises en vente selon un tarif établi par le Conseil. Les Sociétaires bénéficient d'un tarif préférentiel (1).

Article 5.

Le nombre des membres de la Société est illimité. Pour faire partie de la Société, il faut s'être fait présenter dans l'une de ses séances par deux membres de la Société qui auront signé la présentation, et avoir été proclamé membre au cours de la séance suivante.

Extraits du Règlement Intérieur

§ 7. — Les Annales et leur supplément constituent le compte rendu des séances.

§ 13. — Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisation et abonnement de l'année peuvent publier dans les Annales. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un même auteur, ne peut dépasser le total de 10 pages, 1 planche simili étant comptée pour 2 p. 1/2 de texte.

Le Conseil peut, par décision spéciale, autoriser la publication de notes plus longues.

§ 17. — Les notes et mémoires originaux (texte et illustration) communiqués à la Société et destinés aux Annales doivent être remis au Secrétariat le jour même de leur présentation. A défaut de remise dans ce délai, ces communications prennent rang dans une publication postérieure.

§ 18. — Les mémoires sont publiés par fascicules après décision du Conseil.

Avertissement

La Société Géologique du Nord ne peut en aucun cas être tenue pour responsable des actes ou des opinions de ses membres.

Tirages à part

Conformément au paragraphe 14 du Règlement Intérieur (Tome LXXXI, p. 12), les tirages à part sont à la charge des auteurs qui doivent en faire par écrit la déclaration expresse en tête des épreuves du bon à tirer.

Cotisations et Abonnements (à la date du 1^{er}-1-1981)

	QUALITE	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
FRANCE et BENELUX	Personnes physiques (2)	20,00 F	105,00 F H.T.	125,00 F H.T.
AUTRES PAYS	Personnes physiques	20,00 F	120,00 F H.T.	140,00 F H.T.

Abonnement des non-membres : FRANCE : 240,00 F H.T. — ETRANGER : 280,00 F

Pour tous renseignements et règlements, s'adresser à : Secrétariat S.G.N., Sciences de la Terre,
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex — Tél. 91.92.22 — C.C.P. Lille 5247

ANNALES DE LA SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

La vente des Annales s'effectue par tomes entiers aux prix suivants. Exceptionnellement, et jusqu'à épuisement du stock, certains fascicules sont en vente séparément. Leur liste figure en fin de fascicule.

Tomes I à LXXIX (manquent I, II, V à IX, XVI, XXII, XXXIV à XXXVI, XXXIX, à XLIII, XLV, XLVII à LVIII)	170,00 F H.T.
Tomes LXXX à XCV (manque XCI)	220,00 F H.T.
Tomes XCVI et suivants	240,00 F H.T.

(1) Modification adoptée lors de l'Assemblée Générale du 10 Janvier 1974.

(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle peuvent, par décision du Conseil, bénéficier d'un tarif préférentiel sur l'abonnement (58,00 F).

SOCIÉTÉ
GÉOLOGIQUE
DU
NORD

GÉOLOGIE APPLIQUÉE
AUX PROBLÈMES
D'ÉNERGIE ET DE MATIÈRES PREMIÈRES

ANNALES

Tome CII

1982

2^{me} trimestre

VOLUME SPÉCIAL PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS DE
L'ÉTABLISSEMENT PUBLIC RÉGIONAL NORD - PAS-DE-CALAIS

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 1982 —

<i>Président</i>	M. J. CHARVET
<i>Premier Vice-Président</i>	M. V. PRUDHOMME
<i>Vice-Présidents</i>	M. J.J. FLEURY M. I. GODFRIAUX
<i>Secrétaire</i>	M. J.M. DÉGARDIN
<i>Secrétaire-Adjoint</i>	M. J. FERRIÈRE
<i>Directeur de la Publication</i> .	M ^{me} Paule CORSIN
<i>Trésorier</i>	M. l'Abbé TIEGHEM
<i>Archiviste-Bib'iothécaire</i>	M. J.L. MANSY
<i>Conseillers</i>	M. B. CLÉMENT J. CHALARD H. CHAMLEY M. P. CELET M. J. LEPLAT M. J. SOMMÉ

COMITE DE LECTURE

— 1982 —

M^{me} Paule CORSIN, Directeur de la publication
M. J.M. CHARLET
M. Ch. DELATTRE
M. P. CELET
M. I. GODFRIAUX

A N N A L E S
D E L A
S O C I É T É G É O L O G I Q U E D U N O R D

Société fondée en 1870 et autorisée par arrêtés en date des 3 Juillet 1871 et 28 Juin 1873

Secrétariat : Société Géologique du Nord
Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Tél. 91.92.22 — C.C.P. Lille 52-47

Avant-propos

par José LEPLAT

Président pour 1980 et 1981 de la Société Géologique du Nord

Dans le cadre de notre civilisation industrielle, axée sur la productivité et la consommation, l'Energie et les Matières Premières occupent une place fondamentale. Il aura pourtant fallu attendre les " chocs pétroliers " pour que le grand public commence à entrevoir le caractère limité des réserves disponibles et les difficultés accrues qu'entraîne leur exploitation. S'étant donné pour président un géologue appliqué, confronté en permanence à ces problèmes, la Société Géologique du Nord se devait de consacrer à ce thème d'actualité une séance spéciale.

Dans les années 1960, notre Région du Nord - Pas-de-Calais a déjà fait l'objet de recherches pétrolières, hélas infructueuses. De nouvelles données géologiques ayant été acquises depuis ce temps, la Société TOTAL a obtenu récemment un permis de recherche (permis Boulogne-Maubeuge). Les deux communications présentées par des ingénieurs de cette Société exposent les méthodes modernes mises en œuvre à cette occasion : télédétection par examen, après traitement spécial, des photos de satellite - sismique réflexion par la technique vibroseis. L'objectif avoué est la recherche de structures profondes favorables, susceptibles de donner du gaz. Si les résultats de ces études préalables sont probants, un forage profond sera alors entrepris.

S'agissant d'une région de longue tradition minière comme la nôtre, plusieurs exposés devaient être réservés au charbon, un charbon particulièrement difficile à extraire en raison de la minceur des veines, de la profondeur du gisement et des déformations tectoniques qui l'affectent. Les projets d'exploitation, établis à partir d'hypothèses géologiques justifiées par les travaux antérieurs et les diverses reconnaissances préalables (galeries - sondages), sont fréquemment modifiés par la découverte d'accidents tectoniques ou sédimentaires imprévisibles, comme le démontre fort bien la communication de Monsieur Varoqueaux, ingénieur aux H.B.N.P.C. Par ailleurs, la mécanisation de l'extraction nécessite un découpage " au carré " ce qui, compte tenu de la complexité du gisement, se traduit par une exploitation moins complète qu'auparavant. L'exploitation minière traditionnelle ne semblant pas devoir être poussée au-delà de 1 000-1 200 mètres de profondeur, la fin de notre Bassin Houiller du Nord - Pas-de-Calais serait relativement proche, au moins sous sa forme actuelle. Toutefois, le relais pourrait être pris par la gazéification souterraine, comme l'ont montré les expérimentations réalisées sur le site de la Fosse 6 de Bruay-en-Artois. Dans ce domaine, les recherches doivent se poursuivre sur d'autres sites, en particulier dans notre région sur celui de la Haute-Deûle, avant qu'une première opération de type industriel puisse être envisagée, peut-être vers la fin de ce siècle.

Les chercheurs de l'Université de Mons (Belgique) ont abordé le Nucléaire, tant décrié par certains, par le biais de la mesure des teneurs en uranium des gisements phosphatés. Testée sur des sédiments phosphatés de Belgique et du Nord de la France, la méthode apparaît rapide et précise. Elle pourrait être appliquée par la suite à certains gisements de phosphates sédimentaires, ceux-ci pouvant constituer à l'avenir une source non négligeable d'approvisionnement en combustible nucléaire.

Un effet bénéfique de la crise pétrolière aura été de stigmatiser le danger qui menace un pays utilisant un seul type d'énergie, et de susciter des recherches dans certains domaines moins connus. Ainsi en va-t-il de la géothermie, encore que celle-ci soit peu utilisable dans notre région si l'on excepte le Calcaire carbonifère. Ici encore, nos voisins et amis belges nous ont montré la voie en obtenant, dans plusieurs sondages récents exécutés en Hainaut, d'importants débits d'une eau artésienne de température supérieure à 65°

Dans un même ordre d'idées se situe l'exploitation énergétique des aquifères superficiels par l'intermédiaire de pompes à chaleur, avec ou sans réinjection dans la nappe de l'eau refroidie.

Encore moins classique apparaît la possibilité de récupérer de l'énergie dans les décharges de déchets ménagers et industriels, au sein desquelles la fermentation des matières organiques se traduit par la formation de composés gazeux, méthane et gaz carbonique essentiellement. Et cependant, les premières expérimentations permettent d'estimer entre 75 et 140 m³ par tonne de déchets la quantité de méthane ainsi produite. La réalisation de grandes décharges bien menées permettrait de récupérer une quantité d'énergie non négligeable, tout en assurant une meilleure prise en compte de l'Environnement.

La quête constante des substances utiles et énergétiques fait progresser peu à peu la connaissance géologique. Un des exemples les plus significatifs à cet égard nous est fourni par le massif primaire du Bas-Boulonnais, dont la structure, révélée dans ses grandes lignes par l'extraction charbonnière au siècle dernier, nous est maintenant précisée par l'exploitation des grandes carrières de granulats.

Elle amène également le Géologue à se poser des questions sur l'utilisation des richesses minérales de la planète Terre, dans la mesure où celles-ci sont irrégulièrement réparties et non renouvelables. Penser que la gestion des "réserves", ou richesses non renouvelables, puisse faire l'objet, dans un futur plus ou moins proche, d'une concertation internationale, relève sans doute de l'utopie. Mais quelle que soit la (ou les) solution(s) adoptée(s) à l'avenir, elle(s) nécessitera(ront) une connaissance suffisamment précise de ces "réserves". Dans cette optique, le Géologue a un rôle fondamental à jouer.

— — — — — « » — — — — —

Technique de télédétection spatiale dans le Nord de la France

par A. LAUMONDAIS (*), A. MAURIN (*), J. PAUTRAT (*) et L. THEPOT (*)

(Planche II)

Résumé. — Les documents satellites reçus sont des images codées en noir et blanc ; toutefois, l'œil humain ne peut discerner que cinq intensités de gris. Il y a donc lieu de suppléer l'œil par la machine qui pourra alors mieux dissocier les informations qui, de par leur aspect synoptique, sont révélatrices de faits morphologiques. Cette méthode, dite des "Equidensités colorées", a été appliquée au Nord de la France et a permis à C.F.P. d'affiner l'étude morphologique de cette région par la mise en évidence de linéaments superficiels inconnus à ce jour.

Abstract. — Satellit informations are transmitted in coded black and white pictures but the human eye cannot dissociate more than 5 intensities of grey. Consequently, it is necessary to substitute to human eye with a technology able by several process to dissociate all data available. In fact such data are the result of morphological events. C.F.P. uses the colored equidensities method and has applied such a method worldwide including Northern France in order to refine morphological details. Unknown lineaments of discussed origin are enhanced.

La réunion de ce jour ayant pour but de présenter les techniques nouvelles de recherche de produits énergétiques dans le Nord, la C.F.P. qui opère dans ce secteur remercie la Société Géologique du Nord de son invitation et va présenter une des méthodes d'étude qu'elle a mise au point et qu'elle a utilisée dans ce secteur.

Les documents utilisés, acquis auprès de la N.A.S.A., sont codés en gris par cet organisme et se lisent comme une véritable image photographique. Ces images sont précieuses en géologie de synthèse à cause de leur aspect synoptique et de la simplification "géologique" due à la faible précision apportée par la taille des pixels (**) (80 m environ).

La méthode présentée consiste essentiellement en un décodage automatique d'une information reçue et non en un nouveau codage (par calcul à l'ordinateur).

Il est bon de rappeler quelques méthodes de décodage destinées à l'analyse oculaire :

(*) C.F.P.

(**) *Pixel*. "picture element". Ceci correspond à l'information élémentaire originale reçue et est constituée par quatre enregistrements de la surface terrestre, suivant des bandes de longueurs d'ondes différentes, soit du bleu au proche infra-rouge. Ce point élémentaire couvre une surface de 59 m × 76 m. Les valeurs sont alors codées de 0 à 127.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

— *Le "stretching"* :

Lors de l'enregistrement de la campagne, une zone spécifique peut n'avoir été concernée que par une partie restreinte de ce spectre. La méthode consiste alors à étendre la totalité du spectre à cette zone spécifique.

— *Le "ratioing"* :

L'enregistrement ayant été effectué sur quatre bandes, nous possédons quatre images simultanées. La comparaison de deux de ces images entre elles permet d'en déduire une nouvelle image composée d'informations provenant de deux longueurs d'ondes différentes.

— *Compositions colorées* :

L'œil humain ne peut séparer efficacement plus de cinq gris ; pour cette raison, la méthode des équidensités colorées permet de très bonnes séparations. Elle peut être opérée par fausse couleur, soit à la suite de lecture de l'image par une caméra très précise numérisant ligne par ligne la photo présentée, soit par traitement direct de l'image numérique enregistrée sur bande magnétique.

C.F.P. possède ses propres programmes d'analyses et toute une étude peut être poussée à l'extrême. Toutefois, il faut que cela en "vaille la chandelle" et bien souvent il suffit de s'arrêter au traitement des *Equidensités colorées* à partir d'une seule et unique image en gris. Ce traitement s'avère largement suffisant pour révéler les aspects structurants peu visibles à la surface du globe. Ce procédé a l'avantage, grâce au "hardware" approprié (DIGICOL I^o S C.F.P.) d'être instantané et permet de réaliser des ajustements de couleur en continu, donc laisse la liberté à l'observateur d'arrêter son choix sur le réglage le plus significatif pour lui.

Un autre branchement permet d'appréhender un faux relief : le document continu est soumis à l'œil électronique d'une caméra qui retranscrit ses lignes de balayage en courbes (isovaleurs analogues aux couleurs). La juxtaposition de ces courbes dans l'axe perpendiculaire au balayage donne ainsi une impression de relief fort plaisante à l'œil d'un morphologiste. Par opposition aux méthodes de perspective par grille, qui nécessitent un nouveau passage en ordinateur lorsque l'observateur veut changer le point de vue, le réglage de l'appareil se fait d'une façon continue en trois dimensions. L'observateur peut ainsi s'attarder sur l'angle qu'il désire, puis rechercher à nouveau une autre position optimale sans que le document de base quitte la table de lecture.

Dans le cadre de cette réunion à la Société Géologique du Nord, nous traiterons l'image satellite Ertz 1

n° 1243-10125 couvrant l'Ouest Ardennais et le Nord Artois.

La fig. 1 montre le secteur étudié en vision classique dans les gris et peu de traits apparaissent, les figures A, B et C de la Pl. II montrent, par contre, en fonction des réglages successifs, des traits géologiques qui parfois s'estompent d'un réglage à l'autre (les réglages ont été effectués en donnant la prédominance au bleu et en allant vers la saturation sur cette teinte, ceci étant effectué afin de "gommer" l'effet des concentrations urbaines). Dans les zones critiques, un "zoomage" peut être effectué permettant d'affiner le détail (fig. D, E, Pl. II).

Ainsi, sur la fig. A, Pl. II, nous observons dans cette débauche de couleurs, deux domaines, l'un dans les rouges bruns correspondant à la craie sénonienne de l'Artois, l'autre dans les jaunes et correspondant aux

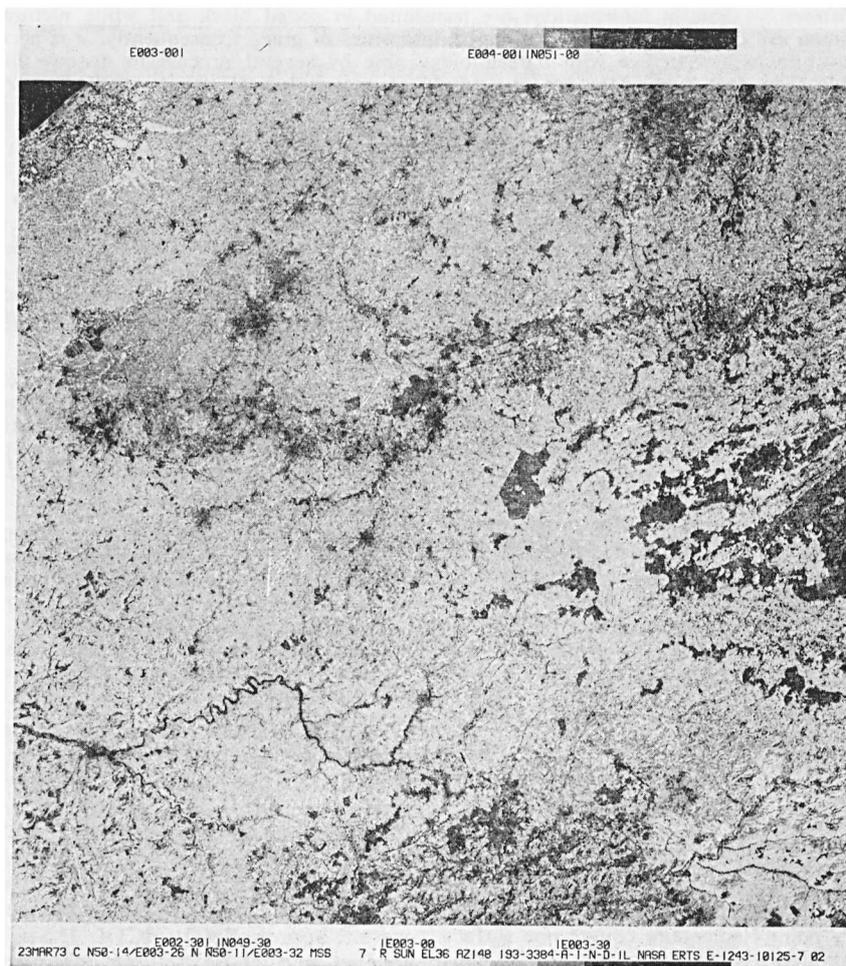


Fig. 1. — Image satellite Ertz de la région Ouest - Ardennais et Nord - Artois.

formations turoniennes et anté-turoniennes. Parmi les linéaments observés, il faut être prudent quant à leur valeur géologique, car certains peuvent être artificiels ainsi que la voie romaine passant par Bavay et le long de la Forêt du Quesnoy.

D'autres, par contre, sont très nets et se manifestent en fonction des réglages :

- faille du Midi visible sur toutes les figures ;
- faille de Hénin-Liétard - Vitry - Belincourt - Péronne bien visible sur la fig. A, Pl. II ;
- faille de Douai - Marcoing visible sur les fig. B et C, Pl. II ;
- faille de Denain - Cambrai - Marcoing - Péronne (cette faille a guidé les cours de l'Escaut), fig A, B, C, Pl. II.

Pour permettre une meilleure définition de ces linéaments, nous pouvons agrandir un secteur critique

ainsi que le montrent les fig. D et E, Pl. II. Sur ces figures, la faille de Denain - Cambrai - Péronne, peu perceptible sur les précédentes vues, devient nette.

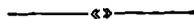
Si nous voulons alors contrôler la rigueur d'une direction détectée par ces différents réglages, il est possible (fig. F, Pl. II) de créer une fausse 3 D permettant de se placer face à cet événement et de contrôler la persistance morphologique suivant un angle de vue différent, donc de contrôler une existence vraie.

Sur cette vue en fausse 3 D, la faille Denain - Cambrai - Péronne est bien marquée.

Nous n'avons fait ici que montrer quelques possibilités de cette technique et de cet appareillage qui doivent, nous le pensons, apporter dans l'avenir proche de très grandes aides pour les géologues morphologistes et tectonicien.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BICHET J. (1974). — Photographie aérienne avec sélection de densités colorées dans le détroit du Poitou. *C.R. Ac. Sc.*, t. 278.
- 2) FORESTIER G., VEREZ C. — Essai de traitement de photographie aérienne du Jura français par la méthode des équidensités colorées (appareil DIGICOL 1^{er} S). (Inédit).
- 3) MAURIN A.F. (1977). — Morphologie hypsométrique en Alberta. *Notes et Mémoires, C.F.P.*, n° 13.
- 4) MAURIN A.F., RIGUIDEL M.J. (1978) — Eléments de morphologie généralisée. *Notes et Mémoires, C.F.P.*, n° 14.



EXPLICATION DE LA PLANCHE II

Traitement de la photo satellite précédente
au Digicol I² S C.F.P.

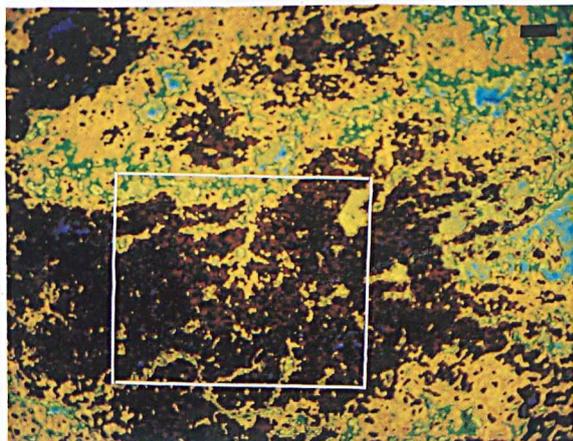
Fig. A-B C. — Réglages successifs dans la gamme des
bleus vers une saturation de cette teinte.

Fig. D-E. — “Zoomage” d’une zone spécifique.

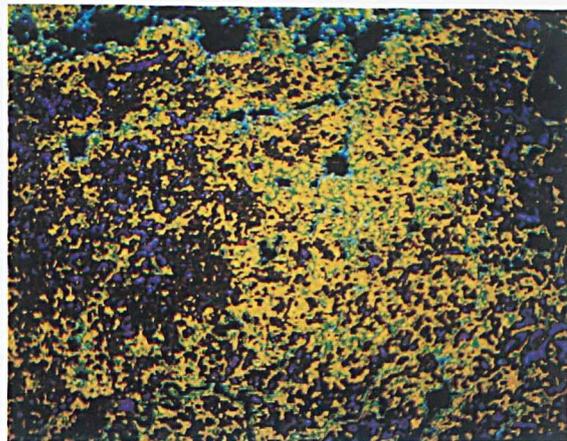
Fig. F. — Projection suivant une fausse 3 D.

*(Sur la photo A a été reportée en blanc la “zone
zoomée” en D et E)*

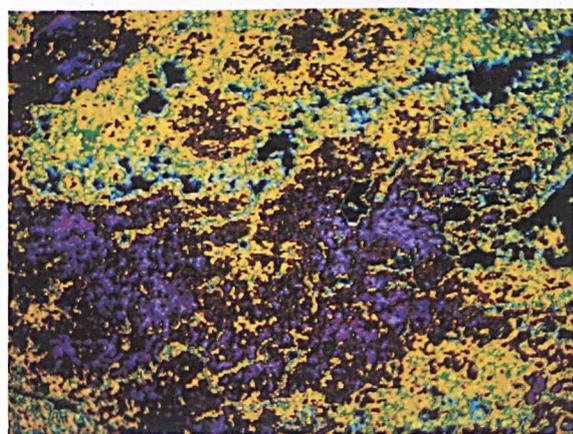
A



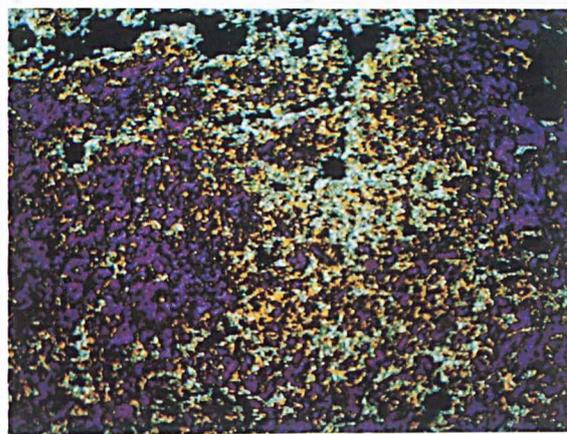
D



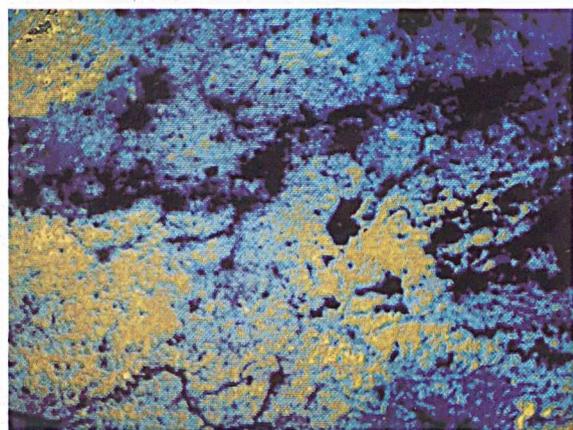
B



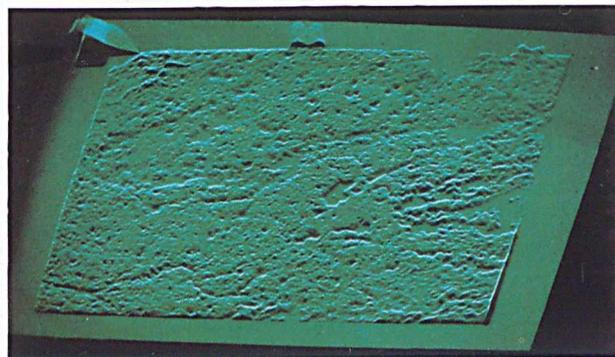
E



C



F



Technique Vibroseis dans le Nord de la France

par A. CHAPERON (*)

Résumé. — La Compagnie Française des Pétroles a commencé, au début de l'année 1980, une campagne de prospection sismique dans le Nord de la France sur le permis de Boulogne-Maubeuge pour rechercher des objectifs pétroliers sous la Faille du Midi. Cet article décrit la méthode vibrosismique utilisée et s'attache à montrer l'évolution des paramètres d'acquisition en vue d'optimiser la qualité et le prix.

Abstract. — C.F.P. TOTAL started at the beginning of 1980 to record a vibroseis survey in the North of France on the permit of Boulogne-Maubeuge in order to look for deep objectives under the fault of Midi. This paper describes the vibroseis method and shows the acquisition parameters evolution to optimize quality-price ratio.

PRELIMINAIRES

La vibrosismique n'a cessé de progresser depuis quelques années et nous sommes encore bien loin d'en avoir exploré toutes les possibilités tant sur le plan de la qualité géophysique que du rendement et des coûts. La mission C.G.G. travaillant sur le permis de Boulogne-Maubeuge, gérée par TOTAL en association avec BP, nous a permis d'améliorer notre connaissance de la méthode et des divers matériels utilisés par C.G.G.

Cet exposé fait le bilan de quinze mois de vibrosismique dans l'optique de l'amélioration du rapport qualité/prix et décrit les perspectives d'amélioration des techniques.

Economiser l'énergie : ce slogan n'a rien perdu de son actualité, ni de son acuité, bien au contraire, de plus en plus il agite le monde.

Je n'échapperai pas à la règle et le fil directeur de cet exposé reposera sur la recherche de la réponse à la question suivante : *Comment économiser l'énergie vibrosismique tout en obtenant une qualité optimale ?*

Pour des raisons de confidentialité, il ne m'est malheureusement pas permis de vous présenter les documents sismiques relatifs à nos campagnes géophysiques dans le Nord de la France. Disons simplement que les résultats obtenus ont modifié sensiblement nos idées sur la géologie de cette région.

(*) Ingénieur géophysicien à la C.F.P.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

I. — VIBROSISMIQUE

Depuis quelques années, les techniques géophysiques évoluent très vite suivant les progrès appréciables accomplis dans les domaines de l'électronique, de l'informatique et de la miniaturisation. Aussi, ne sommes-nous pas surpris de voir les constructeurs de matériel sismique rivaliser de par le monde et des générations de matériel se succéder à une cadence rapide.

Expliquons schématiquement cette évolution.

Pour obtenir la meilleure qualité sismique, il est nécessaire d'améliorer le rapport signal/bruit à l'émission et à la réception.

1) Réception : laboratoire + dispositif d'enregistrement.

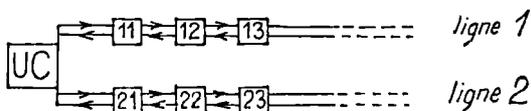
L'augmentation du rapport signal sur bruit requiert :

- Multiplication du nombre de capteurs (plus de 6.000),
- Multiplication du nombre de canaux d'enregistrement (500),
- Enregistrement sur plusieurs lignes d'acquisition pour éliminer les arrivées latérales et permettre une pseudo 3D,
- Systèmes d'élimination de bruits industriels et électroniques très complexes.

En conséquence, la gestion de l'information devient de plus en plus difficile et le volume de données à traiter de plus en plus gros. Pour répondre à ces impératifs, SERCEL, la filiale de C.G.G., a lancé une nouvelle génération de laboratoires sur le marché : le SN 348, laboratoire dit télémétrique que nous avons utilisé sur Boulogne-Maubeuge.

- Les sismographes, groupés en trace, sont connectés à un boîtier électronique qui permet de digitaliser l'in-

formation sismique à la trace sur le terrain tout en faisant passer dans une chaîne d'amplificateurs et de filtres. Les boîtiers sont tous reliés par un câble à six conducteurs (flûte) à un ordinateur situé dans le laboratoire qui gère l'ensemble de la chaîne d'acquisition. L'observateur, installé devant l'écran de l'ordinateur, sélectionne les programmes de test d'exploitation... sur la cassette et dialogue avec l'unité centrale UC.



Le 348 commande les autres matériels installés dans le laboratoire et qui complètent la chaîne d'acquisition et de visualisation de l'information.

Citons-les pour mémoire :

- | | | |
|---|--|---------------|
| — sommateur GUS CDX | RCV ³¹⁰
SHV ³¹⁰ | } acquisition |
| — électronique de commande des vibrateurs | | |
| — porte-bande | } visualisation | |
| — corrélateur quantum | | |
| — caméra | | |

Le sommateur GUS CDX que nous utilisons sur Boulogne-Maubeuge limitait les possibilités du 348 à 192 traces (4 ms) au lieu de 500. SERCEL vient de pallier cet inconvénient en lançant sur le marché son corrélateur stacker CS 2502 dont la fiche signalétique comprend la corrélation en temps réel et l'addition des vibrations d'un point vibré...

2) Emission.

Quels sont les paramètres influant sur l'énergie sismique utile émise par les vibrateurs ?

- nombre de vibrateurs (5 - Boulogne-Maubeuge),
- écart entre vibrateurs (20 m - Boulogne-Maubeuge),
- nombre de vibrations par point vibré (entre 6 et 16),
- longueur d'une vibration (entre 20 et 27 s)

sans oublier le couplage plaque vibrante-sol à travers trois éléments :

- drive traduisant la force d'excitation,
- adhérence plaque-sol,
- géologie des premières couches.

L'étude de l'influence de ces paramètres sur l'énergie sismique émise et transmise est très complexe et, il faut le reconnaître, très empirique.

Notre effort s'est donc porté sur ce problème à travers de multiples essais sur le terrain destinés à améliorer notre connaissance de l'énergie vibrosismique.

3) Remarques d'ordre général.

1° Le rendement kilométrique, qui est bien sûr un des facteurs prépondérants du calcul du coût d'acqui-

sition d'une campagne, dépend en majeure partie de la densité d'énergie émise.

2° La sophistication de plus en plus grande du matériel requiert des rendements très élevés pour en assurer la rentabilité.

3° Le coût de plus en plus grand du matériel laboratoire et vibrateur nécessitera une fiabilité accrue du petit matériel (flûte, bretelle de capteurs...). Ajoutons à ce propos, qu'il serait superflu et absurde d'utiliser des techniques de pointe très coûteuses en oubliant qu'une des conditions essentielles d'obtention d'une bonne qualité sismique réside dans le bon couplage sismographe-sol ou une bonne mise en phase des vibrateurs.

4° La notion de rendement élevé impose des automatismes très poussés. Cette complexité requiert de la part des observateurs laboratoires des compétences techniques dans le domaine électronique qui doivent s'harmoniser avec des qualités de connaissance du terrain, parfois en contradiction avec le travail répétitif de "pousse-bouton" imposé par la cadence de production.

4) Environnement.

Comment ne pas clore ce premier volet en disant quelques mots de l'influence de l'environnement sur la vibrosismique ?

Le plus simple, bien sûr, est de prendre l'exemple du Nord de la France. Les difficultés induites par l'environnement p.oviennent de deux facteurs.

a) Facteur géographique.

La densité d'habitants au km² est très élevée, notamment aux abords du bassin houiller. Les habitations se répartissent le long des routes et chemins, ce qui empêche parfois de vibrer sur de longues distances. Il est important, dans ces conditions, de jongler avec le terrain pour maintenir le degré de couverture au-dessus d'un seuil choisi arbitrairement. Le pourcentage de points non vibrés par rapport aux points vibrés s'est maintenu entre 20 et 30 % sur l'ensemble de l'étude. De plus, il s'est avéré indispensable de concilier les contraintes liées aux opérations de vibrosismique avec les impératifs des travaux agricoles (moissons, ramassage des betteraves). Enfin, il est indéniable que le bruit ambiant (industries, voies ferrées, routes, lignes à haute tension) s'est révélé très gênant dans certaines zones.

b) Facteur climatique.

Le plus gênant pour le rendement et la qualité, hormis les périodes de pluies incessantes, fut la répétition des périodes de dégel suivies de gel. Les 6.000 sismos étalés sur une dizaine de kilomètres, qui étaient plantés aisément lors du dégel, devaient être retirés à la pioche en période de gel. Il est facile d'imaginer les

conséquences de cet événement climatique sur l'avancement.

Enfin, je réserve une mention spéciale aux bovins de cette région pour leur appétit tenace et leur goût prononcé pour les flûtes et bretelles de sismos déroulées à leur portée. Les coupures de ligne se sont multipliées par endroit.

II. — ECONOMIE D'ENERGIE SISMIQUE UTILE

1) Notre expérience dans le Nord de la France.

Economiser l'énergie sismique revient à diminuer le temps de vibration en réduisant la densité d'énergie au mètre par un choix optimal des trois paramètres suivants :

- longueur du point vibré,
- longueur du balayage en fréquence,
- nombre de lieux par point vibré.

Définissons, au préalable, le *concept d'énergie optimale*. C'est l'énergie développée par les vibreurs qui offre la qualité nécessaire et suffisante pour atteindre un objectif donné.

Sur notre permis de Boulogne-Maubeuge, l'objectif était de déterminer avec une bonne résolution les horizons profonds situés sous la Faille du Midi. Jusqu'à présent, le géophysicien ne peut apprécier utilement la qualité sismique qu'à partir de documents "stackes" ayant subi une séquence de traitement informatique. Nous avons donc logiquement suivi la démarche suivante :

— *Les phases d'essais* sur le terrain pour le choix initial des paramètres d'enregistrement. Pour ne pas prendre de risques inconsidérés, nous avons choisi une densité d'énergie élevée, que nous pensions supérieure à la valeur optimale, d'autant plus que les documents bruts terrain n'offrent qu'une idée très approximative des résultats et que le domaine de validité de ces essais réalisés ponctuellement nous est parfaitement inconnu.

— *La production*, qui a débuté ainsi : dispositif de 120 traces/4 bretelles par trace, 8 lieux de 27 s sur 50 m.

Au fil des profils, nous avons cherché à mieux approcher ce concept d'énergie utile en jouant sur la densité d'énergie émise.

- Réduction du nombre de lieux par point vibré : 8 → 6 lieux.
- Réduction du temps de vibration : 27 → 20 s.
- Augmentation de la longueur du point vibré : 50 m → 80 m - 100 m.

A cet effet, le point vibré couvrait deux traces consécutives. Pour relever l'ordre de couverture miroir, le nombre de traces enregistrées est passé de 120/4 bretelles par trace à 192/2 bretelles par trace.

Ainsi, les *paramètres utilisés* lors de la dernière campagne dans le Nord ont été les suivants : 6 lieux de 20 s sur 80 m - dispositif de 192 traces/2 bretelles par trace.

Je passe rapidement sur les profils-tests enregistrés en double ligne ou exploités avec des sweeps courts puisqu'ils ne nous ont pas apporté la satisfaction que nous en attendions. Néanmoins, ces méthodes ne sont pas à écarter dans les régions nécessitant un filtrage latéral important (multiligne) ou pour la recherche d'horizons stratigraphiques peu énergiques (sweeps courts). La fig. 1 présente les conséquences financières de cette évolution des paramètres vers un point optimal.

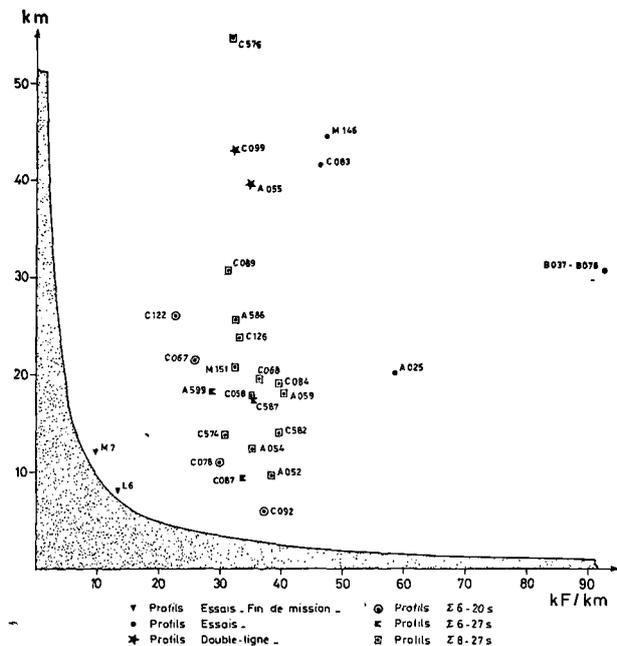
Le coût d'acquisition au "kilomètre vibreur" a été divisé par presque trois entre le début et la fin de la première campagne.

L'analyse financière de la deuxième campagne septembre-décembre 1981 se résume par ce tableau :

KF/KM	ACQUISITION	TRAITEMENT	TOTAL
coût/km vibreur ...	29	6,6	35,6
coût/km miroir	25,7	5,9	31,6

En conséquence, nous pensons que le coût total par KM d'une vibrosismique lourde évolue dans une fourchette de 30 à 50 KF/KM.

Et maintenant ?



2) L'avenir.

Nos idées s'orientent dans de multiples directions. Citons-en quelques-unes :

- Meilleure transmission de l'énergie à l'émission.
- Meilleure approche de la densité optimale d'énergie.
- Amélioration de technique de vibration (Combi sweep ou encoded sweep de Prakla, sweeps simultanés d'intercorrélation nulle...).
- Ondes S émises par des vibrateurs S ou PS.

J'insisterai simplement sur les points suivants :

1° Plus grande souplesse d'exploitation en fonction de l'environnement. La rigidité s'allie parfois avec le gâchis. Prenons l'exemple d'un profil dont les 95 % de la longueur sont implantés dans la campagne, tandis que 5 % seulement passent près de sources de bruits. Aujourd'hui l'énergie utilisée s'adapte aux 5 %, demain il faudrait qu'elle évolue suivant l'environnement. De

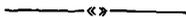
même, il serait souhaitable de régler la densité d'énergie suivant les conditions météorologiques.

2° Moyens de visualisation ou de contrôle plus performants sur le terrain : le géophysicien a besoin d'un outil quantitatif qui lui permette de mieux juger de la qualité des résultats et d'affiner ses paramètres. Nous avons à cet effet testé un analyseur de spectre dont nous attendons beaucoup.

III. — CONCLUSION

Je ne puis malheureusement conclure en vous présentant des documents relatifs à Boulogne-Maubeuge.

Je dirai donc simplement que la vibrosismique a encore un bel avenir dans nos régions en raison de sa souplesse d'utilisation, de son universalité (objectifs profonds, HR...) et maintenant de son prix.



Interprétation tectonique du bassin houiller du Nord de la France

par J.P. COLBEAUX (*)

Résumé. — L'analyse structurale de la carte au 1/50.000 des zones stratigraphiques à la cote — 300 permet de mettre en évidence une succession de déformations liées à des raccourcissements alternativement N-S et E-W. Cette succession est confortée par l'analyse méso-structurale des formations paléozoïques du Boulonnais et de l'Ardenne.

Abstract. — The structural analysis of the geological map of the Nord - Pas-de-Calais coalfield at a 1/50.000 scale show a sequence of deformations corresponding to shortening alternatively N-S and E-W. This sequence corresponds to the one deduced from the meso-structural analysis in the Boulonnais and Ardenne area.

Reconnu et exploité depuis plus d'un siècle, le bassin houiller du Nord - Pas-de-Calais a fait l'objet de nombreuses études stratigraphiques et paléontologiques, mais les données de la tectonique y sont plus pauvres et intéressent essentiellement la mise en place des grands chevauchements hercyniens. Il se présente sous la forme d'un synclinorium dissymétrique (synclinorium de Namur), avec un flanc Sud très redressé à renversé et un flanc Nord à faible pente, chevauché au Sud par le synclinorium de Dinant à la faveur de la faille du Midi.

Le présent travail porte sur l'analyse de la carte géologique à la cote — 300 du bassin, réalisée par Bouroz *et al.* en 1963 et présentée à l'échelle 1/50.000 (feuilles de Lillers, Béthune, Carvin, Douai, Saint-Amand - Crespin - Mons, Valenciennes et Le Quesnoy) ; cette carte, qui reprend les données détaillées des Houillères, apparaît comme un reflet fidèle de la structure du gisement.

Trois grands types de déformations ont été retenus : des plis, des failles chevauchantes et des failles à forte pente :

1° les traces des plans axiaux des plis permettent de distinguer des plis longitudinaux (N 70° à N 110°) et des plis transverses (N 150° à N 30°) ;

2° les failles chevauchantes se groupent également en deux ensembles : des failles chevauchantes longitudinales à faible pente vers le Nord ou le Sud, des failles chevauchantes transversales à faible pente vers l'Est ou l'Ouest ;

3° les failles à forte pente ont des orientations N 110°-130°, N 60°-70° et N 150°-160°.

L'observation systématique des relations cartographiques entre ces différentes déformations permet d'en proposer la succession suivante ;

- plis longitudinaux ;
- failles chevauchantes longitudinales (A, fig. 1) ;
- plis et failles chevauchantes transverses (B, fig. 1) ;
- rejeu Sud-Nord des chevauchements longitudinaux (C, fig. 1) ;
- failles à forte pente N 110°-130° et N 60°-70° (D, fig. 1).

Cette succession s'inscrit harmonieusement dans les ensembles de caractères propres de la déformation mis en évidence en Boulonnais (Colbeaux, 1978) et en Ardenne (Beugnies et Colbeaux, 1977), à savoir :

(*) U.E.R. Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

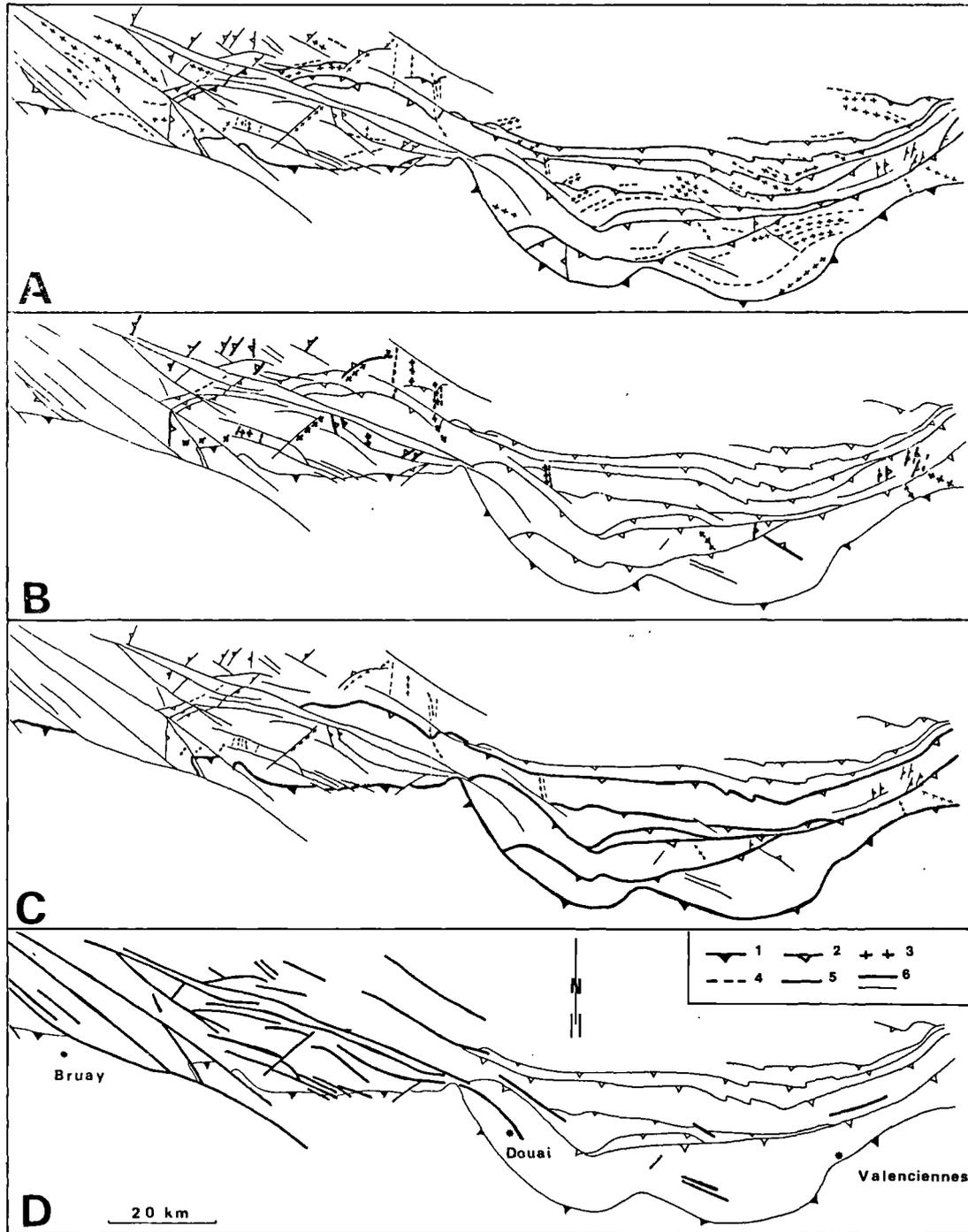


Fig. 1. — Les déformations successives dans le Bassin houiller Nord-Pas-de-Calais : schéma structural. A à D, ordre chronologique des déformations. — 1, faille du Midi. — 2, faille chevauchante. — 3, anticlinal. — 4, synclinal. — 5, faille à forte pente. — 6, un trait fort indique que la déformation concernée ; un trait fin, une déformation postérieure ou antérieure.

BIBLIOGRAPHIE

— un ensemble P_1 lié à des raccourcissements N-S comprenant, dans l'ordre chronologique, des plis longitudinaux, des chevauchements longitudinaux, des failles à forte pente conjuguées (N 20°-40° et N 150°-170°);

— un ensemble P_2 postérieur à P_1 , lié à des raccourcissements E-W, des plis et chevauchements transverses, un rejeu des chevauchements longitudinaux P_1 ;

— un ensemble P_3 , lié à des raccourcissements N-S et marqué essentiellement par le rejeu des chevauchements longitudinaux P_1 et transverses P_2 ;

— un ensemble P_4 , lié à des raccourcissements E-W et caractérisé par des failles à forte pente conjuguées (N 60°-80° et N 110°-130°).

1) BEUGNIES A. et COLBEAUX J.P. (1977). — Confirmation de la tectonique polyphasée du Massif de la Tombe. *Bull. Soc. belge de Géologie*, t. 86, fasc. 1, p. 57-65.

2) BOUROZ A., STIEVENARD M., BUISINE M., DALINVAL A., DOLLE P., PINEL G., PUIBARAUD G. (1963). — Carte des zones stratigraphiques à la cote — 300. Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais.

3) COLBEAUX J.P. (1978). — Cinématique de la déformation au front de la faille du Midi: les carrières du Pont à Nô.e (Sud de la Belgique), carrière Napoléon (Nord de la France). *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XCVIII, p. 167-177.

—————«»—————

Exploitation d'un panneau aux H. B. N. P. C. Prévisions et réalités

par G. VAROQUEAUX (*)

Résumé. — Les projets d'exploitation sont établis à partir d'hypothèses sur le gisement à déhouiller. Ces projets sont accompagnés d'études de rentabilité simplifiées qui consistent en une évaluation du rendement espéré.

L'exemple présenté concerne un panneau du siège 3 de Courrières dans la veine Marcel. Il montre que les irrégularités du gisement sont découvertes avec l'avancement des travaux préparatoires. Le projet initial est ainsi fréquemment modifié et les prévisions de rentabilité sont souvent à remettre en question.

Abstract. — The mining projects are drawn up from assumptions about coal deposit. Profitability is also succinctly examined, it consists of an estimation of expected output per man-shift.

This example concerns a panel of pit 3 Courrières in seam Marcel. It proves that accidents in deposit are discovered by exploratory work. The initial project is often changed, just as the initial profitability provisions.

I. — INTRODUCTION

Le gisement du Bassin du Nord-Pas-de-Calais est reconnu et étudié à partir des renseignements fournis par l'extrapolation des travaux sus-jacents, par les sondages de reconnaissance et par les galeries en couche ou au rocher.

La connaissance du gisement s'améliore avec le déroulement des travaux préparatoires et des exploitations. Mais les contraintes de programme et de planification amènent à établir les projets d'exploitation à partir d'hypothèses sur le gisement.

Dans le gisement tourmenté et irrégulier du Bassin (zones faillées, irrégularité des veines, pendages variables, tenues de toit difficiles), le projet initial de déhouillement d'un panneau doit être remanié plusieurs fois à la suite de la découverte de conditions géologiques imprévues et en fonction des données nouvelles fournies par la préparation du panneau.

Par ailleurs, les projets sont accompagnés d'études de rentabilité simplifiées à l'aide de l'établissement de fiches-panneaux. Une fiche-panneau (annexe) permet, à partir d'indices caractéristiques, d'évaluer le rendement probable lié à un projet.

Nous allons présenter l'exemple du déhouillement d'un panneau du siège 3 de Courrières dans la veine

Marcel. Nous verrons comment les projets d'exploitation et les prévisions de rendement doivent être fréquemment ajustés lorsque la connaissance du gisement évolue avec les travaux préparatoires.

II. — DEHOUILLEMENT DU PANNEAU 31 DE MARCEL

1) Présentation du panneau.

Au siège 3 de Courrières, la veine Marcel a été exploitée dans des conditions favorables dans plusieurs régions du siège.

Au 1^{er} juin 1976, à l'Ouest du stot des puits 3/15, subsistait un secteur triangulaire délimité par (fig. 1) :

- à l'Est, le stot des puits 3/15 ;
- au Sud, la faille de la Sucrerie, faille directe importante de 45° de pendage environ et d'une cinquantaine de mètres de rejet ;
- au Nord, une faille directe de 20 à 30 m de rejet ;
- à l'Ouest, le resserrement de ces deux failles.

A l'intérieur de ce secteur triangulaire, dont la surface entre failles est de l'ordre de 450.000 m², une autre faille, de faible rejet (quelques mètres) a conduit à prévoir l'exploitation d'un panneau rectangulaire de 180.000 m² de surface, limité au Nord par cette faille métrique et à une distance suffisante des deux failles principales pour qu'elles ne perturbent pas l'exploitation.

(*) H.B.N.P.C., Douai.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

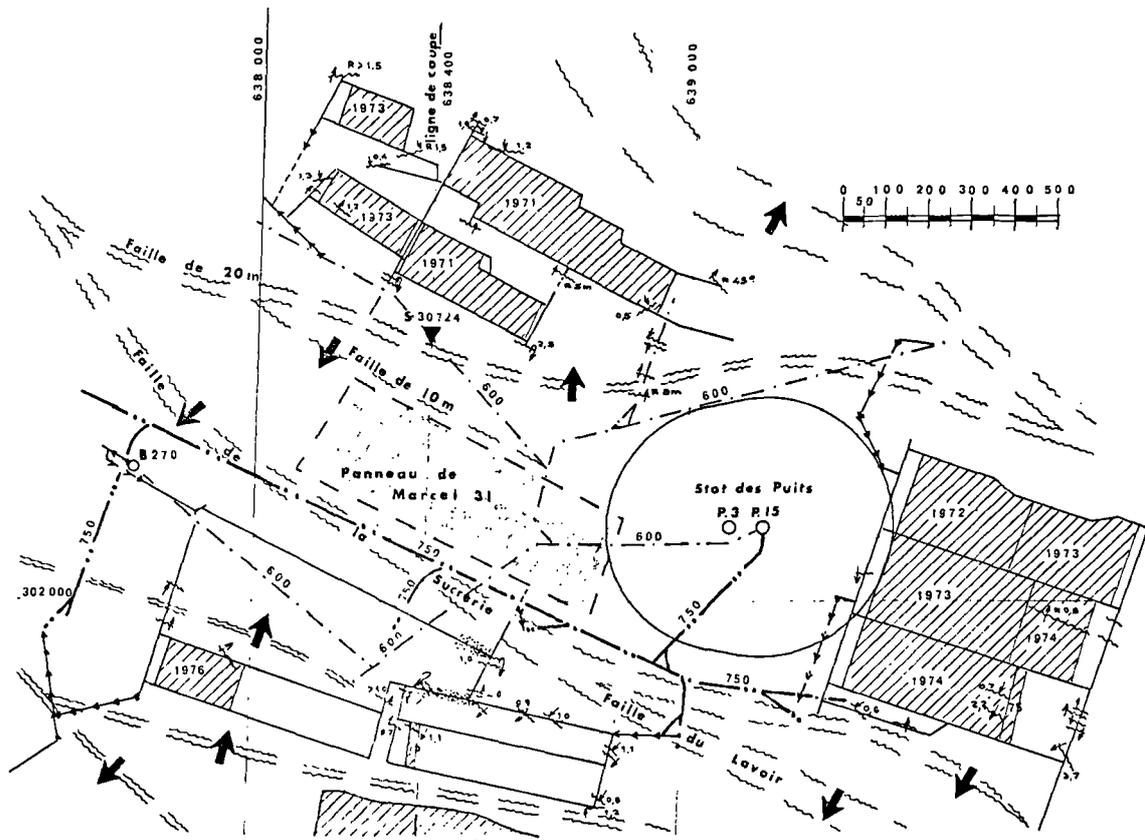


Fig. 1. — Situation du panneau Marcel 31 (travaux au 1-6-1976).

La coupe (fig. 2) montre toutefois que la faille de la Sucrerie s'aplatit au-dessus de ce panneau, pour devenir parallèle aux veines, mais à 50 m environ de la veine Marcel, assez loin semblait-il pour ne pas être gênante. Au mur de Marcel, on prévoyait en outre l'exploitation de la veine Alfred, plus éloignée de la faille de la Sucrerie et plus ouverte que Marcel dans cette région, en utilisant les mêmes voies d'accès et de déblocage au rocher.

L'exploitation de Marcel se présentait dans des conditions très favorables dans ce panneau, les exploitations voisines ayant obtenu de bons résultats : à l'Est du stot des puits, trois tailles à soutènement marchant avaient produit de 650 à 1.050 tonnes par jour avec des rendements en taille élevés, de 12 à 21 tonnes (de 1972 à 1974).

Au Nord, avaient été exploitées :

- deux tailles à soutènement marchant, en 1971, avec des productions journalières supérieures à 1.000 tonnes et plus de 10 tonnes de rendement en taille ;
- une taille à étaçons de 95 m. en 1973, avec plus de 600 t./jour et 7.35 t. de rendement.

Au Sud, des chantiers sont en cours d'exploitation avec soutènement marchant et obtiennent des rendements supérieurs à 10 tonnes.

Les caractéristiques de la veine Marcel sont les suivantes :

— matières volatiles	: 21 %
— taux de cendres	: 6.5 %
— taux de soufre	: 0,85 %
— indice de gonflement	: 9

C'est un excellent charbon 3/4 gras, utilisé pour la fabrication du coke de fonderie, donc bien valorisé.

2) Evolution du projet.

a) Premier projet.

Le projet initial a été établi mi-1976. Il prévoyait la prise du panneau par une seule taille à soutènement marchant produisant 800 tonnes par jour. Le projet prenait en compte les exploitations à prévoir dans le stot, dans la même veine, et celles dans la veine Alfred dans le même panneau.

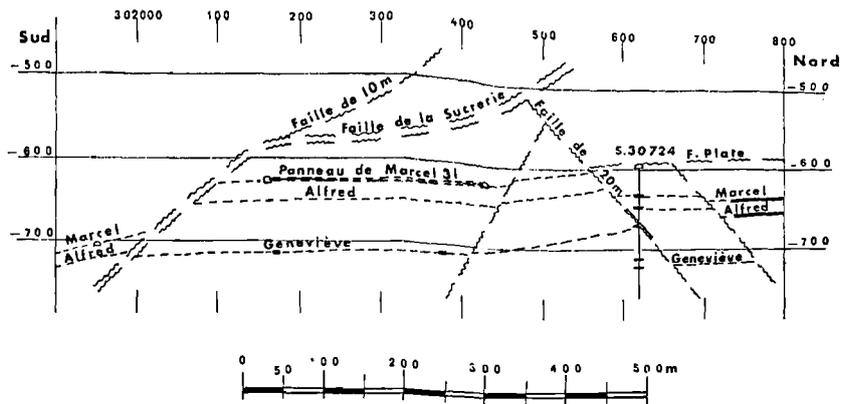


Fig. 2. — Coupe Nord-Sud suivant le méridien 638 400.

La fig. 3 donne le tracé des voies prévues dans ce premier projet et le tableau I donne les caractéristiques de l'exploitation prévue.

Les voies destinées à servir également d'accès et de déblocage à la veine Alfred ont été comptées pour moitié dans ce tableau. Le tonnage au mètre carré prévu était de 1,40.

Avec un rendement taille prévu à 8 tonnes et en prenant des rendements en creusements égaux aux rendements moyens du siège, le rendement au niveau siège calculé était de 2,49 tonnes.

Les creusements préparatoires ont débuté en septembre 1976.

b) *Deuxième projet.*

Les accidents rencontrés dans la galerie AB à partir de laquelle devait démarrer la taille ont conduit à

déplacer les voies de base et de tête du panneau par rapport à ce qui était prévu dans le projet initial.

D'autre part, le montage de taille a été attaqué plus à l'Est que prévu en raison de l'irrégularité de la limite Ouest.

Mais l'accident rencontré dans la voie de base CD a pris de l'importance dans le panneau et 155 m de reconnaissances par montages ont montré que la partie Sud-Ouest du panneau était inexploitable.

Un deuxième projet a été alors étudié. Il consistait à prendre seulement la partie Est du panneau avec une taille de 215 m de long :

— la fig. 4 donne le plan des creusements déjà réalisés au 1^{er} juin 1978 et l'emplacement du montage EF de la taille ;

— la deuxième colonne du tableau I donne les caractéristiques de ce projet qui aboutissent à un rendement siège de 2,25 tonnes.

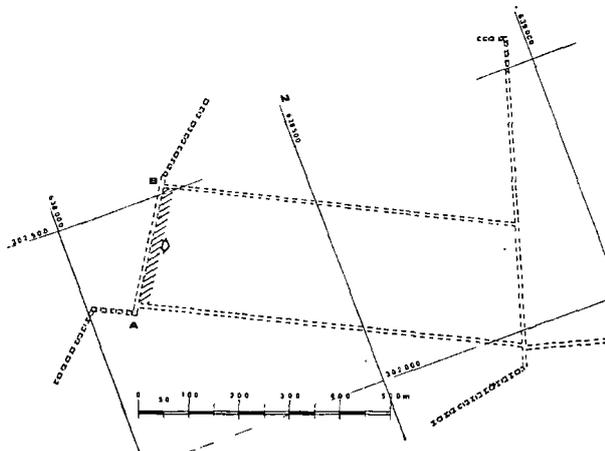


Fig. 3. — Evolution du projet d'exploitation (Projet n° 1 - 1-6-1976).

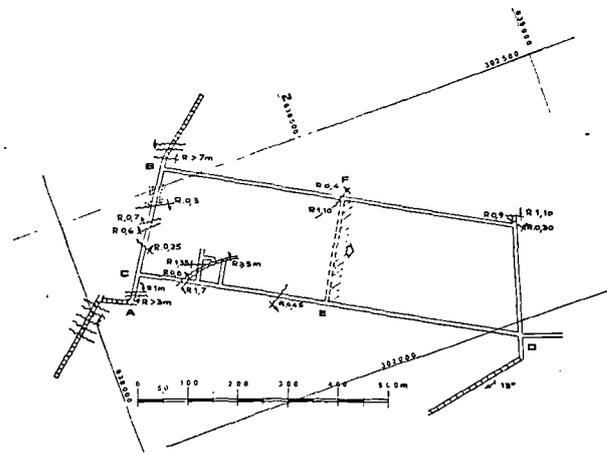


Fig. 4. — Evolution du projet d'exploitation (Projet n° 2 - 1-6-1978).

RENTABILITE des PROJETS d'EXPLOITATION de MARCEL 31					
FICHES PANNEAUX					
INDICES CARACTERISTIQUES	PROJETS SUCCESSIFS				REALISATION
	1	2	3	4	
Surface à déhouiller 10 ³ m ²	176	90	121	185	158,
Tonnage au m ² t/m ²	1,4	1,5	1,5	1,51	1,56
Tonnage à récupérer k _t	246,6	135,4	182,2	280	246
RENDEMENTS					
- en taille t	8	8	6,5	8,5	9,1
- au quartier t	5,7	5,7	4,5	5,4	5,7
CREUSEMENTS pour 1000^t					
voies au charbon m/1000 ^t	9,2	17,8	17,6	14,1	16,5
montages au charbon *	1,0	2,7	2,6	2,6	3,6
voies au rocher *	1,7	2,8	2,0	1,35	1,8
DESCENTES pour 1000^t					
en taille	117,6	107,1	132,3	104,4	95,7
en services liés à la taille	47,0	42,8	57,1	60,1	57,2
en creusement	79,2	126,8	119,4	93,5	109,
en installation et déséquipement	12,2	22,2	24,7	17,4	22
en autres services	145,	145,	145,	145,	144
TOTAL	401,0	443,9	478,5	420,4	427,9
Rendement au niveau du Siège	2,49	2,25	2,09	2,38	2,34

Tableau I.

Les hypothèses utilisées pour l'établissement de la fiche-panneau correspondant à ce projet sont les mêmes que pour le projet initial, sauf pour le tonnage au mètre carré, qui a été réévalué à 1,50, les creusements déjà réalisés ayant découvert une veine plus ouverte que prévu.

c) *Troisième projet.*

Le montage EF a rencontré un accident de 2,60 m de rejet, ce qui obligea à couper en deux la taille unique prévue dans le deuxième projet.

Pour essayer de récupérer le maximum de charbon dans les zones les plus régulières, le déhouillement d'une troisième taille dans la partie Nord-Ouest a été prévu.

De plus, il était nécessaire de s'assurer une production journalière importante dans ce panneau pour rester compatible avec le programme de production du siège. La diminution de la longueur des tailles et de leur surface et les irrégularités de gisement nous amenaient à équiper les tailles d'étauçons au lieu de soutènement marchant, ce qui allait entraîner une dimi-

nution de la production journalière par taille. Il nous fallait donc prévoir la marche simultanée de deux tailles pendant quelques mois.

Le troisième projet a été établi le 1^{er} octobre 1978 : la fig. 5 donne le plan des creusements supplémentaires prévus ; le tableau I donne dans la troisième colonne les indices caractéristiques correspondants.

Cette troisième fiche-panneau a été établie à partir des hypothèses suivantes :

- rendement des creusements à réaliser égal à celui des creusements déjà faits ;
- tonnage au m² : 1.50 ;
- production journalière par taille : 600 tonnes avec un rendement de 6.5 tonnes ;
- hypothèses concernant les autres indices : sans changement.

Avec ce projet, le rendement au niveau siège de l'ensemble du panneau devient 2,09 tonnes. Ce rendement devient relativement faible mais il faut considérer que d'importants investissements ont déjà été consentis dans les creusements qui ont produit peu de charbon. Ce calcul de la fiche-panneau en comptant uniquement les travaux restant à réaliser donne un rendement de 2,44 tonnes.

d) *Quatrième projet.*

En octobre 1979, la taille 3 est terminée, la taille 1 est en cours de déhouillement et la taille 4 en cours d'installation.

Les résultats de ces tailles sont satisfaisants avec des productions journalières de 500 à 600 tonnes et surtout un rendement proche de 9 tonnes. L'établissement d'une fiche-panneau pour l'ensemble de 3 tailles, en prenant comme indices les rendements effectivement

réalisés, aboutit à un rendement du niveau siège voisin de 2,3 tonnes.

Il a donc été décidé de prolonger vers le Nord la voie limitant le panneau à l'Est et cette reconnaissance ayant été favorable, un quatrième projet est établi visant à exploiter une quatrième taille au Nord.

La fig. 6 montre ce projet et le tableau I donne dans sa quatrième colonne le calcul du rendement correspondant qui est de 2,38 tonnes.

e) *Réalisation.*

L'exploitation de Marcel s'est terminée début 1981 et la fig. 7 donne le plan de tous les travaux de creusement et de déhouillement réalisés.

Par rapport au quatrième projet, la préparation de la dernière taille a été perturbée par la rencontre d'une zone d'étreinte de la veine au Nord et d'un accident infranchissable au Sud.

Le tableau I donne, dans sa dernière colonne, les résultats de l'exploitation de l'ensemble du panneau.

Les conditions ont été moins favorables qu'on ne le prévoyait initialement puisque, dans le panneau prévu, 30 % de la surface ont dû être abandonnés. La récupération d'une taille supplémentaire au Nord a cependant compensé cette perte. Mais au lieu d'une seule taille de grande longueur, quatre tailles plus courtes ont dû être préparées, installées et desservies pour produire le même tonnage total.

Le bilan n'a pas trop souffert de ces déceptions dans le gisement grâce, essentiellement :

- à un tonnage au mètre carré plus élevé que prévu,
- à un bon rendement taille.

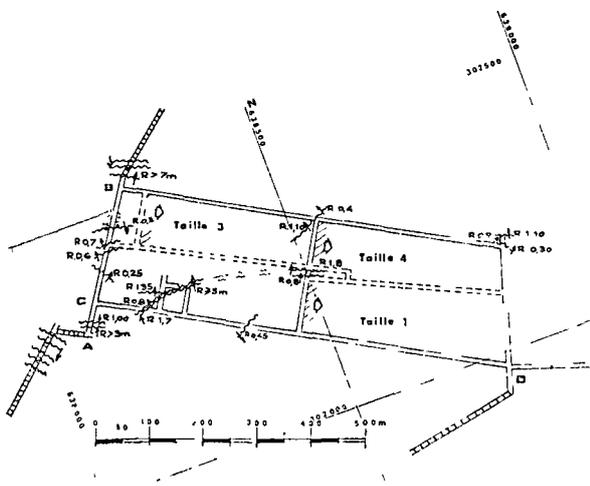


Fig. 5. — Evolution du projet d'exploitation (Projet n° 3 - 1-10-1978).

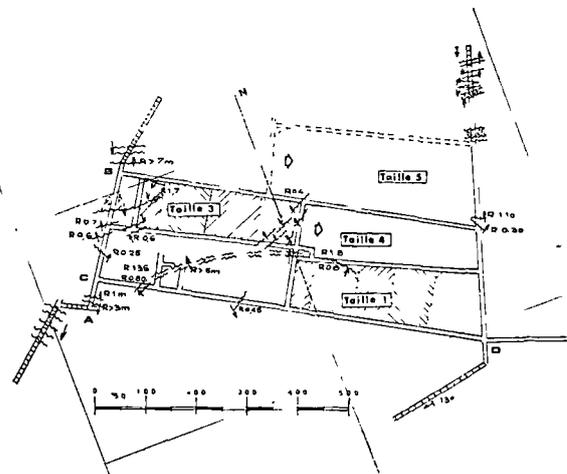


Fig. 6. — Evolution du projet d'exploitation (Projet n° 4 - 1-10-1979).

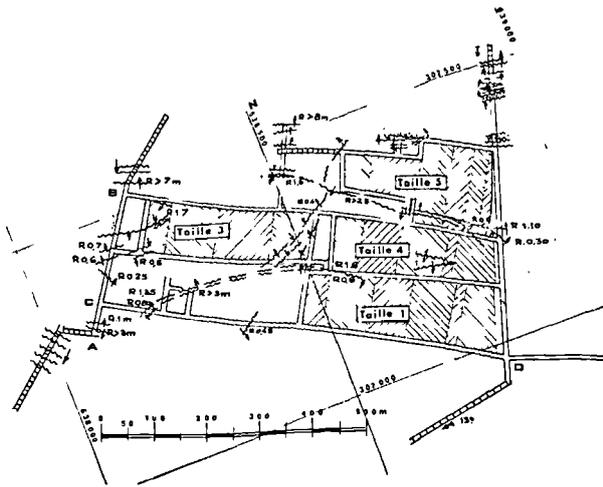


Fig. 7. — Evolution du projet d'exploitation (Exploitation terminée).

Par ailleurs, l'exploitation d'Alfred, veine sous-jacente, est en cours de déroulement (fig. 8) et se présente dans des conditions plus favorables :

- la veine est plus ouverte ;
- la connaissance précise des accidents dans Marcel a permis de creuser les voies dans Alfred avec moins d'aléas ;

— les reconnaissances ont montré qu'une extension vers l'Ouest était possible, à la suite de l'éloignement de la faille de la Sucrerie, permettant d'exploiter une surface beaucoup plus grande.

Au total, on peut estimer à 400.000 tonnes environ le tonnage récupérable dans Alfred.

III. — CONCLUSIONS

L'analyse du déhouillement du panneau de Marcel 31 du siège 3 de Courrières permet d'appréhender quelques-uns des problèmes que rencontre le Bassin pour la reconnaissance du gisement, la préparation et la conduite des chantiers et l'évaluation des tonnages exploitables.

On peut retenir en particulier :

— que l'exploitabilité d'un panneau n'est pas définie à partir de quelques paramètres caractéristiques, mais ne peut être affirmée qu'après de longs travaux de reconnaissance et de préparation ;

— que quatre projets d'exploitation successifs ont dû être étudiés pour s'adapter au gisement découvert dans les creusements.

Les quatre tailles exploitées dans Marcel 31 ont rencontré un certain nombre de difficultés locales, comme on peut le voir sur les plans. Mais elles ne se sont pas heurtées à des obstacles inattendus infranchissables, comme cela arrive malheureusement assez fréquemment dans le gisement du Bassin.

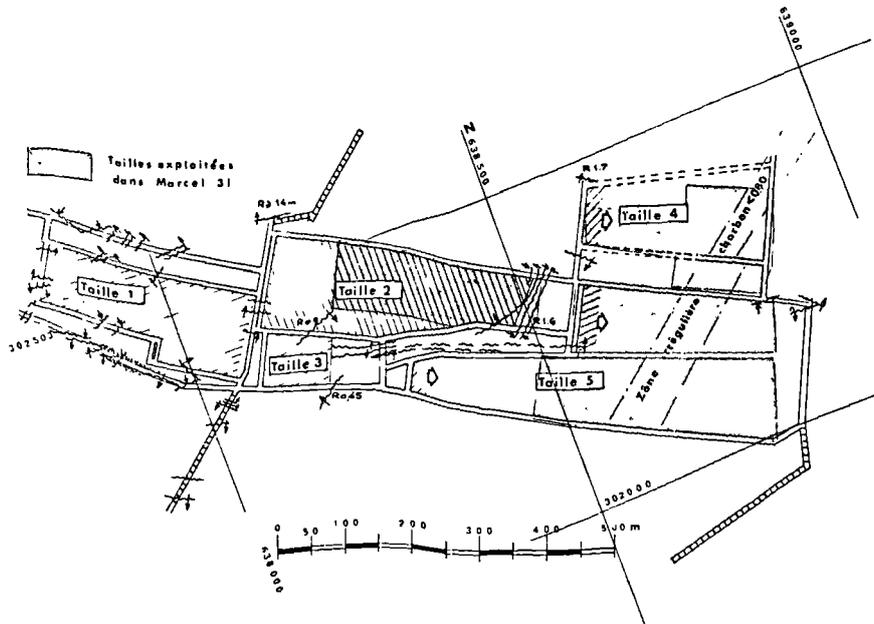


Fig. 8. — Exploitation d'Alfred. Situation au 1-1-1982.

Annexe : RENTABILITE D'UN PROJET D'EXPLOITATION
FICHE-PANNEAU

Une fiche-panneau permet, à partir des données d'un projet (creusements à réaliser, tonnage à exploiter, prévisions de personnel et de rendement liées aux méthodes prévues), de calculer le rendement au niveau siège prévisible (tonne/homme poste).

Le prix de revient étant fortement lié à ce rendement, cette étude de rentabilité simplifiée permet :

- de juger de la rentabilité d'un projet,
- de comparer différents projets,
- d'évaluer, au cours de la préparation ou du déroulement d'une exploitation, l'intérêt de poursuivre ou non les travaux.

A partir d'un projet définissant les accès au panneau (voies au rocher), les voies de découpage en veine, les tailles prévues, sont calculées :

- les longueurs de creusement à réaliser
 - en voies, en veine, au charbon
 - en montages de tailles
 - en voies au rocher,
- la production prévue
 - en creusement de voies
 - en tailles

Ensuite est évalué, en descentes pour 1.000 tonnes produites, le personnel nécessaire aux travaux à réaliser :

- en creusements
- en taille
- en services liés aux tailles
- dans l'installation et le démantèlement des tailles
- pour les autres services pendant l'exploitation.

Les besoins en personnel sont évalués en fonction des résultats de référence, du siège, ou de la veine. Ils dépendent également de la structure du quartier, de ses accès, de la méthode d'exploitation envisagée, du matériel qui équipera les chantiers pour les différentes fonctions (transports produits, matériel, mode de soutènement...).

Le résultat espéré au niveau siège est à comparer, pour juger de la rentabilité d'un projet, au rendement moyen du siège prévu dans la période d'exploitation.

Pour le siège 3 de Courrières, le rendement moyen des années 1976 et 1977 a été légèrement supérieur à 1,9 tonne après une mauvaise année 1975 à 1,73 tonne, alors que de 1971 à 1974, il était en moyenne de 2,2 tonnes. Le rendement était prévu en hausse les années 1978 à 1980 pour atteindre à nouveau 2.2 tonnes.

«»

La gazéification souterraine du charbon

Dossier présenté au nom du G.E.G.S. par M. DUPONT (*)

Résumé. — L'objectif du G.E.G.S. (Groupement d'étude pour la gazéification souterraine) est d'étudier la gazéification en place des charbons profonds, inaccessibles à l'exploitation minière traditionnelle, entre deux forages distants de quelques dizaines de mètres. La réussite du procédé passe par la résolution de deux problèmes techniques : la liaison entre les deux forages et la gazéification à pression élevée dans un réacteur naturel, de configuration variable.

Après les résultats encourageants obtenus à Bruay-en-Artois, de nouvelles recherches seront menées, en particulier sur la liaison par électrocarbonisation et par forage dirigé. Elles devraient déboucher à l'horizon 1984 sur une première expérience pilote, l'exploitation industrielle n'étant guère envisageable avant la fin du siècle.

Abstract. — G.E.G.S. (Group for underground gasification study) studies underground gasification on deep coals, inaccessible to usual mining working, between two boreholes several ten meters away from one another. To be successful, process requires to solve two technical problems : Linkage between the two boreholes, and gasification with high pressure in a natural reactor, variable in its shape.

After encouraging results at Bruay-en-Artois, new research will be led, in particular on linkage by means of electrocarbonization and oriented boring. They would open into a first experiment in 1984, but industrial development cannot be consider before the end of this century.

HISTORIQUE

1) L'idée de gazéifier du charbon en place, en le soumettant à l'action d'un agent comburant pour récupérer de l'énergie sous forme gazeuse, n'est pas nouvelle.

Des expérimentations ont été menées dès 1928 en U.R.S.S., en 1947 aux U.S.A., et en 1950 par les Français à Djerada (Maroc). Certains des sites soviétiques étaient encore en activité il y a quelques temps ; des sites américains sont en exploitation, mais toujours dans des couches peu profondes (100 à 500 mètres).

Les premières expérimentations avaient laissé une impression pessimiste : en injectant de l'air, on obtenait seulement un gaz pauvre (1 th/m³) valorisable au mieux pour une production d'électricité. On se heurtait de plus à de nombreuses difficultés liées au manque d'étanchéité des gazogènes souterrains peu profonds : migration des gaz vers la surface, infiltrations d'eau dans la zone de combustion.

2) La crise de l'énergie de 1974 a relancé l'idée de gazéifier le charbon en place.

(*) Charbonnages de France, Direction des Services Techniques.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

Dès 1975, les chercheurs de l'INIEX (Belgique) s'intéressant à la récupération de l'énergie des couches profondes de charbon inaccessibles par les moyens traditionnels, ont étudié la possibilité de gazéifier le charbon à des profondeurs assurant une étanchéité naturelle et permettant ainsi une injection de gaz comburant sous pression.

Dès le début, les Français et les Allemands se sont intéressés aux idées nouvelles lancées par l'INIEX, car les gisements que ces trois pays étaient désireux de valoriser sont des gisements profonds, les autres gisements devant être exploités par les méthodes traditionnelles.

Toutefois, les Français ont élaboré un programme spécifique qui se différencie des recherches belgo-allemandes par la finalité de la production de gaz.

I. — OBJECTIF ET METHODES DE L'EXPERIENCE FRANÇAISE

1) Objectif.

L'objectif que s'est fixé le groupement français pour l'étude de la gazéification souterraine (G.E.G.S.) (**)

(**) Groupement d'intérêt économique composé de quatre organismes : B.R.G.M., C D.F., G D.F., I.F.P.

est de gazéifier le charbon de couches épaisses, de l'ordre de 2 m au moins, situé à des profondeurs (1.000 à 2.000 m) qui les rendent inaccessibles à l'exploitation minière traditionnelle en vue de produire, à la différence du programme belgo-allemand, un substitut de gaz naturel (GNS) à haut pouvoir calorifique (10 kWh/m³). Mais pour aboutir à un gaz de cette qualité, il faut d'abord parvenir à produire un gaz primaire déjà riche (de l'ordre de 3 kWh/m³). Un tel gaz primaire ne peut être obtenu qu'en utilisant un agent gazéifiant autre que l'air (oxygène avec éventuellement de la vapeur d'eau). Ce n'est qu'en seconde étape que ce gaz primaire est enrichi en surface, par méthanisation, ce qui suppose d'autres moyens déjà bien connus.

2) Description du procédé.

Le schéma de principe comporte successivement :

- la foration jusqu'à la veine de charbon, de deux puits (au sens pétrolier du terme) distants de quelques dizaines de mètres ;
- la création dans la couche, d'une communication de perméabilité suffisante pour qu'un agent gazéifiant puisse être injecté au débit souhaité par l'un des deux puits (puits d'injection) ;
- l'allumage du charbon ;
- la combustion du charbon (gazéification proprement dite) et recueil par le deuxième puits (puits de production) des gaz produits (fig. 1).

L'exploitation peut ensuite être conduite en ligne ou en étoile (fig. 2).

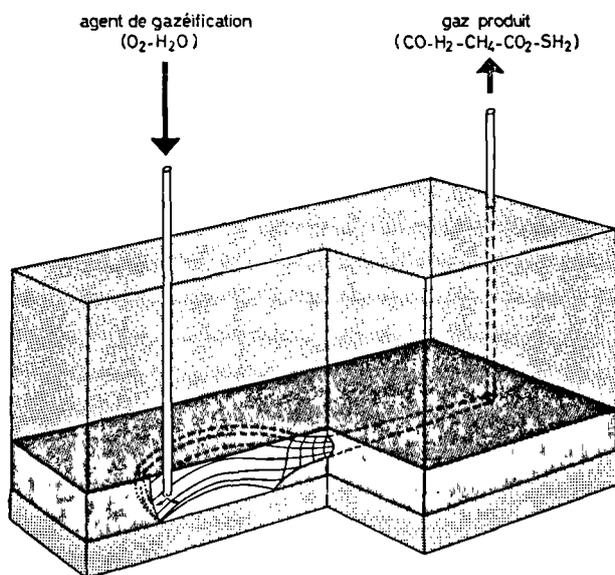


Fig. 1. — L'opération de gazéification proprement dite.

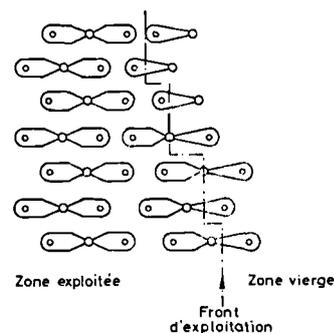


Schéma en ligne

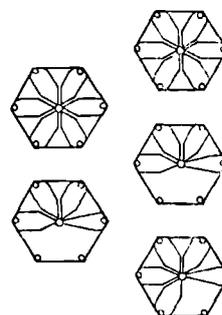


Schéma en étoile

Fig. 2. — Schémas envisageables pour l'implantation des doubles d'exploitation.

3) L'étude économique.

Les caractéristiques très spécifiques de ce projet ont amené le G.E.G.S. à vérifier, avant tous travaux, la faisabilité économique de la gazéification profonde pour un domaine de variation des paramètres techniques qui ne soit pas déraisonnable.

Les éléments techniques et économiques nécessaires à l'évaluation du projet ont été rassemblés en juin 1977 par un groupe de travail composé de représentants des Charbonnages de France, du Gaz de France et de l'Institut Français du Pétrole. Les données techniques utilisées restent valables mais, par contre, l'évaluation économique a été révisée en actualisant les coûts de 1977 à mi-1981.

Très schématiquement, on peut écrire que le prix de revient est constitué de deux parts :

- C₁ : correspondant aux installations de surface (usine d'oxygène, ateliers de traitement, station de compression) dont le montant est parfaitement déterminé dès lors qu'on se fixe la production visée (estimée à 3.10⁹ m³ par jour).
- C₂ : correspondant aux installations souterraines (puits) et dont le montant dépend donc de la profondeur du charbon et de la quantité Q de charbon récupérable par

douplet (l'abaque de la fig. 3 permet de déterminer Q en fonction de l'épaisseur cumulée des couches exploitables par un doublet, du taux de récupération, et de la distance entre puits).

Dans ces conditions, les résultats économiques se présentent (fig. 4) sous forme d'un réseau de trois courbes qui donne le coût C du gaz en centimes par kWh en fonction de la quantité de charbon gazéifié Q par doublet (association puits d'injection - puits d'exploitation) pour trois profondeurs de la veine charbonnière (800, 1.100 et 1.500 m).

On remarque la forte sensibilité des coûts C (Q) pour les faibles valeurs de Q.

On constate ainsi (fig. 4) que pour obtenir par exemple un gaz substituable au gaz naturel à un coût inférieur à 15 cF/kWh, il faut parvenir à gazéifier plus de 6.000 tonnes de charbon par doublet, ce qui revient, dans le cas d'une veine de 2 m par exemple (fig. 3) située à 1.100 m de profondeur et récupérée à 70 %, à écarter les deux puits du doublet d'une distance supérieure à 60 m.

Cette constatation a conduit le G.E.G.S. à orienter ses tentatives de création de liaison avec des puits suffisamment éloignés (plus de 50 à 60 m) pour que la démonstration soit économiquement valable.

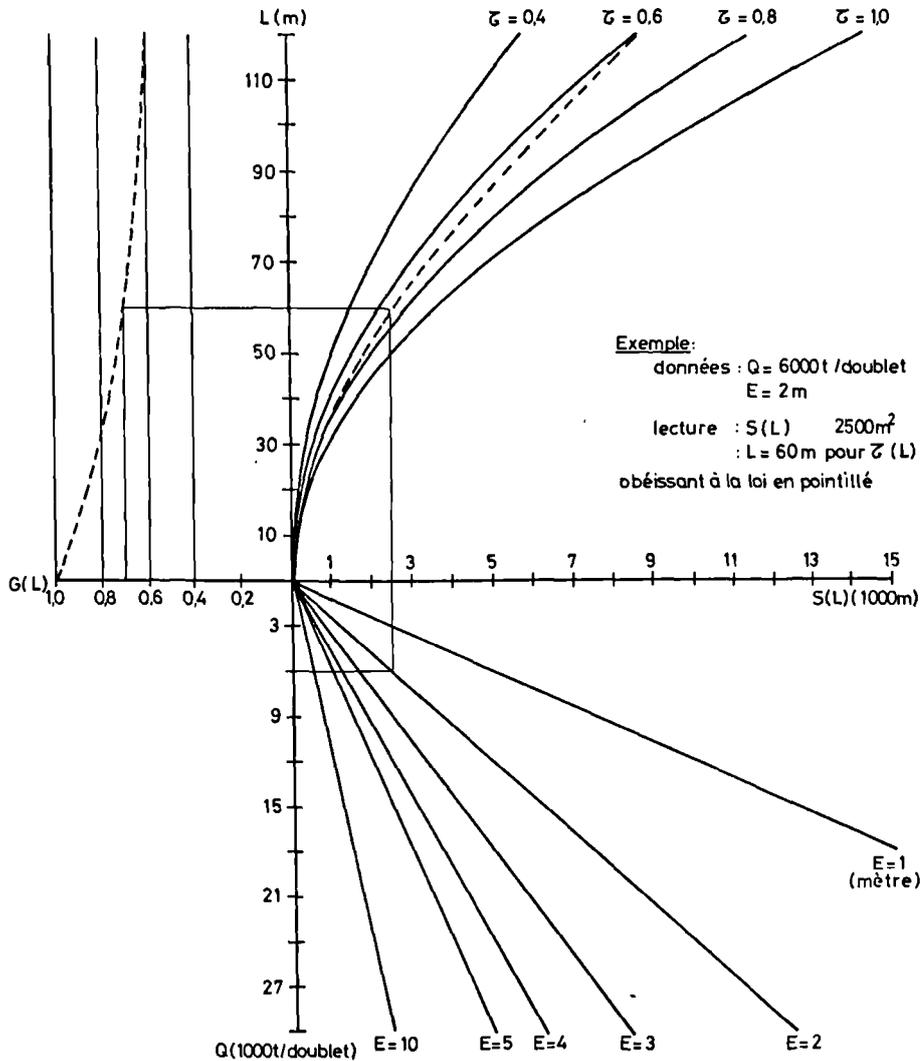


Fig. 3. — Correspondances entre les différentes grandeurs Q, E, L, S(L) et τ .

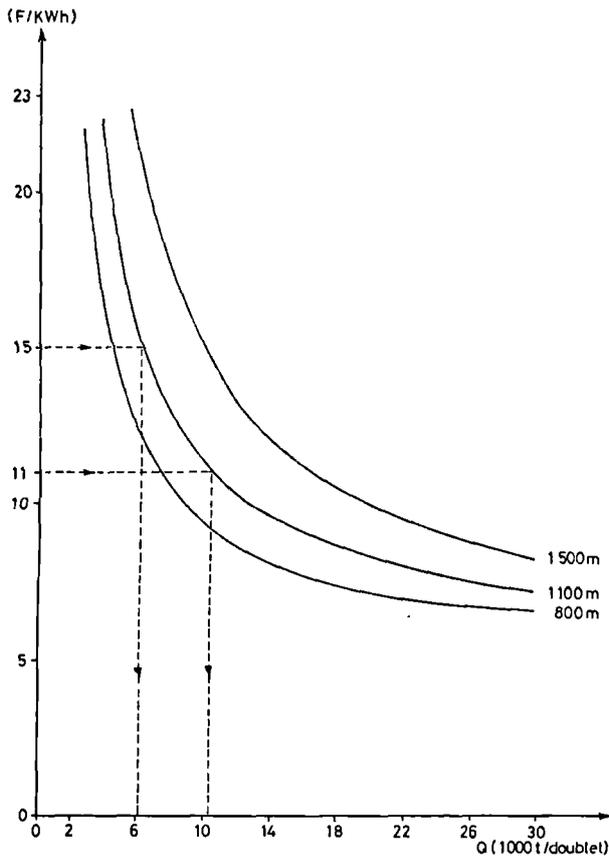


Fig. 4. — Prix de revient de la thermie produite $CAS H^2/CO = 1$ — Electricité EDF
Exploitation en étoile.

4) Les problèmes techniques.

La réussite du procédé est conditionnée par la résolution de problèmes techniques difficiles portant entre autres sur deux points :

a) La liaison entre les puits d'injection et de production.

C'est le problème n° 1 des charbons très profonds, donc compactés et pratiquement imperméables, à la différence des charbons gazéifiés en U.R.S.S. et aux U.S.A. (à faible profondeur) qui permettent une injection de l'agent gazéifiant à une pression peu élevée (20 bars).

Cette liaison doit être créée artificiellement et, parmi les diverses solutions envisageables, le procédé que le G.E.G.S. a choisi pour ses premières expérimentations consiste en une fracturation hydraulique suivie d'une combustion à contre-courant : on fissure le charbon par accroissement rapide de la pression d'injection d'un

fluide constitué d'eau, de gel et de sable destiné à maintenir ouverte(s) la(ou les) fracture(s) créée(s). Ensuite, on assure une combustion à contre-courant en faisant progresser en sens inverse du courant d'injection de comburant, un front de combustion qui élargit ainsi le premier chenal (fig. 5).

Un autre procédé actuellement étudié consiste à faire une électrocarbonisation entre deux électrodes placées dans la veine de charbon. Soumis à un courant de forte intensité, le charbon s'échauffe, se carbonise et ainsi se fissure.

b) La gazéification proprement dite.

Une bonne connaissance des phénomènes mis en jeu et de leurs interactions est indispensable afin d'établir que les processus de gazéification se maintiennent suffisamment longtemps et fournissent des produits utiles dans un domaine de variation acceptable des paramètres opératoires. Les réactions élémentaires entre le charbon et les gaz sont les mêmes qu'en gazéification de surface mais les pressions sont plus élevées, la configuration du réacteur est variable au cours de l'exploitation, les phénomènes de foudroyage et de thermo-fluage sont nouveaux, les possibilités de conduite du réacteur sont plus limitées.

5) Les expérimentations.

Les différents aspects du procédé sont étudiés à l'aide d'expériences de laboratoires, de travaux théoriques et d'expériences sur le terrain.

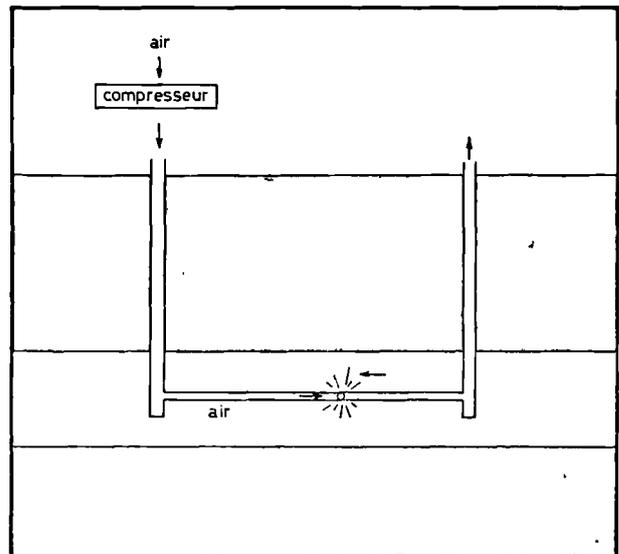


Fig. 5.

a) *Expériences de laboratoires et études théoriques.*

La création et l'amélioration de la liaison initiale donnent lieu à des recherches de laboratoires sur la fracturation hydraulique, le procédé d'électrocarbonisation, et l'attaque chimique du charbon. L'étude des processus de gazéification s'appuie sur une modélisation schématique du processus, ainsi que sur des études théoriques et expérimentales en laboratoire.

Pour ce faire, le trajet des gaz réactifs est étudié dans trois zones considérées successivement (fig. 6).

b) *Expériences sur le terrain à faible profondeur.*

Parallèlement, et dès le début de l'année 1981, des expérimentations ponctuelles ont été entreprises dans une couche de charbon à très faible profondeur (une trentaine de mètres) située à l'Echoux dans les Houillères de la Loire ; cette couche devant prochainement être exploitée par découverte, on pourra éventuellement

constater les effets des opérations réalisées. Celles-ci ont des objectifs partiels et ne prétendent pas simuler toutes les conditions d'une opération à grande profondeur. Elles concernent : la mise en œuvre et la réalisation d'une liaison par électrocarbonisation, l'amélioration de l'injectivité du charbon par attaque chimique, l'allumage par allumeurs chimiques.

c) *Expériences sur le terrain à grande profondeur.*

La principale expérience in situ décrite ci-après a été réalisée de novembre 1979 à juillet 1981 dans le Bassin houiller du Nord - Pas-de-Calais, à Bruay-en-Artois. Ces essais fondamentaux ont été complétés par des études d'accompagnement et d'interprétation des résultats.

Une expérience pilote est sur le point de démarrer sur un nouveau site de ce même bassin — la Haute-Deûle — mis à disposition du G.E.G.S. par les Charbonnages de France.

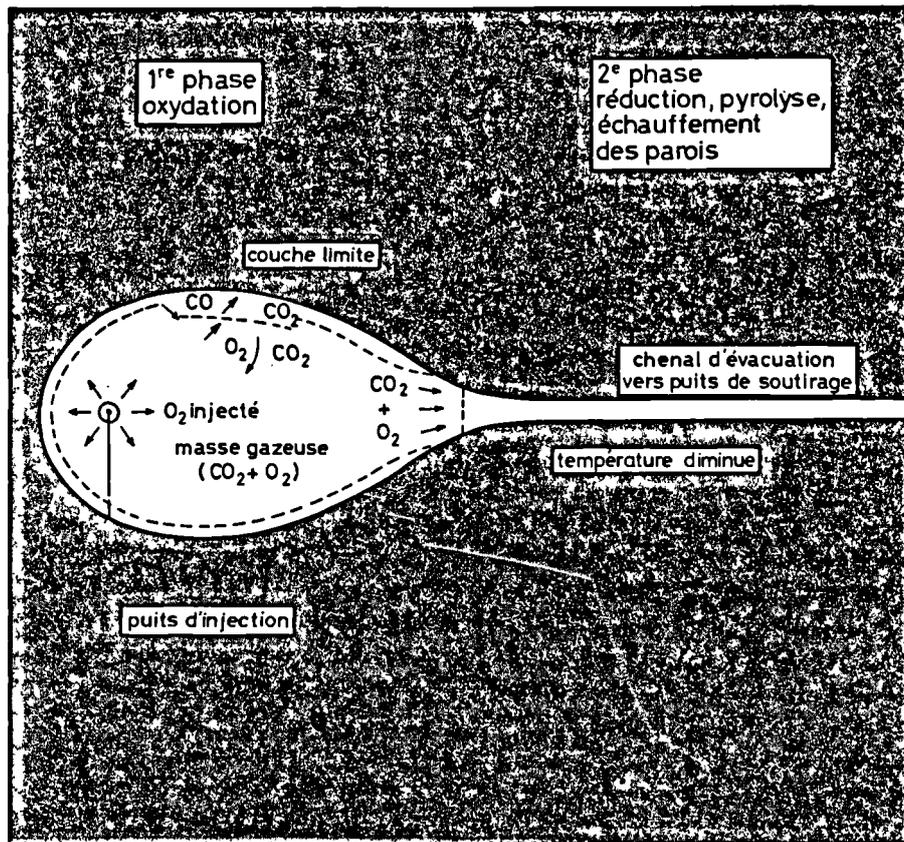


Fig. 6

II. — LES EXPERIMENTATIONS DE BRUAY-EN-ARTOIS (Pas-de-Calais)

Les résultats et les problèmes qui se posent

Pour la première expérimentation in situ, le G.E.G.S. a utilisé les galeries souterraines d'un siège récemment arrêté (siège n° 6 de Bruay-en-Artois) mis à sa disposition par les Houillères du Bassin du Nord-Pas-de-Calais.

1) De novembre 1979 à juillet 1980, une première série d'expériences a permis de réaliser :

- Une préliaison par fracturation dans une veine à grande profondeur (1.100 m), ce qui constitue une première mondiale. Une méthode originale a été utilisée : elle consiste à injecter durant plusieurs mois de l'eau à faible débit, afin de modifier le champ de contrainte en vue d'orienter les fractures ; puis à injecter sous forte pression (700 bars) un fort débit (1 m³/min.) d'un mélange eau + gel, accompagné ensuite de sable pour assurer le soutènement de la communication.
- Un allumage du charbon à l'aide d'un allumeur électrique conçu et mis au point par le G.E.G.S.
- Une tentative de rétro-combustion (combustion à contre-courant) qui a été maintenue durant 15 jours.

2) A partir des observations tirées de la première série d'expériences, une amélioration de l'équipement et des appareillages de mesures et de contrôle a pu être apportée en vue d'effectuer, au premier semestre 1981, une seconde série d'expériences. Celles-ci visèrent à obtenir :

— une meilleure connaissance de la liaison par des mesures des taux de récupération obtenus au puits de sortie lorsqu'on injecte au puits d'entrée de l'eau, de l'azote ou les deux à la fois ; par des mesures de délais de transit à l'aide de traceurs, tels que l'hélium, non absorbé par le charbon ;

— une approche des phénomènes d'auto-allumage intempestif du charbon au puits d'injection qui s'étaient produits durant les premières tentatives de rétro-combustion à partir d'un allumage effectué au puits de production. Des injections de mélanges gazeux O₂ + N₂ à teneur croissante en oxygène ont ainsi été effectuées ;

— une nouvelle tentative de rétro-combustion qui n'a pu être conduite longtemps, le site étant arrivé à limite de disponibilité.

3) De ces diverses expériences de Bruay, actuellement terminées, il ressort que :

— la création d'une préliaison par fracturation hydraulique à haute pression et fort débit, après une phase préparatoire d'infusion de la couche, est réalisable à grande profondeur.

L'existence d'une première communication de bon rendement (30 à 50 %) a été ainsi prouvée, sans que l'on soit en mesure de préciser la nature de cette communication.

— l'allumage du charbon à l'aide d'un allumeur électrique est possible, ainsi que le démarrage d'un début de rétro-combustion.

Par ailleurs, ces expériences ont permis d'améliorer notablement nos connaissances et notre savoir-faire dans les domaines, tant de l'équipement opérationnel (tubages, têtes de puits, obturateurs...), que de l'appareillage de mesures, de contrôles et de télécommande.

Cela étant, ces expériences ont fait apparaître des phénomènes non prévus à l'origine, en particulier l'absorption d'oxygène par le charbon, et l'auto-inflammation (non voulue) du charbon au niveau du puits d'injection.

L'étude de ces phénomènes est activement poursuivie afin qu'une solution (initiation et maintien de la rétro-combustion sous un air à faible teneur en O₂ par exemple, ce qui suppose une bonne préliaison) soit rapidement trouvée et puisse être expérimentée sur le futur site de la Haute-Deûle.

III. — LES PERSPECTIVES D'AVENIR

Pour la réussite du procédé, il est indispensable d'obtenir une liaison franche de puits à puits, de haute conductivité hydraulique et permanente.

Pour la création de cette liaison, notre voie principale reste la fracturation hydraulique suivie d'une rétro-combustion. C'est le procédé déjà utilisé à Bruay et le site de la Haute-Deûle doit permettre d'améliorer les performances et de compléter nos connaissances dans un charbon de caractéristiques différentes. En effet, si un premier résultat a été enregistré à Bruay-en-Artois dans ce domaine, les difficultés techniques restent nombreuses : réalisation d'une rétro-combustion efficace, neutralisation des phénomènes d'auto-allumage.

D'autres expériences in situ de fracturation hydraulique permettant de mieux cerner les phénomènes et dont les résultats pourraient être éventuellement vérifiés de visu à partir de travaux miniers sont également envisagées dans un programme complémentaire.

L'étude d'autres voies de liaison telles que l'électro-carbonisation, ou l'attaque chimique du charbon, est commencée et sera poursuivie, en particulier dans des expériences in situ en surface, avec ensuite vérification de visu des résultats obtenus.

En outre, des voies nouvelles peuvent être explorées : l'essai de liaison par forage dirigé, inspiré des réalisations pétrolières, paraît intéressant. Dans sa phase exploratoire initiale, on pourrait tenter le pilotage d'un forage dirigé en veine. Ce n'est qu'ensuite que pourrait être envisagé un forage dirigé à partir de la surface, recoupé par un forage vertical pour obtenir le doublet de gazéification.

*

**

Le programme initialement prévu pour la période de 1978 à 1984, s'élevait à un montant de 155 MF financé par la C.C.E. (40 %), par les pouvoirs publics français (30 %) et par les quatre partenaires (30 %).

Au 1^{er} janvier 1982, il reste sur ce budget environ 100 MF, dont 35 MF initialement prévus en 1982.

Sur l'instigation des pouvoirs publics, le programme actuel sera accéléré et portera le budget de 1982 à 42 MF. Cette accélération permettra en particulier d'engager à la Haute-Deûle, une double expérimentation comme il est écrit plus loin.

Par ailleurs, un programme complémentaire de 40 MF sur deux ans (1982-1983) a été, à la demande des pouvoirs publics, étudié. Il reste jusqu'à présent, optionnel, sous réserve d'un financement spécifique à obtenir.

Les principaux thèmes de ce programme complémentaire seraient :

- la foration dirigée (voir ci-dessus) ;
- l'électrocarbonisation : les essais en cours à l'Echaulx seraient répétés sur des sites différents par la nature du charbon, la profondeur... ;
- la rétro-combustion, dont les phénomènes parasites (absorption d'oxygène, auto-allumage) seraient mieux cernés par quelques expériences in situ avec accès ultérieur pour vérification des résultats ;
- la connaissance des résultats effectifs d'une opération de fracturation en veine, que peut permettre l'accès ultérieur par travaux miniers. Ce pourrait être le cas pour une partie du dispositif expérimental de la Haute-Deûle qui est située à proximité des ouvrages souterrains du Siège 24 d'Estevelles des H.B.N.P.C.

IV. — LE PROGRAMME DE LA « HAUTE-DEULE »

1) Objectif.

L'objectif assigné au site de Bruay ayant été atteint, et pour permettre au G.E.G.S. la poursuite des expérimentations in situ, un nouveau site a été mis à disposition par les Charbonnages de France et les Houillères du Bassin du Nord - Pas-de-Calais.

Ce site, dit "de la Haute-Deûle", parce qu'il se trouve de part et d'autre du canal de la Haute-Deûle, est situé entre Lens et Carvin (Pas-de-Calais).

L'objectif assigné à ce nouveau site marque un pas en avant dans la recherche puisque :

— pour atteindre les couches de charbon situées à plus de 800 m, les sondages seront lancés *depuis la surface*, et non plus à partir de travaux souterrains ;

— les couches à atteindre sont constituées d'un charbon de caractéristiques *différentes* de celui de Bruay (maigre au lieu de gras) ; ceci permettra de préciser les "qualités" des divers charbons vis-à-vis du procédé de gazéification in situ ;

— les expériences, qui dureront environ cinq ans, devraient comporter la réalisation sur ce site d'un *pilote de démonstration* de gazéification faisant la synthèse de tous les acquis et consistant essentiellement à faire la démonstration du procédé dans des conditions voisines de celles de son futur développement industriel. Les différentes étapes en seront les suivantes :

- 1° choix du champ de démonstration ;
- 2° implantation de puits et réalisation d'une liaison entre eux ;
- 3° allumage du charbon et élargissement de la liaison par combustion à contre-courant ;
- 4° combustion du charbon à contre courant.

En ce qui concerne l'objectif de la voie 1, à savoir le choix du champ de démonstration, il s'agit de définir une méthodologie de reconnaissance précise d'un site en vue d'une opération de gazéification souterraine.

Parmi les critères de sélection du site, celui relatif à la continuité de la couche sur une superficie suffisante amène à envisager le recours aux méthodes géophysiques. La nécessité de mettre en évidence des failles de rejet supérieur ou égal à l'épaisseur de la veine nécessite de faire appel aux tout derniers perfectionnements de la méthode de sismique réflexion, à savoir : la sismique haute résolution et le profil sismique vertical réalisé à partir d'un trou de forage dans lequel est déplacé le récepteur captant les ondes de tirs réalisés à la surface.

2) Les phases de travaux prévues.

Les études géologiques réalisées par le G.E.G.S. à partir des documents miniers ont permis de décider, dans une première phase, d'effectuer des travaux à partir de deux zones de surface, situées à l'aplomb d'une série de veines de 1,3 à 3 m d'ouverture, entre 800 et 1.200 m de profondeur. Sur ces deux zones, on envisage d'entreprendre un programme d'essais comportant plusieurs phases :

a) *Une phase de reconnaissance et de préparation* (fin 1981, début 1982).

Sur chacune de ces zones, un premier sondage vertical traversera toutes les veines de charbon en vue de les reconnaître, et de les analyser à l'aide de carottages, de diagraphies et de mesures physiques. Réalisés en diamètre 200 mm à l'aide de sondeuses lourdes, ils serviront de forages constitutifs des dispositifs expérimentaux après complétion en puits.

b) *Une phase expérimentale à objectifs limités* (1982-1983).

L'implantation du premier dispositif expérimental comportera les opérations suivantes :

- réalisation d'un second sondage, complétion en puits,
- réalisation d'une opération limitée de fracturation hydraulique, dite minifrac, destinée à déceler par étude sismo-acoustique l'orientation de la fracture,
- réalisation éventuelle d'un troisième sondage si la direction de fracturation s'avère être d'une orientation nettement différente de celle passant par les deux premiers puits,
- réalisation d'une fracturation hydraulique après préparation par infusion d'eau,
- évaluation de la transmissivité de la liaison obtenue.
- initiation d'une combustion localisée par un procédé d'allumage,
- conduite d'une rétro-combustion à l'air (éventuellement appauvri en oxygène),
- début de la phase de combustion à contre-courant.

A l'issue de cette phase, une reconnaissance des résultats des opérations par travaux miniers pourrait être entreprise.

c) *La phase pilote* (1983-1984).

Avec un décalage de temps sur les opérations précédentes afin d'en exploiter les résultats, une expérimentation pilote sera menée sur la même zone ou sur l'autre zone reconnue, jusqu'à l'opération de gazéification à l'oxygène qui pourrait avoir lieu à partir de 1984. Pour ce faire, les complétions des puits auront été prévues pour supporter les hautes températures et l'équipement comportera un dispositif de récupération de mise à la flamme ou d'incinération de gaz produits.

CONCLUSION

Avec l'appui des pouvoirs publics français et de la C.C.E., le G.E.G.S. a engagé un programme de 125 MF

portant sur la période 1978-1984. Ce programme aborde tous les aspects du problème et vise à réaliser d'ici 1984 une opération de faisabilité technique de production de gaz primaire.

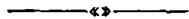
Après un premier résultat encourageant obtenu à Bruay, beaucoup de problèmes demeurent.

A l'instigation des pouvoirs publics qui ont demandé d'aller le plus vite possible, le G.E.G.S. prévoit d'accélérer le programme actuel dès 1982, en engageant très rapidement la seconde opération (pilote de démonstration) sur le site de la Haute-Deûle.

Par ailleurs, un programme complémentaire de 40 MF pour 1982 et 1983 a été proposé. Son exécution est liée à un appui financier important par les pouvoirs publics.

Après 1984, le développement du procédé nécessitera des travaux de recherche appliquée et parallèlement de nombreuses opérations pilotes concernant la technique de liaison et la maîtrise des processus de combustion. Cette phase demandera environ 10 ans à partir de 1985. Elle permettra une évaluation plus précise des réserves françaises de charbon relevant de la gazéification souterraine, compte tenu des critères d'application du procédé.

Une première opération industrielle de grande envergure pourrait être réalisée entre 1995 et 2000. Le coût du gaz produit dépendra de sa qualité et de la quantité de charbon exploitable par un doublet de puits, car le coût total dépend très fortement de la partie forages. Il paraît possible, sous toutes réserves, dans l'état actuel des estimations économiques, d'obtenir un gaz substituable au gaz naturel, à un coût inférieur à 15 cF/kWh.



La gazéification souterraine du charbon

Les expérimentations de Bruay-en-Artois - Le cadre géologique

par P. SOLETY (*) et J. LEPLAT (**)

Résumé. — La gazéification *in situ* du charbon nécessite la création d'une communication entre deux puits distants de plusieurs dizaines de mètres. Pour assurer au mieux cette communication, il semble logique de profiter d'une direction préférentielle de la fracturation naturelle et d'implanter les puits suivant cette direction, d'où le besoin d'une bonne connaissance structurale du site.

Les expérimentations de Bruay-en-Artois ont porté sur la veine n° 22, vers le sommet du faisceau de Six-Sillons, Assise de Bruay, Westphalien C. L'étude structurale a conduit à retenir la direction de fracturation naturelle N 120°. La liaison obtenue par la suite démontre l'opportunité de ce choix.

Abstract. — Underground coal gasification requires realization of a communication between two boreholes several ten meters away from one another. To obtain the best communication, it seems logical to make use of a preferential direction among natural fractures, and to place the boreholes according to that direction; it follows that a good knowledge of the site's structure is necessary.

Experimentations of Bruay-en-Artois concerned 22th vein, located near the top of the "faisceau de Six-Sillons" (assise de Bruay, Westphalian C). Structural study led to accept the direction of natural fracturation N 120°. The linkage obtained afterwards demonstrates appropriateness of that choice.

I. — PRINCIPES ET OBJECTIFS DU PROJET DE GAZEIFICATION SOUTERRAINE PROFONDE DU CHARBON

Le projet français de gazéification souterraine vise la gazéification de charbons profonds, inaccessibles à l'exploitation minière traditionnelle, dont une première estimation a permis d'évaluer les réserves nationales à environ 2 milliards de tonnes. Il faut noter qu'il ne s'agit que d'une estimation. L'évaluation des réserves justiciables du procédé ne pourra être effectuée que quand les critères de sélection découlant des contraintes techniques seront précisés et que parallèlement, un inventaire des gisements peu ou mal connus sera réalisé.

L'objectif du projet est à terme la mise en œuvre d'un procédé industriel de production d'un substitut de gaz naturel GNS (10 kWh/m³). Pour aboutir à un gaz de cette qualité, il faut convertir au jour en méthane un gaz primaire de pouvoir calorifique de l'ordre de 3 kWh/m³. Ce gaz primaire ne peut être obtenu qu'en utilisant un agent gazéifiant autre que l'air (oxygène

avec éventuellement vapeur d'eau). Compte tenu des fortes profondeurs, au-delà de 1.000 m, où sont situées ces réserves gazéifiables, on peut envisager de travailler sous pression élevée. Le projet français se différencie donc nettement de la plupart des réalisations en cours aux U.S.A. ou en U.R.S.S., où la gazéification est effectuée à des profondeurs beaucoup plus faibles (quelques centaines de mètres) et ne permet d'obtenir par injection d'air et éventuellement de vapeur d'eau, qu'un gaz de faible pouvoir calorifique. Un projet belgo-allemand vise également la gazéification de charbons profonds, mais diffère du procédé français dans sa méthode d'approche.

Le principe de la gazéification *in situ* consiste, successivement :

- à déterminer, par les méthodes de la géologie structurale, les directions principales de la fracturation naturelle du charbon ;
- à créer dans le charbon, naturellement compact étant donné la profondeur, une communication entre deux puits, disposés parallèlement à la direction préférentielle de la fracturation naturelle et distants de plusieurs dizaines de mètres ;
- à gazéifier le charbon par injection de l'agent gazéifiant à l'un des puits et recueillir les gaz produits à l'autre puits.

(*) B.R.G.M., Orléans.

(**) B.R.G.M., Lezennes.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

La première expérimentation in situ mettant ce principe en application a eu lieu d'octobre 1979 à juin 1981 à Bruay-en-Artois (H.B.N.P.C.).

II. — LES EXPERIMENTATIONS DE BRUAY-EN-ARTOIS

Le cadre géologique

1) Généralités.

Bruay-en-Artois se situe dans la partie ouest du Bassin Houiller du Nord - Pas-de-Calais, marquée par la présence des grandes failles épicrotacées de l'Artois [failles d'Hersin, de Ruitz, de Pernes et de Marqueffles (Gosselet, 1908)]. Implanté au Sud-Est de la ville, le siège 6 s'inscrit dans un compartiment de terrain houiller s'allongeant de l'WNW à l'ESE entre les failles de Ruitz au Nord (direction N 140° E) et de Marqueffles au Sud (direction N 120° E).

La structure générale du site est bien illustrée par la coupe sensiblement N-S représentée à la fig. 1. Les couches sont affectées de plis en genoux, déterminant une succession de "dressants" et de "plateures". L'orientation des axes de ces plis, N 90 à 110° E (fig. 2), traduit un raccourcissement Sud-Nord lors de la phase asturienne. Aux grandes failles directes à pendage sud de Ruitz et de Marqueffles, cette dernière recoupant

la grande faille du Midi, s'ajoutent d'autres failles directes mais à pendage nord, désignées par l'importance de leur rejet : rejet de 60 m (direction N 130 à 135° E, pendage N 65°) et rejet de 10 m (direction N 130° E, pendage N 65°).

Le siège 6 de Bruay a exploité une bonne partie de l'assise du même nom (Westphalien C et D), dont la composition est donnée à la fig. 3. La veine concernée par les expérimentations de gazéification est la n° 22, située vers le sommet du faisceau de Six-Sillons, sous les tonsteins Maurice et Maxence. D'une épaisseur de 1,20 m, elle est constituée par un charbon 3/4 gras, à indice de gonflement très élevé (7 à 8).

2) Etude structurale du site.

L'étude structurale du site a été assurée par Bles et Breton (1), dont les observations corroborent, à quelques détails près, la succession de déformations présentée par Colbeaux (4); en particulier, deux axes de plissement ont été mis en évidence, un premier autour de la direction N 100° E, correspondant aux plis en genou de la première phase, et un second, postérieur au premier, autour de la direction N 155° E.

Dans ce qui suit, nous ne retiendrons que les éléments suivants, essentiels pour l'implantation du dispositif expérimental et la création d'une liaison entre puits, au sein de la couche de charbon, par développement de la fracturation naturelle.

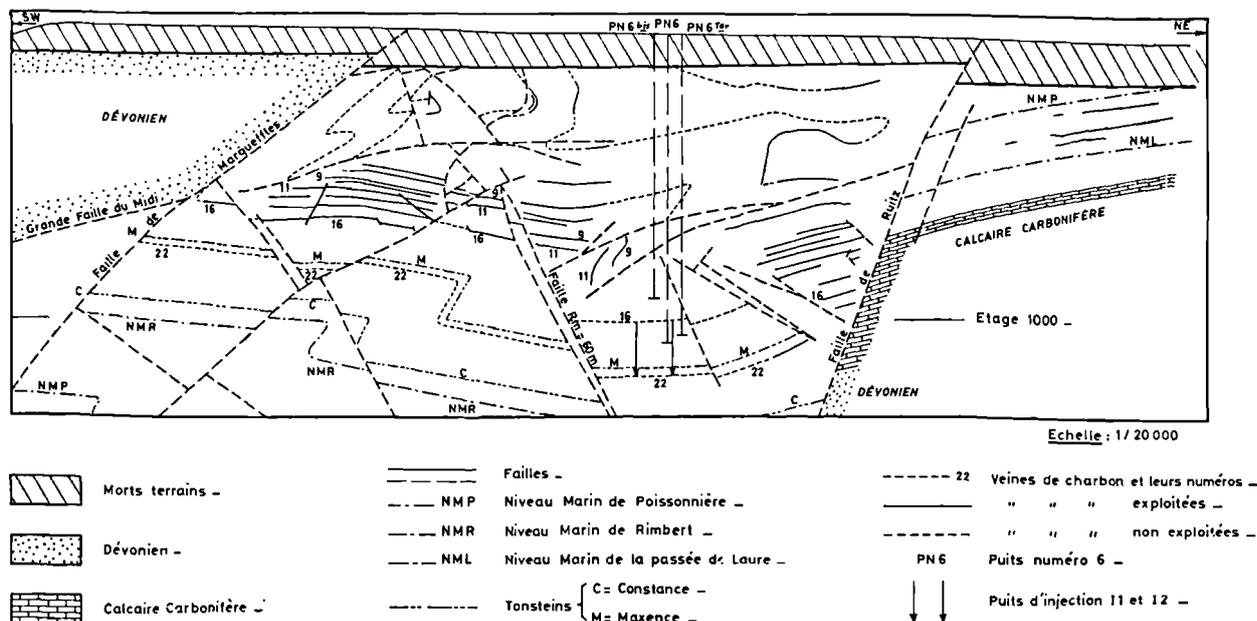


Fig. 1. — Coupe géologique verticale passant par le siège 6 de Bruay-en-Artois, actualisée grâce aux travaux de l'étage 1.000.

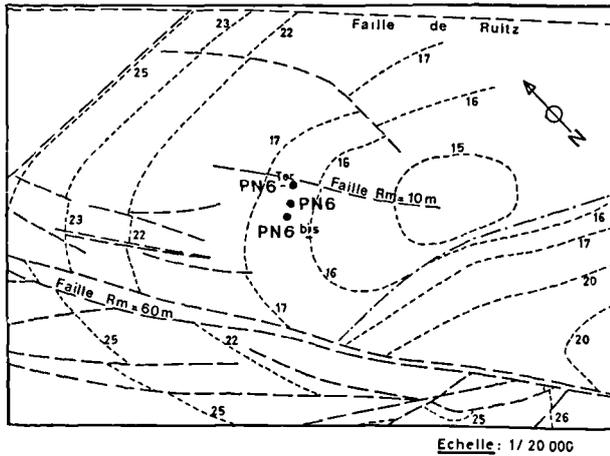


Fig. 2. — Siège 6 de Bruay-en-Artois.
Vue en plan de l'étage 1.000 (— 920 NGF).

1° Le charbon est beaucoup plus affecté par les déformations que les terrains encaissants. Les veines étudiées (la n° 22 mais aussi la n° 16) montrent un regroupement des fractures sensiblement autour des mêmes directions :

N 60° E - 75° NW ; N 85° E - 65° S ; N 120° - 65° SW ;
N 140° E - 60° SW ; N 170° E - 50° W,

les trois dernières correspondant à celles des failles environnantes (fig. 4).

2° En comparant à la fracturation de l'encaissant, on relève :

— des directions communes : N 60° E, ainsi que des directions comprises entre N 120° E et N 180° E ;

— une direction spécifique à l'encaissant : N 10° E - 90° ;

— des directions spécifiques au charbon : N 40 à 60° E/45 à 60° NW.

On note par ailleurs :

— une fréquence supérieure des fractures dans le charbon (0,05 à 0,20 m) (*) par rapport à l'encaissant (1 m) (*) ;

— des pendages moins forts dans le charbon que dans l'encaissant.

3° La proximité d'une faille majeure se traduit dans le charbon par la prédominance des fractures de même direction mais de pendages divergents, ainsi que par une fréquence plus grande.

(*) Distance moyenne entre fractures.

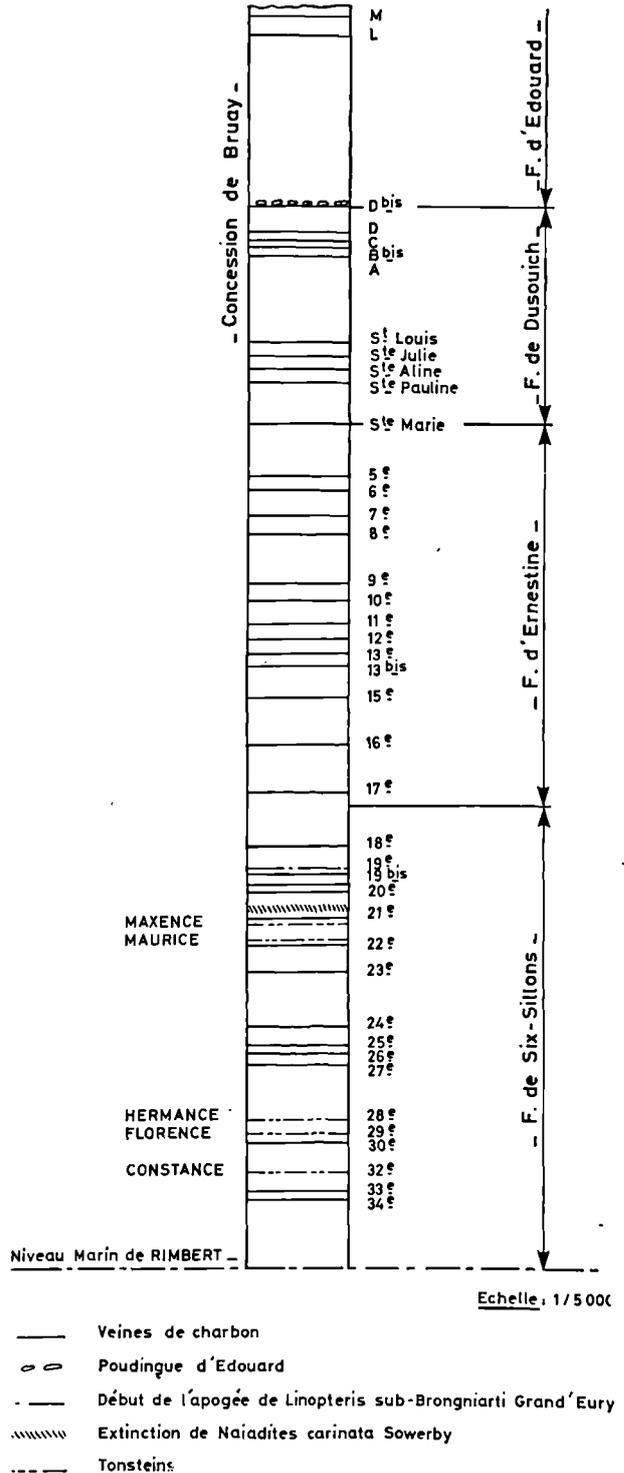


Fig. 3. — Composition de l'assise de Bruay dans le groupe de Bruay, d'après Bouroz, Chalard et Dollé, 1953.

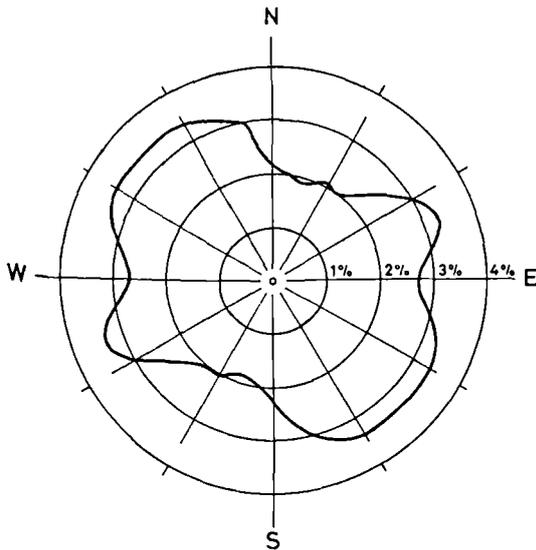


Fig. 4. — Rosace des directions de fractures dans le charbon (Pendage > 30°).

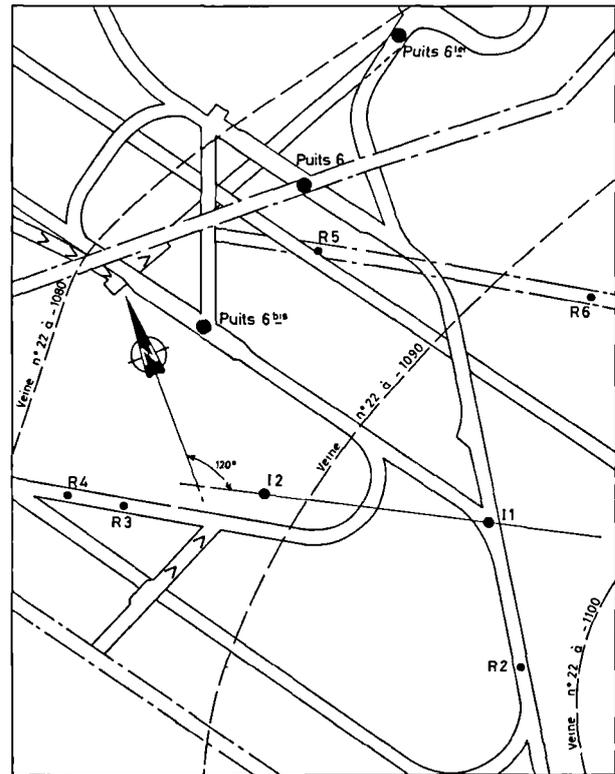
La conclusion de cette étude se résume ainsi :

- les forages prévus dans le cadre des expérimentations sont trop éloignés des failles de 10 m et de 60 m pour que leur influence se fasse sentir ;
- la direction moyenne la plus probable des fractures de la veine n° 22 est la direction N 120°.

3) Réalisation du dispositif.

C'est en fonction de cette conclusion qu'a été réalisé le dispositif représenté fig. 5, consistant en deux puits d'injection (11 et 12) éloignés de 65 m, complétés par cinq sondages d'observation périphériques. Forés depuis l'étage 1.000 (— 920 NGF), ces ouvrages ont atteint la veine n° 22 à des profondeurs comprises entre 160 et 170 m (soit 1.160 à 1.170 m comptés depuis la surface). Tous ont fait l'objet d'enregistrements diagraphiques (γ ray, $\gamma\gamma$ neutron) permettant de conclure à la continuité de la veine de charbon sur le site d'expérimentation.

Le puits 12 a été implanté suivant la direction N 120° E par rapport au puits 11 (au lieu de N 10° E comme prévu initialement). L'objectif initial de l'expérimentation, qui consistait à établir la communication entre puits par fracturation hydraulique, a été atteint dans de bonnes conditions, ce qui tend à prouver l'opportunité du choix de la direction N 120° E. Ce résultat favorable a déterminé la poursuite de l'expérimentation par l'opération dite de " rétrocombustion ", qui permet d'élargir le chenal de communication créé par fracturation hydraulique.



Echelle : 1/2000

Fig. 5. — Siège 6 de Bruay-en-Artois
Implantation des puits et sondages

- == : Galeries à l'étage 1.000
- : Puits du siège 6
- I : Sondages d'injection
- R : Sondages de reconnaissance

III. — LIMITES TECHNIQUES IDENTIFIEES ET RECHERCHES A ENGAGER

Elles concernent les trois phases de reconnaissance, de préparation et de fonctionnement du réacteur de gazéification.

1) Reconnaissance du site de gazéification.

Contrairement aux procédés de gazéification du charbon en usine, au jour, ainsi qu'à d'autres procédés de production d'énergie, la gazéification souterraine se réalise dans un réacteur imposé par la nature. Les possibilités de contrôle et de pilotage de ce réacteur sont ainsi réduites et l'on ne peut pratiquement jouer que sur la quantité et la qualité du comburant injecté.

Il est en conséquence fondamental d'avoir la meilleure connaissance possible du milieu géologique dans lequel seront mises en œuvre les différentes phases du procédé de gazéification souterraine. Cette connaissance est d'ailleurs d'autant plus capitale que l'on est en phase expérimentale.

L'approche et la certification géologique d'un site d'expérimentation comportent plusieurs étapes :

1° L'examen de la séquence lithologique où se situera le réacteur, c'est-à-dire la détermination de la nature des veines de charbon et des roches encaissantes.

2° L'étude de la continuité des veines de charbon à l'intérieur du périmètre d'opération. Cette étude s'appuie sur les résultats de l'examen sédimentologique et sur des diagnostics complémentaires fournis par des diagraphies réalisées dans les forages de reconnaissance. On peut ainsi s'assurer que le périmètre d'opération n'est pas perturbé par des failles qui risqueraient de compromettre l'expérimentation.

3° La détermination des propriétés géomécaniques du charbon et des roches encaissantes : la connaissance de ces propriétés telles que perméabilité, pression hydrostatique, état de contraintes... est indispensable pour la modélisation des phénomènes de fracturation provoquée, phase capitale du procédé de gazéification.

4° L'analyse fine de la fracturation naturelle du massif rocheux constitué par le charbon et les terrains encaissants. Un massif rocheux, quel qu'il soit, est en effet toujours fracturé suivant un nombre de directions préférentielles variable mais limité. Ce fait est d'une grande importance car, si l'on connaît la direction suivant laquelle la fracturation naturelle du charbon est la plus développée, c'est bien évidemment suivant cette direction que l'on implantera le doublet de sondages — ou puits — qui servira de base à l'ensemble des opérations. C'est une telle analyse qui a été effectuée à Bruay et qui a permis de disposer les sondages au mieux, tout en tenant évidemment compte des servitudes imposées par les galeries déjà existantes.

En vue de préparer le développement industriel d'un champ de gazéification souterraine, deux orientations de recherche apparaissent : il s'agira en effet d'implanter un dispositif systématique de puits d'injection-production en tenant compte, d'une part, de la fracturation naturelle du faisceau de veines de charbon et, d'autre part, de son état de contraintes in situ.

2) Création et amélioration de la liaison entre puits.

Actuellement réalisée suivant la technique pétrolière de la fracturation hydraulique, la liaison dépend largement des caractéristiques du milieu, telles qu'elles viennent d'être rappelées : état de la fracturation naturelle et état de contraintes du massif.

D'autres techniques sont envisagées dont la mise en œuvre pratique se heurte à de grosses difficultés technologiques :

a) *L'électrocarbonisation*. Partiellement étudiée à très faible profondeur, elle doit être étendue à grande profon-

deur. Il est pour cela nécessaire de connaître la distribution des résistivités du charbon et des roches encaissantes suivant leur nature lithologique. La seule façon d'y parvenir est de réaliser une campagne de mesures dans les exploitations minières actuelles opérant en France de façon à prévoir, sur un site donné, si l'électrocarbonisation peut constituer une technique de liaison efficace.

b) *La foration dirigée*. Cette foration par forage dévié, ou "taupe téléguidée", est très séduisante a priori. Les récentes réalisations étrangères et françaises sont encourageantes, mais la précision du tracé est encore insuffisante tandis que le coût de mise en œuvre demeure prohibitif.

3) Processus de gazéification.

Le réacteur souterrain peut être découpé théoriquement en trois zones :

- la zone voisine du puits autour duquel se produisent les phénomènes exothermiques d'oxydation du charbon avec formation de CO_2 et H_2O ;
- la partie active du chenal de liaison dans laquelle CO_2 et H_2O sont transformés partiellement en CO et H_2 ;
- la partie inerte du chenal de liaison où la température est inférieure à celle d'arrêt cinétique de la réduction et conditionne l'arrêt ou la propagation des réactions.

Les phénomènes physico-chimiques mis en jeu sont extrêmement complexes et leur simulation en laboratoire se heurte au manque de données expérimentales. Celles-ci sont par ailleurs délicates à déterminer car les spécifications des expériences à concevoir et à réaliser sont très mal définies.

IV. — NECESSITE D'UNE EVALUATION DES RESERVES JUSTICIAIBLES DU PROCEDE DE GAZEIFICATION SOUTERRAINE

Avant le lancement du projet de gazéification souterraine, un premier recensement des réserves de charbon justiciables de ce procédé a été réalisé. La gamme des profondeurs envisagées se situe entre 800 et 1.500 m ; l'épaisseur minimale des veines prises en considération est de 2 m, constituées soit par une seule couche, soit par deux couches de puissance cumulée égale à 2 m. Les réserves calculées correspondent à des tonnages en place, affectés d'un coefficient réducteur variant de 0,8 pour un gisement déjà exploité à 0,3 pour un gisement probable se situant dans le prolongement lointain d'un gisement connu. Dans l'état actuel des connaissances, ces réserves sont d'au moins 2 milliards de tonnes, les quantités les plus importantes étant situées en Lorraine, dans le Nord - Pas-de-Calais et le Jura.

Il est nécessaire de moduler ce chiffre par les considérations suivantes :

- en dehors des extensions proches des gisements actuellement exploités par méthodes classiques, les bases d'évaluation sont extrêmement imprécises ;

- les gisements potentiels repérés soit par des données géologiques et paléogéographiques, soit parce qu'ils ont été recoupés par un sondage pétrolier n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation des réserves ;
- les gisements de lignite, hors ceux de Provence, ont été également exclus de cette évaluation.

Cependant, bien que les seules ressources retenues en France avec une bonne certitude soient incomparablement plus faibles que celles avancées par l'Europe du Nord, leur valorisation par gazéification souterraine serait loin d'être négligeable. Dans une hypothèse moyenne, un milliard de tonnes en place gazéifiables pourrait correspondre à la production de 150 milliards de mètres cubes de gaz substituables au gaz naturel au rythme de 7,5 milliards de m³/an pendant 20 ans, valeurs qui sont du même ordre de grandeur que les

réserves de gaz naturel connues du Sud-Ouest de la France.

Cette comparaison met en évidence la nécessité de réaliser, parallèlement à l'étude de faisabilité technique du procédé de gazéification profonde :

- la confirmation des réserves des gisements situés dans le prolongement ou au voisinage des bassins exploités ;
- l'identification et la certification des gisements rencontrés ponctuellement par des forages pétroliers ;
- la prospection et l'identification des zones d'espoir dont le raisonnement de géologie prévisionnelle et les données de géophysique profonde laissent supposer l'existence, principalement sur les bordures du Massif Central en ce qui concerne les charbons et dans les grands bassins sédimentaires en ce qui concerne les lignites.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BLES J.L., BRETON J.P. (1979). — Gazéification in situ du charbon. Expérimentation sur le site de Bruay 6. Etude structurale. *Rapport B.R.G.M.*, 79 SGN 369 GEO.
- 2) BOUROZ A. (1948). — La structure du Bassin Houiller du Pas-de-Calais à l'Ouest du méridien de Lens. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. LXVIII, p. 93-105.
- 3) BOUROZ A., CHALARD J., DOLLE P. (1953). — Extension géographique et valeur stratigraphique des niveaux de tonstein du Bassin Houiller du Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. LXXIII, p. 98-141.
- 4) COLBEAUX J.P. (1982). — Interprétation tectonique du Bassin Houiller du Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. CII, p. 61-63.
- 5) GOSSELET J. (1908). — Note sur quelques failles communes aux terrains crétacique et houiller de l'Artois. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XXXVII, p. 80-109.
- 6) MONTAIGNE M. (1910). — Coupe de la faille de Marqueffles à Vimy. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XXXIX, p. 82-83.

—————«—————

Recherches géothermiques en Belgique

par A. DELMER (*)

A ce jour, aucune installation géothermique n'est établie en Belgique, malgré un potentiel confirmé. On y vient cependant et des projets prennent corps.

1) En 1975, Legrand (3) publiait toutes les mesures de températures faites dans les ouvrages profonds du pays. Les quelque 450 mesures, dont le souvenir a été conservé, ne révèlent aucun point très chaud. Les écarts du gradient autour de la valeur moyenne de 3 % s'expliquent soit par des mouvements de nappes aquifères, soit par des situations tectoniques particulières. Les massifs autochtones sont "plus chauds" que les massifs charriés de même lithologie. Ce dernier point mériterait une explication sur documents plus précis que ceux dont nous disposons. Quoi qu'il en soit, tant l'examen des résultats de mesures des températures que notre connaissance de la géologie du pays confirment que, s'il y a une énergie géothermique, elle ne peut être que de basse enthalpie.

2) L'exiguïté de notre territoire et surtout cette échine dorsale calédonienne dite Massif du Brabant, ne laissent pas de place à des bassins sédimentaires d'âge céno ou mésozoïque suffisamment profonds pour qu'on puisse extraire, des nappes aquifères qui y circulent, des calories à un niveau de température intéressant. Dans le nord du pays, le Crétacique descend un peu au-delà de 1.000 m de profondeur laissant espérer tout au plus des températures voisines de 40° C.

3) Reste le Paléozoïque et si des découvertes relativement récentes n'infirmait une opinion qui semblerait aller de soi, nous n'aurions aucun espoir d'y découvrir des circulations aquifères importantes.

Or, dès 1954, le sondage de Turnhout traversait vers 2.194 m une zone karstique au sommet du calcaire carbonifère. La température y est de 103° C [Grosjean (2)]. La salure des eaux est élevée : 134 g/l et la crainte d'une pollution des eaux de surface a conduit à cimenter le fond du trou. Un sondage foré à Heibaart, au nord-est d'Anvers, devait traverser la même zone karstique à moindre profondeur.

Dans le Hainaut, trois sondages mettaient en évidence une importante nappe aquifère chaude dans le

même calcaire carbonifère. Une note récente [Delmer, Leclercq, Marlière, et Robaszynski (1)] résume la situation connue à ce jour en Hainaut.

4) Les problèmes que pose cette géothermie, basse enthalpie en Paléozoïque fracturé ou karstique, sont certainement différents de ceux qui sont maintenant de mieux en mieux maîtrisés dans les nappes aquifères profondes à perméabilité de pores des roches peu indurées des bassins sédimentaires.

En Campine, deux problèmes retiennent l'attention.

a) Quelle est l'allure du calcaire carbonifère en profondeur? Cette allure suit certainement celle du terrain houiller mais il s'en faut, et de beaucoup, que cette dernière soit connue avec précision dans le nord et dans le nord-ouest du pays. Des campagnes sismiques, actuellement en cours, devraient éclaircir la situation.

b) On l'a vu, la forte salure des eaux du calcaire carbonifère impose leur rejet en profondeur et il faut donc penser à une exploitation par doublet. Or, quel sera, dans un milieu karstique, le " temps de percée ", c'est-à-dire le temps au bout duquel la température de l'eau qui sort du puits de production tombera en-dessous d'une valeur critique. Les calculs valables pour un aquifère homogène, isotrope, circulant dans un milieu à perméabilité de pores, ne sont plus valables. A ce point de vue, l'épaisseur de l'aquifère devient une donnée essentielle si l'on songe à implanter les deux puits à des profondeurs différentes pour bénéficier d'une stratification des températures. L'étude d'un premier puits devrait permettre de choisir un modèle susceptible de mieux comprendre les transferts de chaleur de la masse en milieu karstique.

Dans le Hainaut, le problème est déjà mieux compris en raison des mesures que les trois puits existants ont permis de recueillir. La vitesse de circulation des eaux de la nappe profonde est suffisamment rapide pour maintenir un taux de salure de l'eau qui n'oblige pas son rejet dans la nappe mais, en même temps, cette vitesse est suffisamment faible pour garantir une durée de vie compatible avec l'économie d'un projet.

Legrand (4) a publié la courbe des températures obtenue en joignant les mesures ponctuelles obtenues au cours de l'avancement de la sonde au sondage de Saint-Ghislain. Cette courbe accuse, à trois reprises, une

(*) Service Géologique de Belgique, 13, rue Jenner, 1040 Bruxelles.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

diminution de la température. Ainsi, on mesure 64° C à 1.710 m, 63° C à 1.820 m et 58° C à 2.022 m, puis la température reprend une allure ascendante pour devenir 77° C à 2.478 m. Comment est-il possible d'obtenir des gradients négatifs en profondeur ? En régime permanent, la chose paraît difficile à justifier. Il est tout aussi difficile d'imaginer que nous sommes témoins d'une intrusion d'eau froide qui daterait de 5 à 10.000 ans.

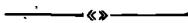
Sans détailler ici des calculs, très simples du reste, on comprend intuitivement que l'intrusion d'une nappe aquifère froide à une certaine profondeur provoque à son toit immédiat un maximum de température. Au cours du temps, ce maximum va s'élever pour aboutir à l'établissement d'un nouveau gradient linéaire plus

faible que le précédent. C'est ainsi que si la nappe aquifère a une température de 20° C inférieure à celle des roches et pour une diffusibilité thermique des roches de 5 m/an, il faut 2.000 ans pour que le maximum s'élève de quelque 300 m au-dessus de la veine liquide. On pourrait certes imaginer l'intrusion non d'une nappe aquifère illimitée mais au contraire d'une nappe limitée en étendue. Ceci paraît arbitraire mais procure la nécessité de mesures soignées des températures à des profondeurs suffisamment rapprochées pour les soumettre à une analyse quantitative.

Nous avons voulu montrer par ces quelques exemples, l'originalité d'une géothermie due à la circulation profonde des eaux météoriques à travers un milieu fissuré en grand ou karstique.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) DELMER A., LECLERCQ V., MARLIERE R. et ROBASYNSKI F. (1981). — La géothermie en Hainaut et le sondage de Ghlin (Mons - Belgique). *Ann. Soc. géol. Nord*, t. CI, p. 189-206.
- 2) GROSJEAN A. (1954). — Mesures de température aux profondeurs de 2.185 et 2.225 m dans le sondage de Turnhout (Campine belge). *Bull. Soc. belge de géol.*, t. LXIII, p. 193-201.
- 3) LEGRAND R. (1975). — Jalons géothermiques. *Mém. Expl. cartes géol. et min.*, n° 16.
- 4) LEGRAND R. (1978). — La géothermie du sondage de St-Ghislain. *Bull. Soc. Belge de géol.*, t. LXXXVII, p. 168-169.



Les ressources géothermiques en France

par Ph. MAGET (*)

Résumé. — L'évaluation du potentiel géothermique français, entreprise à partir de 1974, a permis de cerner toutes les zones favorables à un développement de la géothermie. Le Dogger du Bassin Parisien est le meilleur "réservoir" que l'on connaisse actuellement, autant pour sa productivité que pour sa fiabilité. En Aquitaine, la ressource est plus dispersée : sables de l'Eocène et du Cénomaniens, calcaire fracturé du Crétacé, grès du Trias.

Abstract. — The estimate of the French geothermal potential, began in 1974. It enabled to better to locate all favourable areas for geothermal development. Dogger in the Paris Basin, is the best reservoir known at the present time, as much for its productivity as its reliability. In Aquitaine, the resource is more dispersed : sands of Eocene and Cenomanian, fractured limestones of Cretaceous, sandstones of Triassic.

INTRODUCTION

La géothermie, en France, concerne presque exclusivement les ressources en eau chaude dans les aquifères profonds. Ceux-ci se rencontrent dans tous les terrains sédimentaires dans les bassins, tels le Bassin Parisien, ou dans les chaînes récentes ; cependant, dans ce dernier cas, leur localisation en profondeur est difficile, voire impossible, et les circulations sont perturbées, ce qui se répercute sur les températures qui sont imprévisibles. Il ne sera donc question que d'aquifères dans les bassins sédimentaires.

En ce qui concerne les sources chaudes, leur intérêt en géothermie est très limité. Leur caractère très ponctuel, les débits toujours trop faibles et leur "monopolisation" par le thermalisme médical leur enlèvent toute autre possibilité de développement économique.

C'est à partir de 1974 qu'a débuté l'inventaire systématique des ressources qui a permis le développement des opérations et dont nous allons exposer les méthodes d'étude utilisées et les principaux résultats.

I. — MOYENS D'ETUDE

1) Origine des données.

L'existence d'eau chaude profonde est connue depuis longtemps... par les pétroliers, grâce à l'intense activité de recherche dans les bassins sédimentaires. Les données utilisées en recherche géothermique proviennent donc presque exclusivement de sociétés pétrolières : données

ponctuelles (les forages) ou données de synthèse (sismique, sédimentologie...).

Ces données ont pu être utilisées grâce à une structure législative favorable en France (ce qui n'est pas le cas dans la plupart des autres pays) ; la documentation géologique est en effet accessible au B.R.G.M. et à la DHYCA (service de conservation des gisements). En outre, la recherche en géothermie est favorisée par une coopération étroite avec les sociétés pétrolières.

2) Méthodologie.

Que ce soit pour une étude régionale ou une étude d'un site, le but est de déterminer tous les paramètres géologiques et hydrogéologiques qui seront utilisés dans l'étude technico-économique d'un projet. Il s'agit de la profondeur, l'épaisseur (totale de la série à capter et productrice), la porosité, la transmissivité, la pression statique, la salinité de l'eau et sa température.

Nous nous attacherons à la méthodologie pour la détermination des deux paramètres fondamentaux en géothermie : la transmissivité et la température.

a) TRANSMISSIVITE.

La transmissivité ne peut être déterminée directement pour les forages pétroliers étant donné que les tests ne concernent qu'une faible hauteur du "réservoir". L'évaluation sera donc faite à partir d'une perméabilité moyenne et de la hauteur "utile".

1° Perméabilité.

Elle peut être déterminée par des mesures sur carottes ; mais les valeurs sont peu représentatives ; elles ne sont considérées que qualitativement.

(*) B.R.G.M., Orléans.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

La perméabilité est calculée à partir des enregistrements de test de formation (D.S.T.), soit sur la courbe de débit (perméabilité " rapprochée "), soit sur la courbe de remontée en pression (perméabilité " éloignée ").

Les incertitudes sur cette détermination sont dues à :

- la faible hauteur testée, laquelle, le plus souvent, ne correspond pas à la partie la plus représentative de l'aquifère, mais à la partie sommitale seule qui présente un intérêt pétrolier ;
- la faible durée du test : de 10 à 120 minutes d'ouverture (moyenne : 30 minutes), ce qui ne permet pas une investigation profonde ;
- le colmatage par la boue de forage (qui est le plus sensible sur la courbe de débit).

Les valeurs obtenues sont donc le plus souvent sous-estimées.

2" Hauteur utile.

Elle est déterminée essentiellement par l'interprétation combinée de diagraphies :

- sonique (B.H.C.),
- neutron (C.N.L.),
- de densité (F.D.C.),
- de résistivité (D.L.L., M.S.F.L.).

avec celles de la radioactivité naturelle (gamma-ray) et du diamètreur.

La hauteur utile ainsi déterminée est toujours fautive par excès : les diagraphies indiquent en effet les hauteurs poreuses mais pas nécessairement perméables.

Les mesures au débitmètre réalisées dans les forages géothermiques montrent que la hauteur productrice ne représente que 20 à 50 % de la hauteur poreuse. Des recherches sont en cours, basées sur la sédimentologie et les phénomènes de diagenèse, pour essayer de mieux cerner ce paramètre au stade prévisionnel.

La transmissivité ainsi déterminée est donc peu précise. C'était cependant la seule méthode possible au départ et les résultats se sont tout de même révélés globalement positifs dans le Bassin Parisien.

Il faut enfin noter que cette méthode est tout à fait illusoire pour les aquifères dans les terrains intrinsèquement compacts mais fracturés ou karstifiés. Dans ce cas, la ressource est toujours aléatoire ; les opérations du sud-ouest et du sud-est l'ont montré.

b) TEMPERATURE.

Le gradient géothermique d'une région est déterminé à partir de nombreux types de données très hétérogènes entre eux. Il s'agit essentiellement :

- Des mesures de fond, en production. Ce sont naturellement les données les plus représentatives, mais qui n'existent que pour les forages géothermiques.

— Les mesures prises lors de tests pétroliers ; elles ne sont — à peu près — significatives que si le test est productif et que s'il n'y a pas eu invasion profonde de la boue de forage. En général, dans nos études, ces mesures servent de référence.

— Les mesures de fond de trou (B.H.T.), prises dans la boue lors de l'exécution de diagraphies. L'équilibre thermique n'a — naturellement — pas le temps d'être atteint et ces valeurs marquent par défaut. Ce sont cependant les données les plus abondantes ; des études statistiques, basées sur les comparaisons avec les températures de tests, conduisent à des valeurs corrigées qui ont donné, en moyenne, de bons résultats.

— Les mesures en surface : il y a cependant une perte thermique durant l'ascension de l'eau ; l'écart est d'autant plus fort que le débit est faible.

— Les thermométries de cimentation pour les courbes situées hors des réactions exothermiques de la prise du ciment ; ces valeurs sont peu précises et marquent par défaut ; les méthodes de correction n'ont pas donné de résultats satisfaisants.

II. — RESULTATS

Quatre grands bassins sédimentaires ont été étudiés en France. Nous présentons ci-après les principaux résultats et les particularités de chacun d'eux.

1) Bassin Parisien.

Le Bassin Parisien renferme de nombreux aquifères dont la profondeur maximale se situe sous la Brie. Il est caractérisé par la prépondérance des " réservoirs " à porosité de matrice (plus ou moins remaniée par des phénomènes de diagenèse et par la fracturation). En outre, mis à part quelques aquifères " tièdes " à faible profondeur, l'eau est salée, voire très salée (plus de 250 g par litre pour le Trias sous la Brie), ce qui implique nécessairement la réinjection.

Les principaux aquifères que l'on rencontre sont :

— *Les sables de l'Albien*, exploités depuis longtemps dans la région parisienne (climatisation de la Maison de la Radio, piscines...); la protection de cette nappe d'eau douce interdit pratiquement son utilisation en géothermie.

— *Les sables du Néocomien*, très fins, se sont révélés récemment très productifs au sud de Paris. L'eau y est également douce.

— *Le Lusitanien calcaire* demeure un objectif possible dans la région de Meaux où l'eau est à plus de 60°. Il a été testé avec succès à Orly qui n'est pourtant pas le site le plus favorable.

— *Les calcaires oolithiques du Bathonien*, poreux, constituent le principal objectif géothermique dans le Bassin Parisien ; des débits supérieurs à 200 m³/h. sont obtenus dans un large secteur autour de Paris et la température dépasse 80° sous La Brie (85° sous Coulommiers).

- *Les grès du Trias* se développent à l'est du Bassin (en continuation des grès bien connus de Lorraine), sous la Sologne (où les caractéristiques peuvent être excellentes comme à Contres et Romorantin) et, pour une part moindre et mal définie, à l'ouest de Paris.
- *Les calcaires du Primaire*, dans le Nord, ont montré leur intérêt récemment. Il est cependant difficile de localiser l'ensemble de la ressource, en raison de la complexité tectonique des séries (région d'Arras, Cambrai), et de déterminer la productivité qui est liée à la fracturation.

2) Bassin Aquitain.

Le Bassin Aquitain est caractérisé par l'existence d'eau chaude douce, ce qui a permis jusqu'ici des opérations à puits unique ; ces ressources sont localisées dans les "Sables inframolassiques" de l'Eocène (Toulouse, Tarbes, Nogaro...), le Crétacé supérieur sableux (Bordeaux) ou calcaire (Mont de Marsan, Dax...) et les grès du Trias (Jonzac).

Dans ce bassin, ce sont surtout les formations carbonatées qui sont les plus étendues : le Crétacé supérieur, le Jurassique. Mais ces formations ne sont productrices que par fracturation ou karstification, d'où le caractère aléatoire de la ressource.

Au sud, malgré un gradient géothermique relativement faible, de l'eau à plus de 100° (parfois plus de 200°) a été mise en évidence, mais à de très grandes profondeurs, les séries du Secondaire étant enfouies jusqu'à plus de 8 km dans la fosse au nord de Pau.

3) Alsace.

L'Alsace bénéficie d'un gradient géothermique très élevé (de 4 à 10°/100 m environ) et les deux principaux aquifères peuvent fournir une eau de plus de 100° sur la majeure partie de la région.

La deuxième particularité est l'intense fracturation de ce fossé d'effondrement qui crée un compartimentage difficile à définir, et qui peut provoquer des lacunes par failles.

Les deux principaux objectifs sont le Dogger et le Trias :

- *Les calcaires du Dogger* sont ici peu poreux et la productivité dépend essentiellement de la fracturation qui est très intense, par exemple, près de Mulhouse.
- *Les grès du Trias inférieur* sont très développés et profonds au nord. Un captage a été tenté près de Strasbourg, mais la porosité utile se révèle faible.

4) Sud-Est.

Le Sud-Est de la France, correspondant à la Bresse, le Couloir Rhodanien et le Languedoc, est caractérisé par une tectonique très intense qui rend toute investigation difficile.

Le principal objectif actuellement connu est constitué par les calcaires du Jurassique supérieur qui sont intrinsèquement compacts mais qui offrent des possibilités aquifères, lorsqu'ils sont fracturés ou karstifiés ; la ressource est donc aléatoire (ex. Bourg-en-Bresse, Valence). Cette région est en cours d'étude.

5) Limagne.

La Limagne est favorisée "psychologiquement" par la proximité des volcans de la chaîne des Puys et de quelques sources chaudes.

Mais la ressource en eau, donc l'essentiel, n'a pas été reconnue (double échec dans la banlieue de Clermont-Ferrand dans les sables du Stampien).

DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE BASSE ENERGIE EN FRANCE

Les applications de la géothermie sont anciennes en France, même si l'on exclut le chauffage à partir de sources chaudes (Chaudes-Aigues, Dax) ; c'est le cas de la nappe de l'Albien à Paris ou du Trias à Nancy, pour l'industrie alimentaire, l'alimentation de piscines, la climatisation. Et ce qui, pendant longtemps, a été une gêne est devenu tout à coup une ressource énergétique (cas des Sables inframolassiques à Blagnac, près de Toulouse).

Si l'on considère l'eau suffisamment chaude pour permettre une utilisation de chauffage direct, sans l'appoint de pompes à chaleur, la géothermie a débuté dès 1962 près de Paris, par une tentative de captage à Carrières-sur-Seine (abandonnée en raison du coût non compétitif d'un deuxième forage pour réinjecter l'eau salée). La première

réalisation complète fut le "doublet" de Melun l'Almont en 1969.

Suite aux événements de 1973, la géothermie prit son véritable essor, d'une part avec l'inventaire systématique des ressources, d'autre part avec de nouvelles opérations (Creil, Villeneuve-la-Garenne en 1976...).

Actuellement, un "régime de croisière" semble atteint, étant donné le nombre d'appareils de forage disponibles sur le marché, avec 4 à 5 opérations simultanées.

La carte ci-après présente schématiquement les ressources reconnues — ou supposées — en France, avec l'état actuel des réalisations.

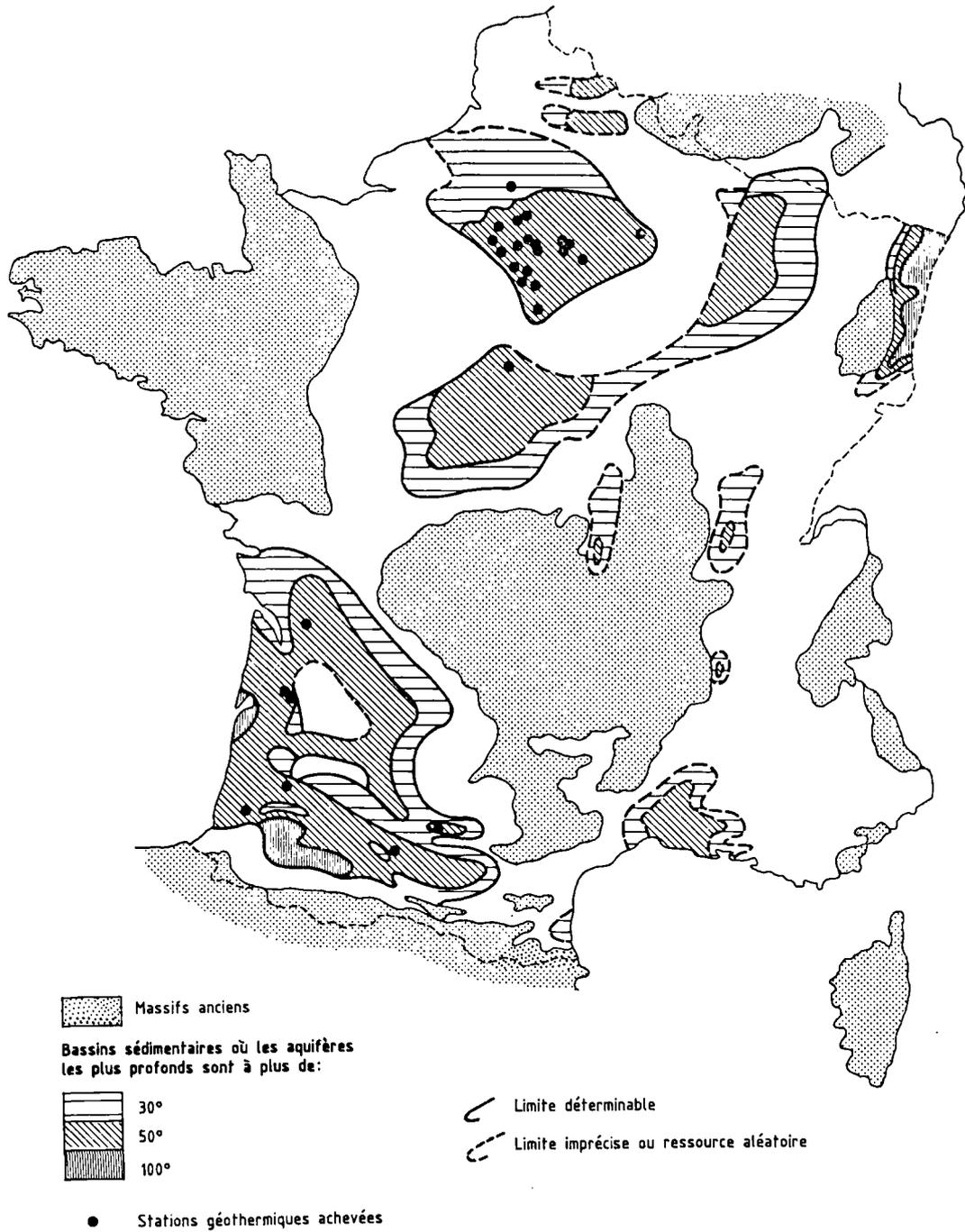


Fig. 1. — Ressources géothermiques.

Dosage de l'uranium dans les phosphates sédimentaires par Spectrométrie gamma in situ ; essais préliminaires dans les craies phosphatées du Bassin de Mons (région de Ciply)

par J.M. CHARLET, Ch. DUPUIS, Ph. LAIR et Y. QUINIF(*)

Résumé. — Les sédiments phosphatés peuvent souvent être considérés comme des dépôts d'uranium de faible concentration. En outre, la récupération de l'uranium à partir de l'acide phosphorique est une technologie développée par plusieurs nations. En vue d'évaluer le contenu en uranium des bassins phosphatés nous proposons une nouvelle méthode de spectrométrie gamma in situ basée sur l'étude de différentes raies liées au même radioélément. Une évaluation des paramètres physiques et géométriques susceptibles d'influencer la mesure a été effectuée à partir d'une étude théorique et d'essais sur le terrain. Une comparaison avec les mesures en laboratoire montre qu'une très bonne précision est obtenue pour l'uranium en utilisant simultanément les raies à 0,610 - 1,12 - 1,76 MeV. La méthode est très rapide et peut être appliquée à des formations géologiques contenant de l'uranium, du thorium et du potassium.

Abstract. — The phosphatic sediments can be often considered as low grade uranium deposits. Besides the recovery of uranium from phosphoric acid is a technology developed by various nations. With a view to evaluate the uranium content of the phosphatic basins we propose a new method of field gamma-ray spectrometry based on the study of various photopeaks connected with the same radioelement. An evaluation of the physics and geometrical parameters which can influence the measurement, has been carried out by a theoretical study and assays on the field. Comparaison with laboratory measurements shows that a very good precision is obtained for uranium by using simultaneously the 0,610 - 1,12 - 1,76 Mev photopeaks. The method is very fast and can be applied for geological formations with uranium-thorium-potassium contents.

I. — INTRODUCTION

Suivant l'option que l'on se fixe pour le développement futur des programmes nucléaires (12), la demande en uranium métal devrait atteindre en l'an 2000 de quatre à cinq fois la demande actuelle. Aussi, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique a-t-elle recommandé d'évaluer les réserves représentées par les formations géologiques dont les teneurs sont situées entre 0,01 et 0,05 % (13). Les phosphates sédimentaires occupent dans cette optique une place particulière. Ils contiennent en effet des teneurs non négligeables en uranium [dix à cent fois supérieures à la concentration moyenne de la croûte terrestre qui est de 3 ppm (10)], teneurs qui peuvent encore s'élever sous l'effet de phénomènes de concentration supergène (formation des poches de phosphates riches par exemple). De plus, les processus industriels de fabrication de l'acide phosphorique se prêtent à une récupération relativement aisée

de l'uranium (8) qui devient ainsi un sous-produit de l'industrie des engrais phosphatés.

Il apparaît donc opportun d'évaluer le potentiel en uranium des bassins phosphatés, que ce soit les gisements partiellement exploités en Europe au siècle dernier (Nord de la France, Belgique...) ou les sources actuelles d'approvisionnement de l'industrie chimique (Bassin méditerranéen, Floride...). Plusieurs travaux ont été consacrés à cette question dans le cadre de mémoires proposés par le laboratoire de géologie appliquée de la Faculté Polytechnique de Mons (2, 4, 9).

La détermination in situ des teneurs d'un élément utile est une méthode particulièrement attrayante puisqu'elle évite des opérations longues et coûteuses de l'échantillonnage et de l'analyse en laboratoire. Elle présente les avantages suivants :

- rapidité d'obtention des résultats permettant une évaluation immédiate d'un gisement ou d'un panneau en exploitation ;
- suppression des coûts représentés par l'analyse en laboratoire qui exige un personnel qualifié, une immobilisation en matériel et des frais de consommation en produits chimiques ;

(*) Faculté Polytechnique de Mons, 9, rue de Houdain, 7000 Mons (Belgique).

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

— évaluation sur des quantités importantes de matière, fonction du rayon d'influence du détecteur et permettant, dans certains cas, une mesure en continu de la répartition de l'élément analysé à l'échelle du gisement.

Lorsqu'il s'agit d'éléments radioactifs, en l'occurrence l'uranium, l'analyse in situ peut sembler extrêmement simple a priori puisque, en première approximation, l'intensité du rayonnement émis est d'autant plus grande que la teneur est élevée.

On se heurte cependant à plusieurs difficultés :

- l'uranium n'est pas nécessairement le seul élément radioactif présent dans les roches, on peut également y trouver du potassium 40 (l'un des isotopes du potassium) et du thorium ;
- dans la famille de l'uranium, le rayonnement gamma provient principalement des descendants à courte période de Bi 214, Pb 214 dont la teneur n'est "transposable" en "équivalent uranium eU" que si l'équilibre radioactif est réalisé dans la famille ;
- enfin l'intensité de rayonnement pour un gamma d'énergie donnée dépendra également des conditions géométriques (distribution autour du détecteur) et physiques (interaction rayonnement - matière).

L'examen de ces trois points est important dans la mesure où l'objectif à atteindre est la précision analytique dans une gamme de teneurs en uranium plus faibles que dans les gisements de type conventionnel (*).

La discrimination entre les teneurs en équivalent uranium, thorium et potassium peut être effectuée par une spectrométrie gamma telle qu'elle est habituellement réalisée en prospection (raie à 1,48 Mev du potassium 40 ; 1,76 Mev du Bi 214 descendant de l'U 238 ; raie à 2,62 Mev du Th 232). Nous n'insisterons donc pas sur cet aspect du problème qui consiste à déterminer sur stations les coefficients de calibrage (10, 11).

La transposition des taux de comptage sur la raie du Bi 214 en équivalent uranium nécessite que l'équilibre soit réalisé dans la famille de l'U 238. La détermination en uranium métal est donc un problème particulièrement délicat qui a déjà fait l'objet de plusieurs études (3, 5) dans les gisements de type conventionnel :

- par voie "in situ", il ne peut être résolu dans le cas des gisements à faible teneur qu'en utilisant un détecteur à haute résolution (Ge - Li, Germanium HP...);
- en laboratoire, un éventail plus large de méthodes est disponible (spectrométrie gamma avec scintillateur ou détecteur haute résolution, spectrométrie alpha, analyse chimique de l'uranium métal...).

La discrimination des teneurs en équivalent-uranium, en thorium et en potassium, ainsi que la détermination de l'équilibre dans la famille de l'uranium, sont des

(*) Un gisement de type conventionnel correspond, pour le cours actuel de l'uranium, à des teneurs limites d'exploitabilité de 0,1 à 0,2 % (1.000 - 2.000 ppm).

questions dont les principes ont été largement traités dans le cadre de la prospection des gisements conventionnels d'uranium (10, 11). Il n'en est pas de même de l'influence des conditions géométriques et physiques des mesures qui conditionnent la précision analytique dans le cas des faibles teneurs. C'est ce dernier aspect qui a retenu principalement notre attention. Nous l'avons abordé en utilisant deux approches différentes et complémentaires : l'une théorique et l'autre expérimentale.

II. — APPROCHE THEORIQUE : RAYON D'INFLUENCE ET INTENSITE DU RAYONNEMENT

Soit un détecteur supposé ponctuel placé en O à la surface d'une formation radioactive homogène (fig. 1). Un volume élémentaire $d\Sigma dr$ centré en P et compris entre deux hémisphères de rayons r et $r + dr$ émet dans un angle solide 4π .

Si q_0 est l'intensité de rayonnement lié à la concentration en uranium par unité de volume, le flux de photons gamma émis par le volume élémentaire envisagé et traversant la surface sphérique de rayon r centrée en P s'écrira compte tenu de la loi d'absorption :

$$d^2 \phi = q_0 e^{-\mu r} d\Sigma dr \quad (1)$$

μ étant le coefficient d'absorption

Le flux en O a alors pour expression :

$$d^2 \phi = \frac{q_0 e^{-\mu r} d\Sigma dr}{4\pi r^2} \quad (2)$$

Si on considère un volume de matière compris entre les hémisphères de rayon r et $r + dr$, le flux reçu en O s'écrit :

$$d\phi = \frac{q_0 e^{-\mu r} 2\pi r^2 dr}{4\pi r^2} = \frac{q_0 e^{-\mu r} dr}{2} \quad (3)$$

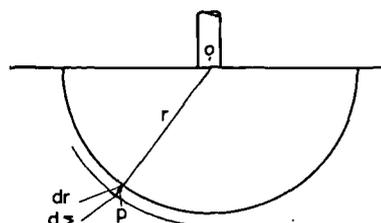


Fig. 1. — Approche théorique, calcul du rayon d'influence autour du détecteur placé en O.

En intégrant l'expression (3) entre les limites $r = 0$ et $r = R$, on obtient la valeur du flux reçu en O et émis par un volume hémisphérique de rayon R et de concentration homogène en uranium (à laquelle correspond une intensité de rayonnement par unité de volume égale à q_0)

$$\Phi(\mu, R) = \frac{q_0}{2\mu} (1 - e^{-\mu R}) \quad (4)$$

$$\text{Pour } R = \infty \quad \Phi(\mu, \infty) = \frac{q_0}{2\mu} \quad (5)$$

On voit donc que pour une couche homogène et infinie, le taux de comptage au détecteur dépendra de la teneur en uranium et du coefficient d'absorption.

Le coefficient d'absorption μ peut s'écrire sous la forme

$\mu = \mu/\rho \times \rho$, μ/ρ est le coefficient d'absorption massique exprimé en cm^2/gr , ρ est la densité exprimée en gr/cm^3 .

Cette expression a le mérite de dégager l'influence de la densité apparente des roches ρ . Le coefficient μ/ρ est pratiquement constant pour les matrices rocheuses les plus courantes (tableau I), il ne dépend que de l'énergie du rayonnement considéré.

A partir de l'équation (4), nous définissons une fonction d'absorption Φ/q_0 qui ne dépend plus que des conditions géométriques du dispositif et des propriétés physiques des roches. Cette grandeur a été portée en fonction de R pour différentes valeurs de la densité (fig. 2).

On voit que :

— plus la densité est élevée, plus le taux de comptage pour une même concentration en uranium d'une couche considérée comme infinie est faible ;

E (MeV)	Calcite	Quartz	Kaolinite	Beton
0,609	0,0781	0,0756	0,0806	0,0798
1,12	0,05871	0,0579	0,0587	0,0595
1,764	0,0474	0,0475	0,0480	0,0475
2,024	0,0445	0,0444	0,0447	0,0443

Tableau I. — Coefficient d'absorption massique (μ/ρ) en cm^2/gr pour différents types de matrices.

Remarque : Les calculs ont été effectués en utilisant les tables de Wight (1) qui donnent les coefficients d'absorption des éléments chimiques.

— plus la densité est élevée, plus la contribution sur le taux de comptage des zones proches du détecteur est grande.

A partir des expressions (4) et (5), on peut calculer un rayon effectif (R_{eff}) qui définit un volume tel que le flux reçu au détecteur soit une fraction choisie (99 % par exemple) du flux correspondant à un volume infini. Il représente le volume investigué par le détecteur.

Le rayon effectif est porté à la fig. 3 en fonction de la densité et pour différentes énergies. On voit que le volume investigué par le détecteur dépend de la densité et de l'énergie des photons gamma.

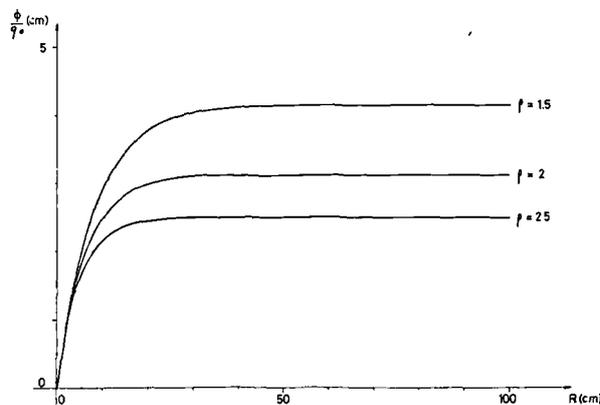


Fig. 2. — Courbe Φ/q_0 en fonction de R pour différentes valeurs de la densité et des photons gamma d'énergie 0,609 Mev ($\mu/\rho = 0,08$).

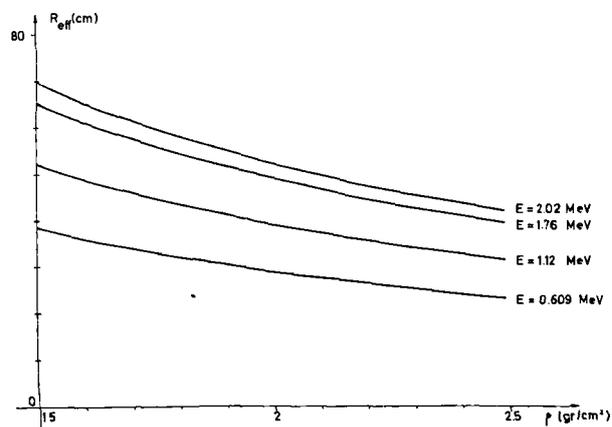


Fig. 3. — Calcul du rayon effectif (R_{eff}) en fonction de la densité et pour différentes énergies.

Remarque : Les valeurs de R_{eff} ont été calculées pour une valeur $\Phi(\mu, R)$ égale à 0,99 $\Phi(\mu, \infty)$.

En conséquence, pour évaluer l'influence des facteurs géométriques (répartition hétérogène de l'uranium autour du détecteur) et des facteurs physiques (densité des roches), il est utile de pouvoir comparer les résultats obtenus pour un même radioélément mais avec des photons gamma d'énergie différente.

L'approche effectuée à partir de l'expression (4) n'a cependant qu'une valeur qualitative. En effet, le rayonnement qui atteint le détecteur comprend également des émissions secondaires (Compton, rétrodiffusion...) liées à l'interaction matière-énergie sur tout le parcours des photons gamma. La relation (3) doit donc être, en réalité, affectée d'un facteur correctif B (7) qui dépend du rayonnement primaire E_0 , de r et de μ .

Cependant, l'introduction de l'expression relative-ment complexe du facteur B dans les équations (3) et (4) n'est pas de nature à modifier les conclusions précédentes qui soulignent l'intérêt d'une analyse spectrale complète des émissions liées aux descendants de l'uranium (2).

III. — APPROCHE EXPERIMENTALE, ETUDE DES GISEMENTS PHOSPHATES DE LA REGION DE CIPLY (Bassin de Mons)

1) Contexte géologique et intérêt du site.

Les carrières de la région de Cibly, autrefois exploitées pour en extraire le phosphate, montrent de haut en bas (fig. 4) :

- le Tuffeau de Cibly, calcarénite du Dano-Montien ;
- le Poudingue de la Malogne à galets phosphatés, épais de quelques décimètres ;
- la Craie phosphatée de Cibly d'âge maastrichtien et dont la partie supérieure est indurée sur environ un mètre d'épaisseur.

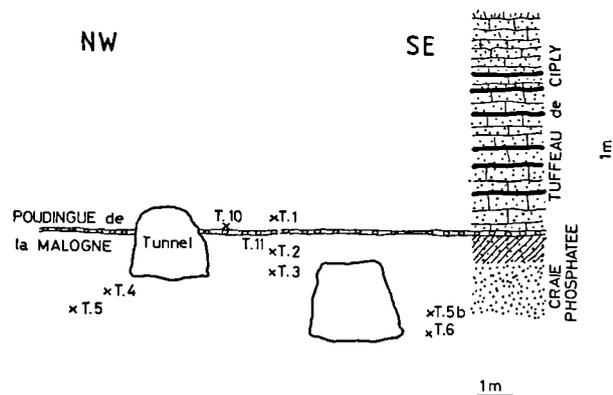


Fig. 4. — Implantation des principaux points de mesures dans la carrière Vandamme (Cibly, Bassin de Mons).

Les points 8 et 9 sont situés latéralement dans la partie sud de la carrière (au niveau des points 3 et 5).

Une analyse préalable en laboratoire montre que toutes ces formations contiennent comme seul radioélément de l'uranium en équilibre avec ses descendants (2,9) à raison de quelques ppm dans le Tuffeau de Cibly et de quelques dizaines de ppm dans la Craie phosphatée. C'est donc un site favorable à l'étude de l'influence des facteurs géométriques et physiques sur la détermination "in situ" des teneurs en uranium puisque l'on a :

- un seul radioélément en équilibre radioactif, avec des teneurs variables ;
- une discontinuité entre des formations uranifères et non uranifères permettant d'expérimenter une hétérogénéité dans la zone d'influence du détecteur ;
- des propriétés physiques différentes entre les craies tendres et indurées.

2) L'appareillage et les techniques de mesure.

Plusieurs types de mesures ont été effectués :

- des comptages "globaux" en utilisant un scintillateur "Geometrics" ;
- des mesures de spectrométrie gamma "in situ" avec un détecteur NaI (Tl) de 2" x 2" placé dans les trous horizontaux de 20 cm de profondeur préalablement forés à l'aide d'un petit carottier à couronne diamantée ;
- des mesures par spectrométrie gamma de laboratoire sur les carottes extraites.

Les mesures en spectrométrie gamma in situ ont été réalisées grâce à un appareillage monté à la Faculté Polytechnique de Mons et qui comprend (photos 1 et 2) :

- un détecteur NaI (Tl) Bicron modèle 2M2 de 2" x 2" couplé à un tube photomultiplicateur Camberra modèle 802-9 ; son diamètre (6 cm) et sa longueur (20 cm) ont été choisis en fonction des dimensions de l'outil de forage. Le détecteur a été placé dans une gaine de protection d'aluminium ;
- un câble à trois conducteurs, de 50 m de longueur, conçu au laboratoire ; il relie le détecteur à un bloc Ortec d'alimentation haute tension - basse tension et à un analyseur à multicanaux par l'intermédiaire d'un dispositif amplificateur ;
- un analyseur à 1.024 canaux Inotech permettant la visualisation du spectre sur écran oscilloscopique et l'intégration directe des raies entre des limites préalablement choisies.

L'ensemble est alimenté par un petit groupe électrogène Honda de 500 Watts.

Pour la famille de l'uranium, nous avons sélectionné les raies suivantes : 0,352 Mev - 0,609 Mev - 1,12 Mev - 1,764 Mev - 2,024 Mev. Elles sont toutes liées à des descendants à courte période entre lesquels l'équilibre radioactif est toujours réalisé. On peut donc les considérer dans l'optique qui nous occupe comme liées à un même radioélément. Les calibrages



Photo 1. — Détecteur sur les dalles de calibrage de la Faculté Polytechnique de Mons.

Le détecteur, dans sa gaine en aluminium, peut être introduit dans des trous forés au centre des dalles. On réalise ainsi des conditions analogues à celles correspondant à une mesure dans des formations carbonatées ou siliceuses, homogènes et infinies (parois de carrières, affleurements...).

en énergie et la correction des dérives thermiques sont effectués à l'aide d'une source Cs 137.

Les mesures en laboratoire ont été réalisées grâce à une chaîne de spectrométrie gamma de configuration analogue à celle utilisée sur le terrain. Elle s'en distingue cependant par plusieurs points :

- le détecteur NaI (Tl) est plus volumineux et donc plus sensible (4" × 2" ou 3" × 3") ;
- le détecteur est thermostaté et protégé du rayonnement cosmique par un château de plomb de 5 cm d'épaisseur avec revêtement intérieur de cuivre sur 0,5 cm ;
- la sortie des résultats s'effectue soit sur imprimante, soit sur enregistreur magnétique couplé à un micro-ordinateur ;

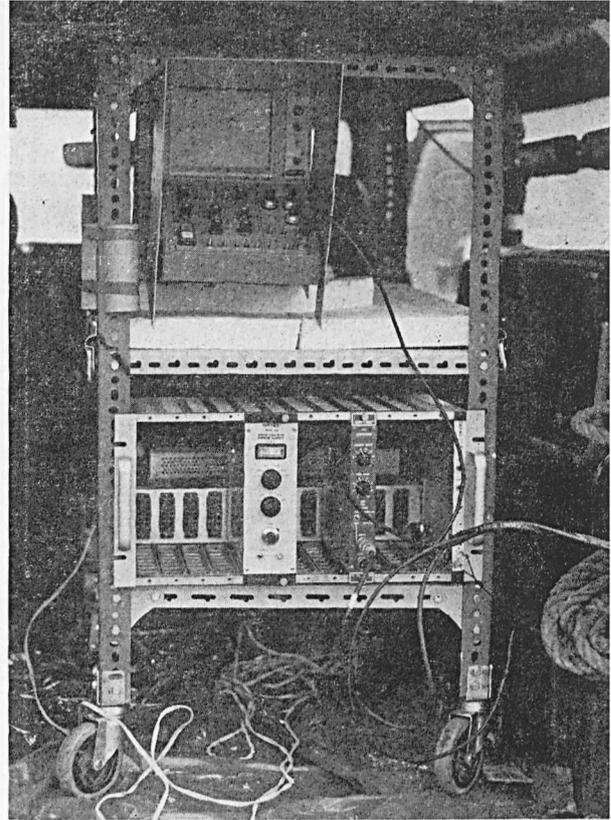


Photo 2. — Le bloc de mesure installé dans un véhicule tout terrain avec, en haut, l'analyseur à multicanaux et, en bas, le rack d'alimentation (haute tension, amplificateur).

— la partie à moyenne et à basse énergie du spectre est exploitée (*) (jusqu'à 1,5 MeV) permettant non seulement le dosage simultané de l'équivalent-uranium, du thorium et du potassium mais également le dosage de l'uranium métal par la raie à 0,184 MeV liée à l'U 235 et au radium.

3) Les résultats expérimentaux.

Une dizaine de trous ont été forés dans la paroi NW de la carrière Vandamme (Ciply, fig. 4) :

— trous 3, 4, 5, 5b, 6, 7, 8 dans la Craie phosphatée de Ciply ;

(*) En spectrométrie in situ, on s'adresse au spectre complet (jusqu'à 3 MeV) afin d'exploiter les raies à haute énergie moins absorbées par la roche (voir fig. 5). La partie à basse énergie (raie à 0,184 MeV) n'est, quant à elle, pas utilisable, les raies étant noyées dans la bosse Compton, résultat de l'interaction du rayonnement avec la matrice rocheuse.

- trou 2 dans le banc dur au sommet de la Craie phosphatée ;
- trou 11 dans le Poudingue de la Malogne ;
- trou 10 dans le Tuffeau de Cibly, à 20 cm du Poudingue de la Malogne ;
- trou 1 dans le Tuffeau de Cibly à 50 cm du Poudingue de la Malogne.

Les corrélations entre les mesures en laboratoire et "in situ" ont été étudiées en excluant le point 10 pour lequel le taux de comptage risque d'être influencé par les formations phosphatées et uranifères sous-jacentes et le point 11 pour lequel le taux de comptage risque d'être influencé par le Tuffeau de Cibly sus-jacent.

Le tableau II nous donne les coefficients de corrélation entre les mesures in situ (exprimées en coups/sec.) et en laboratoire (exprimées en eU) ainsi que l'expression analytique des droites de corrélation. On constate :

1° que les coefficients de corrélation sont excellents lorsque les mesures sont effectuées en analyse spectrale ($r^2 > 0,95 - 0,96$) ;

2° qu'ils sont beaucoup plus faibles pour des mesures en comptage global ($r^2 < 0,95$) ;

3° qu'en analyse spectrale, les coefficients r^2 sont moins bons pour la raie à 0,352 Mev fortement influen-

raies	droite de corrélation x : teneurs labo y : comptage in situ	r^2
comptage global	$y = 3,64 x + 5,07$ (1) $y = 3,56 x + 10,29$ (2)	0,9456 0,8487
0,352	$y = 35,01 x + 105,53$	0,982
0,610 MeV	$y = 45,21 x + 84,13$	0,9905
1,12 MeV	$y = 10,64 x + 16,16$	0,9945
1,76 MeV	$y = 4,58 x + 7,31$	0,9974
2,02 MeV	$y = 0,94 x + 3,20$	0,9563

Tableau II. — Corrélation mesures "in situ", mesures en laboratoire.

Remarque : Les mesures en comptage global réalisées à l'aide d'un scintillateur "Geometrics" donne les plus faibles coefficients de corrélation. En outre, celui-ci est extrêmement variable suivant les conditions géométriques de mesures. A titre d'exemple, la droite (1) a été obtenue par des mesures effectuées dans la carrière Vandam (Cibly) et la droite (2) par des mesures effectuées dans la carrière Vienne (Cibly).

cée par la bosse Compton et pour la raie à 2,024 Mev d'intensité plus faible et donc plus influencée par l'erreur statistique de comptage.

L'expression analytique des droites de corrélation permet de calculer le facteur de conversion taux de comptage - teneurs (coefficients de sensibilité) et l'influence du rayonnement cosmique (ordonnée à l'origine des droites).

A partir des équations du tableau II, on peut calculer, pour les différentes raies, les teneurs équivalentes et les comparer aux valeurs obtenues par des mesures effectuées en laboratoire sur carottes.

On remarque (tableau III) que pour les points de 2 à 9, les teneurs calculées à partir des raies à 0,609 - 1,12 - 1,76 Mev sont très proches des valeurs obtenues sur carottes. L'écart $\Delta 1$ entre la moyenne des teneurs calculées à partir de ces trois raies et les valeurs laboratoire ne dépasse pas quelques %. En particulier, il n'est pas plus important pour le trou 2 foré dans la craie durcie que pour les trous forés dans la craie tendre. Une augmentation de l'écart $\Delta 1$ doit donc avoir une signification au niveau de l'hétérogénéité dans la distribution de l'uranium autour du détecteur. Ceci est particulièrement net pour les trous 10 et 11 forés au voisinage immédiat du contact entre le Tuffeau de Cibly et la Craie phosphatée uranifère. Le ta-

trou	labo	raie 0,610	raie 1,12	raie 1,76	$\Delta 1$ (en %)
1	2,57	1,81	2,15	1,90	- 27,43
10	3,25	7,65	6,10	7,35	+ 74
11	4,6	16,56	18,59	17,40	- 30
2	33	33,57	33,82	33,34	+ 1,74
3	40,7	39,48	38,71	39,45	- 3,73
4	40,7	41,4	41,9	41,20	+ 1,95
5	44,8	43,19	44,25	44,47	- 1,87
6	37,2	36,09	36,42	37,49	+ 1,85
7	45,3	44,39	44,91	45,12	- 1,09
8	30,1	30,50	30,17	30,39	+ 2,52
9	23,3	23,69	23,39	24,39	+ 2,50

Tableau III. — Comparaison teneurs en eU déterminées en laboratoire et teneurs en eU déterminées in situ sur les raies à 0,610 - 1,12 et 1,76 Mev.

$$\Delta 1 = \frac{\text{eU in situ} - \text{eU in labo}}{\text{eU moyen}}$$

Remarque : En dehors des hétérogénéités de distribution de l'uranium dans la zone d'influence du détecteur, l'écart entre les teneurs déterminées par mesures in situ et en laboratoire est très faible (quelques %).

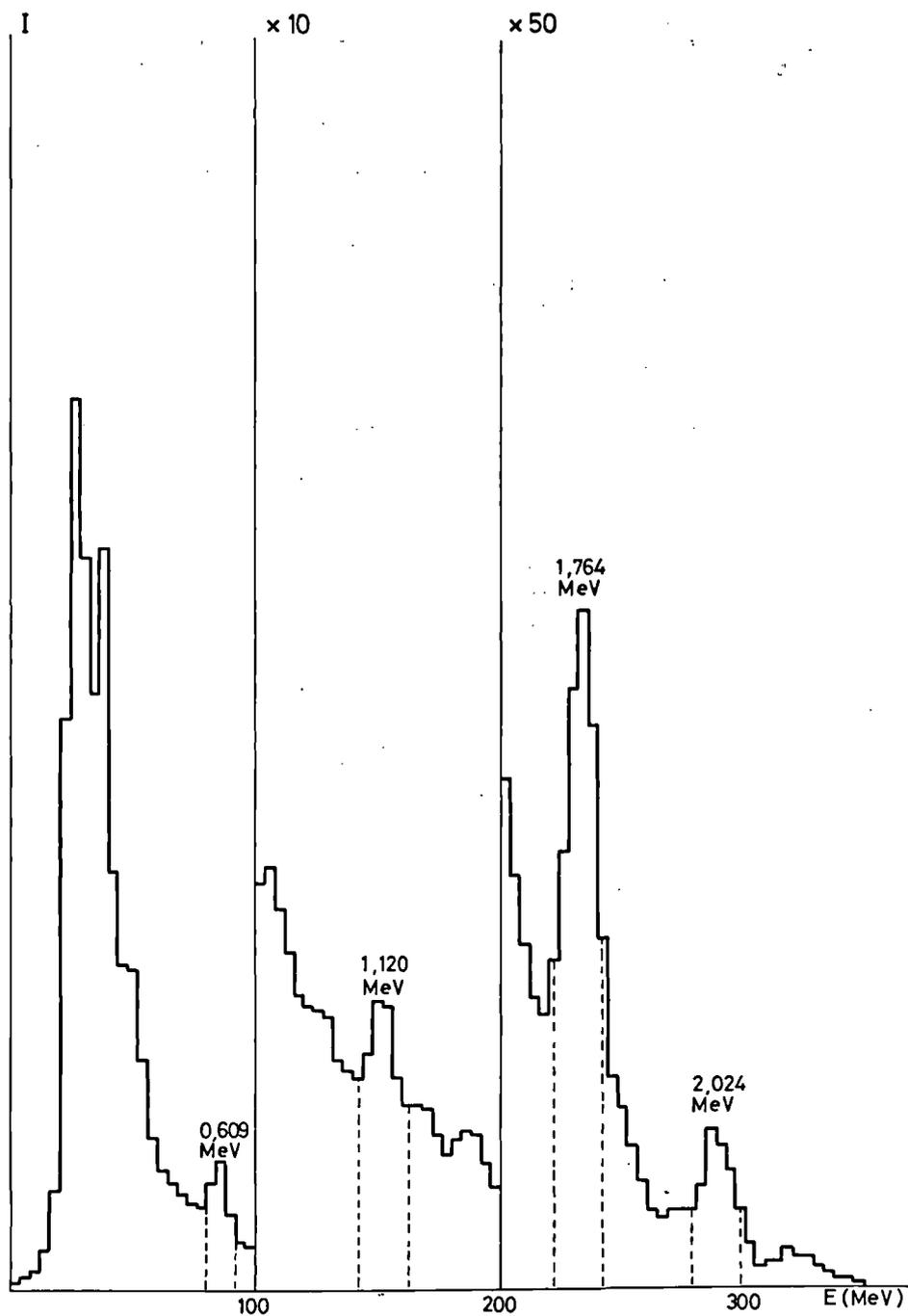


Fig. 5.

Spectre gamma d'une craie phosphatée. Intensité I du rayonnement en fonction de son énergie (exprimée en Mev).
Remarque : Deux changements d'échelle ($\times 10$ et $\times 50$) ont été nécessaires afin de tenir compte des intensités respectives des raies.

bleau III montre qu'en outre une forte dispersion entre les résultats obtenus sur les raies à 0,609 - 1,12 - 1,76 Mev est toujours l'indice d'une hétérogénéité marquée dans la distribution de l'uranium autour du détecteur (voir points 10 et 11, par exemple).

IV. — CONCLUSIONS

L'analyse spectrale détaillée du rayonnement gamma réalisée entièrement par des mesures in situ permet :

— de discuter des facteurs physiques et géométriques (propriétés des roches, hétérogénéité dans la distribution des radioéléments...),

— de déterminer rapidement et avec précision (*) les teneurs en radioéléments.

Les mesures effectuées sur le site de Ciplly où les formations sont essentiellement uranifères nous ont permis de vérifier ces deux propositions formulées à partir des études théoriques sur le comportement du rayonnement dans la matière.

Le calibrage de la méthode a été réalisé à partir de mesures in situ et en laboratoire sur des craies et calcarénites dont les teneurs pouvaient varier dans un intervalle de quelques dizaines de ppm.

Une autre approche du calibrage consiste à utiliser des dalles dopées avec des teneurs déterminées en radioéléments et dont les dimensions et les propriétés

(*) Le tableau IV montre les avantages des mesures in situ sur les mesures en laboratoire : réduction du temps de comptage pour une amélioration considérable du rapport signal/bruit. L'implantation du détecteur dans les trous préalablement forés permet en outre de standardiser les conditions géométriques et de réduire l'influence des fluctuations thermiques sur les mesures.

physiques permettent de les assimiler à des formations géologiques de type normal (calcarénites, grès...) homogènes et infinies. Notre équipe, qui vient de réaliser la prospection radiométrique autoportée du Paléozoïque de Belgique, dispose de telles stations (**). Celles-ci permettront dans un proche avenir, la détermination rapide et précise des trois principaux radioéléments (uranium-thorium-potassium) par mesures in situ ainsi que la détermination des éléments non radioactifs (P_2O_5 par exemple) dans le cas où une corrélation directe à l'échelle d'un bassin (6) a pu être démontrée.

	Mesures in situ	Mesures en Laboratoire
Temps de comptage	15 minutes	450 minutes
Intensité de la raie	174 coups	884 coups
Bruit de fond	7,5 coups	262 coups
Rapport $\frac{\text{signal}}{\text{bruit}}$	23,72	3,37
Dimensions du détecteur	2" x 2"	4" x 4"

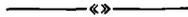
Tableau IV. — Comparaison entre l'efficacité des mesures in situ et en laboratoire, raie à 1,764 Mev, Craie phosphatée de Ciplly, trou 8.

(**) Construites dans le cadre d'un contrat financé par la Commission des Communautés Européennes et le Service Géologique de Belgique. Ministère des Affaires Economiques (photo 1).

* * *

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BRIERE M., JOUVE B., PAULIN R. (1970). — Mesures en radioactivité. Ed. Hermann, Paris.
- 2) CANART G. (1977). — Mise au point d'une technique de spectrométrie gamma « in situ » pour le dosage des radioéléments et l'étude des propriétés des roches. Travail de fin d'études, Faculté Polytechnique de Mons, 47 p.
- 3) CHARLET J.M., DUPUIS Ch., MEYS H. (1976). — Spectrométrie gamma et géologie appliquée. *Ann. des Mines de Belgique*, n° 12, p. 1017-1025.
- 4) DRUMEL B. (1978). — L'uranium lié aux phosphates sédimentaires dans le bassin de Mons et les régions voisines. Travail de fin d'études, Faculté Polytechnique de Mons.
- 5) DUMESNIL P., GRECO J.L. (1981). — Mesure de la teneur en uranium des minerais sur camion. *Actes du 7^e Colloque Européen de diagraphies*, SAID, Paris.
- 6) QUINIF Y., CHARLET J.M., DUPUIS Ch., ROBASZYNSKI F. (1982). — Relations uranium-phosphate dans les craies phosphatées des bassins de Mons et de Picardie. *C.R. Ac. Sc.* (sous presse).
- 7) KOGAN R.M., NAZAROV I.M., FRIDMAN Sh. D. (1969). — Gamma Spectrometry of natural environments and formation, Moscou. Traduction du russe par « *Israel program for scientific translations* », Jerusalem, 1971, 337 p.
- 8) KOULOHERIS A.P. (1980). — Uranium from phosphoric acid. *Chemistry Engineering*, August, p. 82-94.
- 9) ZOUIR BEN AMAR (1981). — Etude géologique et radiométrique de quelques coupes dans les phosphates sédimentaires du bassin de Mons (Belgique). Diplôme d'Etudes Approfondies, Université de Lille et Faculté Polytechnique de Mons, 67 p.
- 10) Gamma-ray Surveys in Uranium Exploration (1979). *Technical Reports*, IAEA, Vienne, 89 p.
- 11) Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration, 1976. *Technical Reports*, IAEA, Vienne, 57 p.
- 12) Uranium supply and demand (1978). — Proceedings of the third International. *Symposium, Uranium Institut, London*, 12-14 July, 369 p.
- 13) Uranium supply and demand (1978). — *Bulletin IAEA*, vol. 20, n° 1, p. 24-34.



Apports de l'exploitation du charbon et des matériaux de construction à la connaissance de la structure du Massif primaire du Boulonnais

par J.P. COLBEAUX (*) et J. LEPLAT (**)

Résumé. — Au siècle dernier, la recherche et l'exploitation de la houille dans le massif primaire du Bas-Boulonnais ont permis à Olry d'élaborer une première synthèse stratigraphique et structurale (1904). Depuis 1965, l'extension considérable de certaines carrières de granulats s'est traduite par de nouvelles observations qui remettent en cause l'interprétation classique. C'est ainsi que vers l'Ouest le tracé de la " faille de Ferques " correspond à la remontée de la faille chevauchante du Haut-Banc ; vers l'Est, la " faille de Ferques " est bien un accident subvertical, mais à caractère décrochant.

Une coupe N-S passant par les anciens sondages de reconnaissance permet d'envisager l'existence d'un synclinal de Houiller.

Abstract. — On last century, through coal research and mining workings in the paleozoic " massif du Bas-Boulonnais " (Pas-de-Calais, France) Olry has been induced to elaborate a first geological synthesis (1904). Since 1965, considerable expansion of some quarries favorized new observations which challenge the classical picture. To the West, the line of " faille de Ferques " is overlaid with the thrustfault of " Haut-Banc " ; to the East, " faille de Ferques " is really a subvertical fault, but with a wrench character.

Nord-South section through the old boreholes permits to suppose existence of a coal syncline.

Le Massif primaire du Bas-Boulonnais a connu au siècle dernier une période d'intense activité géologique liée à la recherche et à l'exploitation du gisement houiller. Les nombreux travaux exécutés à cette occasion, complétés par les observations faites lors du creusement de la tranchée de chemin de fer Calais-Boulogne, ont permis à Olry (1904) d'élaborer la première synthèse stratigraphique et structurale de ce secteur.

Depuis 1965, l'augmentation croissante de la production des granulats utilisés pour la construction (routes, bâtiments...) et des " pierres à chaux " nécessaires à certaines industries (sidérurgie, industrie sucrière...) s'est traduite par une extension considérable de certaines carrières avec, comme conséquences immédiates, la prise de conscience par les exploitants du caractère limité des ressources et le besoin de mieux les connaître. Parallèlement, grâce aux nouvelles observations possibles sur des fronts de taille de grande ampleur, la géologie connaissait un regain d'intérêt.

(*) U.E.R. des Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

(**) B.R.G.M., Lezennes.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

Au cours des six dernières années, l'application de méthodes modernes, tant stratigraphiques (analyse séquentielle) que tectoniques (levés systématiques de la fracturation et traitements statistiques), la mise en œuvre de relevés topographiques précis et l'exécution de nombreux sondages de reconnaissance ont permis l'obtention de données originales. Bien que leur exploitation cartographique ne soit pas encore terminée, ces dernières éclairent d'un jour nouveau la structure du massif primaire du Bas-Boulonnais.

I. — LE BASSIN HOULLER DU BOULONNAIS

Les anciens auteurs (Vuillemin, Olry) font remonter la découverte du Bassin Houiller du Boulonnais à la seconde moitié du XVII^e siècle, entre les années 1660 et 1692. Toutefois, ce n'est qu'à partir de 1720 que l'exploitation minière dans la région d'Hardinghen et de Réty connaît une première impulsion avec l'arrivée des frères Desandrouin. Un grand nombre de petites fosses sont alors ouvertes, tant sur les territoires d'Hardinghen et Réty que sur celui de Fiennes.

La première concession, celle des mines de houille d'Hardinghen, est accordée le 1^{er} janvier 1800 à l'as-

sociation Desandrouin-Cazin. Les concessions de Ferques et de Fiennes sont délivrées quelques dizaines d'années plus tard, respectivement les 27 janvier 1837 et 29 décembre 1840, cette dernière date correspondant à la réunion, au sein de la société de Fiennes, des concessions d'Hardinghen et de Fiennes.

1847 constitue une date importante dans l'histoire du Bassin Houiller du Boulonnais; c'est, en effet, en juin de cette année-là que se situe la découverte du prolongement du bassin d'Hardinghen à l'Ouest de la faille de Locquinghen. Par ailleurs, en 1880, intervient la mise en évidence de la faille d'Elinghen, d'où la division du Bassin en trois régions (réf. Olry): ancien bassin d'Hardinghen à l'Est de la faille de Locquinghen, région intermédiaire entre les deux failles, nouveau bassin d'Hardinghen à l'Ouest de la faille d'Elinghen. Entre temps, les travaux de Gosselet, reconnaissant l'existence de failles très peu inclinées, avaient permis de "fixer les grandes lignes de la structure des terrains primaires du Boulonnais" et d'aboutir au schéma structural proposé par Olry en 1904 (fig. 1A). C'est ce schéma qui a été repris, pratiquement sans modification importante, par l'ensemble des publications ultérieures, et notamment par la carte géologique (feuille Guines et Marquise au 1/50.000 - fig. 1B).

II. — LES RECHERCHES VERS L'OUEST LA CONCESSION DE FERQUES

Dans la région occidentale, les indices de charbon relevés au contact de la faille de Ferques donnèrent lieu à l'ouverture, entre 1835 et 1848, des fosses Frémicourt 1 et 2 et de Leulinghen, qui ne rencontrèrent que du "terrain houiller broyé renfermant des amas irréguliers de houille" (Olry, 1904).

Une trentaine d'années plus tard, les sondages de Blecquenecques (1875-1879) puis d'Hydrequent (1879-1881) se révélaient positifs; du Houiller ayant été trouvé antérieurement au sondage de Basse Falise (1850), on entreprit en 1898 le creusement des puits de Ferques... qui se solda par un échec. La lecture de la correspondance échangée à cette époque entre Olry, Gosselet et le Directeur des Mines de Ferques, Monsieur Trouillier, est révélatrice de la difficulté qu'ils éprouvaient à comprendre la structure de ce secteur au travers de quelques sondages, parfois peu fiables. Cependant, il nous a paru intéressant de rapporter ici certains faits signalés par Monsieur Trouillier dans une note sur la concession de Ferques du 29 septembre 1906. Pour cet auteur, le puits n° 2 de Ferques, descendu à 568,80 m et prolongé jusqu'à 690,5 m par un sondage, serait situé à l'aplomb d'une faille subverticale à laquelle il donne une orientation voisine de celle des failles d'Elinghen et Locquinghen. D'autres accidents de direction identique existeraient plus à l'Est dont un important car "faisant disparaître le Joinville". Enfin, le sondage de Blecquenecques aurait été lui-même implanté sur une faille.

C'est pour lever toute incertitude que fut décidé le second sondage de Blecquenecques, à peu près à mi-chemin d'une ligne joignant le sondage de Blecquenecques 1 au puits n°2 de Ferques. Là encore, on ne trouva point de Houiller, et comme à peu près dans le même temps le sondage de la Vallée Heureuse se révélait négatif, la concession de Ferques fut définitivement abandonnée.

III. — LA FIN DU BASSIN HOUILLER DU BOULONNAIS

Déjà très faible au cours de la période 1889-1901, la production est complètement arrêtée entre 1901 et 1920. En 1910-1911 est réalisé le sondage d'Elinghen, qui rencontre le gisement houiller à la profondeur de 281,15 m. Entre 281,15 m et 451,05 m, profondeur à laquelle est atteint un calcaire "analogue à celui de la fosse de la rue des Maréchaux" (Calcaire à *Productus giganteus*), celui-ci traverse les principales veines de charbon connues dans le bassin: veine à boulets (peu développée), veine à cuerelles (sur 0,50 m), veine Maréchale (sur 1,25 m) et veine à bouquettes (sur 0,90 m).

Les fosses d'Elinghen sont alors creusées (1919-1920) et l'exploitation est reprise à partir de 1920 par les Charbonnages du Boulonnais. Entre 1924 et 1928, la production annuelle se situera autour de 50.000 t mais divers incidents (plusieurs feux dans la veine à bouquettes et surtout importante venue d'eau dans les contours d'accrochage) provoqueront la liquidation de la Société en 1930. Après une tentative de reprise par la Compagnie de Vendin, puis par les Charbonnages du Mont-Saint-Pierre, la mine d'Elinghen fut définitivement abandonnée en 1936.

Le tableau ci-après récapitule, par période, la production du Bassin du Boulonnais.

xviii ^e siècle	≈	500.000 tonnes	estimation	VUILLEMIN
1800 - 1833	≈	254.000 tonnes	estimation	OLRY
1834 - 1901	=	1.452.355 tonnes	chiffres	OLRY
1920 - 1936		476325 tonnes	chiffres	DUCASTEL

2.692.680 tonnes

soit au total de l'ordre de 2.700.000 tonnes

IV. — LE BASSIN CARRIER DE MARQUISE

Dans la région de Marquise, différentes assises, tant primaires que jurassiques, sont exploitées depuis longtemps pour la production de matériaux de construction ou de matières premières industrielles (calcaire pour fabrication de chaux, dolomie). Autrefois dispersée dans une multitude de petites carrières (fig. 2A), l'activité extractive est maintenant concentrée dans quelques exploitations de forte capacité (fig. 2B).

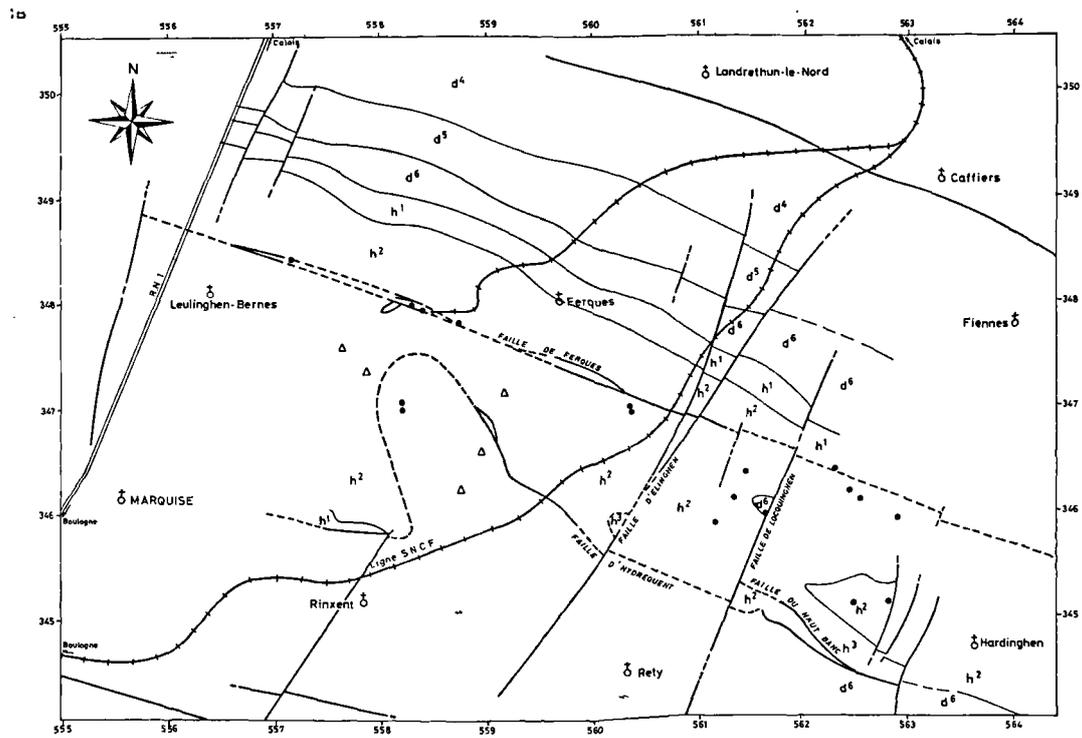
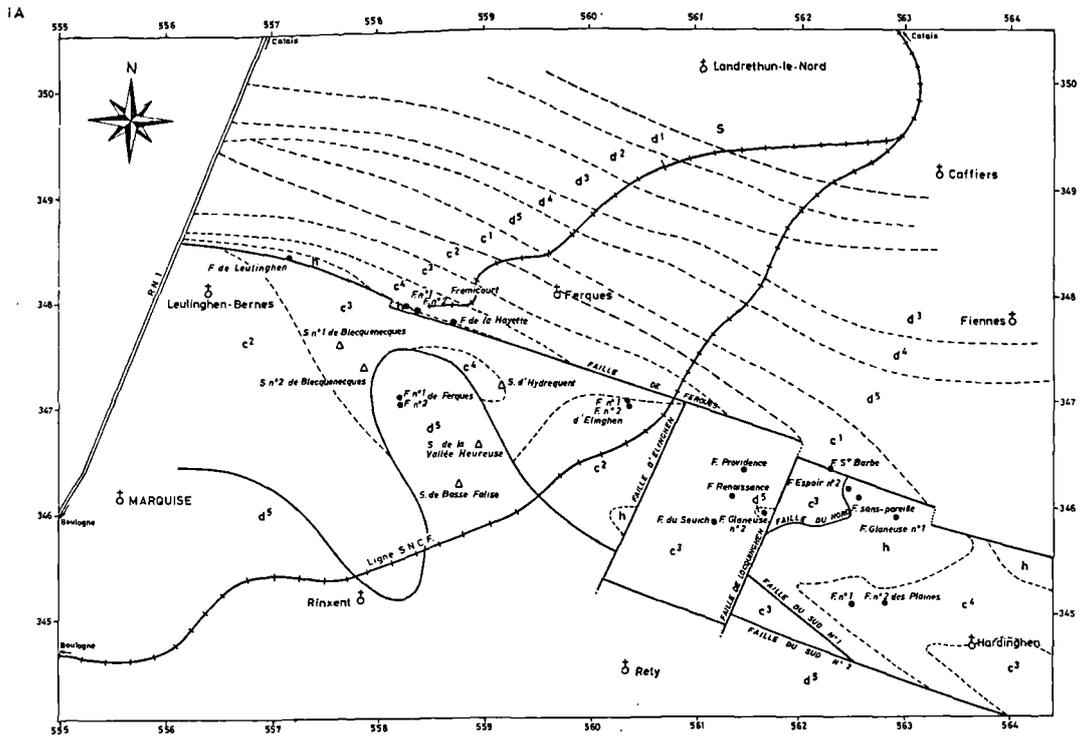


Fig. 1.

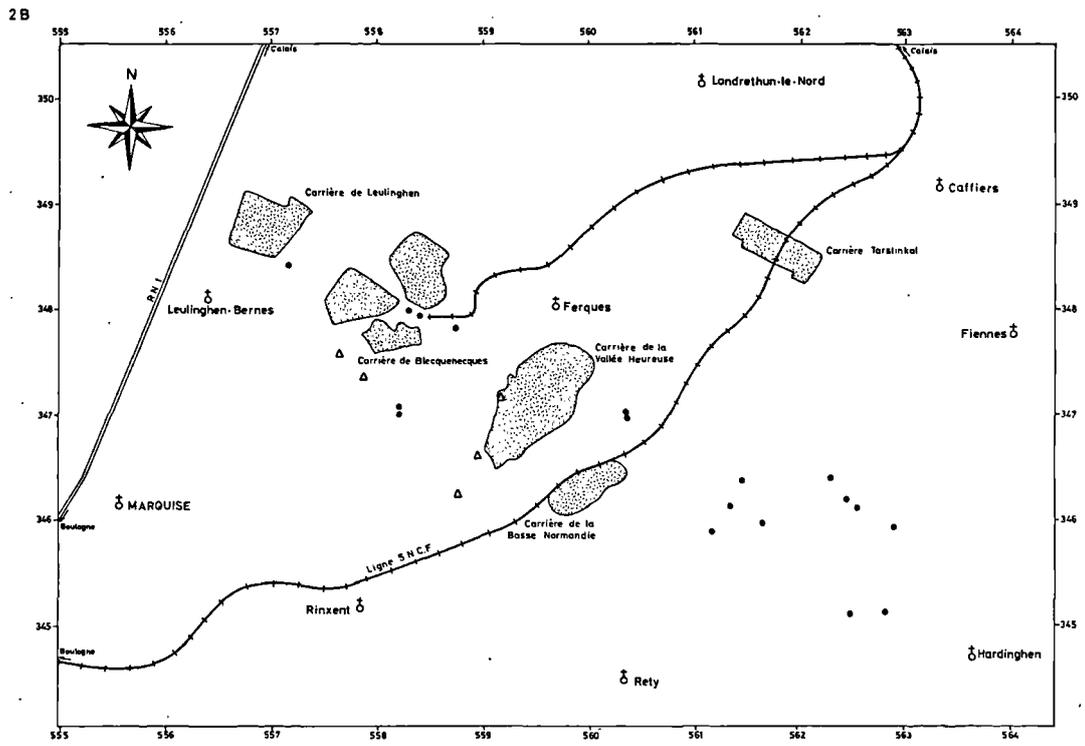
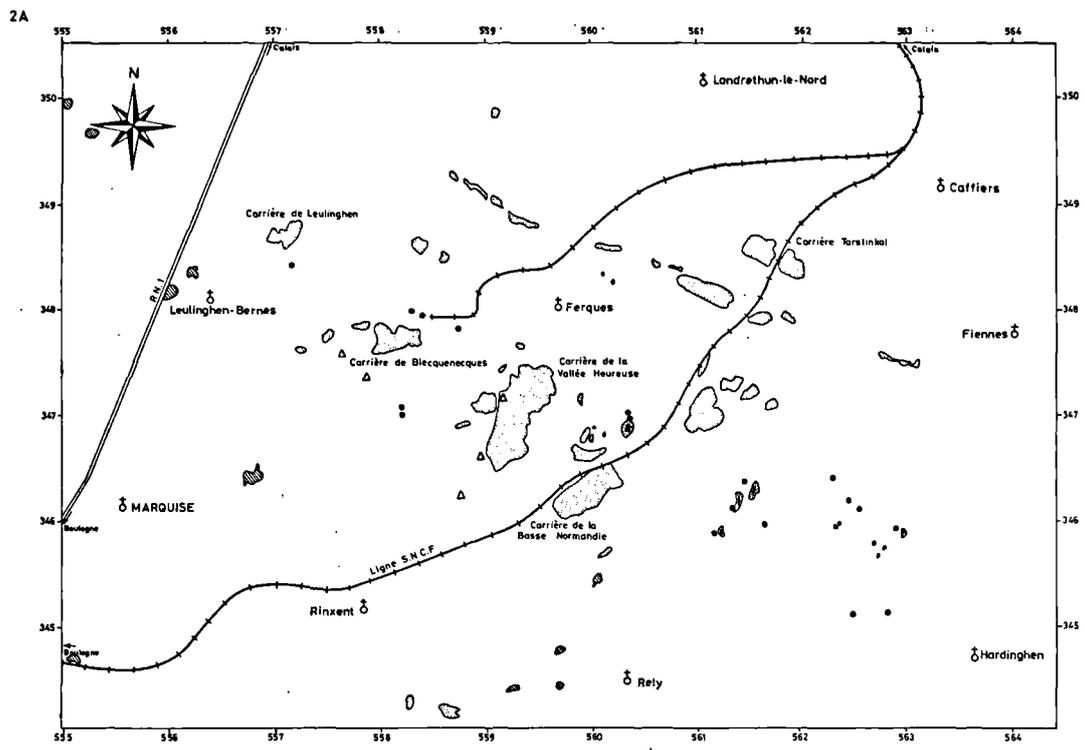


Fig. 2.

Le Bathonien (Calcaire de Rinxent et Oolithe de Marquise), le Famennien (grès psammitiques de Sainte-Godeleine) et le Frasnien (Calcaire de Ferques) ont été abandonnés au profit du Givétien (calcaire de Blacourt), du Tournaisien (Dolomie du Huré) et surtout du Viséen (Calcaire du Haut-Banc, Lunel, Napoléon et Joinville). La puissance de ce dernier étage (plus de 250 m), ainsi que sa relative homogénéité, se prêtent en effet fort bien à une exploitation moderne de type industriel.

Depuis une vingtaine d'années, les quantités de Viséen extraites annuellement sont en augmentation pratiquement constante. Elles se situent pour le moment à plus de 5 millions de tonnes, ce qui représente approximativement une excavation de deux hectares de superficie et d'une profondeur de 100 mètres. Dans ces conditions, le caractère épuisable des ressources a été mis rapidement en évidence, provoquant chez les exploitants un besoin de connaissance et de planification. C'est la raison pour laquelle des campagnes de sondages de reconnaissance ont été menées récemment dans tout le bassin carrier. Ces observations ponctuelles, complétées par celles, beaucoup plus continues, que l'on peut réaliser aux vastes fronts de taille des exploitations, permettent d'éclairer d'un jour nouveau la structure du massif primaire du Bas-Bouloonnais.

V. — RAPPEL DE LA STRUCTURE CLASSIQUE DES TERRAINS PRIMAIRES DU BAS-BOULONNAIS

La structure des terrains primaires du Bouloonnais, due essentiellement à la phase hercynienne, est caractérisée par (Bonte, carte géologique au 1/50.000, feuille Marquise) :

1° " des accidents chevauchants, traduisant une poussée du Sud au Nord " :

— faille du Sud n° 1 = faille du Nord (Oly), ou faille du Haut-Banc,

— faille du Sud n° 2 (Oly), ou faille d'Hydrequent, seule visible en surface.

2° " des accidents verticaux, les uns longitudinaux à fort rejet (faille de Ferques), les autres transversaux à faible rejet (failles d'Elinghen et Locquinghen) ".

La faille de Ferques séparerait le massif autochtone de Ferques au Nord du massif du Haut-Banc, lequel reposerait en profondeur sur le prolongement du massif de Ferques.

Pour Oly, la chronologie des déformations serait la suivante :

1° failles chevauchantes,

2° failles de Locquinghen et d'Elinghen, qui déplacent les précédentes,

3° faille de Ferques.

Cette opinion n'est pas adoptée par la carte géologique au 1/50.000, pour laquelle les effets des failles d'Elinghen et de Locquinghen se font sentir non seulement sur la faille de Ferques mais aussi sur les assises primaires du massif de Ferques et sur celles du Jurassique.

En fait, le problème est bien celui de la faille de Ferques dont on notera qu'elle est la seule des failles de ce type à ne pas affecter le Jurassique. De la description qu'Oly donne de cet accident, il faut retenir les faits suivants :

— Les points d'observation, nombreux du côté d'Hardinghen, se raréfient vers l'Ouest où ils sont limités aux anciennes carrières d'Elinghen et aux fosses de Leulinghen, Frémicourt et de la Hayette.

— A l'Ouest de la fosse Frémicourt n° 1, le tracé en affleurement est curviligne ; à l'Est, il est parfaitement rectiligne, orienté N 111°, avec quelques échelons.

— A l'Ouest, aux fosses Frémicourt et de Leulinghen, la faille, plutôt verticale en surface, s'incline à 45° vers le SSW en profondeur. A l'Est, elle reste subverticale, plongeant le plus souvent vers le Sud, mais parfois vers le Nord.

— Le rejet vertical de la faille de Ferques, estimé d'après les terrains situés de part et d'autre, serait au maximum de 500 mètres vers Hardinghen. Pour Oly, il s'agirait d'une " faille à charnière, produisant, du côté de l'Ouest, un relèvement des terrains du Sud par rapport à ceux du Nord et, du côté de l'Est, un affaissement des premiers par rapport aux seconds ".

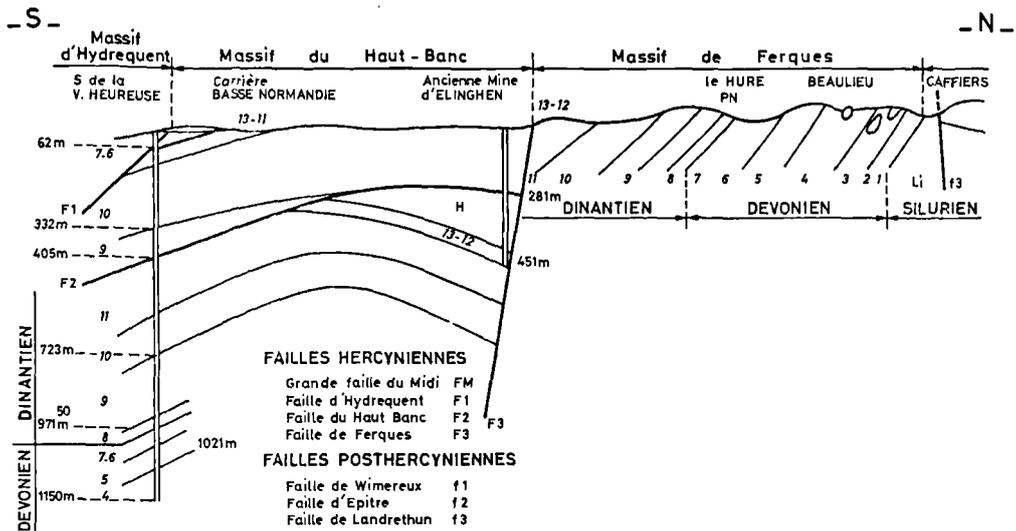
VI. — OBSERVATIONS RECENTES

La traversée de la " faille de Ferques " (ou tout au moins du tracé de cette faille indiqué par la carte géologique), par la Carrière de la Vallée Heureuse, ainsi que le développement au voisinage de cet accident, des exploitations de la Société des Carrières du Bouloonnais (carrières de Leulinghen, des Moines, du Bois Sergent), ont permis d'effectuer quelques observations intéressantes.

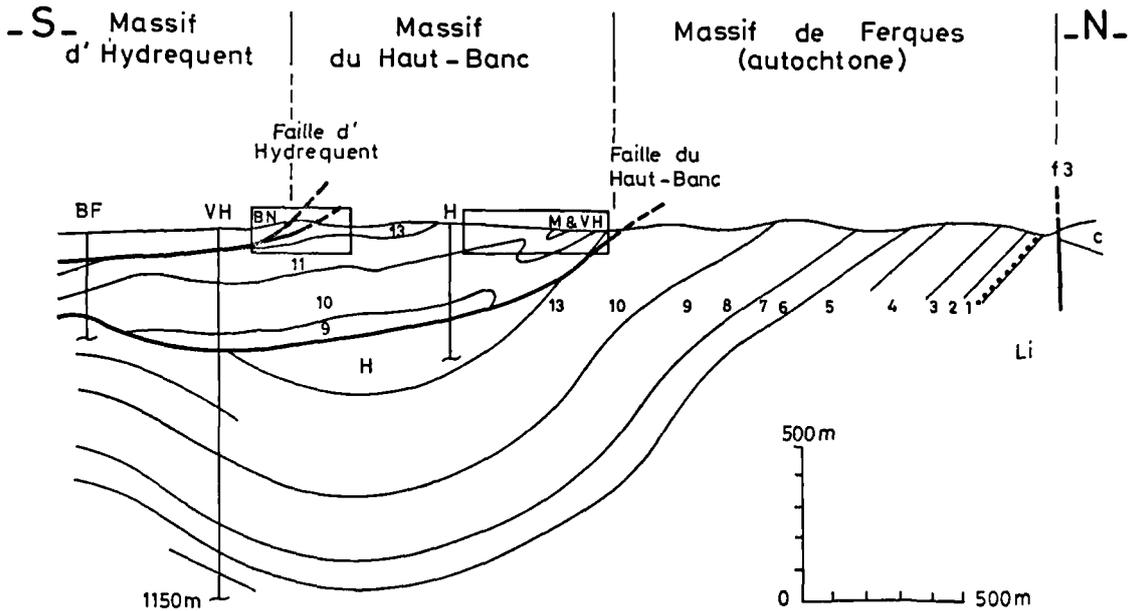
— Dans la carrière de la Vallée Heureuse, nous n'avons pas relevé de fracturation homologue de la " faille de Ferques " au droit de son tracé supposé.

— Dans cette même carrière, nous avons découvert l'existence, immédiatement au Sud du tracé de la " faille de Ferques ", d'un pli en genou d'orientation N 130° à 137°.

— Un pli en genou identique a été retrouvé à la carrière des Moines (siège de Blecquenecques des Carrières du Bouloonnais) ; il y est superposé à une faille à faible pente qui pourrait correspondre à la faille du Haut-Banc (Colbeaux *et al.*, 1979), et l'intersection de cette faille peu pentée avec la surface des terrains primaires coïncide justement avec le tracé de la " faille de Ferques " en cet endroit. Or, l'examen des nombreuses coupes réalisées dans le Bassin Houiller



— Coupe du Massif paléozoïque du Boulonnais (selon A. BONTE, 1969, d'après P. PRUVOST, 1921 et 1947, modifié) —



— Coupe passant par 3 sondages alignés NS: BF: Basse Falise, VH: Vallée Heureuse, H: Hydrequant —
 — Panoramas observés: f3: Faille de Landrethun, BN = carrière Basse Normandie, M et VH = carrières des Moines et de la Vallée Heureuse —

Fig. 3.

du Nord - Pas-de-Calais montre que la présence d'un pli en genou est toujours subordonnée à celle d'une faille chevauchante dans le voisinage immédiat.

En résumé, dans la partie occidentale du massif primaire du Bas-Boulonnais, le tracé de la " faille de Ferques " correspondrait à celui d'une faille chevauchante, en l'occurrence la faille du Haut-Banc, ce qui expliquerait le fait que les couches jurassiques ne soient pas affectées par la dite faille. En revanche, dans la partie orientale du massif, l'existence d'un accident vertical semble indubitable, mais il faudrait plutôt envisager un accident décrochant (Colbeaux, 1982, thèse en préparation), dont le rejet vertical pourrait être considérablement réduit. Les observations faites dans la carrière des Moines, où une faille subverticale à caractère décrochant, d'orientation N 105° à 117°, peut encore être vue dans l'angle sud-ouest de l'excavation, tendent à confirmer cette hypothèse.

VII. — UNE NOUVELLE COUPE A TRAVERS LE MASSIF PRIMAIRE

A partir des faits précédemment exposés, il n'est pas possible pour le moment de réaliser une synthèse structurale complète (Colbeaux, Leplat, à paraître) du Massif primaire du Bas-Boulonnais. Toutefois, Colbeaux (*in Robaszynski et al.*, 1981) a récemment proposé une nouvelle coupe perpendiculaire à l'allongement des structures, dont l'avantage est de prendre en compte des informations bien alignées, contrairement à la coupe classique publiée par Bonte en 1969, d'après Pruvost, 1921 et 1947 modifiée (fig. 3). Les enseignements que l'on peut en tirer se résument ainsi :

— La " faille de Ferques " n'apparaît plus comme l'accident majeur gouvernant la géométrie du massif ; la priorité est donnée aux failles chevauchantes du Haut-Banc et d'Hydrequent qui délimitent trois unités : un autochtone relatif ou unité de Ferques, et deux unités allochtones, du Haut-Banc et d'Hydrequent.

— L'unité du Haut-Banc n'est plus un dôme mollement ondulé, mais une écaïlle de poussée dont la partie septentrionale est fortement plissée et disloquée.

— L'interprétation du sondage de la Vallée Heureuse avec des couches à pendage nord dans l'unité de Ferques (et non sud comme dans la conception classique) permet de raccorder aisément les sondages voisins de Basse Falise au Sud et d'Hydrequent au Nord, et de montrer la continuité géométrique de l'autochtone de Ferques.

— L'anticlinal d'Hardinghen, bien connu vers l'Est grâce à l'exploration charbonnière, retrouve ici sa signification d'anticlinal post-chevauchement (post-faille du Haut-Banc). Il est décalé vers le Sud par une série de failles transverses d'orientation N 20° à 40°, du type failles de Locquinghen et d'Elinghen, dont l'existence vers l'Ouest était déjà envisagée par Colbeaux et Leplat dès 1978. Rappelons à ce propos que Trouillier, lors des recherches menées dans la concession de Ferques au début de notre siècle, citait deux accidents similaires, l'un passant par la fosse n° 2 de Ferques, l'autre à environ 700 m plus à l'Est. Ce dernier semble bien coïncider avec une faille qui a limité l'extension vers l'Ouest de la carrière de Joinville et dont le rejet vertical a été estimé à environ 120 mètres. Si on prolonge cet accident vers le Sud, on arrive exactement dans l'alignement d'une faille, indiquée par la carte géologique, qui décale les assises jurassiques.

CONCLUSIONS

Les observations faites récemment grâce au développement des carrières de granulats montrent que dans la partie occidentale du Massif primaire du Bas-Boulonnais, le tracé de la " faille de Ferques " correspondrait à celui de la faille du Haut-Banc. Dans la partie orientale du Massif, la " faille de Ferques " serait bien un accident vertical, mais à caractère décrochant.

La nouvelle interprétation proposée amène à concevoir l'existence, entre Ferques et Leulinghen, d'un synclinal de Houiller dont il resterait à évaluer l'importance. Verra-t-on un jour de nouvelles mines de charbon en Boulonnais grâce à l'exploitation intensive des granulats que nous connaissons aujourd'hui ? Voilà ce qui serait, croyons-nous, un juste retour des choses.

* * *

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1) BONTE A. (1969). — Le Boulonnais. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. LXXXIX, p. 23-46.
- 2) BONTE A. et coll. (1971). — Carte géologique au 1/50.000, feuilles Marquise et Guines. 1^{re} édition, B.R.G.M.
- 3) BOUROZ A. (1962). — Contribution à l'étude de la structure du Bassin Houiller du Boulonnais. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. LXXXII, p. 27-37.
- 4) COLBEAUX J.P. (1975). — Etude d'une zone de chevauchement : la faille d'Hydrequent (Bas-Boulonnais, France). *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XCV, p. 101-108.
- 5) COLBEAUX J.P., CONIL R., HOYEZ B. (1978). — Phénomènes tectoniques au voisinage de la faille de Ferques (Massif Primaire du Bas-Boulonnais, France). *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XCVIII, p. 345-358.
- 6) GOSSELET J. (1903). — La faille d'Hydrequent. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XXXII, p. 131-135.
- 7) OLRV A. (1903-1904). — Travaux d'exploitation et de recherche exécutés dans le Bassin Houiller du Boulonnais. *Bull. Serv. Carte géol. France*, n° 100, t. XV.
- 8) OLRV A. (1904). — Topographie souterraine du Bassin Houiller du Boulonnais au Bassin d'Hardinghen. *Et. Gîtes Min. France*, 1 vol., VI, 240 p., 44 fig., 3 pl.
- 9) VUILLEMIN E. (1880). — Le Bassin Houiller du Pas-de-Calais.



Exploitation énergétique des aquifères

par J.Y. AUSSEUR (*) et J.P. SAUTY (*)

Les eaux des nappes souterraines sont de plus en plus couramment exploitées pour le chauffage d'habitations, ou d'installations agricoles telles que serres :

— directement à la température d'extraction lorsque celle-ci est suffisamment élevée : eaux géothermales nécessitant généralement des forages de 1 000 à 2 000 m de profondeur ;

— après élévation de leur niveau énergétique par l'intermédiaire de pompes à chaleur : géothermie très basse énergie, sur des nappes de faible profondeur.

L'exploitation inverse, pour la climatisation de locaux ou le refroidissement d'installations industrielles, est également courante.

(*) B.R.G.M., Orléans.

Un concept plus récent est celui du stockage de calories ou de frigories. Les aquifères se prêtent bien au stockage intersaisonnier d'eau chaude ou froide : de tels dispositifs sont étudiés depuis quelques années du point de vue théorique ; plusieurs réalisations industrielles sont actuellement en cours.

Dans la plupart des cas, qu'il s'agisse de géothermie ou de stockage, et pour diverses raisons, le dispositif retenu est celui du doublet de forages : l'eau extraite par l'un des puits est recyclée par injection dans le second ouvrage après exploitation de son énergie sensible. Il s'ensuit une modification des températures du réservoir, éventuellement préjudiciable, et qu'il s'agit de prévoir.

Les différents cas de figure rencontrés dans la pratique sont examinés dans l'optique de la rentabilité des projets. Des applications en vraie grandeur sont présentées.



Récupération d'énergie dans les décharges : une solution rentable aux problèmes d'environnement

par J. BECKELYNCK (*)

Le moyen le plus répandu et le moins coûteux d' "élimination" des déchets ménagers et industriels demeure leur mise en décharge. Constitués en partie de matières organiques, ces dépôts sont le siège d'une fermentation intense dont l'une des conséquences est la formation de produits gazeux composés principalement de méthane, de dioxyde de carbone et, secondairement, d'heptane, d'azote, d'octane et d'un cortège d'hydrocarbures. Si certains de ces derniers sont responsables des odeurs nauséabondes qui émanent des décharges, les effets les plus importants sont représentés par les dommages causés aux cultures avoisinantes et les risques d'explosion que constitue le mélange entre 5 % et 15 % de méthane dans l'air.

Aussi, les premières études menées sur les gaz de décharges ont porté essentiellement sur la résorption et la prévention des migrations de gaz en provenance des déchets.

Les premières expérimentations menées, notamment aux U.S.A. et en R.F.A., ont alors permis de constater que le taux de production en méthane s'échelonne entre 70 et 140 m³ par tonne de déchets déposés,

variations dépendant de la composition de ces derniers mais également des conditions de milieu. En terme d'exploitation, une décharge de moyenne importance peut ainsi produire plusieurs centaines, voire millions, de mètres cubes de gaz par jour suivant le dispositif d'exploitation mis en place.

La récente escalade du coût des énergies a alors orienté l'exploitation des gaz de décharge dans le sens d'une récupération d'autant plus intéressante que la production des déchets constitue une ressource dont on peut être assuré.

Ainsi, pour un rendement moyen de 200 m³ de gaz par tonne de déchets, les quelque trois millions de tonnes de déchets urbains mis annuellement en décharge représentent un potentiel récupérable de plus de 300 000 tep.

En favorisant de grandes exploitations, la récupération des gaz de décharge en facilite la gestion et le contrôle tout en permettant de maîtriser les migrations dans les terrains avoisinants. Elle contribue ainsi d'une manière harmonieuse, d'une part, à la valorisation des déchets et, d'autre part, à la protection des sites, tant au niveau de la surface que pour les problèmes souterrains.

(*) B.R.G.M. Nord à Lezennes 59260 Hellemmes.



A qui la Terre ?

par Antoine BONTE (*)

Résumé. — La répartition des richesses minérales est hétérogène, entraînant une très grande disparité entre les pays ; leur distribution est arbitraire et fondée sur des principes discutables.

La Terre n'appartient pas à l'Homme, mais à tout le monde vivant. Une distribution équitable de ses richesses entre tous les hommes doit tenir compte de la distinction entre Ressources, Réserves statiques et Réserves entretenues, qui est basée sur les notions de cycle de Dégradation \rightleftharpoons Agradation et de rythme de renouvellement.

Une gestion planétaire suppose la restitution des Réserves à la Communauté humaine et une concertation au sein d'un organisme chargé de définir des règles de bon usage, de réviser périodiquement le classement des richesses naturelles, de mettre au point de nouvelles techniques de prospection et d'exploitation.

Abstract. — The location of mineral riches is heterogeneous, leading to a very great disparity between nations. Their distribution is arbitrary and founded on contestable principles.

The Earth does not belong to the Mankind, but to the whole living world. An equitable distribution of its wealth between every man must take in account the distinction between Resources, Static Stores and Maintained Stores. This distinction is founded on the ideas of Degradation \rightleftharpoons Agradation cycle and of renewal rhythm.

A planetary gestion supposes the restitution of stores to the human community and an international concertation, in order to decide a good-use guide, to periodically revise the classification of natural riches and to look for new prospection and exploitation technics.

Le mot Terre est pris ici dans son sens le plus général : la planète et son environnement, avec son contenu : les richesses naturelles. Pour un géologue, il s'agit essentiellement des richesses minérales, et à ce titre tout est richesse, du grain de sable à la pépite d'or ou au bloc de charbon. A priori, le géologue n'a pas à s'occuper des richesses biologiques (flore et faune), même si bon nombre de substances minérales ont une origine biochimique ; mais il est clair que le géologue comme tout homme, doit se préoccuper des richesses biologiques qui sont d'ailleurs conditionnées par leur contexte géologique.

Les richesses minérales se sont mises en place progressivement au cours des temps géologiques, mais elles restent soumises à une évolution ininterrompue comme toutes les richesses naturelles. On peut rappeler quelques étapes de cette évolution pour situer les problèmes qui seront évoqués. La croûte initiale a 4 à 5000 MA et les premiers sédiments 3750. Dans l'eau des premiers

océans, la Vie a fait son apparition brusquement et probablement partout à la fois, sous l'influence de rayonnements extérieurs à la planète ; ses premières traces identifiables datent de 3400 MA. Beaucoup plus tard, l'apparition de l'oxygène, grâce au mécanisme extraordinaire de la photosynthèse (2300 MA), est à l'origine du développement de la flore, puis de la faune. L'homme, terme actuel de cette évolution, a fait son apparition au début du Quaternaire (1,5 à 2 MA) — même si des traces de son émergence ont été reconnues bien plus tôt (3 à 5 MA) — et vraisemblablement en de nombreux points de la surface à la fois, comme la Vie l'avait déjà fait à l'origine.

Le problème des richesses minérales n'a pas 200 ans ; il se pose de façon aiguë depuis 30 ans, s'aggravant de jour en jour et exigeant des mesures d'urgence.

I. — REPARTITION ET DISTRIBUTION

La répartition spatiale des richesses minérales à la surface du globe est très hétérogène, ce qui entraîne une grande disparité entre les différentes régions et surtout entre les différentes populations, en raison du caractère arbitraire et fluctuant des frontières politiques.

(*) Université des Sciences et Techniques de Lille. Sédimentologie et Géochimie, Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

Note présentée le 20 Janvier 1982 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 2 Juin 1982.

Contrairement à des dogmes profondément ancrés dans le passé et qui présentent tous, quel que soit leur fondement, un caractère anthropocentrique indéniable, la Terre n'a pas été faite pour l'Homme et pour sa seule satisfaction ; elle ne lui appartient pas, elle est simplement à sa disposition — à la disposition de tout l'Homme, c'est-à-dire de tout homme présent et futur — sous réserve qu'il en fasse un bon usage. De même qu'elle est à la disposition de tout le monde vivant, animal et végétal, pour lequel l'air, l'eau et les substances nutritives sont aussi indispensables qu'à l'homme.

Toute la planète Terre avec son contenu, doit être considérée comme le patrimoine commun de l'humanité (" Common Heritage of Mankind ") et non pas seulement le fond des Mers, suivant la suggestion faite le 1^{er} Novembre 1967 par Arvid Pardo devant l'Assemblée générale des Nations Unies.

Si la répartition actuelle des richesses minérales n'a guère changé depuis l'émergence de l'Homme, leur *distribution* et leur *appropriation* ont été fondées, dès l'origine de l'humanité, sur des principes discutables qui doivent être remis en question : le droit du premier occupant et ses corollaires : le droit prime la force, la coutume c'est le droit. Ces concepts étaient justifiables lorsqu'il y avait surabondance, et ils le sont encore dans certaines circonstances, notamment en pays neuf.

Comme l'animal, l'homme s'attribuait, ou se voyait attribuer par un chef, un domaine qui avait été investi par le groupe dans une région inhabitée ; il pouvait s'y installer avec sa famille, y construire son habitation, utiliser dans ce but les matériaux trouvés sur place et mettre le sol en culture. De cette occupation, concédée par un chef qui attribuait des biens dont il n'était pas maître, découlait un certain droit de propriété établi d'un commun accord : le travail fourni pour améliorer le terrain concédé constituait une sorte de " valeur ajoutée " justifiant en partie la prise de possession. Mais ce partage plus ou moins arbitraire d'une région inhabitée, considérée comme *res nullius*, par un chef qui, en fait, n'avait aucun droit, était une usurpation. Ce chef, aussi plébiscité fût-il, n'était pour rien dans l'existence du sol superficiel ; pas plus que l'Arabe pour le pétrole ou le Congolais pour le cuivre et le diamant ; pas plus que les riverains pour la Mer du Nord.

La *distribution* actuelle des richesses minérales de la planète n'a aucun sens ; elle consacre un état de fait, sans cesse aménagé par les guerres et les conquêtes coloniales, suscitées par la convoitise des voisins pour les produits du sol ou du sous-sol : denrées rares d'abord, puis matières premières.

Les pays industrialisés ont pris naissance sur des zones apparemment favorisées. L'Europe occidentale est fondée sur les premiers gisements exploités de fer et de charbon : le Bassin houiller anglo-franco-belge.

Mais, bien avant leur épuisement, les exploitants se sont tournés vers d'autres régions où les matières premières étaient plus accessibles et de meilleure qualité.

Cette distribution arbitraire a aggravé encore les disparités de la répartition spatiale originelle des richesses minérales ; elle ne peut donc prétendre à assurer un partage équitable entre tous les hommes. Par ailleurs, les dangers créés par une consommation effrénée, mise au service d'une démographie incontrôlée, conduisent inéluctablement, à plus ou moins brève échéance, à une situation de pénurie dénoncée par le Club de Rome. Il est donc nécessaire de procéder rapidement à une révision complète des principes admis jusqu'ici, si on veut remédier aux injustices du passé et permettre à tous les hommes de vivre et de se développer harmonieusement, ou même de survivre.

Pour tenter de réaliser une distribution plus équitable, on peut envisager soit d'améliorer la situation actuelle, soit d'en modifier radicalement les fondements.

1. - Une *redistribution territoriale* est impensable : aucun critère morphologique, géologique ou structural ne pourrait la justifier ; elle nécessiterait périodiquement des révisions de frontières inacceptables ; du point de vue social et politique, elle créerait plus de problèmes qu'elle n'en résoudrait.

2. - Une *révision radicale* de la situation actuelle devrait comporter deux objectifs : a) *restitution volontaire* à la communauté humaine des richesses qui lui reviennent fondamentalement ; b) mise sur pied d'une *organisation internationale* qui assurerait une *gestion* des richesses à l'échelle de la planète, comportant : d'une part, *attribution de ressources* en fonction des besoins présents et futurs ; d'autre part, *fixation de règles d'une saine exploitation* pour éviter le gaspillage et la pollution.

L'attribution à chaque nation de ressources minérales est un problème difficile qui doit tenir compte des situations existantes et des perspectives de développement raisonnables. Quant aux règles à suivre, il est évident que toutes les richesses naturelles ne sont pas justiciables des mêmes contraintes : les terres cultivables relèvent d'une autre économie que la forêt, les combustibles minéraux, les minerais, les granulats ou l'eau.

II. — RESSOURCES ET RESERVES

Avant d'envisager les modalités de cette gestion, il est nécessaire d'en reconsidérer l'objet. Parmi les richesses minérales, il faut distinguer les *ressources* et les *réserves* (*). Cette distinction, basée sur la notion

(*) Les mots Ressources et Réserves sont pris ici dans un sens conventionnel différent du sens donné par les mineurs.

de *renouvellement*, doit être complétée par les notions de

DEGRADATION \rightleftharpoons AGRADATION ($D \rightleftharpoons A$)

et de *rythme de renouvellement*, lui-même défini par la durée des cycles $D \rightleftharpoons A$.

La notion de Dégénération \rightleftharpoons Agradation a été introduite dans le vocabulaire géologique français en 1962 par Lucas, à propos de la transformation des minéraux argileux ; transformation considérée comme négative pour la dégradation, dans le sens *altération* et *perte* de substance, comme positive pour l'agrada-tion, dans le sens *construction* et *acquisition* de substance. Cette notion peut s'appliquer à tous les matériaux pour désigner l'ensemble des mécanismes qui commandent les phénomènes naturels et qui régissent la genèse et l'évolution des matériaux naturels en précisant qu'il y a continuité entre les deux termes du processus $D \rightleftharpoons A$ et que, globalement, ces deux termes sont strictement corrélatifs, car ils peuvent être assimilés aux deux termes d'une réaction d'équilibre : l'*acquisition* de substance en un point suppose une *perte* équivalente en un autre point ; de même que la *construction* nécessite l'emploi de matériaux issus de l'*altération*. Toutefois, les deux termes peuvent se succéder dans le temps sur le même matériau pour constituer un *vrai cycle*.

La dégradation correspond aux différents aspects de l'altération physique et chimique : désagrégation mécanique, usure, corrosion, hydrolyse. L'agrada-tion correspond à la sédimentation des produits de l'érosion et à leur diagenèse ; elle comporte souvent deux phases : l'*élaboration du matériau* par des processus physico-chimiques ou biochimiques et sa *mise en gisement*, suivie d'une période de *repos* ou d'*attente* plus ou moins longue.

En géologie sédimentaire, l'agrada-tion succède toujours à une dégradation, qui succède elle-même à une agrada-tion antérieure. Cet enchaînement est le fonde-ment de la notion de renouvellement, à condition que la durée du cycle, ou plutôt du processus d'agrada-tion, ne soit pas trop longue (rythme de renouvellement). La durée du cycle $D \rightleftharpoons A$ peut se mesurer à l'échelle humaine, géologique ou cosmique.

Quelques exemples permettront de préciser ces notions :

1° Du granite originel au gîte alluvial (sable ou placer aurifère), il y a dégradation du granite (érosion et transport) ; puis agrada-tion, en un autre lieu, d'un gîte alluvial (sédimentation). Conformément à la défini-tion du processus $D \rightleftharpoons A$, la transformation peut être considérée comme négative par rapport à la roche originelle ; mais elle est positive par rapport au gîte alluvial.

2° Dans la formation d'un gisement d'hydrocarbu-res, le terme agrada-tion comporte la mise en place d'un

sédiment argileux ou pélitique (qui résulte de la dégra-dation, par érosion, d'un matériel originel), au sein duquel seront confinés les débris organiques dont la dégradation est à l'origine du pétrole. Dans ce cas particulier, un peu exceptionnel, les deux phases de l'agrada-tion sont très disproportionnées. Si l'élabora-tion du matériau est très rapide, puisque c'est un processus biochimique lié à la sédimentation, la mise en gisement par migration peut demander des millions d'années. Une fois formé, ce gisement reste ensuite indéfiniment en attente, à condition que l'érosion ne le mette jamais au contact de l'atmosphère, ce qui entraînerait une dégradation naturelle relativement rapide. Quant à la dégradation par combustion, elle est instantanée.

Généralement, le cycle $D \rightleftharpoons A$ est ouvert, car l'agrada-tion ne reconstitue pas le matériau originel ; mais il existe des cycles fermés dont la durée est gé-néralement courte.

Le meilleur exemple est le cycle de l'eau qui est à la fois un cycle de matière première et un cycle d'énergie. L'eau ne reviendra s'accumuler derrière un barrage que si, aboutissant à la mer après avoir fourni du travail, elle en revient, porteuse d'énergie, sous forme de vapeur d'eau, de pluie ou de neige.

Autre exemple : un grès à ciment calcitique, résultant de la cimentation d'un sable, peut, par altération (érosion et transport, ou dissolution sur place), évoluer en sable puis, ultérieurement, donner un nouveau grès, à ciment de calcite ou d'oxyde de fer, par diagenèse superficielle. Si la dégradation se fait par érosion et transport, le support sableux a changé de texture ; si elle est due à la dissolution du ciment, les grains de sable ont conservé leur disposition originelle : la texture du grès final est identique à celle du grès originel. Le cycle est fermé et parfois en un temps relativement court.

Enfin, à notre point de vue humain, essentiellement utilitaire, le processus $D \rightleftharpoons A$ peut être considéré comme favorable, lorsqu'il aboutit à la *concentration* de certains éléments libérés de leur gangue, c'est-à-dire à un enrichissement (placer) ; ou défavorable, s'il conduit à la *diffusion* dans le milieu extérieur d'élé-ments solubles (sel gemme) ou volatiles (hydrocarbures).

En se basant sur la notion de renouvellement, on peut définir trois catégories de richesses naturelles.

1) **Les richesses renouvelables** dont le rythme de renouvellement oscille entre la journée et le siècle. On peut y ranger : *du point de vue matières premières*, l'eau au premier rang, les granulats, les évaporites actuelles et même les hydrocarbures, si on n'envisage que la durée de formation du matériau ; *du point de vue sources d'énergie*, l'énergie éolienne, l'énergie hy-draulique, l'énergie thermique des mers, l'énergie maré-motrice..., toutes dérivées pratiquement de l'énergie solaire.

C'est dans cette catégorie qu'il faut aussi ranger les phénomènes naturels en action : le vent, la pluie, les marées, les courants marins, les eaux courantes, les eaux souterraines, qui donnent naissance aux sources d'énergie précédemment citées et enfin les ressources biologiques et les terres cultivables, qu'il importe de protéger de la dégradation.

A ces richesses renouvelables, on peut donner le nom de *RESSOURCES*. Ce sont des richesses actives dont certaines peuvent être accumulées en stocks temporaires pour une utilisation continue, comme l'eau qui alimente les glaciers ou qui s'accumule derrière les barrages.

2) Les richesses non renouvelables à notre échelle de temps. Elles ont été mises en place une fois pour toutes au cours des temps géologiques et, de ce fait, elles sont strictement limitées en volume. Ce sont les *RESERVES STATIQUES* correspondant à un stock passif. Leur rythme de renouvellement est de l'ordre du million, de la dizaine ou de la centaine de MA. A l'échelle humaine, elles sont hors cycle ; mais on pourrait envisager une amélioration considérable si on parvenait à limiter l'agradation à la seule élaboration du matériau. Par exemple : pour les hydrocarbures, en captant les liquides et les gaz dans la roche-mère, à l'issue du processus de dégradation biochimique, comme on le fait déjà pour les déchets de l'agro-alimentaire. Des espoirs du même ordre sont permis pour les roches de type oolithique ou noduleux dont l'origine biochimique est indéniable.

Ces réserves statiques sont *figées* ; elles correspondent, en fait, à toutes les substances qui préoccupent l'homme du XX^e siècle, à savoir : les minerais d'origine magmatique, même s'il s'en forme de nouveaux gisements au fond des océans ; les minerais d'origine sédimentaire comme les minerais de fer oolithiques, les nodules polymétalliques, les nodules phosphatés, à moins qu'on puisse un jour les produire artificiellement ; les évaporites anciennes ; les combustibles minéraux solides, liquides et gazeux.

Tous ces matériaux, qui forment des gisements limités et dont le processus d'agradation est bloqué depuis longtemps, doivent être traités comme des richesses non renouvelables, des *RESERVES* à économiser au maximum, jusqu'au jour où on pourra envisager une agradation artificielle.

3) Il existe d'autres richesses qui dépendent de cycles cosmiques (durée supérieure à 10⁹ années) que l'on peut admettre comme hors du temps. Leur dégradation est continue mais absolument insensible à notre échelle. On peut les qualifier de *RESERVES ENTRE-TENUES* ; leur masse est illimitée, de toute façon hors de proportion avec les besoins des habitants de la planète.

En ce qui concerne les matières premières, il s'agit, en fait, de réserves inépuisables plutôt qu'entretenues.

Ce sont, d'une part, les séries basaltiques qui forment l'essentiel de l'écorce terrestre et en particulier les fonds océaniques, avec les massifs plus ou moins circonscrits de roches intrusives ; d'autre part, le contenu des grands bassins sédimentaires (grès, calcaires et schistes) et particulièrement le domaine océanique dans son ensemble. Du point de vue sources d'énergie, c'est l'énergie géothermique, d'utilisation difficile, et surtout l'énergie solaire dont la masse colossale serait surabondante si on savait la mettre en œuvre : elle est déjà à l'origine de bien des énergies dérivées (éolienne, hydraulique, thermique des mers et marémotrice, photosynthèse...). Sa dégradation, bien que très lente, est le plus formidable gaspillage qu'on puisse imaginer.

Depuis l'époque où, dit-on, Archimède incendiait par un jeu de miroirs les navires romains qui assiégeaient Syracuse (212 BP), on a complètement négligé l'énergie solaire, alors qu'elle pourrait fournir à elle seule 10 à 20.000 fois la consommation mondiale actuelle ; alors que, dans notre propos, elle pourrait contribuer efficacement aux processus de *renouvellement*. Les fours et maisons solaires, comme les cellules photovoltaïques, sont des tentatives récentes appréciables, mais qui n'ont guère dépassé le stade de la recherche.

III. — RENOUELEMENT

La notion de renouvellement qui a été précisée par la notion de $D \rightleftharpoons A$ est discutable. En fait, rien n'est renouvelable intégralement, car on ne peut remonter un cycle : l'usage suppose toujours une perte d'énergie. Par contre, si on peut compenser cette perte par un apport d'énergie, tout est renouvelable ; mais à quel prix ?

Pour discuter l'opportunité d'un renouvellement, il faut d'abord préciser les différents sens du mot *usage* qui peut être, suivant Robert, *utilisation*, *consommation* ou *usure*, suivant que le matériau subsiste, disparaît ou se modifie (altération).

1° Dans notre perspective, l'usage devrait toujours se limiter à l'utilisation, qui autorise un renouvellement si on a pris soin de protéger le matériau contre l'altération (usure), en particulier contre la pollution ; et ceci s'applique en particulier à l'eau.

2° La *consommation* est une destruction, une dégradation, volontaire ou non, sans espoir de retour. La combustion des hydrocarbures qui, du point de vue économique, est une hérésie, est une consommation. Cette consommation, souvent inutile, est le leitmotiv des sociétés développées, mais elle les conduira à leur perte. En réalité, suivant le mot de J.B. Say, « la consommation n'est pas une destruction de matière (car rien ne se perd), mais une destruction d'utilité ».

3° Enfin, l'usure est pire que la consommation, car elle altère un matériau sans contrepartie d'utilisation.

En résumé, utilisation - consommation, ces deux mots caractérisent la destinée des matériaux, suivant qu'ils sont renouvelables ou non.

Pour en revenir au renouvellement, dans la phase d'agradation, il ne peut se réaliser que s'il y a un apport d'énergie correspondant à la perte d'énergie entraînée par la dégradation.

Reprenant l'exemple de l'eau derrière un barrage, sa chute à travers les turbines est une dégradation qui est, pour elle, une perte d'énergie compensée en partie par la production d'électricité. L'eau pourra revenir derrière le barrage après évaporation en mer par l'énergie solaire et transport sous forme de pluie. Le cycle $D \rightleftharpoons A$ est fermé, dans un temps relativement court. L'eau est une richesse renouvelable : sa dégradation est instantanée, son agradation est rapide et peu coûteuse, car elle utilise une réserve entretenue.

Finalement, le renouvellement n'est acceptable que si l'apport d'énergie nécessaire à l'agradation est fourni par une réserve entretenue.

On peut aller plus loin dans le renouvellement et tenter même de l'appliquer aux richesses dites non renouvelables, à condition de disposer d'une énergie peu coûteuse. On pourrait envisager l'agradation de certaines substances, dans la phase d'élaboration du matériau : hydrocarbures, minerais de type oolithique ou noduleux..., par l'encadrement et l'accélération des processus biologiques, par la récolte en continu des substances élaborées.

Une autre approche du renouvellement serait la *recupération des déchets* qui, pour des raisons de facilité, a souvent été négligée. Les déchets, qu'ils soient urbains ou industriels, sont, en fait, le résultat d'une dégradation avec perte d'énergie ; l'agradation de ces déchets pour retrouver les matériaux originels nécessite une dépense d'énergie très variable suivant les matériaux.

Prenons le cas des métaux lourds, qui font l'objet d'un gaspillage insensé eu égard à la modicité relative des réserves. On peut admettre qu'ils ne sont jamais perdus, car la masse totale d'éléments disponibles est toujours la même. Après de multiples transformations, on les retrouve toujours, sous une forme ou sous une autre, dans les déchets urbains ou industriels ; puis, de là, dans l'eau souterraine où ils sont une cause de pollution grave, en attendant d'aboutir à la mer où les attend le piège de la sédimentation chimique.

Leur récupération dans les déchets pose des problèmes difficiles en raison de leur extrême diffusion et de leur teneur très faible. Il est évidemment plus rentable, dans l'immédiat, de repartir du minerai qui est beaucoup plus concentré. Avec les énergies entretenues, on peut envisager un recyclage intégral des déchets qui retarderait, dans une certaine mesure, la consommation des réserves statiques. L'objectif qui

s'impose est le recyclage intégral des matières premières par le traitement des déchets à l'aide d'énergies nouvelles ou d'énergies entretenues.

À propos de pollution, de récupération et d'énergie, on peut encore évoquer le problème de la pollution thermique qui correspond à un gaspillage d'énergie inacceptable.

IV. — GESTION DES RICHESSES NATURELLES

L'usage inconsidéré des richesses naturelles a conduit dans le passé à de nombreuses erreurs et à un gaspillage inadmissible des Réserves et des Ressources. Il faudrait maintenant restituer à la Communauté humaine ce qui lui revient fondamentalement et organiser une concertation internationale qui assurerait une gestion rationnelle du contenu de la planète.

Dans l'optique d'une gestion planétaire, les *Richesses renouvelables* ou Ressources, ainsi que les *Réserves entretenues*, seraient laissées à la disposition des nations qui les possèdent sur leur territoire : elles sont utilisables sans risque d'épuisement. Par contre, les *Réserves figées* devraient être considérées par les détenteurs comme inaliénables ; leur exploitation éventuelle, qui est une consommation, étant placée sous juridiction internationale.

L'organisme gestionnaire, qui aurait aussi un rôle de *contrôle*, assurerait, en accord avec les représentants des pays intéressés, la *prospection*, l'*attribution* et l'*exploitation* éventuelle des matériaux. Il assumerait, en outre, une fonction de *recherche* dans le but de : 1° définir les *règles* de bon usage (protection et économie des gisements, maintien des équilibres naturels, respect de l'intégrité de la planète, notamment des climats...); 2° réviser périodiquement le *classement* des richesses en fonction des connaissances du moment ; 3° mettre au point de *nouvelles techniques* de prospection et d'exploitation.

— En ce qui concerne le *classement* des richesses naturelles, il est évident qu'il est établi à un moment donné en fonction des théories en cours, dont la durée est parfois éphémère ; il peut donc varier dans le temps.

— La recherche et la mise au point de *nouvelles techniques*, réalisées dans une étroite collaboration internationale, devraient être l'objectif essentiel pour lutter contre un gaspillage auquel nous sommes trop habitués. Dans ce but, il faudrait analyser les processus naturels pour en acquérir la maîtrise ; les utiliser, les encadrer ; tenter d'en accélérer le rythme, pour diminuer la durée de production des matériaux... ; et, en même temps, chercher à récolter ces matériaux au fur et à mesure de leur élaboration, pour s'affranchir de la phase de mise en gisement et de la période de repos qui suit. On peut ainsi espérer améliorer la production des matières premières, tant dans le domaine marin que dans le domaine continental.

1) L'Océan, considéré dès l'Antiquité comme pourvoyeur de richesses et en même temps comme épurateur universel, a subi une lente dégradation en raison des abus dont il a été le siège : exploitation inconsidérée de la faune marine, pollution massive organique et chimique par les rejets urbains et industriels et, beaucoup plus grave, immersion en fosses prétendues stables et sans risque de déchets divers (gaz de combat, déchets toxiques ou radioactifs...). Depuis quelques années, on constate un retour en arrière prometteur, et on sait que les abus dénoncés, exagérés par une information parfois tendancieuse, n'étaient que peu de chose en regard des dégradations naturelles : volcans sous-marins, éruptions sous-marines de pétrole, radioactivité naturelle... équilibrées par une capacité insoupçonnée de l'autoépuration.

En réalité, si on respecte les grands équilibres naturels (courants marins, climats...), si on évite la pollution massive par les déchets de l'industrie chimique et surtout par les déchets radioactifs, la mer pourrait bien être la seule vraie richesse de la planète et, en ce sens, elle constitue bien l'héritage commun de l'humanité.

De l'avis des océanologues, la composition de l'eau de mer n'a guère varié au cours des siècles et cela malgré l'arrivée incessante de millions de tonnes de matériaux tous les ans dans les océans. Suivant Ivanoff (1972), « Il est à supposer qu'il existe au sein même des eaux de mer des processus limitant leur concentration en la plupart des éléments » et favorisant la précipitation par voie physique, chimique et biologique sous forme de grains, de concrétions ou d'encroûtements. Dans le cas particulier des nodules et autres concrétions, c'est une mise en stock à l'échelle humaine et l'eau de mer peut être considérée comme un volant, intermédiaire entre les richesses continentales et les richesses sous-marines. Les paléo-océanologues démontrent actuellement qu'on ne peut extrapoler cette stabilité à des millions et à des centaines de millions d'années : on connaît des variations brutales des conditions de dépôt, comme on connaît des modifications brutales de la structure des continents et des fonds océaniques. Mais il s'agit d'événements relativement brefs, à l'échelle de la planète, suivis d'une stabilisation progressive et probablement de longue durée.

2) Dans le monde entier, des cris d'alarme ont été poussés depuis 15 ans, par les biologistes et certains économistes. La mise en garde a porté ses fruits : les économies de matière et les économies d'énergie sont entrées dans les habitudes, mais il faut aller plus loin : il y a encore beaucoup à faire dans le domaine de la pollution et dans le recyclage des déchets pour la récupération des matières premières.

Un des grands programmes à développer est celui du captage de l'énergie solaire, soit directement par les capteurs solaires, soit indirectement par la biomasse ou par les énergies dérivées : vent, pluie, courants marins, énergie thermique des mers, *énergie marémotrice*...

Au sujet de cette dernière énergie, on se plaint de la rareté des emplacements favorables. Ne pourrait-on créer des batteries de sites dans les zones qui se prêtent à cette technique par leur topographie, leur densité de population, l'ampleur des marées ? La constitution de réservoirs de grande capacité en bordure de mer par terrassement traditionnel serait probablement trop coûteuse ; mais le terrassement à l'explosif nucléaire, déjà utilisé à plusieurs reprises, notamment par les Russes en 1972 pour la liaison Petchora-Volga, permettrait de réaliser à bon compte, et en peu de temps, les excavations nécessaires à l'emmagasinage de l'eau de mer. Cela constituerait une utilisation de l'énergie nucléaire, plus économique et moins dangereuse, parce que temporaire, que dans les centrales à combustible nucléaire.

3) D'un point de vue plus général, enfin, dans tous les domaines, il faudrait faire appel largement aux *techniques biochimiques* qui sont susceptibles de fournir, à moindre coût, la plupart des éléments dont l'homme a besoin. Suivant les microbiologistes, il existe dans la nature, pour toute réaction chimique, la bactérie spécifique qu'il suffit de trouver et de cultiver.

Les microorganismes, notamment les bactéries, travaillent lentement, mais leur prolifération est fantastique et ils travaillent sur des surfaces et des volumes considérables. Toutefois, il y a un risque : il faut s'assurer que de tels organismes ne sont pas nuisibles pour l'Homme, soit par leur nombre, soit par les résidus de leur métabolisme. La pullulation incontrôlée de microorganismes pourrait être plus néfaste que la radioactivité qui suscite tant d'appréhensions.

Enfin, la coordination des travaux et des recherches permettrait de *normaliser les implantations* d'industries, éventuellement à travers les frontières existantes et d'éviter l'anarchie parfois constatée à l'heure actuelle.

Pour ne prendre qu'un exemple, en France, il peut sembler aberrant d'extraire à grand renfort d'énergie et d'eau potable (il faut un mètre cube d'eau pour dissoudre 300 kilos de sel gemme) les quatre millions de tonnes représentant la production annuelle de sel et, dans le même temps, de rejeter au Rhin huit millions de tonnes de sel sous forme de saumures résultant du lessivage de treize millions de tonnes de minerai de potasse. Le bon sens suggère que les saliniers soient installés, d'office s'il le faut, à l'aval des fabricants de potasse pour utiliser les eaux résiduaires abandonnées par ces derniers.

CONCLUSION

Tout cela est sans doute utopique pour plusieurs raisons : d'une part, la tâche de l'organisme gestionnaire serait colossale, nécessitant des équipes pluridisciplinaires très lourdes, qui devraient être universellement acceptées pour leur compétence et leur impartialité ; d'autre part, les détenteurs actuels et futurs, sous tou-

tes les latitudes, devraient manifester un désintéressement et une loyauté auxquels nous ne sommes guère accoutumés.

Programme utopique surtout parce qu'il suppose une révision complète de nos conceptions philosophiques et morales et de nos habitudes séculaires... pour tout dire une nouvelle ETHIQUE fondée sur l'HOMME ou mieux, sur la VIE.

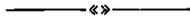
Quelques orientations dans ce sens : nouvelles conceptions sur la Vie sur Terre ; sur l'origine et la destinée de l'Homme, sur la place et le rôle de l'Homme sur Terre et sur ses prétendus droits (on ne parle jamais de devoirs), sur le racisme et sur la démographie, sur le rôle de l'argent... ; nouvelles conceptions aussi sur l'utilisation des richesses naturelles : économie et recyclage plutôt que consommation ; nouvelles conceptions enfin sur la rentabilité : à la rentabilité « Finances », il faut substituer une rentabilité

« Matières premières » et une rentabilité « Energie » ; (dans ce sens, les énergies entretenues devraient nous apporter quelque espoir).

Le slogan célèbre « Halte à la croissance », lancé par le Club de Rome en 1972, est sans doute la première tentative de redressement, sévèrement critiquée par les économistes de la « Consommation ». Il faut l'entendre dans tous les sens et à tous les niveaux : de l'individu à la société capitaliste, de la tribu aux grandes nations.

Devant ce problème, quelle attitude adopter : Optimisme ou Pessimisme ? Pour le géologue, qui en a vu d'autres depuis 5 milliards d'années, il n'est pas interdit d'être Optimiste.

Remerciements. — Je remercie vivement M. Chamley des indications et des conseils qu'il a bien voulu me donner au cours de conversations amicales.



Sont en vente au Siège de la Société :

MEMOIRES (*)

Tome I, n° 1. - Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétaé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p.	336,00 F.
n° 2. - P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pensylvanie</i> , 1882, 178 p.	252,00 F.
n° 3. - R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p.	36,00 F.
Tome IV, n° 1. - J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Verneuilli</i> , 1894, 63 p., 7 pl.	90,00 F.
Tome VI, n° 1. - P. BERTRAND, <i>Etude du stipe de l'Adelophyton jutleri</i> B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl. ..	85,00 F.
n° 2. - J. GOSSELET, Ch. BARROIS, M. LERICHE, A. CREPIN, P. PRUVOST, G. DUBOIS, <i>Faune siluro-dévonienne de Liévin</i> , 1912-1920. (Fasc. 1 épuisé). Fasc. 2	336,00 F.
n° 3. - V. COMMONT, <i>Saint-Acheul et Montières : Notes de Géologie, de Paléontologie et de Préhistoire</i> , 1909, 68 p., 3 pl.	156,00 F.
Tome VII, n° 1. — P. BERTRAND, <i>Etude des Stipes d'Asterochloena laxa</i> Stenzel, 1911, 72 p., 6 pl.	102,00 F.
Tome VIII, n° 2. — Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria. Observations géologiques et hydrologiques sur le plateau et la falaise au Sud de Boulogne-sur-Mer</i> , 1929, 50 p., 5 pl.	120,00 F.
Tome IX, n° 1. - G. DUBAR, <i>Etude sur le Lias des Pyrénées françaises</i> , 1925, 332 p., 7 pl.	432,00 F.
n° 2. - Dom Grégoire FOURNIER et P. PRUVOST, <i>Description des poissons élasmodontes du marbre noir de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl.	96,00 F.
Tome X, n° 2. - J.W. LAVERDIERE, <i>Contribution à l'étude des terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl.	180,00 F.
Tome XII. — D. LE MAITRE, <i>Etude sur la Faune des Calcaires dévoniens du Bassin d'Ancenis</i> , 1934, 263 p., 18 pl.	336,00 F.
Tome XIII. — P. BRICHE, P. DANZE-CORSIN et J.P. LAVEINE, <i>Flore infraliasique du Boulonnais (Macro- et Microflore)</i> , 1963, 145 p., 11 pl.	252,00 F.
Tome XIV. — G. WATERLOT, <i>Les Gigantostacés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl.	84,00 F.
Tome XV. — J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p.	180,00 F.

FASCICULES SPÉCIAUX (*)

« Géologie du Nord de la France » (T. LXXXIX, fasc. 1)	85,00 F.
« Centenaire de la S.G.N. » (T. XC, fasc. 4)	100,00 F.
« Rupture des roches et massifs rocheux » (T. XCV, fasc. 3)	70,00 F.
« Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale » (T. XCVI, fasc. 4 et T. XCVII fasc. 1) ..	200,00 F.
« Apports récents à la Géologie du Gondwana » (T. XCVII, fasc. 4)	150,00 F.
« Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens » (T. XCIX, fasc. 1)	150,00 F.

PUBLICATIONS (*)

Publication N° 1. — J. CHOROWICZ, <i>Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie)</i>	130,00 F.
Publication N° 2. — J. CHARVET, <i>Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Sarajevo (Yougoslavie)</i>	150,00 F.
Publication N° 3. — J. ANGELIER, <i>Néotectonique de l'arc égéen</i>	140,00 F.
Publication N° 4. — J.J. FLEURY, <i>Les zones de Gavrovo-Tripolitza et du Pinde-Olonos (Grèce continentale et Péloponnèse du Nord). Evolution d'une plate-forme et d'un bassin dans leur cadre alpin</i>	175,00 F.
Publication N° 5. — M. COUSIN, <i>Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie</i>	175,00 F.

<i>Esquisse géologique du Nord de la France</i> , par J. GOSSELET, Fascicule IV (Terrains quaternaires)	29,00 F.
<i>Ecorché géologique infra-mésozoïque</i> (extrait de « Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France », présentée par C.F.P.(M), COPESEP et S.N.P.A.)	50,00 F.

SERIE DOCUMENTATION (Pochettes de 6 Diapositives avec notice) (*)

Série I. — Paysages du Nord de la France au cours des temps géologiques	30,00 F.
Série II. — Aperçu sur les microfossiles de la craie	30,00 F.
Série III. — Les Nannofossiles calcaires de la craie	30,00 F.
Série IV. — Pétrographie des Houilles	30,00 F.
Série V. — La flore houillère. 1° les plantes à feuilles de Fougères	30,00 F.
Série VI. — Les étapes de la Préhistoire	30,00 F.
Série VII. — Reconstitution de Vertébrés sans mâchoires (« Agnathes ») du Primaire	30,00 F.
Série VIII. — Le gisement paléolithique de Blache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). - 1) Les fouilles et le cadre stratigraphique	35,00 F.
Série IX. — Le gisement paléolithique de Blache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). - 2) Les vestiges humains, l'industrie lithique et la grande faune	35,00 F.

Les membres abonnés bénéficient d'une réduction de 20 % sur un exemplaire de chacune de ces publications.
Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.

SOMMAIRE

Tome CII

1982

2^{me} trimestre

	pages
J. LEPLAT. — Avant-Propos	51
A. LAUMONDAIS, A. MAURIN, J. PAUTRAT et L. THEPOT. — Technique de télédétection spatiale dans le Nord de la France	53
A. CHAPERON. — Technique Vibroseis dans le Nord de la France	57
J.P. COLBEAUX. — Interprétation tectonique du bassin houiller du Nord de la France	61
G. VAROQUEAUX. — Exploitation d'un panneau aux H.B.N.P.C. Prévisions et réalités	65
M. DUPONT (dossier présenté au nom du G.E.G.S.). — La gazéification souterraine du charbon ..	73
P. SOLETY et J. LEPLAT. — La gazéification souterraine du charbon. Les expérimentations de Bruay-en-Artois. Le cadre géologique	81
A. DELMER. — Recherches géothermiques en Belgique	87
Ph. MAGET. — Les ressources géothermiques en France	89
J.M. CHARLET, Ch. DUPUIS, Ph. LAIR et Y. QUINIF. — Dosage de l'uranium dans les phosphates sédimentaires par Spectrométrie gamma in situ ; essais préliminaires dans les craies phosphatées du Bassin de Mons (région de Cipluy)	93
J.P. COLBEAUX et J. LEPLAT. — Apports de l'exploitation du charbon et des matériaux de construction à la connaissance de la structure du Massif primaire du Boulonnais	103
J.Y. AUSSEUR et J.P. SAUTY. — Exploitation énergétique des aquifères	111
J. BECKELYNCK. — Récupération d'énergie dans les décharges : une solution rentable aux problèmes d'environnement	113
A. BONTE. — A qui la Terre ?	115

© 1983 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

Toute reproduction, même partielle de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteur.

Imprimé en France (Printed in France)