



HAL
open science

Perspectives françaises pour l'exploitation des schistes bitumeux

Bernard Dupraz, Teresina Martinet

► **To cite this version:**

Bernard Dupraz, Teresina Martinet. Perspectives françaises pour l'exploitation des schistes bitumeux. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1980. hal-01909928

HAL Id: hal-01909928

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909928>

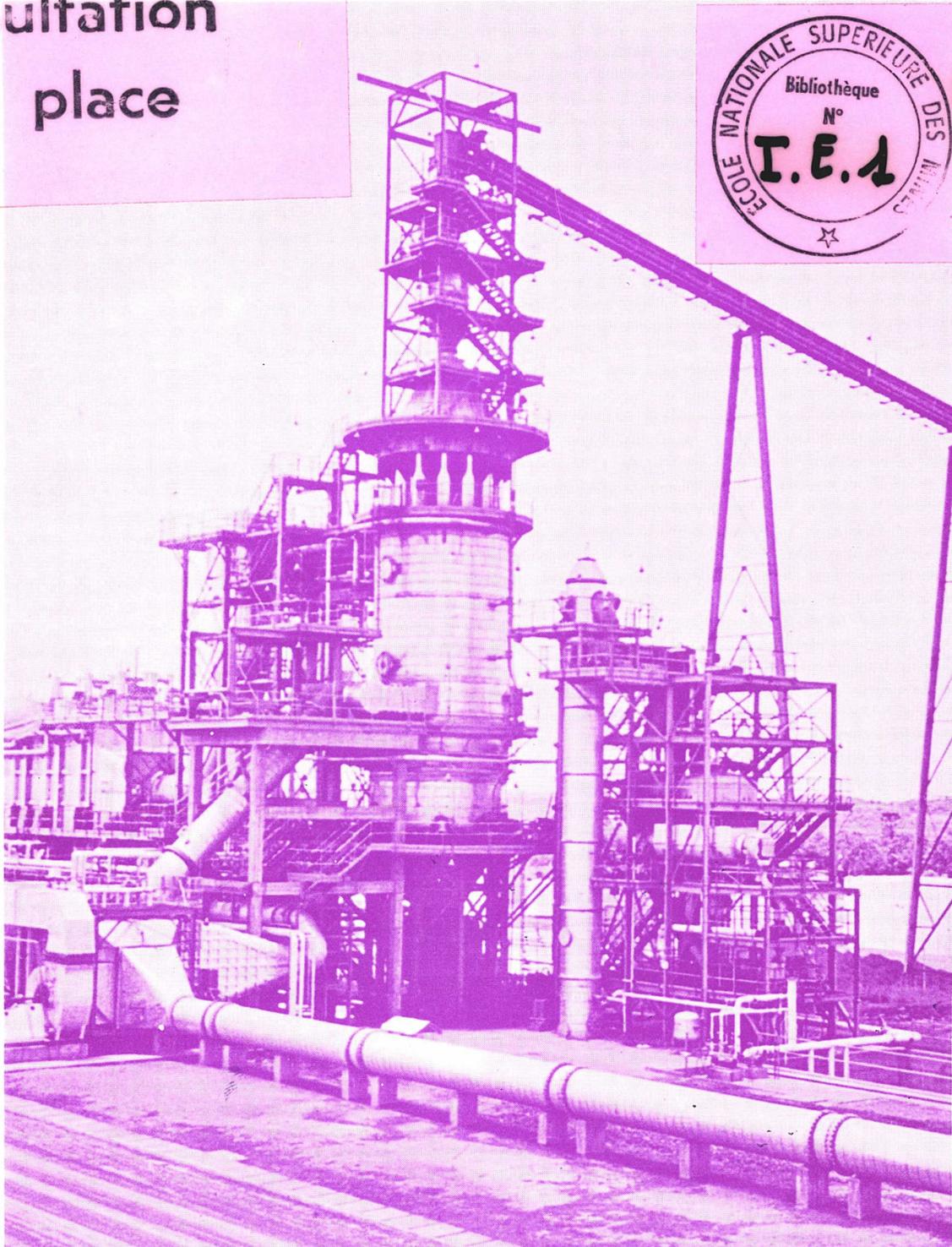
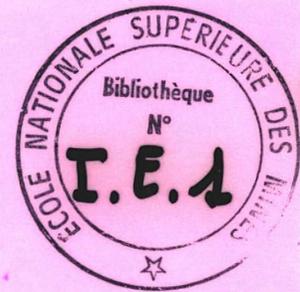
Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PERSPECTIVES FRANÇAISES POUR L'EXPLOITATION DES SCHISTES BITUMINEUX

Consultation
sur place



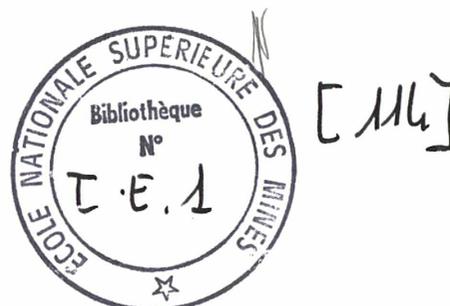
B. DUPRAZ

T. MARTINET

JUIN 1980

PERSPECTIVES FRANCAISES POUR
L'EXPLOITATION DES
SCHISTES BITUMINEUX

**Consultation
sur place**



B. DUPRAZ
[BERNARD]

T. MARTINET
[Teresina]

Juin 1980

L'étude suivante a été réalisée dans le cadre des dossiers longs effectués par les ingénieurs élèves des Corps Techniques au cours de leur 3ème année de formation à l'Ecole des Mines de Paris.

Monsieur Jean-Pierre Lamoure, Chef du Service Prospection-Production à la Direction des Hydrocarbures, a bien voulu nous guider dans cette étude et nous faire participer à la réflexion conduite par le Groupe d'Etude des Roches Bitumineuses (GERB). Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance.

Nous remercions également le personnel de la DHYCA et du Service de Conservation des Gisements d'Hydrocarbures pour son aide précieuse, ainsi que les représentants de CDF de la CFP, de SNEA(P), de l'IFP et plus particulièrement du BRGM pour les conseils et appuis qu'ils nous ont apportés.

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
Résumé - Conclusion	1
Introduction	3
I - Les schistes bitumineux - Généralités	4
I-1 - Nature et origine	6
I-2 - Réserves mondiales	7
I-3 - Contexte énergétique	10
II - Les filières technologiques	13
II-1 - La valorisation in situ	13
II-2 - La valorisation ex situ	16
II-3 - Les réalisations et projets industriels	19
III - Eléments de réflexion pour une stratégie française	23
III-1 - Historique	23
III-2 - Réserves nationales	28
III-3 - Bilan énergétique	30
III-4 - Aspects économiques	32
III-5 - L'Environnement	35
IV - Propositions	42
IV-1 - Inventaire	42
IV-2 - Choix des filières nationales	43
IV-3 - Coopération avec les pays étrangers	44
Annexe 1 - Principaux procédés de pyrolyse	
Tableaux	
Figures	
Annexe 2 - L'exploitation des schistes bitumineux de Sao Mateus do Sul	

RESUME - CONCLUSION

Les schistes bitumineux évoquent tout un passé où à l'âge préindustriel et en période de pénurie, on réussissait à faire suinter un peu d'huile d'une roche sombre.

Ce livre poussiéreux est-il le dossier maudit périodiquement réouvert, ou bien la presse aurait-elle raison en affirmant comme elle le fait depuis plusieurs mois: "les schistes bitumineux pas plus chers que le brut" ?

Face à la situation de pénurie en pétrole conventionnel qui semble inévitable à brève échéance et l'inquiétude qu'elle engendre, quel rôle attribuera la technique aux schistes ? Si l'innovation est la "réalisation de l'improbable", l'exploitation des schistes peut-elle en être une illustration ?

D'ores et déjà les réserves potentielles des schistes sont considérables (500 milliards de tonnes d'huile en place) et leur répartition sur le globe est susceptible de modifier quelque peu le contexte géopolitique de l'énergie.

En ce qui concerne les filières, la voie ex-situ qui permet d'exploiter des réserves, certes limitées, a connu de notables améliorations et s'avère aujourd'hui prête dans certains cas à un développement industriel. La voie in-situ qui est séduisante dans la mesure où elle donne accès à plus de réserves et préserve davantage l'environnement est encore au stade de la recherche. Par ailleurs la voie semi in-situ permet de nourrir de nouveaux espoirs.

La naissance de nombreux projets industriels notamment aux Etats-Unis, au Brésil, au Maroc, montre malgré les obstacles rencontrés le regain d'intérêt que suscite l'exploitation des schistes bitumineux.

En France le groupe d'étude des roches bitumineuses (GERB) a mené de 1974 à 1978 divers travaux visant à déterminer le potentiel en hydrocarbures des schistes, à étudier des techniques de valorisation et à préparer l'étape industrielle.

Les réserves françaises se composent d'une formation étendue (schistes du Toarcien) mais pauvre et de quelques gisements plus riches mais limités.

Malgré la pauvreté des schistes du Toarcien, une optimisation des techniques de valorisation permettrait de limiter à 30 % le taux d'autoconsommation.

Sur le plan économique la voie électrique ne semble pas attrayante. La voie à huile, sous certaines conditions, est déjà intéressante.

Cette industrie pose cependant de sérieux problèmes d'environnement. D'aucuns parlent d'hystérie aux Etats-Unis, mais celle-ci peut être raisonnablement atténuée si l'on considère les solutions paisibles qui ont été trouvées pour l'exploitation des lignites d'Allemagne.

Dans ces conditions il semble bon de poursuivre les travaux dans les directions suivantes :

- Inventaire des réserves nationales
- Choix et mise au point de filières adaptées à nos ressources, à nos besoins et à nos contraintes, notamment par la réalisation de pilotes.
- Coopération avec des pays mieux pourvus dans la perspective du "contrôle" d'une production d'huile et de l'exportation d'une technologie.

I N T R O D U C T I O N

Depuis plus de cinquante ans on prédit régulièrement aux schistes bitumineux un développement industriel dans les dix années suivantes, or leur exploitation a au mieux eu tendance à stagner. Lors de la crise énergétique de 1973 ces prévisions ont connu un vif regain, or le coût estimé de l'huile de schiste a suivi ces dernières années la même courbe que le prix du pétrole : au début de 1979 la production d'huile à partir de schistes bitumineux était toujours sur le point d'être rentable. Face aux interrogations suscitées par cette situation, les nouvelles hausses de 1979-80 marquent-elles une rupture décisive pour les schistes bitumineux ?

Après un examen du contexte général et des filières technologiques, l'étude suivante apporte des éléments de réflexion sur quelques aspects particuliers qui ont conduit à émettre des propositions.

I - LES SCHISTES BITUMINEUX - GENERALITES *

Les transformations de la matière vivante en énergie fossile sont nombreuses et mal connues.

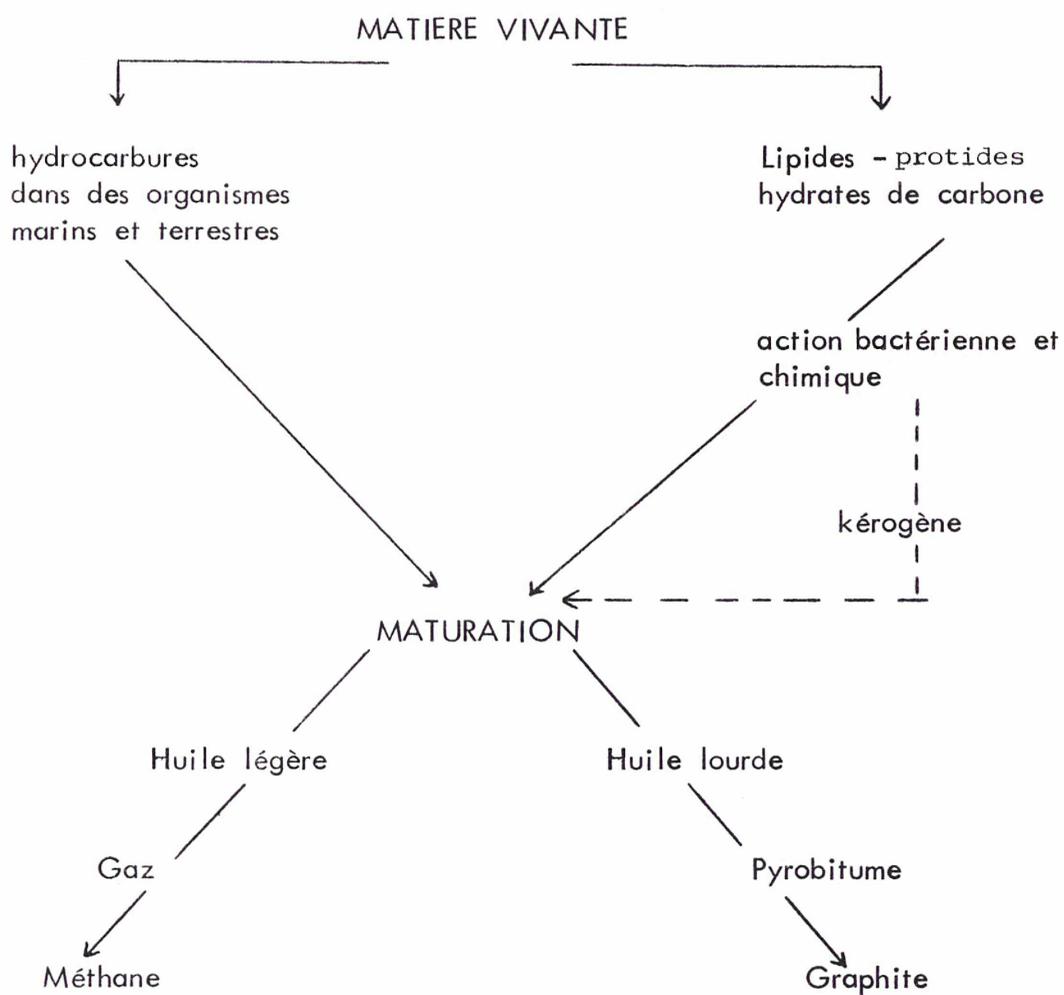
Elles peuvent conduire à un pétrole brut ou à un charbon et à un stade moins avancé au kérogène. Le schéma de la page suivante donne une idée de ces diverses conversions.

Substance organique complexe, le kérogène est insoluble dans les solvants habituels, au moins à 95 %, mais peut s'il est chauffé vers 500°C être pyrolysé pour donner naissance à une huile visqueuse comparable à certains bruts pétroliers.

Les schistes bitumineux sont des roches sédimentaires à grains fins présentant souvent une schistosité et contenant du kérogène. Leur dénomination est donc usurpée dans la mesure où il ne contiennent en aucun cas du bitume.

* Pour des données générales sur les schistes bitumineux cette étude a notamment utilisé le document de J. Burger "L'exploitation des pyroschistes ou schistes bitumineux, données générales et perspectives d'avenir "Revue de l'IFP Mai-Juin 1973.

ORIGINE DES HYDROCARBURES



1 - 1 Nature et origine des schistes bitumineux

L'intérêt des schistes bitumineux est essentiellement énergétique bien que la roche elle-même contienne souvent des matières minérales utiles que l'on peut penser à valoriser.

Le procédé Fischerde pyrogénéation permet d'extraire de 50 à 60 % du poids de la matière organique contenue dans la roche traitée, sous forme d'huile. Or beaucoup de schistes contiennent du kérogène. En fait, on a l'habitude de parler de schistes bitumineux lorsque le rendement Fischer en huile est au moins de 40 l/tonne. La figure 1 indique comment cette forme d'énergie fossile se place par rapport aux autres.

D'origine lacustre ou marine ces schistes se sont formés par le dépôt lent sous atmosphère non oxydante de sédiments organiques, pour le kérogène, et inorganiques, pour la matrice rocheuse, avec une contribution bactérienne qui semble maintenant importante. Des bactéries et des algues fossiles de 3 milliards d'années ont été retrouvées dans certains dépôts, comme ceux des schistes précambriens du Soudan.

Mais si varié que puisse être le kérogène, il présente une constante : cette substance est formée de composés à haut poids moléculaire contenant principalement du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, du soufre, de l'azote. On remarque la pauvreté en hydrogène comme le montre le tableau ci-dessous. On trouve surtout des composés hétérocycles à plus ou moins longues chaînes alkyles associés à des cycles saturés et aromatiques.

Matériau	Composition élémentaire (% poids)				
	C	H	S	N	O
Gaz naturel	76	23	0,2	0,2	0,3
Pétrole	84	13	2	0,5	0,5
Bitume	83	10	4	1	2
Kérogène	79	6	5	2	8

Composition chimique élémentaire Gaz Naturel, Pétrole
Bitume, Kérogène.

Quant à la matrice minérale, elle contient du quartz, des silicates, de la pyrite, de la marcassite... Certains minéraux s'y trouvent avec une teneur suffisante pour qu'il ne soit pas absurde de penser les extraire. (C'est le cas pour les schistes du Colorado qui contiennent plus de bauxite que les réserves des Etats-Unis).

.../...

Ainsi les schistes bitumineux, qui sont classés parmi les schistes argileux, se présentent sous forme d'une roche finement cristallisée, plus ou moins feuilletée (schistes "papiers" brésiliens ou schistes "cartons" du Toarcien français) de couleur plutôt sombre, surtout quand ils ne sont pas oxydés.

La conversion biochimique et dynamique de la matière vivante a donné lieu à cette énergie fossile dont on saisira l'importance, ne serait-ce qu'en considérant qu'il y a 1000 fois plus de carbone organique sur terre contenu dans le kérogène que dans le charbon.

Certes ce chiffre à lui seul n'a qu'une valeur très restreinte : les difficultés d'utilisation ne sont pas moindres, comme nous le verrons ultérieurement. D'autre part la localisation des ressources naturelles est un paramètre de plus en plus important d'une politique d'approvisionnement énergétique et un examen rapide des réserves mondiales de schistes bitumineux révélera qu'une fois de plus la nature n'a pas eu pour cette matière le souci d'un partage équilibré.

1 - 2 Réserves mondiales

Si peu de pays sont complètement dépourvus de schistes bitumineux (ne serait ce que parce que beaucoup de roches sédimentaires sont des schistes et qu'une partie non négligeable contient plus de 5 % de matière organique), ils sont très inégaux quant à la teneur, l'extension, et l'âge de leurs dépôts. Ceux-ci ont affecté de nombreuses formations puisqu'on les retrouve du paléozoïque au tertiaire comme l'indique le tableau suivant :

Age des dépôts de schistes bitumineux

NOM	AGE	PAYS
Um-Barek	Crétacé	Israël
Frontier	Crétacé	Etats-Unis (Wyoming)
Kimméridgien	Jurassique	Angleterre
Ermolo	Carbonifère	Afrique du sud
Saint Hilaire	Carbonifère	France
Autun	Carbonifère	France
Cartons du Toarcien	Lias	France
Lothian	Lias	Ecosse
Albert Mines	Mississipian	Canada

En ce qui concerne les quantités en place plusieurs remarques s'imposent.

Nous avons reporté dans le tableau 1 les quantités d'huile de schistes récupérables par essai Fischer dans les différents pays, ainsi que la teneur des gisements. N'ont été pris en compte que les schistes bitumineux proprement dits, (rendement Fischer supérieur à 40 l/t).

Cependant les chiffres indiqués, relatifs à des réserves potentielles, ne sont que des estimations approchées. En effet les dépôts de schistes bitumineux sont souvent mal connus et donc pas très bien délimités, bien qu'un effort de recherche ait été fait ces dernières années.

Ces précautions étant prises, la disparité en teneur et en quantité apparaît nettement dans le tableau 1.

En particulier les schistes français du Toarcien se trouvent être parmi les plus pauvres, puisqu'ils ont presque la teneur limite de l'appellation "schistes bitumineux" avec 45 l/t. Or si la teneur est un paramètre capital pour la faisabilité économique de toute exploitation minière, elle intervient ici fondamentalement dans le bilan énergétique de l'opération.

En effet, si l'on ne tient pas compte des divers procédés de récupération de chaleur au cours de la pyrolyse, il faut de l'ordre de 250 cal/g pour porter les schistes à 500°C, ce qui est équivalent à une teneur de la roche en kérogène de 2,5 % de son poids. (soit environ 25 l/tonne de schistes).

On considère que les schistes bitumineux sont riches à partir de 100 l/t. On les trouve essentiellement en Australie, Afrique du Sud, Estonie et aux Etats-Unis.

Ces derniers recèlent à eux seuls les deux-tiers des réserves mondiales connues qui s'élèvent à 530 milliards de m³ d'huile en place. Parmi le tiers restant plus de la moitié se trouve dans le sous sol brésilien. Ainsi le Brésil et les Etats-Unis concentrent 90 % des réserves mondiales de schistes bitumineux. Cette constatation vaut sans doute la peine qu'on s'y arrête.

L'essentiel des gisements américains se trouve dans les trois états du Colorado, Utah et Wyoming. Parmi eux le gisement situé dans le bassin de Piceanase Creek, dans l'ouest du Colorado est certainement le plus grand du monde. D'âge tertiaire, avec une épaisseur atteignant 600 m et une teneur moyenne supérieure à 100 l/t, il renfermerait une centaine de milliards de tonnes d'huile.

L'autre gisement géant est situé au Brésil dans l'état du Parana et Rio Grande do Sul. C'est la formation de l'Irati, d'âge permien. La puissance est ici de 3 à 10 m, la teneur de 70 l/t, et les réserves à présent exploitables sont évaluées à 320 Mtep, d'après les dernières estimations, pour une quantité potentielle de 124 milliards de tonnes.

.../...

Ces chiffres cependant ne représentent que des quantités théoriques. Compte tenu des teneurs et des caractéristiques géomorphologiques des gisements les quantités actuellement techniquement récupérables sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Celles-ci sont bien sûr susceptibles d'être modifiées dans l'avenir.

Source O.N.U.

Continent	Ressources récupérables dans les conditions actuelles (10 ⁹ t) (hors monde communiste)
Afrique	1,4
Asie	3,3
Europe	4,1
Amérique du Nord	11,0
Amérique du Sud	6,8

On s'aperçoit que le continent américain reste bien sûr prépondérant mais que la part de l'Europe augmente sensiblement. En effet, alors que les réserves potentielles de l'Europe (constituées de nombreux gisements dispersés et d'un "Géant" en Sicile) représentent à peu près 1,2 % des réserves mondiales, ses réserves récupérables sont de l'ordre de 15 %. C'est une donnée plus significative si l'on pense à une exploitation industrielle à moyen terme.

En effet la technique actuellement au point semble être l'ex-situ alors que de nombreuses réserves sont plutôt susceptibles d'une exploitation in-situ. (Cf. chapitre II)

A ce sujet il est frappant de constater que seuls deux pays étaient passés au stade industriel jusqu'à présent : l'URSS et la Chine. La décision du Brésil, sur laquelle nous reviendrons, d'avoir une installation produisant 2,2 millions tep/an est récente.

Les raisons techniques ne suffisent pas à expliquer cette situation où il est évident que les motifs politiques sont très importants.

Depuis quelques temps déjà on danse une valse hésitation au sujet des schistes bitumineux. Représentent-ils une voie royale pour le futur, bien que l'histoire énergétique les ait jusqu'à présent boudés ?

.../...

I - 3 Contexte énergétique

La situation énergétique mondiale suscite actuellement de nombreuses analyses dont nous n'avons pas la prétention de faire ici une synthèse.

Mais il nous paraît nécessaire, pour plus de clarté, de situer la production d'huile à partir de schiste bitumineux dans son contexte historique.

L'opération de pyrolyse n'est pas une découverte récente. Des fours à bois existaient dès 4000 ans Av. J.C., pour la production de charbon de bois et l'on utilisait parfois le pyroligneux.

Le principe de pyrolyse était bien connu mais la technique de traitement des schistes pour l'obtention d'une huile ne fut acquise que plus tard. Le premier brevet date de 1694 et leur exploitation a débuté un peu partout au 19ème siècle, en 1838 pour la France. Des installations furent créées à la même époque au Canada et aux Etats-Unis, précédant de justesse le forage du premier puits de pétrole.

De nombreux pays se sont alors lancés dans la fabrication d'huile à partir de schistes. Cette industrie a connu un essor pendant la deuxième guerre mondiale, après quoi elle a été abandonnée (Cf. fig 2), le pétrole présentant plusieurs attraits en particulier celui d'un prix très faible. L'exemple d'Autun en France, où la mine a été fermée en 1957, est caractéristique. Seuls la Chine et l'URSS ont continué à exploiter leurs schistes d'une manière industrielle ; récemment le Brésil, un pays en voie de rapide développement, vient de s'y décider.

Depuis l'inquiétude de pénurie qui règne dans les pays consommateurs de pétrole, de nombreuses compagnies pétrolières se sont mises à étudier sérieusement des techniques économiquement viables pour produire l'huile de schiste. En particulier les Etats-Unis ont expérimenté beaucoup de pilotes.

Mais est-il raisonnable de penser que l'huile de schiste sera le pétrole de demain ?

Quelques constatations simples permettront de situer la place des diverses énergies dans le monde d'aujourd'hui.

Le pétrole a pris une place considérable dans l'approvisionnement énergétique mondial, puisqu'en 1978 il représentait 54 % de la consommation.

Or, comme l'indique la figure 3, les réserves de pétrole dans le monde non communiste sont nettement en baisse depuis 1968. Cela provient essentiellement des gisements géants que l'on connaît relativement bien. Néanmoins ces réserves sont fonction du prix de l'huile et augmenteront avec celui-ci, notamment grâce à un effort accru d'exploration.

De plus en plus l'industrie pétrolière aura à faire à de petits gisements qui seront par ailleurs plus difficiles à exploiter (l'offshore en est un exemple). Ces deux motifs techniques contribuent sans nul doute à l'augmentation du prix du pétrole.

L'industrie pétrolière a une autre caractéristique importante : il est classique maintenant de parler de déséquilibres pétroliers mondiaux. La plupart des grands pays consommateurs ne sont pas producteurs. 80 % des réserves prouvées de pétrole connues du monde non communiste se trouvent concentrées dans les pays de l'O.P.E.P. . Ceux-ci tendent de plus en plus à avoir une politique de conservation des gisements afin de ne pas épuiser trop rapidement une ressource vitale. Leur production qui s'élevait à 1,6 GTep en 1979 ne devrait pas dépasser 1,7 GTep en l'an 2000. La production de pétrole hors OPEP passerait de 1 GTep en 1978 à 1,6 GTep.

La nature concentrée des réserves pétrolières semble se retrouver aussi pour les réserves de bruts lourds (huile lourdes et bitumes). Au stade actuel de la connaissance, deux pays, le Canada et le Venezuela, renferment 86 % des ressources mondiales en place qu'on évalue approximativement à 320 milliards de tonnes. On estime que le niveau de récupération mondiale ne devrait pas dépasser 10 Gt dont la moitié proviendrait du Canada.

Les réserves de gaz naturel semblent plus diluées. L'URSS en contient cependant 35 % sur un total de 70 GTep.

Si les réserves de charbon, à qui l'on prédit un brillant retour, sont 5 à 6 fois plus élevées que celles d'hydrocarbures (liquides et gazeux), trois pays possèdent 80 % des ressources : les Etats-Unis, l'URSS et la Chine. Mais beaucoup de pays contiennent des quantités non négligeables par rapport à ce que pourrait être la production de charbon.

Quant aux ressources en uranium estimées à 5 Mt dont la moitié raisonnablement assurées, elles se trouvent être essentiellement situées aux Etats-Unis, au Canada et en Afrique Australe.

La figure 4 et le tableau 2 résument ces différentes données. Nous avons également indiqué le nombre d'années de réserve au rythme de la consommation en 1979. On peut remarquer que les énergies hydroélectriques et diverses (solaire, géothermie ...) n'augmenteront que peu.

Il suffit de voir la structure des réserves mondiales d'énergies et la part respective de chacune d'elle dans la consommation en 1978 (les chiffres de 1979 sont encore provisoires) pour comprendre les difficultés qui ne manqueront pas de se produire.

A l'aspect quantitatif des besoins énergétiques, s'ajoute bien sûr l'aspect qualitatif et spécifique de chacun d'eux. Les délais de mise en œuvre qui varient de 5 à 10 ans à partir de la décision d'exploiter une source d'énergie à un endroit donné et l'inertie que présentent les structures de la consommation nécessitent des programmes à long terme. Sur une base de croissance économique faible, de l'ordre de 2,5 à 3 %, des hypothèses d'économie d'énergie, et compte tenu des investissements nécessaires à la mise en œuvre d'énergies nouvelles (cf figure 5), et des coûts de production (cf. figure 6) des prévisions ont pu être faites, comme celles d'Exxon, illustrées par la figure 7.

Le tableau ci-dessous montre quelle pourrait être l'évolution de la consommation énergétique mondiale. (Hors Chine et pays de l'Est).

Energie	Consommation annuelle (en %)		
	1978	1990	2000
Pétrole	54	45	37
Gaz	18	18	16
Charbon	18	20	24
Nucléaire	3	7	10
Energies renouvelables	7	8	9
Synthétiques	0	2	4
Total (MTep)	4 900	6 450	8 200

D'après EXXON, la part des combustibles synthétiques pourrait être de 2 % en 1990 et 4 % en 2000. La production de pétrole et de gaz à partir de charbon, sables et schistes bitumineux ou produits agricoles, pourrait augmenter considérablement en valeur absolue, atteignant 370 MT en 2000 dont 200 à 300 seraient produits aux Etats-Unis.

Au vu des projets actuellement prêts (cf. chapitre suivant) la production d'huile à partir de schistes bitumineux pourrait atteindre en 1990, 15 MTep, soit 0,2 % de la consommation énergétique mondiale (Chine et pays de l'Est exclus).

Or, comme le montre la figure 5, les investissements nécessaires sont de l'ordre de 3000 F/tep/an pour la production d'huile de schiste, équivalent à ceux du nucléaire, se situant entre les investissements pétroliers au charbonniers et ceux des énergies "nouvelles". C'est donc environ 40 milliards de francs qui pourraient être investis d'ici 1990 dans le monde non communiste pour l'exploitation des schistes bitumineux.

.../...

II - LES FILIERES TECHNOLOGIQUES (cf. tableau 3)

Bien que la substance minérale des schistes bitumineux puisse donner lieu à des utilisations dans l'industrie ou l'agriculture, c'est la matière organique contenue dans les pyroschistes que l'on cherche en priorité à valoriser, essentiellement pour son énergie.

Le traitement thermique est actuellement le seul moyen pratique pour effectuer cette transformation ; les recherches de processus d'extraction par solvants n'ont pas abouti et les biotechnologies bactériennes, si elles s'avéraient envisageables, relèveraient du futur lointain.

La valorisation du potentiel énergétique du schiste peut s'effectuer de trois grandes manières :

- 1 - par transformation de la matière organique en dérivés hydrocarbonés (huile, gaz, produits de base pour la pétrochimie). La pyrogénéation des schistes conduit aux environs de 500°C à une transformation de la matière organique par des processus proches du thermocracking. Un certain pourcentage est transformé en huile (de l'ordre de 50 à 60 %), un autre en gaz combustibles (de l'ordre de 10 %) et le reste constitue un dépôt de carbone résiduel dont l'énergie peut être utilisée pour fournir des calories nécessaires à la pyrolyse.
- 2 - par combustion totale de la matière organique afin de récupérer de la chaleur .
- 3 - par combustion partielle afin d'obtenir un gaz pauvre.

Sur le plan technologique, ces valorisations peuvent s'effectuer :

- ex situ, après extraction et broyage des schistes,
- in situ, c'est à dire au sein même de la couche avec ou sans intervention humaine au fond.

On étudiera donc successivement ces deux grandes voies avant d'examiner les réalisations ou projets industriels.

II - 1 L'in situ

Cette voie, pour séduisante qu'elle soit, n'est pas actuellement maîtrisée de façon satisfaisante et nécessitera encore de longs travaux de recherche avant de déboucher à l'échelle industrielle et commerciale. Cette filière a été envisagée de deux manières différentes :

- une méthode strictement in situ sans intervention humaine au fond.
- une méthode "semi-in situ", faisant appel à des techniques minières.

II - 1 - 1 - L'in situ stricto sensu

Ces méthodes consistent dans un premier temps à assurer une liaison entre deux puits d'un doublet. En effet, contrairement aux roches réservoirs des gisements pétroliers, les schistes n'ont pas une perméabilité naturelle suffisante pour permettre la circulation d'un fluide, on doit donc créer une fracture ou un réseau de fractures, réalisés en général par :

- fracturation hydraulique. Celle-ci est réalisée par un accroissement rapide de la pression de fluide dans le puits. La fracture peut être gardée ouverte par maintien de la pression ou par injection de matériaux granulaires.
- fracturation thermique : soit électrique par passage d'un courant de forte intensité entre deux électrodes, soit par micro-ondes.
- fracturation par explosifs.
- création d'une cheminée de schistes broyés par explosion nucléaire.
- forage d'un chenal horizontal dans la couche de schistes.

Bien entendu, plusieurs de ces méthodes peuvent être combinées.

Une fois établie cette liaison, on est alors en mesure d'initier les réactions de transformation qui peuvent être :

- une pyrolyse obtenue par injection de fluides chauds (vapeur surchauffée, gaz naturel chaud, ...).
- La combustion *in situ* d'une partie de la matière organique conduisant à la production d'huile ou de gaz, la chaleur emmagasinée pouvant être récupérée, après combustion, par injection d'eau dans la couche et récupération de chaleur.
- Le recours à des techniques nouvelles actuellement au stade exploratoire : méthodes électriques, utilisation de micro-ondes.

Au niveau de l'établissement de la liaison comme à celui de la pyrogénéation *in situ* les essais effectués dans les trente dernières années furent peu couronnés de succès et les recherches en cours ne semblent pas près d'aboutir à court terme :

Les essais de fracturation et de combustion de Sinclair Oil dans les années 1950 n'eurent pas de suite.

Equity Oil fit des essais de pyrogénéation par du gaz naturel chaud, qui ne connurent pas, bien que techniquement réussis, de développement commercial.

Shell semble avoir renoncé à son approche *in situ*.

Les projets de fracturation par explosion nucléaire ont été abandonnés en raison de difficultés techniques d'une part, de problèmes politiques et d'environnement d'autre part.

Le Bureau of Mines a poursuivi des essais de fracturation (hydraulique et/ou par explosifs) et de combustion in situ sur des schistes à très faible profondeur sans succès immédiats.

Néanmoins les recherches continuent parmi lesquelles on peut citer celles de Géokinetic Corp. et de Raythéon.

En conclusion, les difficultés techniques rencontrées, en particulier en ce qui concerne la création d'une perméabilité, rendent improbable une percée rapide de l'in situ stricto sensu.

II - 1 - 2 - Le semi-in situ

Cette méthode, appelée Garrett et développée surtout par la société Occidental Petroleum à la fin des années 1960, consiste en une pyrogénéation des schistes dans une chambre d'éboulement.

Le mode opératoire est schématiquement le suivant (cf. figure 8):

Dans un premier temps, des chambres sont creusées au toit et à la base de la couche de schiste et sont reliées par un puits. La part de matériau extrait est de l'ordre de 15 à 20 % du volume de la chambre de combustion. Des trous de mines sont alors forés suivant une géométrie appropriée et chargés d'explosifs en quantité étudiée pour produire la fragmentation désirée.

L'explosion crée ainsi une chambre d'éboulement qui peut faire fonction de réacteur souterrain. Le taux d'espace vide et la taille des blocs dans la chambre peuvent être partiellement pilotés par le volume initial extrait et la technique d'abattage. On procède alors à l'allumage au toit de la chambre où a lieu une injection d'air. On obtient ainsi la progression d'un front de combustion dans une chambre composée de 4 zones :

- une zone de cendres,
- une zone de combustion, dans laquelle le carbone résiduel est brûlé,
- une zone de pyrolyse, dans laquelle a lieu la transformation de la matière organique,
- une zone de condensation, dans laquelle les produits liquides et gazeux refroidissent et se déplacent vers la zone de production.

.../...

Enfin on récupère à la base de la chambre l'huile qui est pompée et le gaz qui peut être partiellement recyclé pour contrôler la teneur en oxygène du gaz injecté.

Occidental expérimenta cette méthode tout d'abord sur trois pilotes de petite taille (9 m x 9 m x 22 m) qui furent concluants : le taux de récupération fut de 60 à 65 % par rapport à l'essai Fischer, Occidental, devant ces résultats encourageants, passa à une échelle supérieure. Pour un premier pilote (chambre de 36 m x 36 m x 82 m), la fracturation fut plus difficile à réaliser que prévu mais on effectua néanmoins la pyrolyse qui produisit 30 000 barils. Malgré ce faible rendement, ce pilote constitua une certaine réussite. Deux autres pilotes connurent des difficultés (digitation du front de combustion et effondrement du toit de la chambre). Néanmoins Occidental poursuit les travaux et affirme être en mesure d'avoir un procédé au point à l'échelle industrielle d'ici 1985.

II - 2 - La valorisation ex situ

Cette voie consiste à extraire et à broyer les schistes puis à les valoriser soit par combustion directe en centrale thermique, soit par pyrogénéation.

L'extraction et le broyage n'appellent pas de commentaires spéciaux, sinon que les quantités de roche en jeu sont colossales ; la taille moyenne des unités commerciales en projet est de l'ordre de 100 000 t/j, soit très largement au-dessus de la plupart des mines actuelles. Ce gigantisme nécessite donc la mise au point de méthodes appropriées et la réalisation d'équipements et de matériels extrêmement puissants pour lesquels les investissements seront considérables.

II - 2 - 1 - La pyrolyse

La pyrolyse de la matière organique est effectuée dans des fours de pyrogénéation dans une atmosphère de composition contrôlée et à une température contrôlée.

Trois sources de chaleur sont possibles :

- la combustion du carbone résiduel après pyrolyse,
- la combustion du gaz issu de la pyrolyse,
- la récupération de la chaleur des schistes traités ou des cendres.

.../...

Bien entendu, on peut utiliser une combinaison de ces différentes sources.

Transférer cette quantité de chaleur à un taux acceptable nécessite le broyage du schiste afin d'obtenir un rapport surface de contact assez grand. Ce transfert de chaleur peut se faire de quatre masse manières :

- à travers une paroi,
- par contact avec les gaz de combustion dans le cas d'une combustion interne,
- par contact avec des gaz chauds recyclés,
- par contact avec des solides chauds.

Là aussi, ces différents modes de transfert peuvent être employés conjointement.

Dans le même temps qu'a lieu le transfert de chaleur, le système doit permettre l'évolution des gaz et de l'huile sans qu'ils restent trop longtemps dans une zone surchauffée et oxydante où peuvent se produire des réactions indésirables.

Enfin le système doit satisfaire au mieux certains critères :

- 1 - grande capacité de traitement afin de réduire le nombre d'unités parallèles.
- 2 - excellent rendement en huile (par rapport à l'essai Fischer).
- 3 - bonne efficacité thermique ; en particulier il est souhaitable que le carbone résiduel soit utilisé.
- 4 - fiabilité ; notamment en ce qui concerne l'utilisation des fines qui donnent parfois lieu à des colmatages.
- 5 - capacité à traiter des schistes de caractéristiques variables.
- 6 - impacts réduits sur l'environnement.

De nombreux procédés ont été mis au point dans le monde depuis plus d'un siècle. On ne s'intéressera ici qu'aux procédés les plus récents ou utilisés à l'échelle industrielle, classés en trois catégories suivant le mode de transfert thermique :

.../...

combustion interne	Combustion de gaz (U.S.A.) Paraho A (U.S.A.) Union Oil A (U.S.A.) Superior Oil (U.S.A.) Kiviter (U.R.S.S.) Fushun (Chine)
recyclage de gaz chauds	Paraho B (U.S.A.) Union Oil B (U.S.A.) Union Oil SGR (U.S.A.) Petrosix (Brésil) Superior Oil (U.S.A.)
circulation de solides chauds	Tosco II (U.S.A.) Lurgi - Ruhrgas (R.F.A.) Galoter (U.R.S.S.), parfois appelé UTT

Le tableau 4 rassemble pour la plupart des procédés examinés certaines données :

- mode de transfert de chaleur
- opérations pilotes (date et capacité)
- granulométrie
- rendement par rapport à l'essai Fischer ; bien entendu, ce rendement peut varier en fonction des schistes traités.

On trouvera en Annexe 1 un examen rapide de ces procédés.

Enfin, quel que soit le procédé de pyrolyse retenu, il est nécessaire de faire subir à l'huile obtenue un prétraitement ; en effet l'huile de schiste se caractérise généralement par sa richesse en soufre, en azote et en oxygène et par une teneur élevée en composés insaturés. Elle doit donc subir une hydrogénation préalable destinée à la stabiliser, désulfurer et dénitrer.

II - 2 - 2 - La pyrolyse - craquage

Une autre voie de valorisation de la matière organique consiste à la transformer en un gaz riche en composés éthyléniques destinés à l'industrie chimique. Cette transformation se fait en deux temps par :

- pyrolyse "classique" des schistes.

- puis craquage des produits obtenus dans un réacteur à haute température.

Cette voie n'a fait jusqu'à présent l'objet que d'études de laboratoire (cf. GERB II).

II - 2 - 3 - L'hydropyrogénéation

Une autre possibilité est de réaliser la pyrogénéation en présence d'hydrogène sous forte pression. Différentes expériences ont été menées dans cette voie, qui ont permis la production d'huile ou de gaz de synthèse ; mais cette filière est actuellement moins avancée que la pyrolyse simple et ne semble pas prête à déboucher rapidement sur le plan industriel.

II - 2 - 4 - La combustion directe

Une dernière valorisation des schistes est la combustion directe :

- soit pour fournir de l'énergie thermique à certaines industries,
- soit pour la production d'électricité.

Dans certains cas, les caractéristiques de ce combustible (faible pouvoir calorifique, richesse en matières minérales) rendent peu appropriée une combustion classique et s'accommoderaient mieux d'une combustion en lit fluidisé plus facile à maîtriser.

II - 3 - Les réalisations et projets industriels (cf tableau 5)

On effectuera un passage en revue pour quelques pays de l'état d'avancement des différentes techniques.

II - 3 - 1 - Etats-Unis

Bien que les Etats-Unis disposent de réserves considérables de schistes riches d'une part, d'une technologie avancée dans ce domaine d'autre part, des obstacles de diverses natures ont freiné et freinent encore le développement de l'industrie schistière.

En premier lieu la complexité et la rigueur du régime minier constituent un obstacle important. En effet, près de 80 % des schistes du Colorado de l'Utah et du Wyoming, notamment les plus riches en huile, sont la propriété fédérale et ce n'est qu'en 1974 que le Département de l'Intérieur mit aux enchères les six blocs suivants :

.../...

Colorado	C - a	Rio Blanco (Gulf + Sd. Indiana)
	C - b	Atlantic Richfield Ashland Shell Tosco
Utah	U - a	Sun Oil + Phillips Petroleum
	U - b	White River Shale Oil Corp. (Sun Oil + Phillips + Sohio)
Wyoming	W - a	non attribués
	W - b	

En second lieu les contraintes liées à la protection de l'environnement découragent les sociétés qui considèrent souvent irréalistes et coûteuses les normes exigées.

Enfin le régime fiscal des produits pétroliers aux Etats-Unis n'a pas toujours été considéré comme suffisamment attractif par les compagnies qui réclament un plan de l'énergie et des incitations fiscales leur permettent d'assumer un risque élevé dans un avenir économique incertain.

Dans ce contexte difficile différents projets ont néanmoins pris naissance. Ils sont cependant à examiner avec prudence dans la mesure où souvent dans le passé de tels projets ont été annoncés et abandonnés.

Projet Union Oil

Union Oil dispose d'un permis d'environ 80 km² contenant près de 300 millions de t d'huile récupérable sur lequel elle a annoncé le lancement d'une unité expérimentale ex situ de 9 000 b/j destiné à établir la faisabilité technique, économique et du point de vue de l'environnement de cette méthode. Cette unité de pyrolyse par le procédé Union Oil B après extraction souterraine réclamerait des investissements de l'ordre de 100 M\$. Si cette expérimentation s'avèrait positive, elle serait suivie du développement commercial d'une installation de 50 000 b/j. Il semble cependant qu'Union Oil fasse dépendre ses décisions de l'obtention de subventions fédérales.

Projet Colony

Arco (Atlantic Richfield) et Tosco, forts de l'expérience du pilote Tosco II de 1 000 t/j au sein de l'association Colony, ont un projet d'exploitation commerciale traitant 66 000 t/j et produisant 50 000 b/j. Les investissements nécessaires sont estimés à environ 1 300 M\$.

Projet Occidental

Occidental poursuit les essais sur son procédé semi-in situ, malgré les difficultés rencontrées lors du foudroyage. Par ailleurs, après le retrait de Tosco, Arco et Shell, Ashland a échangé l'entrée d'Occidental sur le bloc C - b contre son procédé semi-in situ. Un développement commercial est prévu sur ce bloc pour produire 50 000 b/j en 1985. Les investissements requis seraient de l'ordre de 900 M\$.

Projet Rio Blanco

L'association Rio Blanco, composée de Gulf et de Standard Oil of Indiana, est titulaire du bloc C - a qu'elle envisage d'exploiter par méthode semi-in situ. Dans un premier temps, Rio Blanco réalisera un programme d'expérimentation pour un montant de 100 M\$. Cette phase, qui permettrait de tester cinq chambres de combustion de tailles croissantes, devrait se terminer en 1981 et être suivie en cas de succès par le développement d'une unité commerciale. Celle-ci entrerait en production en 1987 et nécessiterait des investissements de plus de 1 000 M\$ pour une capacité de 50 000 b/j.

II - 3 - 2 - Brésil

Le Brésil, qui possède les plus importantes réserves mondiales après les Etats-Unis, a été amené, en raison de ses faibles ressources pétrolières à essayer assez tôt de développer ses schistes bitumineux. Après s'être concentrée à partir de 1957 sur les schistes de l'Irati, la SIX mit en service en 1972 une usine prototype de 2 000 t/j utilisant le procédé Petrosix.

Devant le succès de ce pilote et après évaluation économique, Pétrobras décida en 1977 de passer à l'échelle industrielle. L'unité industrielle, en cours de construction aura une capacité de 110 000 t/j pour une production finale de 45 000 b/j d'huile, de 500 t/j de GLP et 900 t/j de soufre ; le gaz combustible ainsi qu'une fraction de l'huile sera brûlé dans le four de recyclage des gaz chauds. L'exploitation à ciel ouvert concernera une surface de 65 km² en 30 ans. La construction se fera en deux phases : production de 1,2 Mtep/an en 1983 et de 2,5 Mtep en 1985. Le montant des investissements est estimé de 1 à 2 G \$.

II - 3 - 3 - U.R.S.S.

L'Union Soviétique dispose en Estonie et dans la région de Léninegrad de schistes extrêmement riches (plus de 200 l/t), qu'elle exploite industriellement depuis longtemps. La production s'est élevée en 1979 à 36 Mt. L'utilisation essentielle (71 %) est la production d'électricité dans deux centrales de 1 600 MW. La seconde valorisation (22 %) consiste en la production de matières premières pour l'industrie chimique (tensio-actifs, phénols, ...) par pyrogénéation à l'aide des procédés Kiviter et Galoter.

.../...

II - 3 - 4 - La Chine

La Chine exploite en Mandchourie le gisement de Fushun, dans lequel les schistes recouvrent du charbon : l'extraction est donc conjointe. Les schistes, valorisés sous forme d'huile, subissent une pyrogénéation dans des unités de petite taille utilisant un dérivé du procédé estonien Pintsch. Alors qu'elle représentait une part importante de la production chinoise d'hydrocarbures dans les années 1950, la production d'huile de schiste a diminué dans les années 1960 face à la concurrence du pétrole et s'élève actuellement à 300 000 t/an.

II - 3 - 5 - Le Maroc

Parmi les gisements de schistes que possède le Maroc, celui de Timahdit, avec des réserves de 2 à 5 milliards de tonnes de roche et une teneur de 100 à 120 l/t, pourrait faire l'objet d'une exploitation industrielle. Le Maroc semble étudier diverses voies de valorisation :

- la combustion directe. La construction d'une centrale thermique de 1000 MW est à l'étude en collaboration en particulier avec l'URSS.
- la pyrolyse ex situ. Le Maroc semble s'orienter vers des fours à combustion discontinue d'une capacité de 500 t.
- le semi-in situ. Un pilote est en cours de réalisation avec l'aide d'Occidental.

II - 3 - 6 - L'Australie

Selon certaines sources, divers projets sont à l'étude, en particulier la construction d'une unité expérimentale de 19 000 b/j mise en service en 1984 nécessitant un investissement de 330 M\$.

III - ELEMENTS DE REFLEXION POUR UNE STRATEGIE FRANCAISE

Les chapitres précédents ont pu montrer qu'à l'échelle mondiale les schistes bitumineux représentent une source importante d'hydrocarbures. Des exploitations se sont ouvertes dans de nombreux pays, mais presque toutes ont été fermées après la guerre. La France en particulier a démantelé sa dernière installation en 1957.

Nous allons voir dans un premier temps quelle a été l'évolution de l'activité schistière en France et l'attitude récente de la France dans ce domaine. Les études entreprises font intervenir des paramètres techniques comme les réserves, le bilan énergétique de l'opération, la rentabilité économique d'une exploitation et actuellement des considérations plus politiques et sociales telles que les problèmes d'environnement.

III - 1 La production d'huile de schiste en France et les études françaises

L'activité française dans le domaine des schistes bitumineux peut se diviser en trois grandes périodes.

- une période où les schistes furent exploités
- une période où l'on ne se préoccupe plus de cette industrie
- une période où l'on pense sérieusement à réexploiter les schistes bitumineux.

Une date importante pour cette industrie est bien sûr 1973.

III - 1 - De 1833 à 1957 : Historique de la production d'huile de schiste.

La France possède des quantités potentielles d'huile considérables grâce à ses gisements de schistes bitumineux, essentiellement situés dans le Toarcien, comme beaucoup de dépôts d'Europe occidentale (Allemagne - Luxembourg). Ce fait était bien connu dès le 19ème siècle.

Mais ce sont surtout dans des gîtes contenant des réserves limitées que les exploitations de schistes ont commencé à se développer au 19ème et au début du 20ème siècle.

Les études les plus anciennes sur la valorisation des schistes bitumineux remontent à 1833. La France fut la première à exploiter ses réserves, dans le bassin d'Autun.

En 1838 et 1840 est créée à Igornay l'usine industrielle de fabrication de l'huile et de raffinage à l'acide.

Mais l'activité schistière n'a pas été maintenue constante jusqu'au moment où la dernière mine (Autun) fut fermée en 1957 (cf. figure 9). L'exemple d'Autun est d'ailleurs caractéristique.

En 1861, dix concessions sont accordées avec une production de 170 t, qui atteindra la capacité de 6 700 t en 1865. Cette industrie sera ensuite ruinée par l'importation de pétrole. Une réorganisation a lieu et désormais ce sera la Société minière des schistes bitumineux qui exploitera les schistes sur une seule mine (la technique d'alors est bien sûr la pyrolyse ex-situ à partir d'une mine souterraine).

Un renouveau se produit à cause de la pénurie de pétrole pendant la guerre de 40-45, à la demande de l'Etat. Mais très vite les subventions mêmes deviennent insuffisantes et en 1957 la SMSB renonce à ses concessions.

D'autres exploitation ont fermé avant Autun : Séverac le Château (1940), St Hilaire (1948), Vagnas.

L'industrie des schistes a été ensuite noyée dans les flots de pétrole bon marché. Dans l'euphorie des années 60 et de cette énergie, on n'y pensait plus.

Le calme a duré jusqu'en 1973 où après la guerre du Kippour et l'augmentation brusque du prix des produits pétroliers, événements qui ont sérieusement ébranlé la croyance inconsciente en une énergie facile et éternelle, les schistes bitumineux ont été l'objet de nouveaux espoirs.

III - 1 - 2 Après 1973 : les études françaises

Cette préoccupation s'est, en ce qui nous concerne, tout d'abord concrétisée dans la naissance du groupement GERB (Groupe d'Etudes des Roches Bitumineuses). GERB a été créé dès la fin de 1973. Y participaient le BRGM, CDF, CFP, SNEA et l'IFP. Un premier programme a été entrepris, financé par le groupe, avec une aide de la DGRST. Ce fut GERB I.

GERB I : Les travaux ont duré jusqu'en 1975 et se sont terminés par la publication en septembre 75 du rapport GERB I. Le but était de déterminer le potentiel en hydrocarbures et en autres composés des roches bitumineuses françaises, d'étudier les teneurs et l'extrahilité de certains métaux, et de voir si les schistes présentaient un intérêt comme source de matériaux divers.

L'effort a essentiellement porté sur l'étude détaillée des schistes du Toarcien dans la bordure Est du Bassin Parisien, où quatre zones intéressantes ont pu être mises en évidence, ce qui a donné lieu à l'octroi de deux permis exclusifs de recherche. L'inventaire des autres gîtes français a surtout été bibliographique et certains ont pu être rejetés pour leur peu d'intérêt ou demandent des études complémentaires. Une étude économique simple a également été faite, ce qui a permis de déterminer le prix de revient de l'huile de schiste pour une exploitation ex situ avec les procédés Tosco II et Paraho. Une fourchette de 8,5 à 14,5 \$/bl a été trouvée et cette étude a conduit à rejeter le procédé Tosco consommateur d'huile vu la pauvreté relative des schistes du Toarcien (35 à 50 kg/t).

GERB avait donc abouti à l'octroi de 2 permis exclusifs de recherche ; il s'agit de "Nancy-Nord" (87 km²) et Fécocourt, au sud de Nancy (253 km²). Le premier programme s'est poursuivi par un deuxième dont les travaux ont surtout porté sur ces deux sites.

GERB II : Les études entreprises comprenaient une évaluation plus précise des réserves sur les permis considérés, des essais de pyrolyse en laboratoire et avec le procédé Lurgi, des essais de combustion des schistes en lit fluidisé, et des essais de laboratoire pour la combustion in situ. Enfin ces travaux devaient déboucher sur l'étude économique d'une exploitation produisant 1,5 Mtep/an (à partir d'une mine à ciel ouvert) et sur le choix des filières le mieux adaptées aux schistes du Toarcien.

En mai 1978, le groupe GERB publiait ses résultats :

1°/ deux filières étaient retenues : la voie à huile et la combustion en centrale thermique.

2°/ la voie in situ était jugée intéressante, d'autant plus qu'elle permettait d'augmenter sensiblement les réserves, mais tenait plus du long terme.

Néanmoins la voie à huile, basée sur une exploitation de 100 000 t/j de schistes à 45 kg/t d'huile, pour un site retenu qui était Fécocourt, ne s'avérait pas rentable pour une entreprise industrielle. Elle nécessitait, en outre, des investissements considérables.

S'agissant de la voie électrique (combustion en centrale thermique), la combustion en lit fluidisé semblait la technique la mieux adaptée aux schistes considérés.

GERB II concluait donc en 1978 que les méthodes de valorisation des schistes bitumineux n'étaient rentables pour aucune des filières.

Un calme relatif s'établit ensuite. Le groupe GERB devait d'ailleurs être dissous en 1979.

Cependant, suite à la demande de la DHYCA dans l'été 1979, l'IFP entreprit une actualisation économique rapide des conclusions de GERB II. En effet de nouvelles hausses du prix du brut, depuis radicales, étaient intervenues fin 1978 et surtout après le printemps 1979.

Il ressortait de cette actualisation que la rentabilité du projet ex situ se rapprochait des limites acceptables pour une société industrielle et commerciale. Mais cette étude était très sommaire ; en particulier de grandes incertitudes subsistaient tant sur les investissements que sur les coûts et l'impact écologique n'était toujours pas pris en compte.

C'est pourquoi une actualisation plus complète que celle de juillet 1979, suivit en octobre 1979. Elle permit de vérifier la validité de certaines hypothèses et, avec toutes les données actualisées à mi 1979 (le démarrage était prévu en 1985) donnait des résultats légèrement moins favorables, mais nettement plus que ceux de GERB II.

Dans le même temps, le Ministère de l'Industrie demandait à son Administration d'élaborer un programme d'ensemble destiné à répondre aux nouvelles contraintes découlant des hausses citées ci-dessus. Cette réponse d'ensemble était définie dans l'axe de la recherche de nouvelles ressources d'hydrocarbures et de nouvelles technologies.

Ce programme, intitulé "Programme Hydrocarbures français" a été annoncé dans ses grandes lignes par le Ministre en septembre 1979 et confirmé dans ses détails par un Conseil Central de Planification en janvier 1980. Il comporte notamment un volet sur la relance de l'exploration en France et un volet sur la récupération des huiles lourdes et des schistes bitumineux.

Une commission fut créée auprès de la DHYCA, présidée par Monsieur J. Blancard afin d'examiner tout projet de recherche appliquée et d'installations pilotes susceptible de recevoir une aide publique par l'intermédiaire du FSH (Fond de Soutien aux Hydrocarbures).

Dans ce cadre l'IFP et la CFP présentèrent un projet concernant les schistes bitumineux. Il s'avérait en fait qu'on pouvait distinguer deux axes :

- un projet de pilote in situ, auquel se sont joints d'autres membres de GERB (SNEA(P) - BRGM), qui comportait des essais de fracturation,
- l'examen préalable d'un projet de pilote ex situ à partir d'une exploitation en carrière.

Le Conseil Central de planification du 10 janvier 80 relatif au développement des hydrocarbures nationaux s'est prononcé sur la question des schistes bitumineux.

- En ce qui concerne l'in situ, il a adopté le projet de pilote d'un coût de 12 MF qui pourrait se poursuivre par d'autres pilotes de méthode plus complètes vers 83-84, considérant qu'il était intéressant à plusieurs titres même si cet intérêt était peut être moins immédiat que pour l'ex situ. En effet ce procédé concerne des réserves beaucoup plus importantes en France et ses applications à l'étranger sont loin d'être négligeables. De plus le projet présente des analogies avec les essais de gazéification du charbon à Bruay en Artois et son coût est relativement faible.

.../...

- S'agissant de l'ex situ, le Conseil n'a pas pris de position définitive. Cependant nous citons la décision suivante : "Le Ministre de l'Environnement et du Cadre de vie et le Ministre de l'Industrie sont chargés de mener une étude de faisabilité du point de vue de l'environnement, selon les techniques utilisées, de l'exploitation en France des schistes d'Autun et de Nancy".

Une commission comprenant des représentants des pouvoirs publics concernés et des participants du groupe GERB a récemment été créée à cet effet.

Au stade actuel, nous pouvons faire le bilan suivant :

1°) pour l'in situ les travaux du projet de pilote ont commencé et le choix du site est en cours.

2°) pour l'ex situ un premier programme a été établi par la commission de l'environnement ; ce qui permettra de conclure sur la faisabilité du projet industriel. Dans un deuxième temps, les études devraient aboutir à l'estimation du coût de remise en état du site.

D'autre part il a été demandé de compléter l'étude GERB II sur différents points et d'en tirer les conséquences sous forme de recommandations :

1°) Compléter l'étude GERB sur :

- l'évaluation des réserves d'Autun
- la voie pyrolyse - craquage et la possibilité de valoriser les produits obtenus
- les expériences étrangères d'exploitation in (et ex) situ et la possibilité pour la France d'exporter sa technologie dans ce domaine

2°) Donner des conclusions sous forme de recommandations :

- sur le choix des filières techniques à privilégier
- sur les caractéristiques d'un pilote d'exploitation ex situ (pour un pilote de 1 000 t/j, une première évaluation de l'investissement était de 300 MF).

Ces travaux devraient être achevés (au moins pour l'essentiel) d'ici l'automne 1980. Des missions, au Brésil et en Allemagne (soit schistes de l'Irati et problèmes d'environnement des lignites de la Ruhr) ont été effectuées récemment et des contacts ont été pris avec les différents détenteurs de procédés.

.../...

Après cette description rapide de l'histoire française des schistes bitumineux, nous nous concentrerons sur quelques aspects particuliers et importants de la question, en commençant par étudier les réserves nationales de schistes bitumineux.

III - 2 - Les réserves

Comme cela apparaît sur la figure 9 on trouve en France de nombreux dépôts de roches bitumineuses, essentiellement des schistes. Ces dépôts peuvent être classés en deux grandes catégories :

- 1°) Les schistes "cartons" du Toarcien situés dans le Bassin Parisien et le Jura, affleurant à l'Est, possèdent la plus grande étendue,
- 2°) de nombreux gîtes de calcaires, grès et schistes bitumineux d'extension limitée, principalement dans la moitié Sud-Est de la France.

Nous étudierons successivement ces deux catégories.

III - 2 - 1 - Les schistes "cartons"

Occupant surtout la partie Est du Bassin Parisien, on trouve ces dépôts dans le Liàs à la base du Toarcien. D'épaisseur variable (pouvant atteindre 50 m vers Soissons) les couches affleurent à l'Est dans un axe Thionville - Metz - Nancy - Langres sur une frange d'environ 20 km et s'enfoncent progressivement vers le centre du Bassin Parisien jusqu'à une profondeur de 2 000 m.

Ces schistes sont considérés comme pouvant être des roches-mères pour les hydrocarbures du Bassin Parisien, sur une épaisseur de 30 m. Un signe est que le taux de matière organique diminue vers l'Ouest de 5 à 2 %.

Un calcul très sommaire des quantités d'huile qui peuvent être extraites de ces schistes montre l'importance des réserves, de l'ordre de quelques dizaines de milliards de tonnes. Mais si l'on pense aux méthodes d'exploitation actuellement envisageables les réserves sont bien sûr moindres.

- en ce qui concerne l'in situ, il faut se limiter à l'Est d'une ligne suivant approximativement la Meuse (profondeur inférieure à 600 m) : les quantités sont de quelques milliards de tonnes d'huile (et encore considérables).

- s'agissant de l'ex situ, les schistes exploitables à ciel ouvert dans la partie affleurante du Toarcien ont un potentiel de plusieurs centaines de millions de tonnes d'huile.

.../...

Les deux campagnes de sondage du programme GERB ont en particulier permis de tracer les courbes isopaques dans toute cette zone (cf. figure 10). Nous avons vu précédemment que 4 sites favorables ont été déterminés. Le tableau suivant indique leurs caractéristiques.

ZONE	Teneur (kg/t)	Epaisseur	Remarques (potentiel)
entre Longwy et Metz	de 30 à 37	50 m	de 2 à 4,4 10^6 t/km ²
Nancy Nord	de 36 à 46	17 m	de 1,5 à 1,75
Fécocourt	de 33 à 43	autour de 20 m	Affleurement important
Créveney-Vesoul	de 33 à 42	jusqu'à 28 m	Atteint 2,7 Mt/km ²

Les deux permis, "Nancy Nord" (87 km²) et Fécocourt (253 km²) ont fait l'objet d'une nouvelle campagne de sondages dans le programme GERB II.

Sur ces deux permis les meilleurs horizons se situent à la base de la couche de schistes, dans la partie Est. Les teneurs peuvent atteindre 75 kg/t à Fécocourt et même 86 kg/t à Nancy Nord, sur 0,5 m. Le tableau 7 récapitule les résultats trouvés après un calcul par la méthode de krigeage (du professeur G. Matheron).

Avec un taux de coupure de 35 kg/t et un taux de découverte de 2, les réserves sur "Nancy Nord" s'élèvent à 31 Mt et sur Fécocourt à 97 Mt pour des surfaces respectivement de 5 km² et 13 km².

III - 2 - 2 - Les autres gîtes

La connaissance que nous pouvons avoir des autres gîtes (autres que schistes toarciens du Bassin Parisien) est en général limitée. Parfois ils ont été déjà partiellement exploités. Nous nous contenterons de citer les plus importants (cf. figure 9).

.../...

Séverac : les teneurs en huile dans les zones explorées près de la surface ne dépassent pas 45 l/t, sur une épaisseur de 10 à 30 m.

Jura : deux sondages vers 400 m ont montré que les schistes - cartons avaient une teneur voisine de 60 l/t sur 10 à 20 m. Dans leur plus grande partie ces schistes ne pourraient être exploités qu'en mine souterraine.

Autun et Aumance : les schistes autuniens semblent plus riches et seraient susceptibles d'une exploitation en mine souterraine. Les schistes d'Autun et d'Aumance ont des teneurs respectivement de 50 - 110 l/t et 60 - 70 l/t.

Les autres gîtes de schistes bitumineux ne contiennent des réserves que de quelques millions de tonnes exploitables en mine souterraine. Les teneurs sont souvent élevées (120 à 150 l/t à Vagnas, 90 à 145 l/t à Faymoreau, 50 à 140 l/t dans le bassin de Manosque).

Les calcaires bitumineux du kimméridgien dans le Jura du Sud semblent étendus, mais on les connaît très mal.

D'une manière générale ces petits gîtes, soit demandent des études supplémentaires, soit sont à rejeter.

III - 3 - Bilan énergétique

L'établissement du bilan thermique de la chaîne de production de produits pétroliers à partir des schistes, toujours intéressant en raison du taux élevé d'auto-consommation énergétique de la transformation, devient capital pour les schistes du Toarcien en raison de leur pauvreté.

On a utilisé pour ce faire les données fournies par GERB II en matière d'exploitation minière, de pyrogénéation LURGI et de raffinage. On ne s'est intéressé qu'aux consommations "directes" d'énergie, l'analyse du contenu énergétique "total" du système de transformation semblant être un exercice périlleux conduisant à des résultats peu significatifs. Enfin, en raison de l'insuffisance de certaines données, on a dû faire des hypothèses qui tendent à majorer l'auto-consommation énergétique. C'est pourquoi l'on ne retiendra que l'ordre de grandeur des résultats.

Les sources extérieures d'énergie sont :

- l'électricité
- la vapeur
- le gaz
- les produits pétroliers (gas-oil et naphtha).

.../...

Les consommations respectives des trois étapes de la transformation sont données par le tableau suivant, ainsi que leur équivalent énergétique en quantité d'huile.

Valeurs rapportées à 1 t de schistes	Electricité		Vapeur		Gaz		Gas-oil ou naphta	Total
	kw.h	kg huile	kg	kg huile	10 ³ kcal	kg huile	kg	kg huile
Mine	8,4	1,9	-	-	-	-	2,3	4,2
Pyrolyse	9,6	2,2	27	1,9	7,9	0,8	0,7	5,6
Raffinage	1,1	0,3	6,5	0,5	11,1	1,1	-	1,9
Total	19,1	4,4	33,5	2,4	19,0	1,9	3,0	11,7

L'extraction et la pyrolyse d'une tonne de schistes ainsi que le raffinage de l'huile obtenue nécessitent ainsi un apport extérieur d'énergie équivalent à 11,7 kg d'huile pour une production de l'ordre de 38 kg d'huile et de 6 kg de gaz, soit un taux d'autoconsommation d'environ 27 %.

A titre de comparaison, les Brésiliens comptent consommer dans leur usine commerciale près de 27 kg d'équivalent huile (non compris le raffinage) pour traiter des schistes heureusement plus riches que ceux du Toarcien (72 l/t), soit un taux d'autoconsommation d'environ 33 %. Une grande partie de cette forte valeur tient à la non utilisation du carbone résiduel.

Deux conclusions s'imposent donc de ce bilan et de cette comparaison :

- 1 - Il est absolument fondamental d'utiliser pour le traitement des schistes pauvres du Toarcien un procédé qui utilise l'énergie des schistes cuits. Sinon l'on risque voir plus de 50 % de l'énergie produite autoconsommée par la transformation. Divers procédés récupèrent actuellement le carbone résiduel : Paraho, Lurgi, Union Oil, ... parmi ceux-ci Lurgi semble bien placé, bien qu'il n'ait pas encore été testé à grande échelle.

.../...

- 2 - A cette condition et sous réserve que les études sur lesquelles est basé le calcul du bilan soient fondées, il apparaît que l'autoconsommation de la filière peut se limiter au quart de la production.

III - 4 - Aspects économiques

1 - En premier lieu l'examen des chiffres publiés dans le passé, en particulier dans les dix dernières années mérite réflexion ; en effet le coût estimé de l'huile de schiste a connu une évolution semblable à celle du prix du pétrole. Le phénomène est bien illustré par les chiffres suivants concernant les schistes américains :

- En 1973 le coût technique de l'huile de schiste était évalué de 2 à 2,5 \$/bbl et l'on estimait aux environs de 4 \$/bbl la valeur actualisée de l'huile. A cette époque le prix du pétrole importé était de l'ordre de 3 \$/bbl
- En 1976 certaines études estimaient à 12 - 13 \$/bbl le coût actualisé à 9 - 12 % de l'huile de schiste, soit du même ordre que le prix du brut à ce moment.
- En 1978-79, les coûts estimés, fortement différents d'un cas à l'autre, s'inscrivent dans une fourchette de 15 à 30 \$/bbl.

Bien entendu, le montant des investissements a connu durant cette période la même évolution : les estimations passaient de 5 000 \$/bbl/j en 1973 à 10 000 \$/bbl/j en 1976 puis à plus de 20 000 \$/bbl/j en 1979.

Les causes de cette dérive sont sans doute multiples :

- tout d'abord, les évaluations économiques s'appliquant à une technologie encore expérimentale, il est peu étonnant de les voir augmenter fortement au fur et à mesure que l'on progresse dans la définition d'une unité industrielle.
- la prise en compte des contraintes liées à l'environnement a engendré à tous les niveaux de l'exploitation (pyrolyse, traitement de l'huile, réaménagement,...) une hausse du montant des investissements et des coûts opératoires.
- le coût de l'huile de schiste incorporant une quantité notable d'énergie, l'augmentation du prix du pétrole a un effet d'entraînement important sur ce coût.
- les facteurs politiques ne doivent pas être négligés ; en effet la menace de la concurrence des schistes bitumineux et des sables asphaltiques a été un argument des compagnies pétrolières contre les pays exportateurs au moment de la montée de la tension entre producteurs et consommateurs. Il n'est donc pas interdit de penser que les chiffres de cette époque (fin des années 1960) étaient sous-évalués pour donner du poids à cette menace. La hausse constatée depuis comporterait ainsi un effet de rattrapage.

.../...

Quoi qu'il en soit, cette dérive des coûts doit inciter à la prudence lorsque l'on examine une évaluation économique, dans la mesure où l'on peut penser qu'elle n'a aucune raison de s'arrêter.

Il semble toutefois que, dans un certain nombre de cas, le coût de l'huile de schiste soit passé, à la suite des hausses du prix du pétrole en 1979, au-dessous de ce dernier.

2 - En second lieu, les évaluations économiques actuelles conduisent à des résultats très différents en fonction de nombreux paramètres : richesse de l'huile, filière choisie, contraintes liées à l'environnement, etc... . On ne peut donc que donner des fourchettes assez larges et il est nécessaire de procéder à des études cas par cas si l'on veut des données plus précises.

S'agissant de la filière semi-in situ, les investissements semblent se situer à environ 20 000 \$/bbl/j (\simeq 1 700 F/tep/an) et le coût de l'huile aux environs de 20 à 25 \$/bbl en ce qui concerne les projets Occidental et Rio Blanco dans le Colorado. Mais le stade expérimental du procédé rend incertains ces chiffres.

S'agissant de la filière ex situ, les évaluations sont vraisemblablement plus fiables. Les investissements s'inscrivent dans la fourchette 20 000 - 40 000 \$/bbl/j (\simeq 1 700 - 3 400 F/tep/an) et les coûts de l'huile dans la fourchette 25-30 \$/bbl. Seul, Superior Oil prétendait en 1977 être capable d'atteindre des coûts plus faibles (10 \$/bbl) par la valorisation de la nahcolite et de la dawsonite.

On se rapportera au paragraphe 1-3 pour comparer ces chiffres aux données relatives à d'autres sources d'énergie.

3 - La situation française

S'agissant de la voie ex situ, différentes études économiques ont été réalisées :

- Une étude préliminaire de GERB I en 1975 concluait à la nécessité d'un procédé utilisant le carbone résiduel comme source d'énergie d'appoint pour les schistes du Toarcien et laissait envisager leur exploitation en carrière.
- Une étude plus approfondie était effectuée par GERB II en 1977, qui examinait deux options pour les schistes du Toarcien exploités à ciel ouvert sur le site de Féocourt : la voie électrique et la voie à huile.

La voie électrique sur la base d'une centrale de 600 MW nécessitait un investissement de 1,7 GF et conduisait à un prix de revient de 16 c/kwh à comparer à l'époque à 12 c/kwh pour les centrales thermiques classiques et 10 c/kwh pour les centrales nucléaires.

.../...

La voie à huile sur la base d'une unité de 100 000 t/j de schistes produisant 1,5 Mtep/an selon le procédé LURGI nécessitait un investissement de 3,8 GF et conduisait à un prix de revient actualisé à 10 % de 6 c/th pour un prix du marché à cette époque de 4,8 c/th, et à un taux de rentabilité de l'ordre de 3 %.

- A mi-1979, à la suite d'une première hausse du prix du pétrole, une actualisation de l'étude précédente concernant la voie à huile réévaluait à 5 GF les investissements et conduisait à un prix de revient actualisé à 10 % de 8,2 c/th pour un prix du marché au 1-09-1979 de 7,2 c/th, et à un taux de rentabilité interne de 6 %.

Les nouvelles hausses survenues depuis lors portent avec un prix de 9,5 c/th en mai 1980 à environ 11 % le taux de rentabilité. En fait, le prix référence à utiliser n'est pas celui d'aujourd'hui mais celui de l'époque de la mise en service d'une installation commerciale soit dans le cas le plus favorable 1988. Or il n'est pas absurde d'imaginer d'ici là une augmentation du prix du pétrole, et la sensibilité du projet à une hausse des prix des produits pétroliers est forte.

En conclusion il semble donc que :

- a - la voie électrique ex situ n'est pas et a peu de chances dans les années qui viennent de devenir rentable par rapport au nucléaire. Par ailleurs l'utilisation des schistes dans une centrale d'appoint en période haute paraît techniquement et économiquement difficile à envisager.
- b - la voie à huile est d'ores et déjà commercialement intéressante, malgré certaines réserves :
 - . incertitudes techniques
 - . incertitudes liées à la prise en compte de l'environnement
 - . incertitudes sur l'évolution économique
 - . forte intensité capitalistique de la filière (3 300 F/tep/an).

S'agissant de la voie in situ, l'IFP a effectué en 1979 une étude économique concernant la production de gaz pauvre ou de vapeur par combustion in situ. En raison de l'ignorance actuelle sur ce procédé, les variables techniques ont été paramétrées. Les principales conclusions de cette étude étaient les suivantes : la voie thermique a très peu de chances de s'avérer rentable. La voie gazière peut être envisageable dans des cas techniquement favorables ; cependant on voit difficilement d'autres valorisations du gaz pauvre que la production d'électricité. La comparaison a donc peu de chances de se modifier nettement en faveur des schistes dans les années qui viennent, puisque leur référence est le nucléaire.

C'est pourquoi il semblerait bon d'examiner les possibilités d'une exploitation in situ ou semi-in situ conduisant à des produits plus "nobles" : hydrocarbures liquides ou gaz de synthèse.

III - 5 - Impact sur l'environnement

En ce qui concerne l'environnement plusieurs approches sont possibles : technique, politique (la réglementation), économique, sociale. De plus la prise en compte des problèmes d'environnement est récente et l'action administrative depuis 70 a été très développée. La sensibilité très vive de l'opinion publique face aux questions de pollution industrielle rend la tâche plus complexe encore, les discussions pouvant dépasser quelquefois le domaine du rationnel et du quantifiable.

Nous évoquerons tout d'abord les spécificités techniques d'une exploitation de schistes bitumineux, puis nous verrons comment ont réagi et réagissent les différents acteurs dans quelques cas précis aux Etats-Unis, au Brésil, en Allemagne et enfin en France.

III - 5 - 1 Généralités sur l'impact écologique d'une exploitation de schistes bitumineux.

Nous nous attacherons principalement à l'exploitation ex situ. En effet les procédés in situ ont un impact sur l'environnement moindre et, vu leur état d'avancement, ont été moins étudiés. Il faut cependant signaler que le problème posé par l'exploitation in situ est celui de la pollution des eaux (trop acides, ou trop basiques, présence de phénols...).

S'agissant de l'ex situ, nous retrouverons d'une part les problèmes posés par toute mine (souterraine ou à ciel ouvert) accrus par la quantité et la composition du stérile (schistes cuits à 500°C), et d'autre part ceux posés par la pyrolyse des schistes et le traitement de l'huile.

Si des résultats positifs ont été obtenus pour la remise en état des terres (avec plantation d'espèces végétales) sur de petites parcelles (cf. pilote de Sao Mateus do Sul au Brésil, ou essai d'Union Oil au Colorado), on ignore encore l'efficacité de tels procédés sur des grandes surfaces (des dizaines de km² sont nécessaires pour une exploitation industrielle). De plus la nature très variée des schistes et du milieu où est implantée l'installation exigent une grande prudence pour toute transposition. Les délais de remise en état sont aussi très variables, en partie à cause de la structure de chaque gisement.

Ce caractère très varié des diverses situations se retrouve dans les installations de pyrolyse et de traitement. Les rejets dans l'atmosphère et dans les eaux sont très sensibles aux divers procédés mais aussi à la composition même des schistes.

Aucune réponse générale ne peut être apportée bien que l'on retrouve nécessairement les mêmes techniques de base de traitement des effluents.

III - 5 - 2 - Trois scénarios pour une exploitation industrielle

Le Brésil

La future exploitation industrielle de Sao Mateus do Sul est située dans une zone relativement peu peuplée bien qu'une ville de 15 000 habitants soit toute proche (environ 1 km). Dès la phase pilote des essais de réaménagement des sols et de traitement des eaux sont effectués (cf. Annexe 2), ainsi qu'un contrôle des rejets dans l'atmosphère. Les études sur l'environnement se sont poursuivies tout au long de la phase pilote et les moyens à utiliser sont intégrés dans le projet industriel. Il ne semble pas y avoir eu une préétude d'impact pour la phase pilote (la construction de ce dernier a commencé en 69). La part d'initiative de Petrosix et de l'Etat est très difficile à cerner vu leurs liens étroits.

Etats-Unis

La situation semble être ici bien différente. Après avoir longuement hésité pour savoir si l'industrie des schistes devait être privée ou publique, les Américains croyaient en 1920 que la production d'huile à partir de schistes était devenue inévitable. En fait, il n'en fut rien.

Actuellement très sensibilisée à ce problème, l'opinion publique est partagée entre le désir de développer une telle industrie (d'intérêt national) et la peur que cela ne détruise irrémédiablement l'environnement. Certains parlent même d'une "hystérie". Il semble que les énormes quantités de stériles qu'il y aurait à manier impressionne beaucoup, sans compter que les quantités d'eau nécessaires et la pollution engendrée semblent pour l'instant très incertaines.

44 000 km² sont concernés par les réserves exploitables de schistes bitumineux. La densité de population y était en 70 d'un peu plus d'un habitant au km².

Le Département de l'Intérieur réagit en 1974 en mettant aux enchères certaines concessions et en créant une commission chargée d'étudier les problèmes d'environnement, où étaient représentées plusieurs administrations. Les activités du groupe (composé de 29 membres) étaient ouvertes au public. Six axes d'étude furent définis :

- 1) facteurs socio-économiques
- 2) impact de surface et réaménagement
- 3) faune et flore
- 4) qualité de l'air
- 5) qualité de l'eau
- 6) sites historiques et antiquités.

.../...

Toutes les études précédentes et celles effectuées par les diverses compagnies s'inscrivent dans un cadre réglementaire qui est "The National Environmental Policy Act" de 1969, qui contient des normes de qualité trop rigides aux yeux de certains qui voient leur projet bloqué (Colony par exemple, a rencontré de gros problèmes au sujet des schistes cuits). Or le coût de la protection de l'environnement est loin d'être négligeable et semble parfois remettre en question la rentabilité économique du projet.

L'Allemagne

La République fédérale d'Allemagne possède d'importants gisements de lignite dont la majorité (55 milliards de tonnes) est située dans la région qui s'étend entre Cologne, Aix la Chapelle et Düsseldorf. Ces lignites fournissent actuellement 30 % de l'électricité allemande, soit 12 000 MW. L'exploitation est assurée par la société Rheinbraun.

L'exploitation se fait en carrière, sur 7 chantiers, et correspond à un mouvement de terres de 400 millions de m³/an dont 300 millions de stériles. La carrière atteint parfois 500 m de profondeur.

Après avoir rabattu la nappe, l'exploitant utilise des excavateurs à roues pelles pour l'extraction du lignite et du stérile.

Au fur et à mesure que le front d'abattage avance les déblais sont remis à l'arrière par bandes transporteuses. Le réaménagement de la carrière revêt une importance considérable ne serait-ce qu'à cause de son emplacement (zone très peuplée).

A la fin de 1978, 18 000 ha avaient été utilisés pour l'exploitation des mines dont 12 000 remis en état. Parmi ces 12 000 ha on distingue :

- 5 100 ha pour l'agriculture
- 5 500 ha pour la sylviculture
- 700 ha de plans d'eau (45 lacs et étangs dont 7 sont destinés au nautisme)
- 650 ha en zone d'habitation
- 260 ha pour les routes.

Il reste actuellement 5 700 ha qui sont occupés par les différents chantiers en cours d'exploitation.

Les terres agricoles sont reconstituées par remise en place du loess d'origine grâce à un remblayage hydraulique.

Les terres forestières sont reconstituées par remise en place d'un mélange de graviers. Dans un premier temps (2 à 3 ans) Rheinbraun cultive elle-même les terres avec des plantations spécifiques, puis les restitue aux propriétaires.

Mais le temps nécessaire au réaménagement est extrêmement variable, de 5 ans à plus de 20 ans.

Le travail de réaménagement est gigantesque puisque nous avons vu qu'il concerne les terres agricoles mais aussi les infrastructures (routes, chemins de fer ...) et les bâtiments. A ce sujet, afin d'éviter les problèmes dus au tassement différentiel, les constructions sont effectuées sur semelles.

Ainsi pendant toute la période d'exploitation et de réaménagement les constructions doivent être détruites et les habitants ne peuvent plus vivre sur leurs terres. Les problèmes les plus importants concernent les exploitants agricoles.

En fait depuis le début de l'exploitation 25 000 personnes ont dû être transférées provenant de 54 localités différentes. Les projets récents d'exploitation minière prévoient que 8 à 10 000 personnes doivent être encore transférées.

Rheinbraun offre trois possibilités aux exploitants agricoles touchés par l'exploitation (et aux autres habitants mais les problèmes sont moindres et de nature différente) :

- reprendre une autre ferme sur le site réaménagé, 70 % font ce choix,
- prendre une ferme n'importe où en RFA (25 % le font),
- travailler à Rheinbraun (qui emploie 15 000 personnes) jusqu'à la remise en état du site d'origine. Ce choix est fait dans 5 % des cas.

Jusqu'à présent 36 fermes ont été installées sur les terres réaménagées. Un remembrement a d'ailleurs pu être effectué à cette occasion.

Si l'exploitation des schistes bitumineux semble poser des problèmes plus complexes à certains égards (schistes cuits, rejets gazeux, pollution de l'eau), l'échelle de la carrière est ici immense.

Par la taille et l'emplacement des zones concernées (180 km² dans une région très peuplée), cette exploitation nécessite des travaux de réaménagement importants et coûteux, qui pour le profane, semblent être une réussite.

Mais celle-ci est certainement due, en partie, à un consensus de la population habituée depuis plusieurs générations à ce type d'exploitation et de cadre de vie qu'elle engendre.

III - 5 - 3 - L'attitude française ; le site de Fécocourt

Face à ces trois pays où les réponses aux problèmes d'environnement sont très différentes, quelle est la position de la France, entre les règlements stricts des Etats Unis et le consensus de la population allemande ?

Nous avons vu qu'une commission vient d'être créée chargée d'étudier la faisabilité du point de vue de l'environnement d'une exploitation de schistes bitumineux à Férocourt (et Autun).

Nous nous bornerons ici à exposer quelques généralités sur le site de Férocourt. En particulier les contacts nécessaires avec les responsables locaux n'ont pas encore été pris, l'étude en étant à un stade très amont.

Présentation du site de Férocourt

Le permis de Férocourt se trouve à cheval sur deux départements (Meurthe et Moselle, Vosges) et concerne environ une trentaine de communes. Mais seule une partie de ces communes serait directement touchée par l'exploitation.

La population essentiellement agricole est concentrée dans de petits villages, malgré quelques maisons isolées.

Les terres situées sur les collines, qui constituent le relief du site, sont utilisées pour la culture de mirabelliers ou pour des pâturages. Citons parmi ces collines celle de Sion, au Sud-Est du permis.

Signalons enfin que des travaux sont en cours pour la construction d'une autoroute à l'ouest du permis.

Le projet d'exploitation

Le projet industriel prévoit l'exploitation de 100 000 t/j de schistes sur deux chantiers. Cette production nécessite un mouvement de terres de 66 millions de m³/j (45 de schistes et 21 de morts-terrains) et l'emprise sur le terrain est évaluée à 1 km²/an (pendant 20 ans), pour la carrière seule. Il faut ajouter à cela les diverses infrastructures (routes pour le transport par camions, ou bandes) et l'emplacement de l'usine de pyrolyse. Une possibilité est de mettre cette installation à proximité du village de Maconcourt qui semble être à mi-chemin entre deux zones (chantiers) éventuelles d'exploitation.

Les problèmes posés

L'exploitation comprendrait donc deux grands secteurs : la (ou les) carrière et l'usine de pyrolyse. Nous trouverons donc les problèmes habituels d'environnement que posent l'ouverture d'une carrière et une installation industrielle. En ce qui concerne l'intégration dans le paysage, il semble que l'emplacement ne puisse être vu de la colline de Sion.

Cependant l'exploitation des schistes nécessite des techniques spécifiques que nous allons maintenant examiner.

- En ce qui concerne la carrière, nous avons vu que les quantités de terres à remuer sont considérables, ce qui ne manquera pas d'accroître la difficulté d'un stockage éventuel. De plus, une fois traités, les schistes gardent un volume important et à cause du foisonnement d'une roche concassée, il sera impossible de remettre les terres enlevées dans le volume qu'elles occupaient primitivement. Il faudra donc augmenter la hauteur du relief d'une dizaine de mètres (estimation très sommaire) ou trouver d'autres lieux de comblement (vallées, ...).

En effet, l'idée d'utiliser les schistes cuits comme liants hydrauliques pour l'industrie cimentière, est difficilement envisageable. D'après le CERILH (Centre d'étude et de Recherche Industrielle sur les Liants Hydrauliques) les quantités disponibles seraient hors de proportion comparées aux quantités nécessaires dans cette industrie, sans tenir compte de l'aspect économique de la question. De plus les schistes de Férocourt semblent peu valorisables pour les métaux qu'ils contiennent.

Un élément positif est tout de même leur relativement faible teneur en pyrite ; ce qui ne posera pas les problèmes rencontrés au Brésil.

- S'agissant de l'usine de pyrolyse, la pollution la plus gênante serait certainement due aux effluents liquides. Certains procédés peuvent utiliser une quantité non négligeable d'eau et rejettent celle-ci avec parfois une forte alcalinité, des sulfures et des phénols.

Le traitement est bien sûr délicat, mais on peut penser à chercher des solutions chez des industriels qui ont eu les mêmes problèmes. En particulier l'industrie de la fabrication de laine de roche rejette des effluents liquides chargés de phénols et des solutions semblent avoir été trouvées (il faudrait aussi tenir compte de l'effet d'échelle possible). Les besoins en eau du procédé Lurgi seraient d'environ 0,6 m³/s.

Des problèmes sérieux existent donc, mais ils ne semblent pas insurmontables. Les expériences étrangères dans le même domaine ou les expériences dans d'autres industries ayant les mêmes impacts peuvent apporter des éléments de réflexion utiles.

Par ailleurs on peut considérer les deux points suivants :

- la population qui serait concernée est une population rurale surtout, certainement très attachée à son habitation et bien sûr à ses terres.

- la France, en matière d'environnement, semble avoir une position moins manichéenne que les Etats-Unis où l'exploitation des schistes apparaît bloquée par le cadre juridique et réglementaire trop inhibant.

.../...

A la suite de ces remarques nous allons évoquer rapidement les études envisagées par la commission chargée d'étudier la faisabilité, du point de vue de l'environnement, d'une exploitation industrielle de schistes bitumineux.

L'étude française sur l'environnement

Cette étude n'est pas une étude d'impact ; elle devra essentiellement déceler les effets inacceptables qu'une exploitation de schistes bitumineux engendrerait sur l'environnement.

Les travaux se feront en deux temps et devront aboutir à une estimation du coût de remise en état du site.

Pour étudier ces effets plusieurs hypothèses doivent être faites au stade actuel de la connaissance. La commission a convenu de retenir le procédé de pyrolyse Lurgi sur lequel on possède des informations importantes (40 t de schistes ont été traitées) et de prendre les autres techniques comme variantes au fur et à mesure que les renseignements seront disponibles. Au stade amont ou se place l'étude les résultats seront représentatifs.

Le programme établi par la commission peut être résumé comme suit :

- 1 - Etude amont (pédologie, géotechnique ...)
- 2 - Etat initial du site
- 3 - Exploitation et traitement
- 4 - Impacts
- 5 - Conseils d'orientation et chiffrage du coût de remise en état du site.

La première phase, dont l'achèvement est prévu fin septembre, constituera un balayage rapide des principaux chapitres prévus dans l'étude. La deuxième phase comprendra notamment les études amont, et des enquêtes et observations sur le terrain qui préciseront les différents points.

IV - PROPOSITIONS

Les prévisions touchant aux schistes bitumineux sont un art périlleux, auquel beaucoup se sont livrés sans succès. C'est pourquoi une grande prudence est nécessaire dans ce domaine. Mais cette prudence ne doit pas conduire, en minimisant la profondeur des changements actuels et à venir en matière d'énergie, à sous estimer le rôle limité mais appréciable que peuvent jouer les schistes bitumineux. Le coût actuel du pétrole et son volume politiquement disponible semblent justifier dans certains cas le recours aux schistes même si de nombreuses raisons entraveront le développement de cette source d'énergie, parmi lesquelles les incertitudes techniques, le volume des capitaux nécessaires, l'incertitude sur l'évolution économique, les pesanteurs administratives, politiques et psychologiques.

Dans ce contexte la France doit, à notre sens, prendre conscience de l'enjeu et acquérir sans retard une technologie en abordant la phase d'expérimentation semi-industrielle.

Le premier choc pétrolier de 1973 avait fortement contribué à la constitution du groupe GERB, qui de 1974 à 1978 a mené diverses études. A la lumière des conclusions de GERB et à la suite du second choc pétrolier de 1979 il convient de poursuivre cet effort dans trois grandes directions :

- Inventaire des réserves nationales
- Choix et mise au point de filières adaptées à nos ressources et à notre situation générale.
- Coopération avec des pays mieux pourvus dans la perspective du "contrôle" d'une production d'huile et de l'exportation d'une technologie.

IV - 1 - Inventaire

Les réserves françaises, qui restent mal connues, se composent d'une formation vaste mais pauvre d'une part, d'une série de gisements plus réduits mais pouvant être plus riches d'autre part.

- En ce qui concerne le Toarcien dans la bordure Est du Bassin Parisien, l'affleurement semble suffisamment connu au stade actuel, mais il serait bon, dans la perspective d'une valorisation in situ, d'améliorer la connaissance de la formation dans la zone où elle se situe à une profondeur de l'ordre de 300 m.
- D'autres gisements, dont certains ont déjà été exploités (Créveney - Vesoul, Autun, Saint-Hilaire, ...), peuvent présenter des teneurs plus élevées (jusqu'à 100 l/t), donc, même s'ils n'ont pas l'extension du Toarcien, se révéler économiquement intéressants. Actuellement mal connus, ils méritent un effort d'exploration sélectionnant les sites susceptibles de receler quelques dizaines de millions de tonnes d'huile techniquement et économiquement récupérable.

IV - 2 - Choix de filières nationales

La multiplicité des filières possibles dans l'absolu nécessite un choix en fonction des caractéristiques de nos ressources, des objectifs à poursuivre et des contraintes à respecter.

- S'agissant de l'in situ, bien que les techniques de valorisation n'existent pas encore, l'enjeu est tel que les recherches doivent être menées.

En effet cette voie semble bien séduisante puisqu'elle peut permettre :

- d'éliminer ou au moins de réduire la manipulation d'énormes quantités de matériaux stériles (de l'ordre de 95 %),
- d'éviter certains problèmes liés à l'environnement : utilisation des schistes traités, rejets dans l'atmosphère ...
- éventuellement d'exploiter des schistes profonds inexploitable par extraction souterraine pour des raisons économiques et donc d'augmenter considérablement les réserves récupérables d'huile de schiste.

Le pilote in situ projeté par CFP, SNEA(P), l'IFP et le BRGM est donc un premier pas fondamental dans cette direction. Néanmoins on peut s'interroger sur la valorisation retenue, vapeur ou gaz pauvre vraisemblablement destinés à la production d'électricité, usage pour lequel l'énergie nucléaire semble mieux adaptée. La transformation des schistes en produits plus "nobles", gaz riche ou huile, pour lesquels on n'a actuellement pas d'autres solutions que l'importation, bien que plus difficile techniquement, peut s'avérer plus intéressante économiquement et contribuer à réduire notre dépendance énergétique. Un tel infléchissement ne remettrait évidemment pas en cause le pilote projeté dans la mesure où celui-ci sert essentiellement à acquérir des techniques générales sur l'in situ (fracturation, allumage, maîtrise de la combustion, ...). Par ailleurs, un des moyens de cet infléchissement pourrait être l'utilisation de méthodes semi-in situ, qui semblent techniquement plus prometteuses pour la production d'huile, si elles s'avèrent applicables au Toarcien. Une étude préliminaire visant à cerner les diverses possibilités d'une valorisation in situ "noble" des schistes bitumineux français est donc souhaitable.

- S'agissant de l'ex situ, la production d'électricité est, si les conditions actuelles n'évoluent guère, peu intéressante. La production d'huile est par contre, sous certaines réserves, envisageable dans le contexte pétrolier actuel, dont rien ne permet de penser qu'il évoluera favorablement dans les prochaines années. Or, vu la nécessité d'une phase expérimentale et la lourdeur d'une industrie schistière, il faut un délai d'au moins 8 ans entre la prise de décision du lancement d'un pilote et le début de production d'une unité industrielle. C'est pourquoi la réalisation d'un pilote de pyrogénéation paraît souhaitable, si l'hypothèque préalable liée à l'impact sur l'environnement est levée. En raison de la lenteur à mettre au point un procédé, il semble préférable d'adopter un procédé étranger en le "francisant" au maximum. Le choix du procédé devra être fait par les spécialistes, néanmoins Lurgi, par son utilisation du carbone résiduel, est bien placé. Enfin, s'agissant du choix du site, Fécocourt, malgré la pauvreté de ses schistes semble préférable à Autun en raison de la complexité, de la profondeur et la faible dimension de ce dernier gisement.

IV - 3 - Coopération avec les pays étrangers

Les perspectives d'exploiter à l'étranger des gisements plus riches et posant moins de difficultés en ce qui concerne l'environnement que les schistes français ne doivent pas être négligées soit pour "contrôler" une production d'huile si le pays est exportateur, soit pour exporter une technologie.

La mise en oeuvre d'une telle stratégie nécessite, pour qu'elle soit crédible, que les groupes français aient la maîtrise de la technologie. Des réalisations dans le domaine des schistes bitumineux, qu'elles se fassent en France ou à l'étranger, sont donc une condition préalable à l'attribution de permis à des groupes français et/ou au choix d'opérateurs français pour exploiter des schistes bitumineux.

C'est pourquoi la réalisation d'un pilote ex situ serait à ce titre fort utile. Si, pour diverses raisons, elle s'avérait impossible ou peu intéressante en France, il serait alors bon d'examiner les possibilités d'une telle expérimentation dans un pays étranger intéressé.

Enfin la recherche dès maintenant de gisements à l'étranger, en particulier dans les zones que les groupes français connaissent bien, est à encourager.

ANNEXE 1

Principaux procédés de pyrolyse

- 1 - Combustion de gaz
- 2 - Pétrosix
- 3 - Paraho
- 4 - Lurgi
- 5 - Galoter
- 6 - Tosco
- 7 - Union Oil
- 8 - Superior Oil

1 - Procédé Combustion de gaz

Ce procédé a été développé par l'U.S. Bureau of Mines à Anvil Points dans le Colorado dans les trente dernières années. Le réacteur (cf. figure II) se compose essentiellement d'un cylindre vertical alimenté continuellement à sa partie supérieure en schistes broyés de 1/4" à 3" qui traversent tout d'abord une zone de préchauffage, puis une zone de pyrolyse où la matière organique se décompose pour libérer l'huile et le gaz, puis une zone de combustion où un complément de chaleur est produit par combustion de gaz recyclé et des résidus carbonés de la pyrolyse avec de l'air injecté à ce niveau. Enfin, les schistes cuits gagnent une zone de refroidissement dans laquelle un flux montant de gaz recyclé récupère une partie de la chaleur.

Les schistes cuits refroidis sont déchargés à la base de l'unité à un débit contrôlé lié à la vitesse de déroulement de la pyrolyse. Au sommet de l'unité la vapeur d'huile et le gaz sont refroidis par les schistes crus et l'huile se condense sous forme d'un fin brouillard qui est entraîné par le gaz vers les installations de traitement.

L'expérimentation de ce procédé posa un certain nombre de problèmes :

- Le rendement chuta de 7 à 10 % lorsque la taille du réacteur passa en section de 0,2 à 6 m². Il se produisit une ségrégation des fines et des particules plus grosses qui occasionna une mauvaise circulation des gaz, un dégagement irrégulier de la chaleur et la formation de scories.

- L'injection d'air n'était pas satisfaisante et la formation du brouillard d'huile difficile à contrôler, notamment lors du traitement de schistes riches (teneur \geq 130 l/t).

C'est pourquoi, sauf données nouvelles, il semble que ce procédé, malgré des travaux complémentaires effectués par six compagnies pétrolières, ne soit pas parmi les mieux adaptés à une opération industrielle.

Cependant, on peut considérer dans une large mesure les procédés Pétrosix et Paraho comme des développements du procédé conçu initialement par l'US Bureau of Mines .

2 - Procédé Petrosix

Ce procédé, développé au Brésil par la SIX filiale de la Compagnie pétrolière PETROBRAS, repose sur le recyclage des gaz chauds (cf. figure I2). Les schistes crus sont injectés dans le réacteur par un dispositif anti-ségrégation composé d'un toboggan rotatif qui se déverse dans une cuve annulaire fixe. Le flux de gaz riche recueilli est séparé en trois portions. L'une est injectée à la base de l'unité pour récupérer la chaleur du schiste cuit, la seconde est réchauffée dans un four avant d'être injectée à mi-hauteur du réacteur pour fournir le complément de chaleur nécessaire à la pyrolyse, la dernière est traitée (séparation du soufre par le procédé Claus) et peut servir de combustible pour le four de réchauffage.

Un pilote de 2 000 t/j est en fonctionnement depuis 1972 avec des schistes de teneur moyenne (environ 70 l/t) et semble donner satisfaction. Toutefois la non-utilisation des calories contenues dans les résidus carbonés est un handicap pour ce procédé.

3 - Procédé Paraho

Ce procédé est issu d'un procédé de calcination des calcaires développé par Paraho Développement Corporation. L'adaptation de cette technique à la pyrogénéation des schistes a été entreprise par un groupe de 17 sociétés, conduit par Sohio Petroleum et comprenant les "majors" pétroliers.

Ce procédé, caractérisé par un dispositif d'alimentation anti-ségrégation, un système multiniveaux d'injection de gaz et une grille élaborée de déchargement des schistes cuits, existe en deux versions.

La première version basée sur une combustion interne est proche du procédé Combustion de gaz.

La seconde version basée sur le recyclage des gaz chauds est proche du procédé Pétrosix.

Une unité de démonstration d'une capacité de 600 t/j fut expérimentée avec succès de 1973 à 1976 à Anvil Points dans le Colorado et Paraho Corp. a signé un contrat avec le Gouvernement pour la production de 15 000 m³ destinés à des tests de raffinage.

4 - Procédé Lurgi

Le procédé LURGI fut développé en RFA dans les années 1950 pour la carbonisation basse température du charbon puis pour le cracking des hydrocarbures. Le transfert de chaleur est effectué par contact entre le solide à traiter et de fines particules chauffées. Dans de nombreux cas les solides étaient du sable ou du coke, pour les schistes bitumineux on choisit comme caloporteur les schistes brûlés.

Diagramme simplifié (cf. figure 13)

Les schistes crus broyés à moins de 1/2" sont introduits dans un mélangeur horizontal à vis dans lequel ils sont mélangés dans un rapport de 1 à 6 (en poids) avec les schistes brûlés chauds. La préparation se déverse en continu dans un réacteur où a lieu la pyrolyse. Les hydrocarbures vaporisés sont recueillis au sommet de l'unité, dépoussiérés et traités, le mélange des schistes cuits et brûlés est évacué vers un pot élévateur dans lequel une injection d'air permet la combustion des résidus carbonés; un combustible d'appoint (gaz combustible ou huile) peut également être injecté dans le pot élévateur afin que les cendres atteignent la température requise. Puis les cendres sont recueillies dans le silo d'alimentation du mélangeur; enfin la portion en excès de cendres et les gaz de combustion sont évacués après avoir traversé des unités de récupération de chaleur.

.../...

Ce procédé, testé sur un pilote de 16 t/j, semble conduire à un excellent rendement en huile tout en conservant une bonne efficacité thermique du fait de la combustion des résidus carbonés. Lurgi affirme par ailleurs être capable de construire des unités performantes de près de 5 000 t/j.

5 - Procédé Galoter

Ce procédé, mis au point assez récemment par les Soviétiques, est très proche du procédé Lurgi : combustion du carbone résiduel et utilisation des cendres comme agent caloporteur. Une unité de 500 t/j fonctionne depuis 1964 et a déjà produit 260 000 t de produits liquides et 102 Mm³ de gaz riche pour 1,93 Mt de schistes. La construction de deux unités de 3 300 t/j chacune a commencé en 1979.

6 - Procédé Tosco

Le procédé Tosco II (The Oil Shale Company) est issu du procédé suédois Asper. Il utilise un transfert indirect de chaleur par l'intermédiaire de billes de céramique (cf. figure 14).

Les schistes crus broyés à moins de 1/2" sont d'abord préchauffés par contact direct avec les gaz provenant du chauffage des billes puis sont injectés dans un tambour en rotation dans lequel des billes chaudes de céramique apportent le complément de chaleur nécessaire à la pyrolyse du kérogène. Puis les schistes cuits et les billes sont séparés dans un trommel; enfin les billes sont réchauffées par combustion du gaz de pyrolyse.

Des unités de tailles très différentes (3, 24, 1 000 t/j) ont permis la mise au point de ce procédé, qui semble être parmi les plus efficaces et les plus aptes à un développement commercial. Cependant la non-utilisation du carbone résiduel peut en réduire les attraits, notamment s'agissant de schistes pauvres.

7 - Les procédés Union Oil

La société Union Oil of California a développé différents procédés de pyrogénéation dont l'originalité essentielle consiste en une injection des schistes crus à la base du réacteur par un mécanisme qualifié de "pompe à roche".

Union Oil A

Ce procédé fut conçu dans les années 1940 pour des unités de 2 puis 50 t/j, puis expérimenté en 1956 sur un pilote de 1 000 t/j à Parachute Creek dans le Colorado. Il repose sur une combustion interne (cf. figure 15). Le schiste cru est introduit à la base du réacteur par une pompe à roche oscillante, l'air est injecté au sommet de l'unité où a lieu la combustion, puis les gaz de combustion portent le schiste à la température de pyrolyse; les cendres sont donc évacuées dans la partie supérieure et l'huile condensée sur le schiste froid à la base de l'unité.

Union Oil B

Ce procédé (cf. figure 16), testé uniquement à petite échelle actuellement (3 t/j), est basé sur le recyclage des gaz chauds.

Les schistes crus, plongés dans un bain d'huile jouant le rôle d'obturateur hydraulique, alimentent un dispositif de deux pompes alternées montées sur un chariot mobile. Le gaz chaud recyclé est injecté au sommet de l'unité où à lieu la pyrolyse. Les cendres et les effluents sont recueillis de la même manière que s'agissant du procédé Union A.

Union SGR

Ce procédé, actuellement à l'étude, pourrait conserver les bons rendements en huile de Union Oil B tout en possédant une meilleure efficacité thermique par l'utilisation du carbone résiduel.

Ce système consiste à coupler un réacteur Union B à un gazogène à coke : le schiste cuit est envoyé directement avec un mélange de gaz recyclé, de vapeur et d'air dans un réacteur où le carbone résiduel est gazéifié. Le gaz de coke ainsi obtenu est en partie utilisé pour produire la vapeur et en partie recyclé dans le réacteur de pyrolyse.

8 - Procédé Superior Oil

Ce procédé a été mis au point pour la valorisation, en plus de l'huile, de certains minéraux contenus dans les schistes du Colorado : nahcolite (Na H CO_3) et dawsonite ($\text{Na Al (OH)}_2 \text{CO}_3$).

On sépare dans un premier temps la nahcolite puis l'on récupère l'huile dans un réacteur de forme torique dans lequel une grille tournante fait passer le schiste par les différentes étapes de la pyrogénéation, qui peut s'effectuer par combustion directe ou par recyclage de gaz chauds; enfin on récupère les composés d'aluminium et de sodium.

Superior Oil affirme avoir testé avec succès ce procédé et surmonté les problèmes liés à l'environnement.

LISTE DES TABLEAUX

- 1 - Réserves d'huile de schiste
 - 2 - Réserves énergétiques mondiales
 - 3 - Filières de valorisation
 - 4 - Caractéristiques des principaux procédés
 - 5 - Réalisations et projets industriels d'exploitation de schistes bitumineux
 - 6 - Réserves de Nancy et Fécocourt
-

RESERVES D'HUILE DE SCHISTE

ZONES	Huile extractible par essai Fischer en 10^6 m^3	Teneur en l/t
AMERIQUE DU NORD	<u>357 000</u>	
- Canada	7 000	92
- Etats-Unis	350 000	
{ Wyoming-Colorado-Utah	318 000	100
{ Centre et Est	32 000	
AMERIQUE LATINE	<u>127 383</u>	
- Argentine	60	
- Brésil	127 320	>105
{ Irati	127 000	79
{ Vallée de la Paraíba	320	
- Chili	3	>105
EUROPE	<u>6 730</u>	
- Allemagne Fédérale	320	50
- Espagne	40	
- France x	100	40 - 100
- Grande Bretagne	160	90 - 166
- Italie (Sicile)	5 600	
- Luxembourg	110	
- Suède	400	50 - 52
EUROPE DE L'EST ET URSS	<u>17 956</u>	
- Bulgarie	20	142
- Pologne	6	
- Yougoslavie	30	113
- URSS	17 900	146 - 208
{ Estonie-Région de Léninegrad	3 500	200 - 358
{ Reste de la Russie d'Europe	2 000	
{ Sibérie	12 400	
AFRIQUE - MOYEN-ORIENT	<u>16 107</u>	
- Afrique du Sud=	20	190
- Congo - Kinshasa	16 000	167
- Israël	3	65
- Jordanie	7	
- Maroc	74	
- Turquie	3	
AUSTRALIE	<u>43</u>	63 - 417
NOUVELLE ZELANDE	<u>40</u>	276
ASIE	<u>4 883</u>	
- Birmanie	320	
- Chine populaire	4 430	
{ Fushun	330	32 - 63
{ autres	4 100	
- Thaïlande	130	< 298
- Tasmanie	3	
T O T A L	<u>530 142</u>	

RESERVES ENERGETIQUES MONDIALES

LEUR LOCALISATION

Pétrole
réserves prouvées au 01.01.80
(en 10^6 t)

Monde	87 500
OPEP	70 %
URSS	10 %
Amérique du Nord	5 %
Mexique	5 %
Autres	10 %
27 années au rythme de production 1979	

Gaz Naturel
réserves au 01.01.80
(en 10^3 Tcal)

Monde	67 900
URSS	35 %
Etats-Unis	8 %
CEE	5 %
OPEP	37 %
Autres	15 %
56 années au rythme de production 1978	

Charbon
réserves prouvées
(en 10^6 t)

Monde	1 307 000
Etats-Unis	37 %
URSS	21 %
CEE	16 %
Chine	15 %
Autres	11 %
466 années au rythme de production 1978	

Uranium (en 10^3 t)
réserves raisonnables assurées

Monde	2 590
Etats-Unis	27 %
Afrique du Sud	20 %
Australie	12 %
Canada	9 %
28 années au rythme de production 1978	

Schistes bitumineux
huile récupérable (10^6 t)
(1)

Monde	27 000
Amérique du Nord	41 %
Amérique du Sud	26 %
Europe	15 %
Asie	13 %
Afrique	5 %

Huiles lourdes et bitumes
quantités en place (10^6 t)

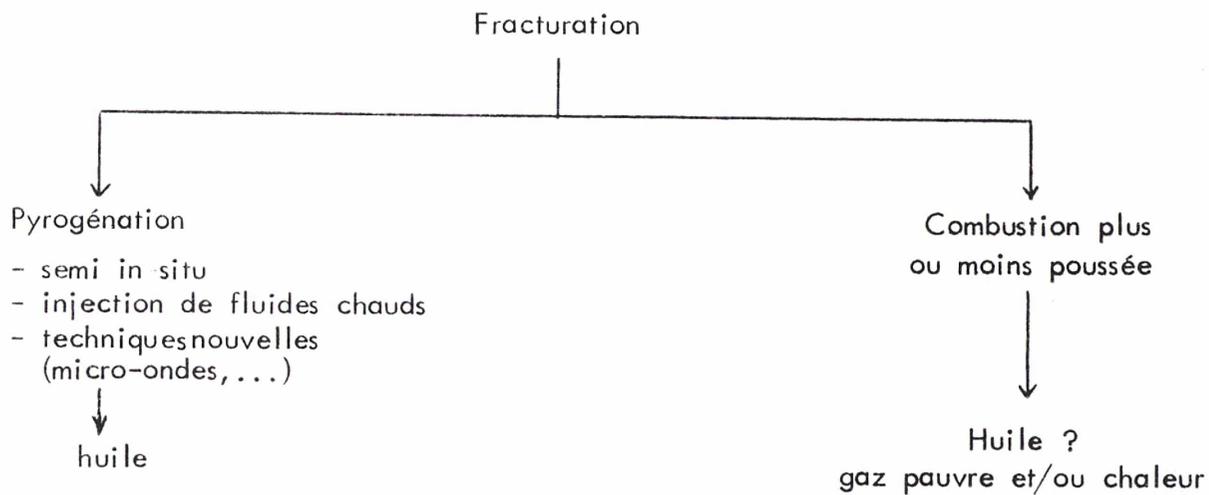
Monde	318 000
Canada	47 %
Venezuela	39 %
Moyen-Orient	4 %
Etats-Unis	7 %
Autres	3 %

(1) dans les conditions actuelles

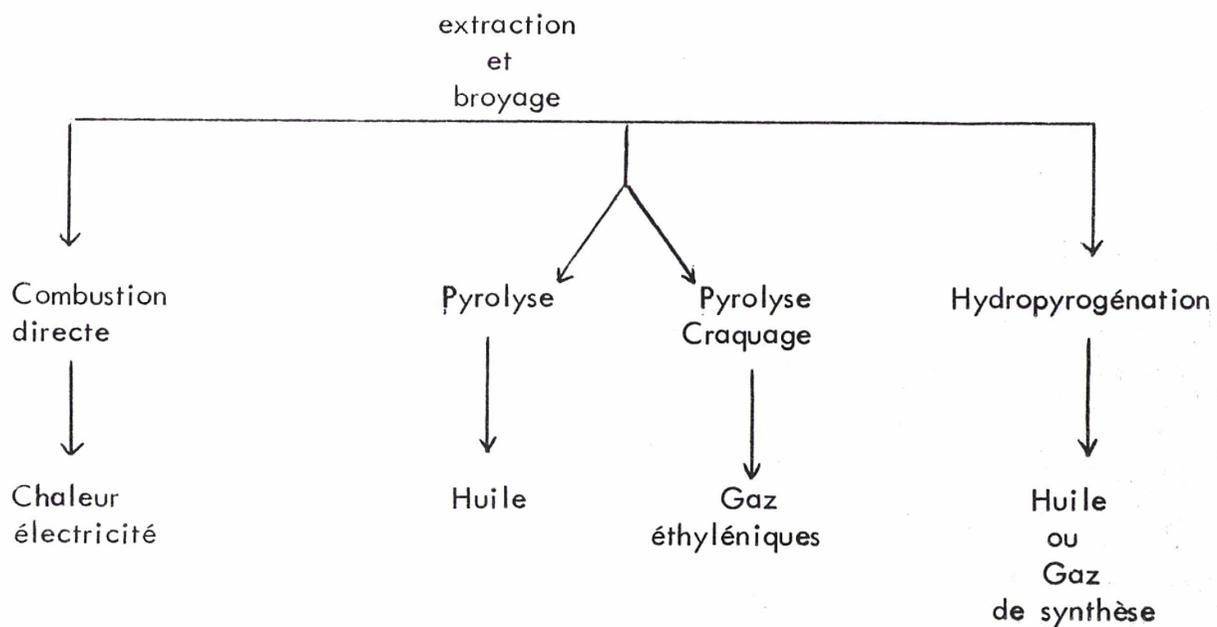
Sources IFP - ONU

Tableau 3

Valorisation in situ (ou semi-in-situ)



Valorisation ex situ



CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX PROCEDES

Procédé	Combustion de gaz	Pétrosix	Paraho A	Paraho B	Lurgi	Galoter
Transfert de chaleur	combustion interne	recyclage de gaz chauds	combustion interne	recyclage de gaz chauds	circulation des cendres	circulation des cendres
Pilote						
Date	1950-51 - 1952-55 1964-66	1972	1974	1976	1960 - 1976	
Capacité t/j	6,25,150	2 000	600		16	500 3 300 (en construction)
Granulométrie	1/4" à 3"	1/4" à 3"	1/4" à 3"	1/4" à 3"	≤ 1/2"	≤ 1"
Rendement par rapport à l'essai Fischer	82 à 87 %	80 - 90 %	95 %	97 %	100 %	

CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX PROCEDES

Procédé	Tosco	Union Oil A	Union Oil B	Union SGR	Superior Oil
Transfert de chaleur	circulation de billes de céramique	combustion interne	recyclage de gaz chauds	recyclage de gaz chauds provenant d'un gazogène	combustion ou recyclage de gaz chauds
Pilote					
Date	1955-57 - 1965-66 1971-72	1948, 1956-58	1973-74		1975
Capacité (t/j)	24, 1000	2, 30, 360 à 1 200	3		360
Granulométrie	≤ 1/2"	1/8" à 3"	1/8" à 3"	1/8" à 3"	≤ 3"
Rendement par rapport à l'essai Fischer	105 %		97 %		95 - 100 %

REALISATION ET PROJETS INDUSTRIELS
D'EXPLOITATION DE SCHISTES BITUMINEUX

Pays	Compagnie	Lieu	Procédé	Production	Investi ^{ts} * (M\$)
U.S.A.	Union Oil	Colorado	ex situ Union Oil B	pilote 9 000 b/j puis 50 000 b/j (1985 ?)	800
U.S.A.	Arco-Tosco	Colorado	ex situ Tosco II	50 000 b/j (1985)	1 300
U.S.A.	Occidental Ashland	Colorado bloc c-b	semi- in situ Occidental	57 000 b/j (1985)	900
U.S.A.	Rio Blanco Gulf+St Indiana	Colorado bloc c-a	semi - in situ	76 000 b/j (1987)	> 1 000
Brésil	Petrobras	Sao Mateus do Sul (Parana)	ex situ Petrosix	50 000 b/j (1985)	1 000 à 2 000
U.R.S.S.		Estonie Région de Leningrad	ex situ combustion Kiviter Galoter	36 Mt de schistes en 1979	
Chine		Fushun	ex situ dérivé de Pintsh	300 000 t huile	

* Le montant des investissements est exprimé en millions de dollars courants à des dates variant de 1977 à 1979 et se rapporte à des définitions différentes. Seul l'ordre de grandeur est donc significatif.

TABLEAU DES RESERVES EN HUILE DES SCHISTES BITUMINEUX

PERMIS DE FECOCOURT ET NANCY

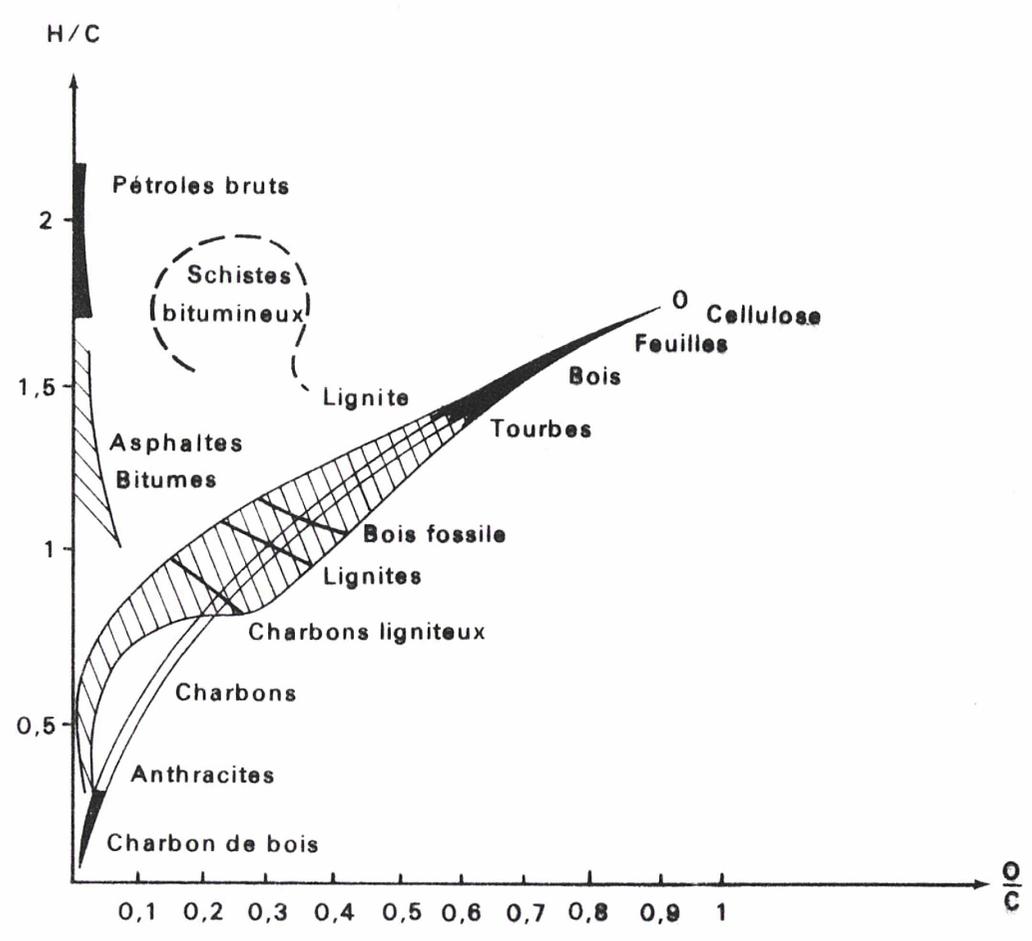
Permis	Taux de coupure (en kg/t)	Taux de découverte	Surfaces exploitées (hectares)	Tonnage d'huile récupérée 10 ⁶ tonnes	Tonnage de stérile 10 ⁶ tonnes	Tonnage de schistes à extraire 10 ⁶ tonnes
Nancy	35	1	385	23,7	238	555
		2	480	31,5	458	732
		3	565	38,5	733	892
		4	735	52,3	1 537	1 211
Nancy	45	1	320	19,3	170	422
		2	440	28,9	429	628
		3	510	34,4	640	748
		4	550	45,4	1 232	984
Nancy	50	1	265	16	142	326
		2	360	23,4	328	473
		3	430	28,6	512	578
		4	555	37,7	965	760
Fécocourt	35	1	1 085	75,8	495	1 816
		2	1 305	97,5	1 140	2 332
		3	1 505	117	1 966	2 804
		4	1 860	153	4 039	3 647
Fécocourt	40	1	1 050	70,8	427	1 669
		2	1 275	92,5	1 054	2 177
		3	1 475	112	1 851	2 632
		4	1 835	147	3 908	3 459
Fécocourt	45	1	940	58	347	1 291
		2	1 115	73,6	783	1 631
		3	1 285	88,5	1 360	1 957
		4	1 630	119	3 073	2 633

LISTE DES FIGURES

- 1 - Energies fossiles - Diagramme en fonction des rapports O/C et H/C
 - 2 - Historique de production d'huile de schiste
 - 3 - Réserves de pétrole brut
 - 4 - Réserves énergétiques mondiales
 - 5 - Investissements pour les énergies
 - 6 - Coûts de production pour les énergies
 - 7 - Approvisionnements énergétiques mondiaux jusqu'à l'an 2000
 - 8 - Procédé Occidental
 - 9 - Situation des principaux gîtes français de roches bitumineuses
 - 10 - Isopaques des schistes du Toarcien
 - 11 - Procédé Combustion de gaz
 - 12 - Procédé Pétrosix
 - 13 - Procédé Lurgi - Ruhrgas
 - 14 - Procédé Tosco II
 - 15 - Procédé Union Oil A
 - 16 - Procédé Union Oil B
-

ENERGIES FOSSILES

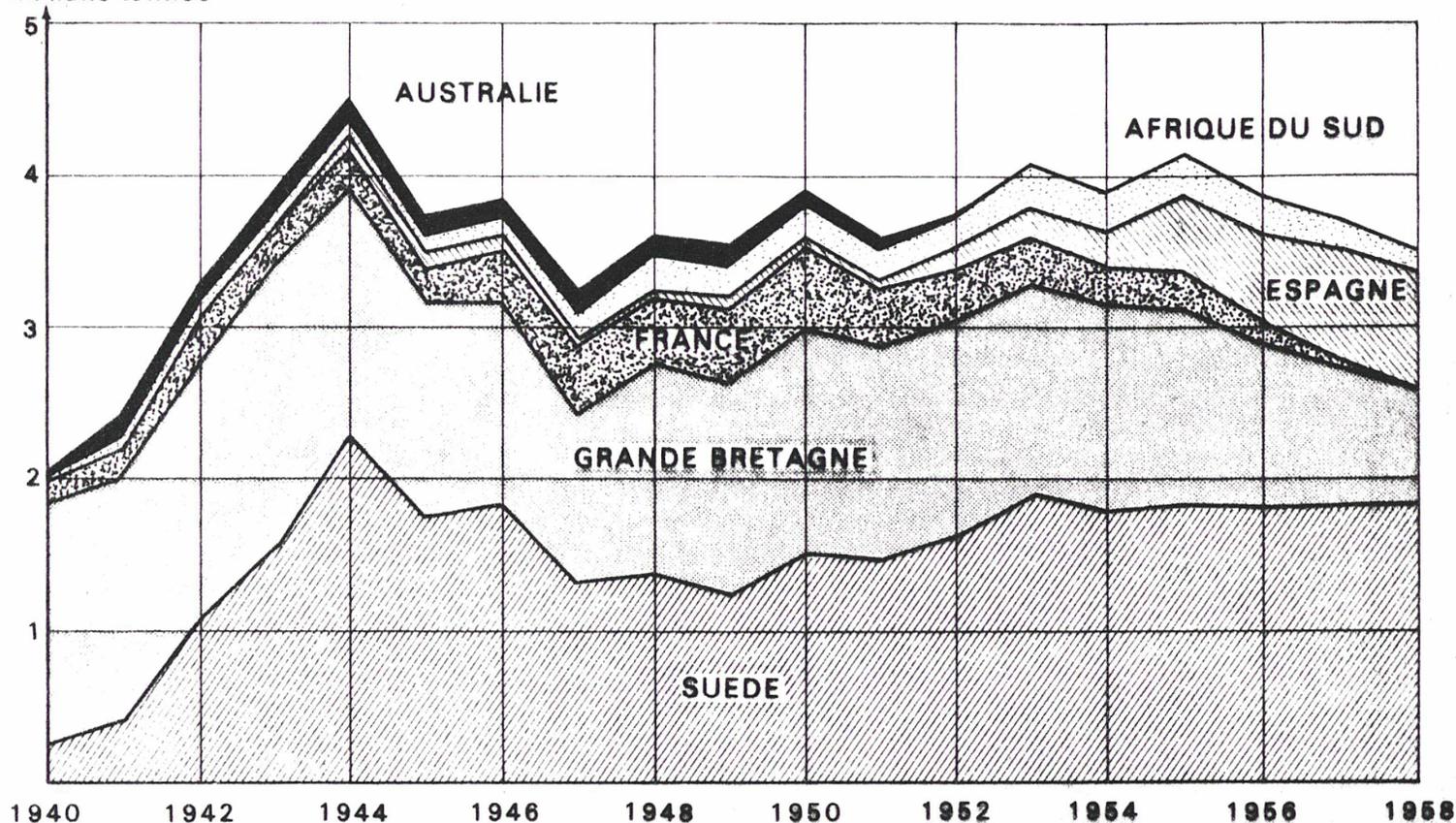
DIAGRAMME EN FONCTION DES RAPPORTS O/C ET H/C



Source : "Bois et Charbon de bois" de Y. Schwob

PRODUCTION D'HUILE DE SCHISTE DU MONDE LIBRE DE 1940 à 1958

millions tonnes

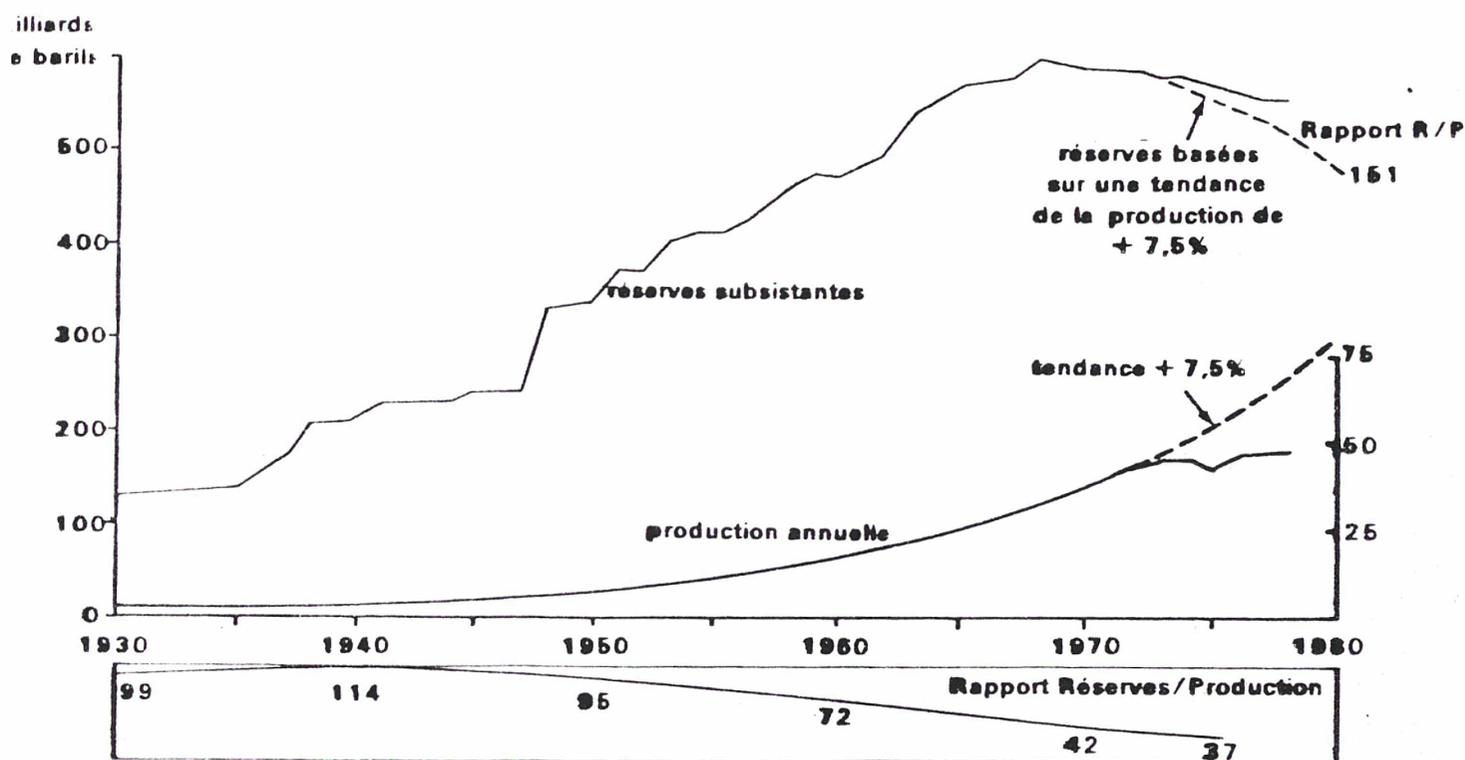


PRINCIPALES EXPLOITATIONS DE SCHISTES BITUMINEUX EXISTANT OU AYANT EXISTE DANS LE MONDE

PAYS CONCERNES	CHRONOLOGIE	
	1840 1860 1880 1900 1920 1940 1960 1980	
EUROPE	FRANCE	AUTUN 1838 — 1867 SEVERAC-LE-CHATEAU 1840 St MILAIRE 1841
	GRANDE BRETAGNE	1860 — 1993 ECOSSE
	SUISSE	MERIDE (jura) 1815 —
	SUEDE	KVARNTORP 1921 — 1966
	ESPAGNE	PUERTOLLANO 1922 — 1968
U.R.S.S.	ESTONIE 1921 —	
U.S.A.	COLORADO —	
BRESIL	PARAIBA 1901 — 1900 1941 — 1957 MATI 1972	
AFRIQUE DU SUD	ERMELO 1935 — 1960 (Epuisé)	
AUSTRALIE	OLEN DAVIS 1965 — 1992	
CHINE	MANDCHOURIE (Fuehien) 1929 —	

RESERVES SUBSISTANTES ET PRODUCTION ANNUELLE DE PETROLE BRUT DANS LE MONDE NON-COMMUNISTE (MNC)

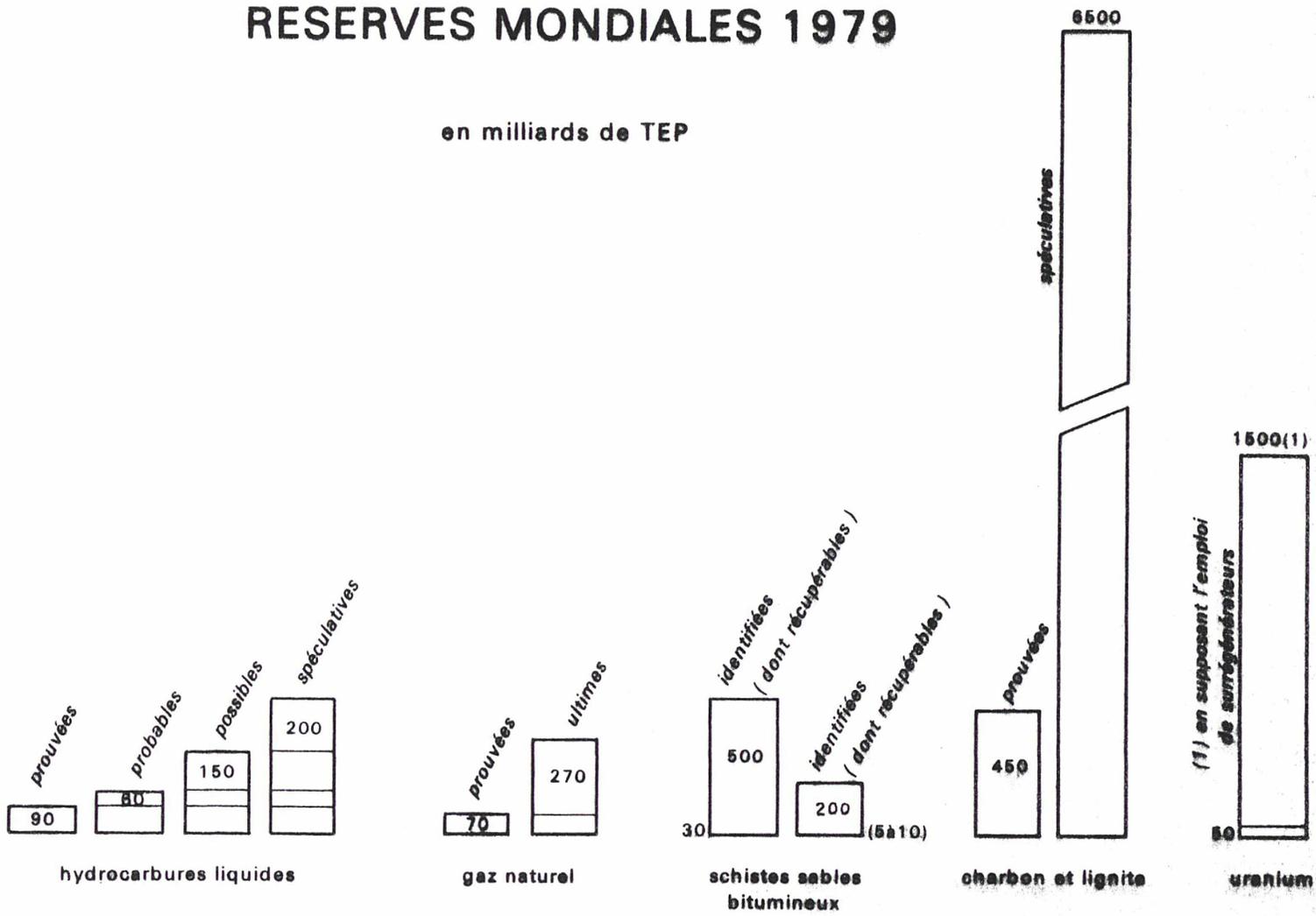
Les réserves déclinent depuis 1968.
Les chiffres sont basés sur les
estimations actuelles des réserves
affectées à l'année de la découverte
R/P indique le rapport réserves/production



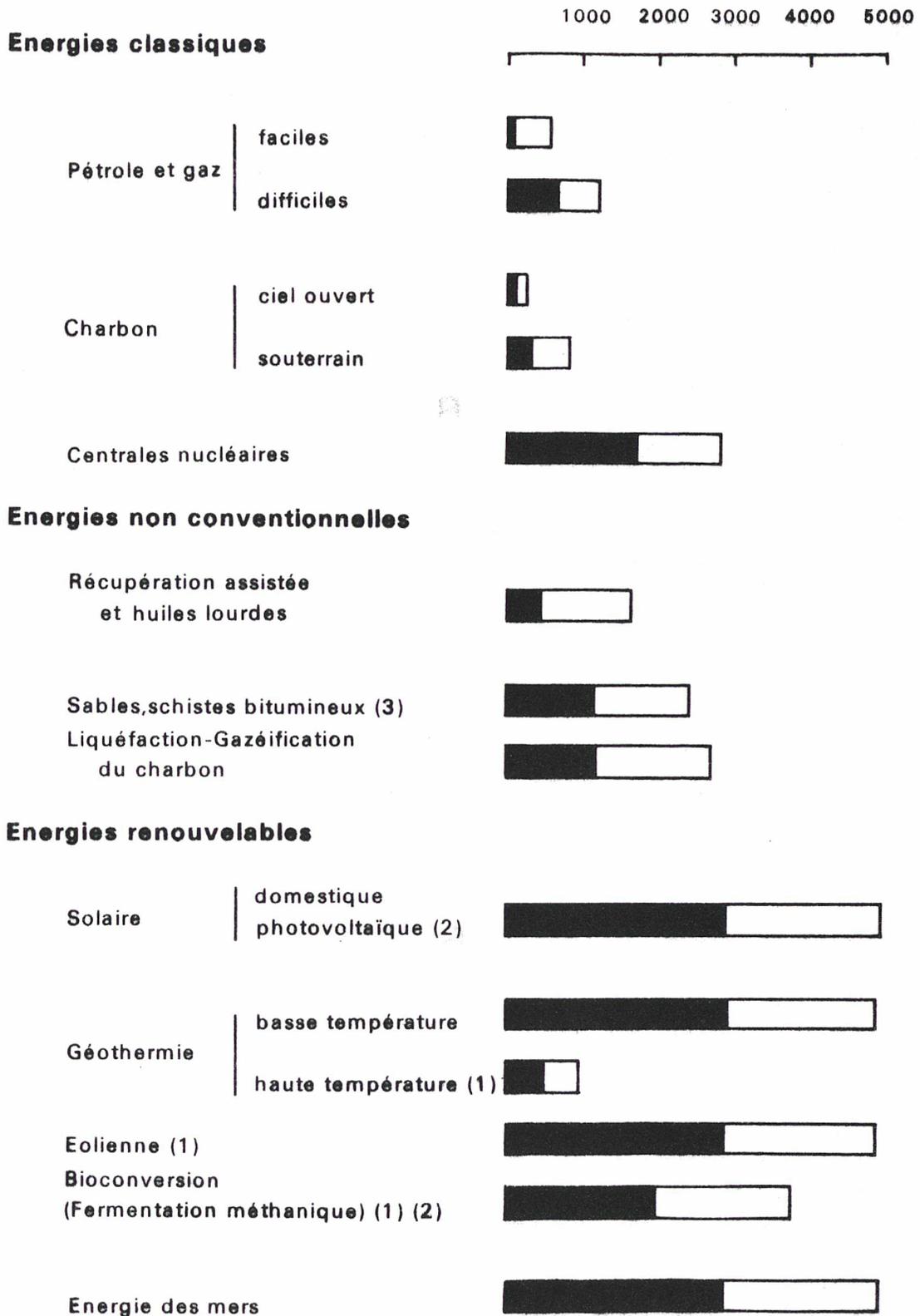
Source : BP

RESERVES MONDIALES 1979

en milliards de TEP



INVESTISSEMENTS POUR LES ENERGIES (F/T p/an)



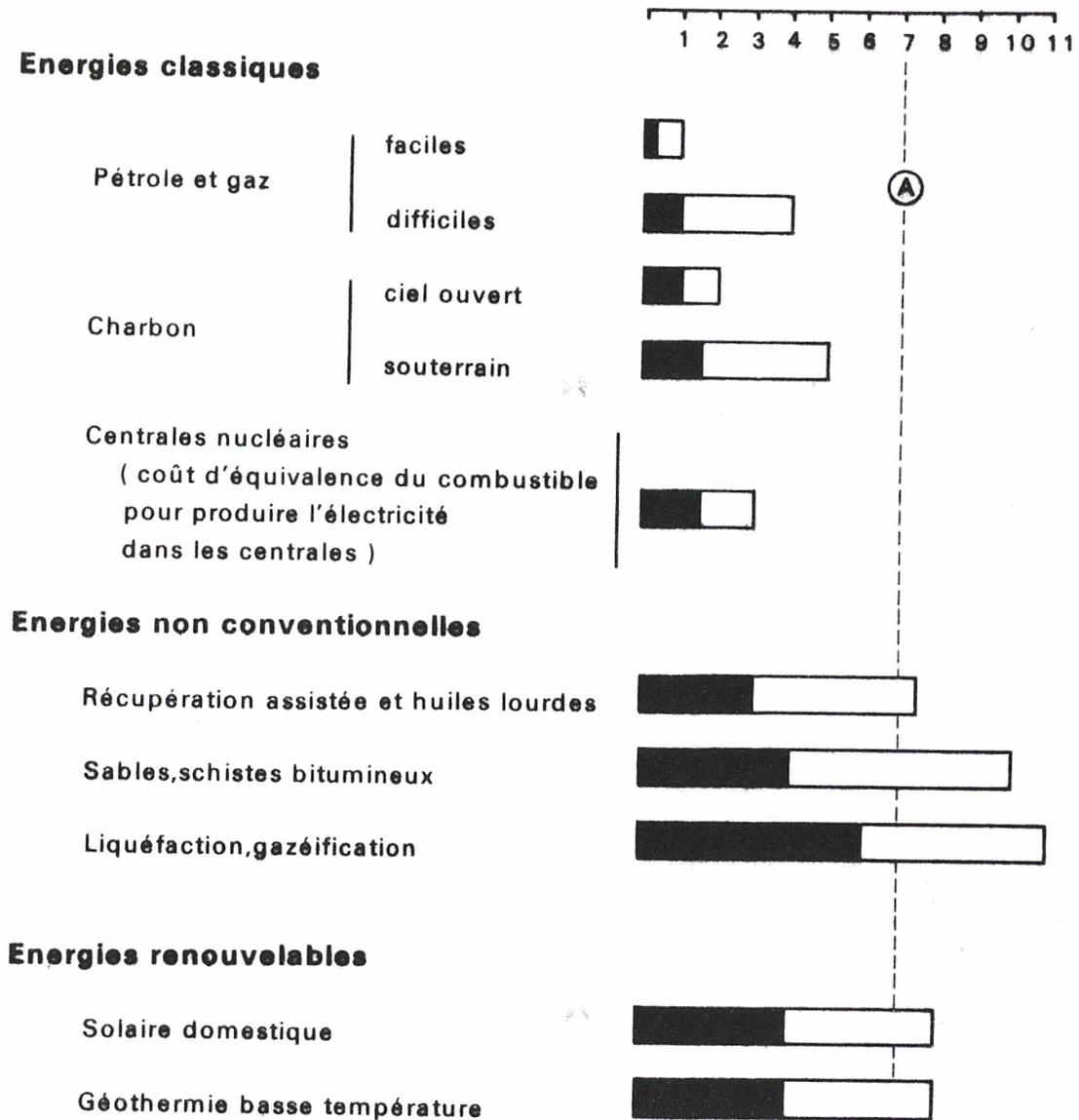
(1) cas particuliers-Faibles quantités disponibles en pratique

(2) peu significatif actuellement

(3) cf.chapitre III-4

COÛTS DE PRODUCTION POUR LES ENERGIES

(centime/thermie)



Ⓐ prix du pétrole de référence : Europe du Nord

APPROVISIONNEMENTS ENERGETIQUES MONDIAUX

JUSQU'EN L'AN 2000

(dans l'hypothèse d'une croissance économique faible)

Demande

--- Demande avant économie d'énergie

□ Economies d'énergie

— Demande

Approvisionnement

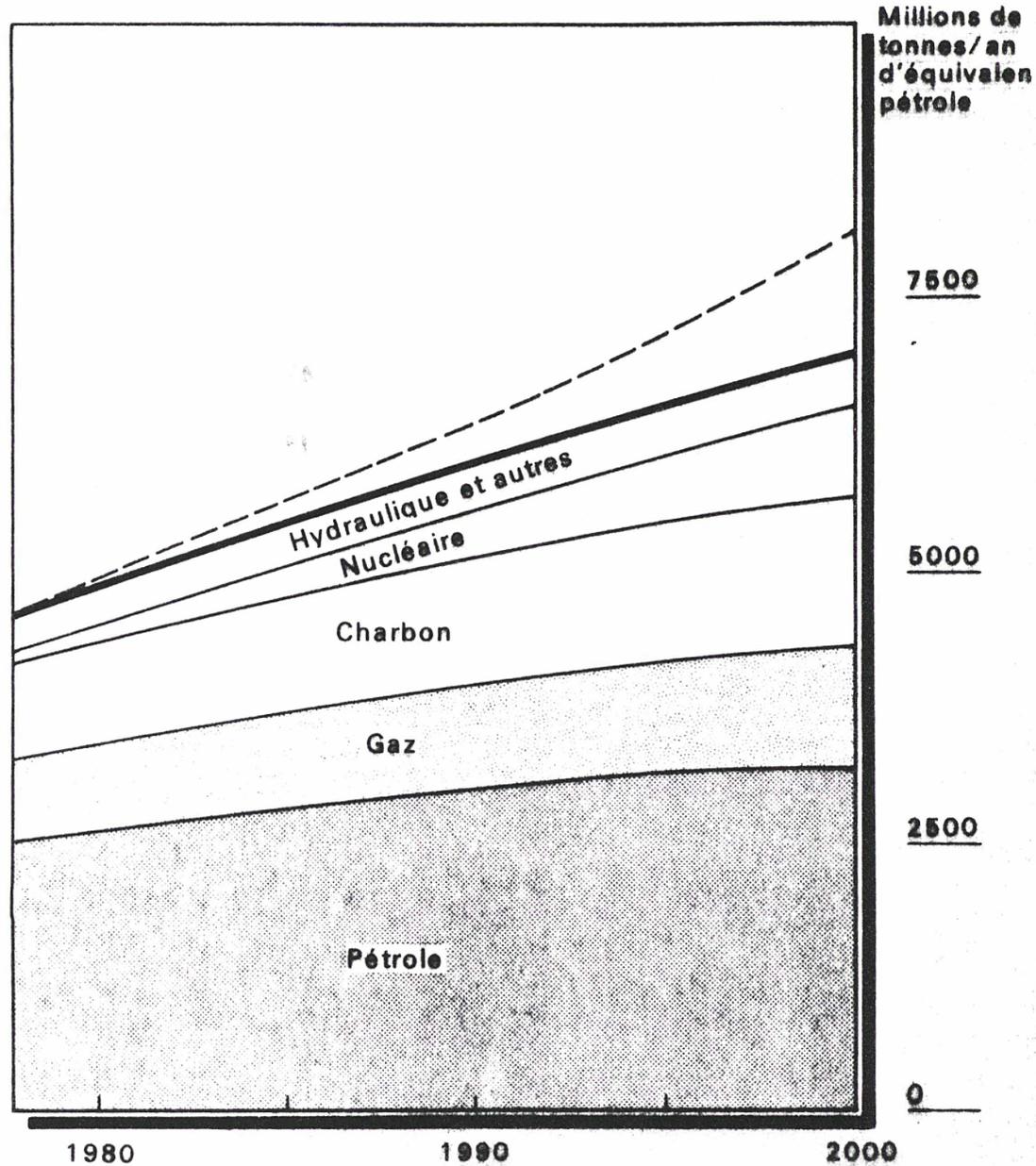
□ Hydro-électricité et autres

□ Nucléaire

□ Charbon

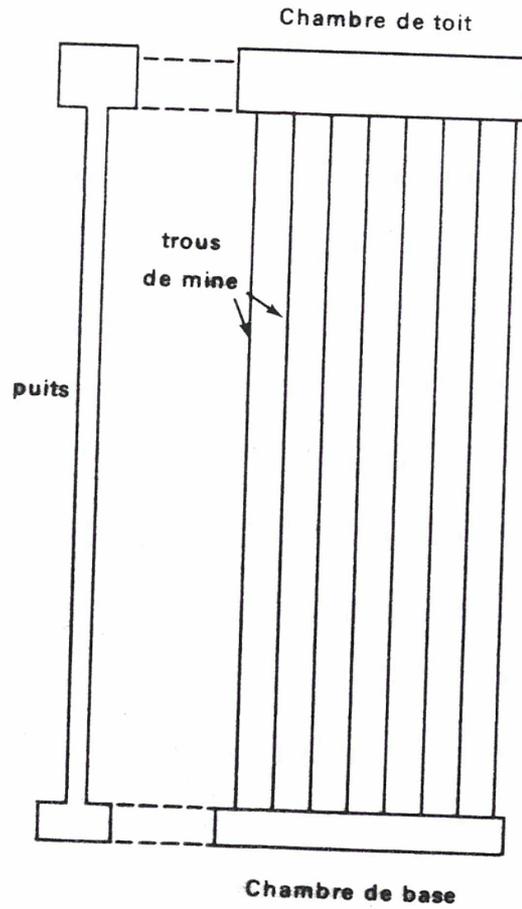
□ Gaz Naturel

□ Pétrole

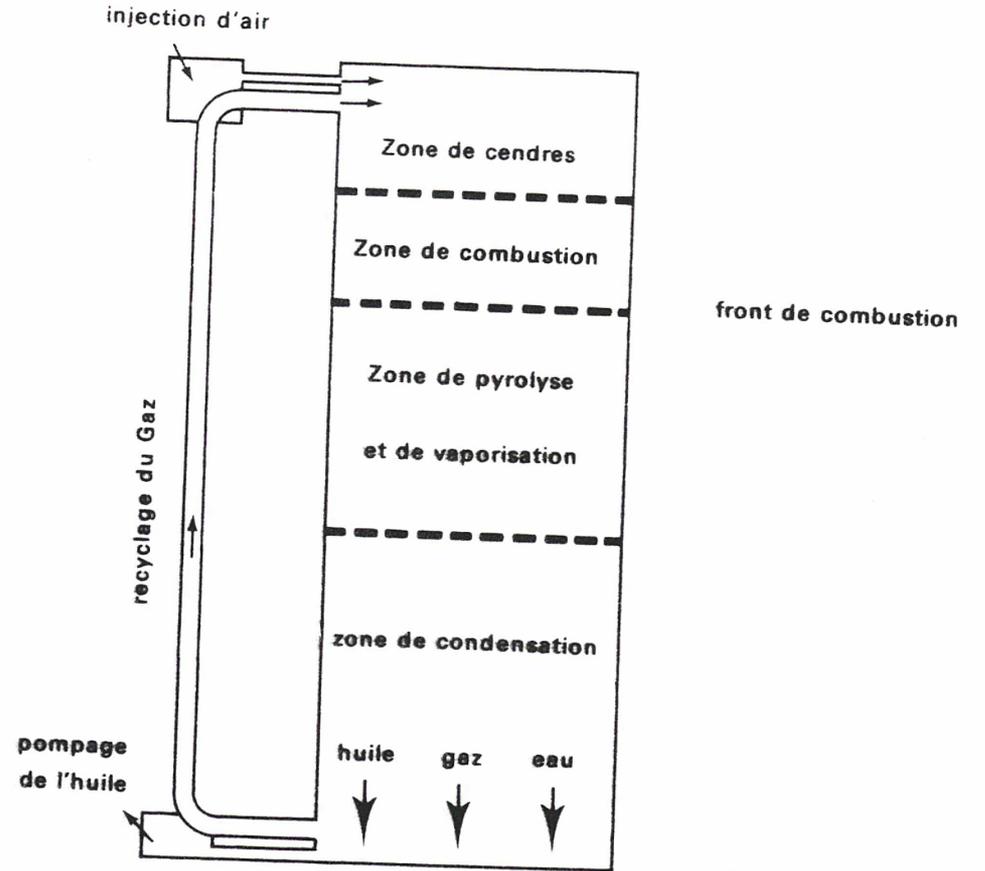


(non compris U.R.S.S., Europe de l'Est et Chine)

PROCEDE OCCIDENTAL



Phase préparatoire



Phase de combustion

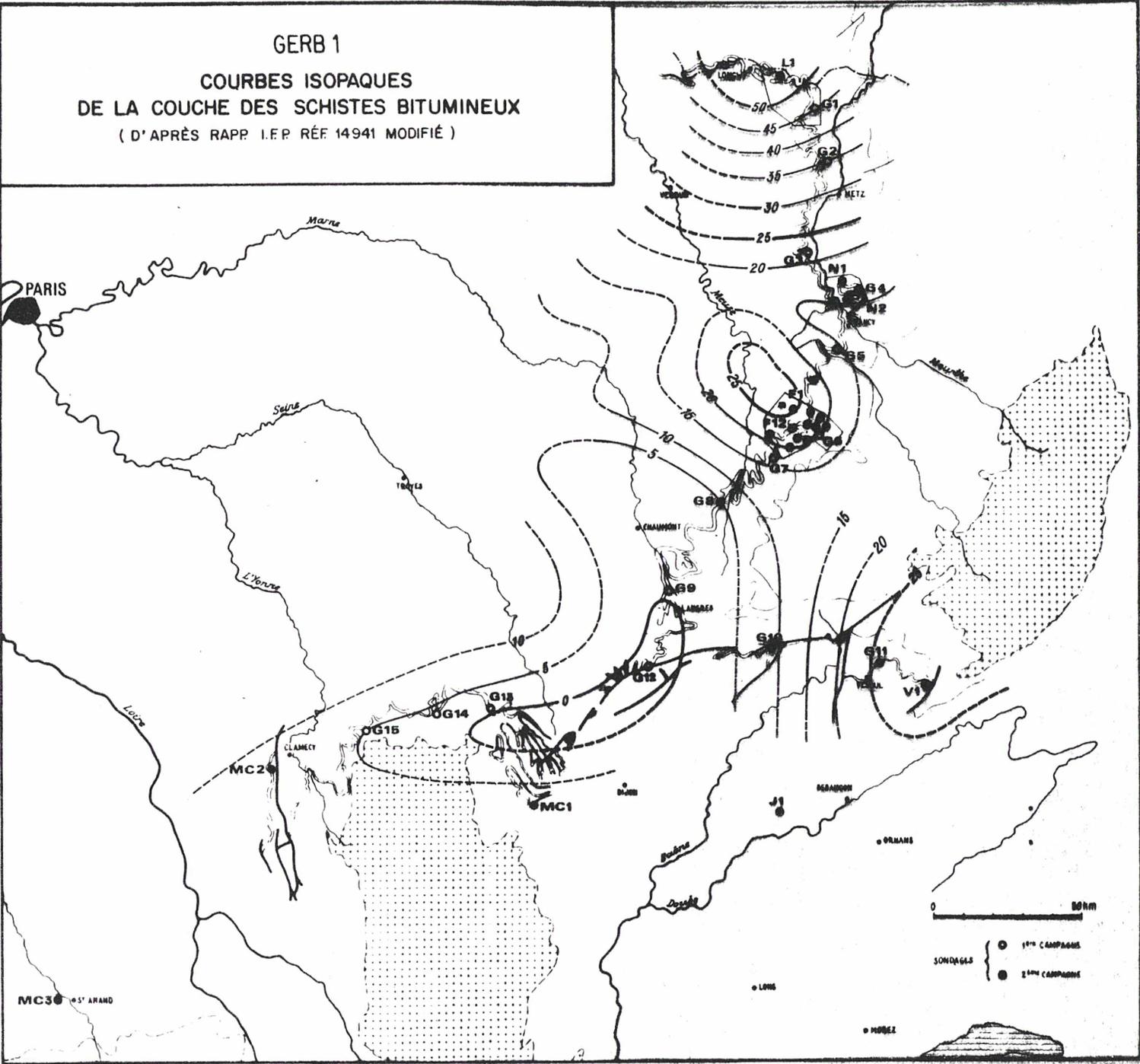


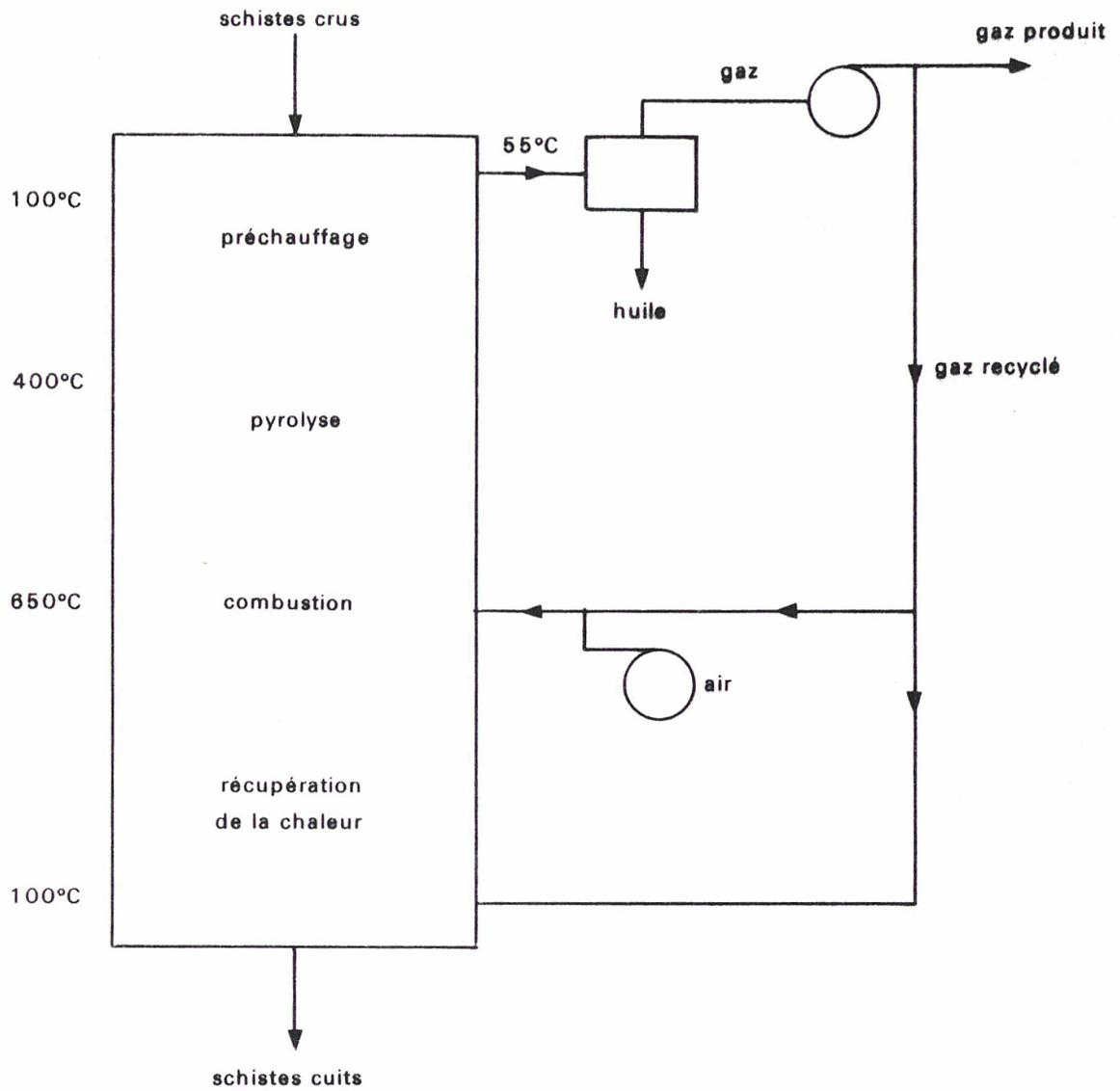
SITUATION DES PRINCIPAUX GITES FRANCAIS
DE ROCHES BITUMINEUSES

Source GERB

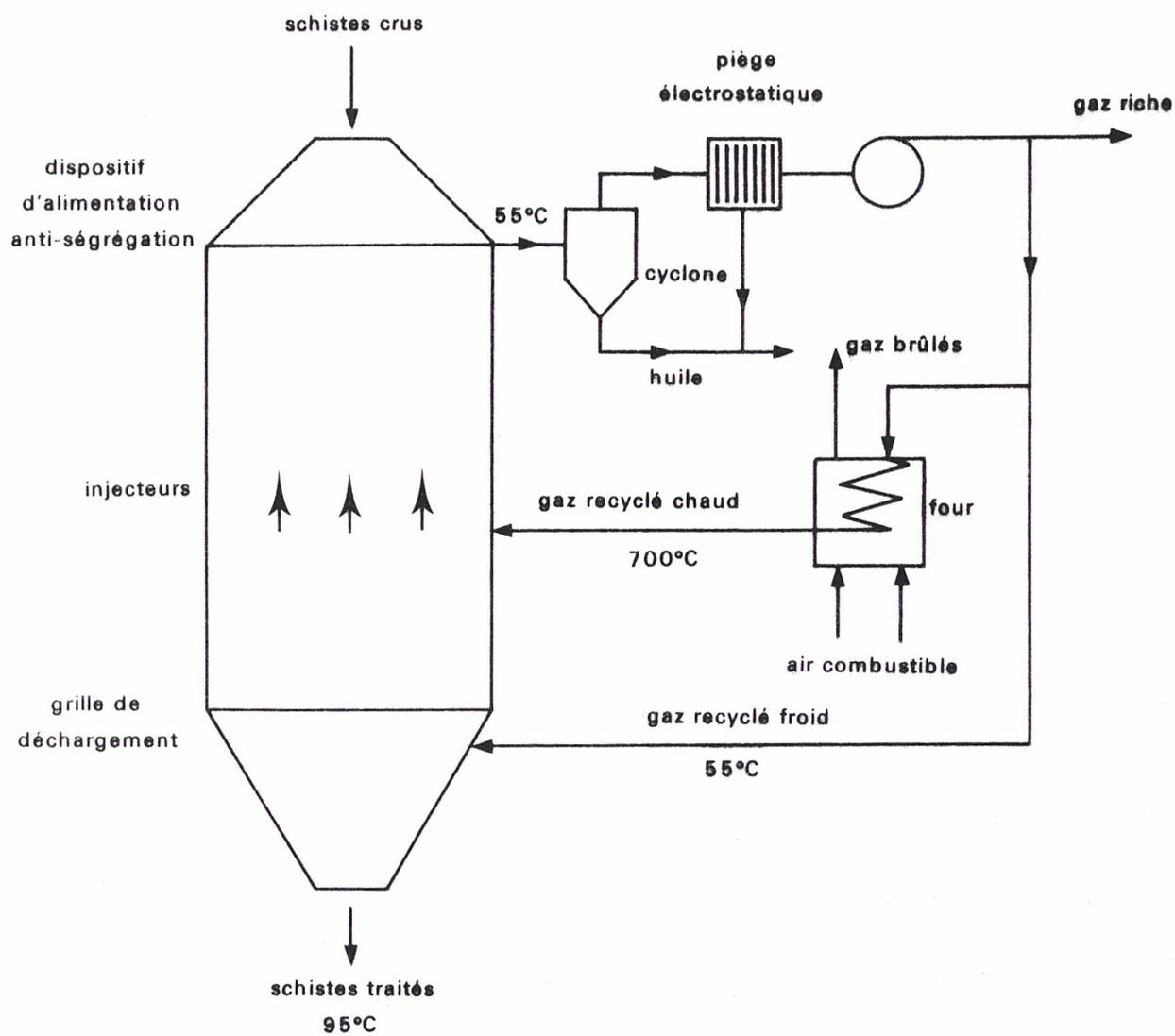
N°	REGION	DEPARTEMENTS	LITHOLOGIE	ETAGE
1	Bassin du Nord - Pas-de-Calais	59 - 62	Schistes	Houiller
2	Bassin de Lorraine	57	"	"
3	Bassin de Ronchamp	70	"	"
4	Bassin de Commeny	03	"	"
5	Bassin de Decazeville	12	"	"
6	Bassin du Plessis	50	"	"
7	Bassin de Faymoreau	85	"	"
8	Bassin de Vendes-Champleix	15	"	"
9	Bassin du Reyrat	83	"	"
10	Bassin de Blanzey-Creusot	71	"	Houiller et Autunien
11	Bassin du Bas Dauphiné	69 - 38	"	"
12	Bassin d'Autun	71	"	Autunien
13	Bassin de l'Aumance	03	"	"
14	Bassin de Decize-La Machine	58	"	"
15	Bassin de Bert-Montcombroux	03	"	"
16	Région d'Aspéville	36	"	"
17	Bassin de Lodève	34	"	"
18	Bassin de Ste Affrique	12	"	"
19	Sud des Vosges (Jussey)	70	Schistes et calcaires	Hettangien
20	Bordure Nord Pyrénéenne	09	"	"
21	Sud Vosges - Nord Jura	70	Schistes - cartons	Toarcien inférieur
22	Jura - Baume les Dames	25 - 70	"	"
23	Jura - Besançon	70	"	"
24	Jura - Lons-le-Saunier	39	"	"
25	Causses - Séverac-le-Château	12	"	"
26	Causses - Millau	12	"	"
27	Normandie	14	"	"
28	Lorraine	57 - 54 - 88	"	"
29	Seuil Morvano-Vosgien	52 - 21 - 89	"	"
30	Sud Bassin de Paris	58 - 18 - 36	"	"
31	Dios	05 - 26	Schistes	Bathonien - Callovien
32	Sud Jura (Orbagnoux)	01	Calcaires	Kimméridgien
33	Bord SW Massif Central	24 - 46	Calcaires et schistes	"
34	Vagnas - Salavas	07	Schistes	Santonien
35	Menat	63	"	Eocène à Oligocène
36	La Boutarisse	63	"	"
37	Laveyssière	15	"	"
38	Bassin de Manosque	04	"	Oligocène
39	Malvezey	11	Calcaires et schistes	"
40	Région d'Apt	84	"	"
41	Nord Alsace	67	Schistes à poissons	"
42	Frodefontaine	90	"	"
43	Louv	68	Calcaires	Dogger
44	Région de Bellegarde	01 - 74	Calcaires et grès	Crétacé et tertiaire
45	Région de Muzièges	74	"	"
46	Région de Lovagny	74	"	"
47	Brioules-Salines	64	Schistes ligniteux	Cénomaniens
48	Bassin d'Alès	30	Calcaires	Eocène à Oligocène
49	Lobsann	67	Calcaires	Oligocène
50	Fossé de Limagne	63	} Calcaires, grès et pépérites	"
51	Fossé de Limagne	63		"
52	Bassin de Manosque	04	Calcaires et grès	"
53	Hirtzbach	68	Sables	"
54	Bastennes - Gaujacq	40	Sables et faluns	Miocène

Source
GERB

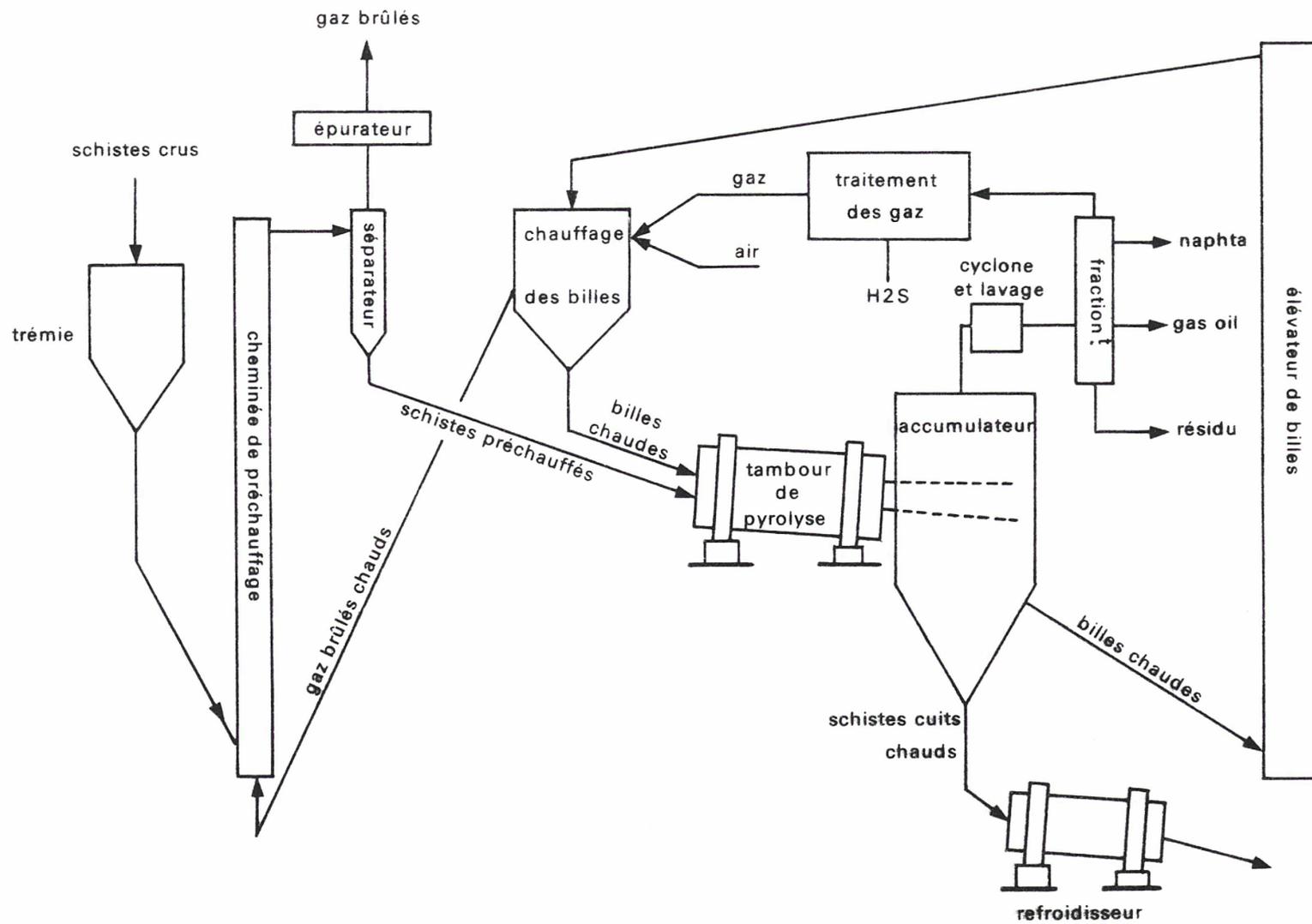




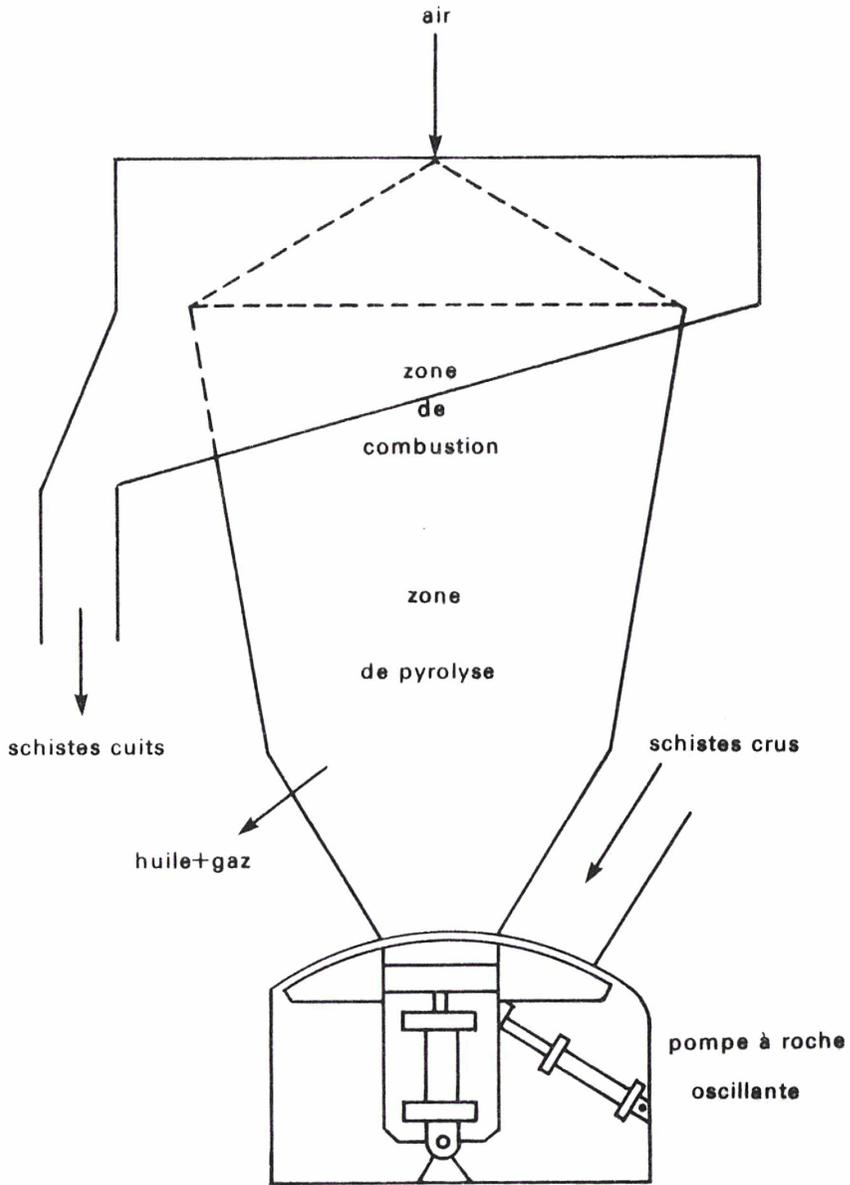
PROCEDE COMBUSTION DE GAZ



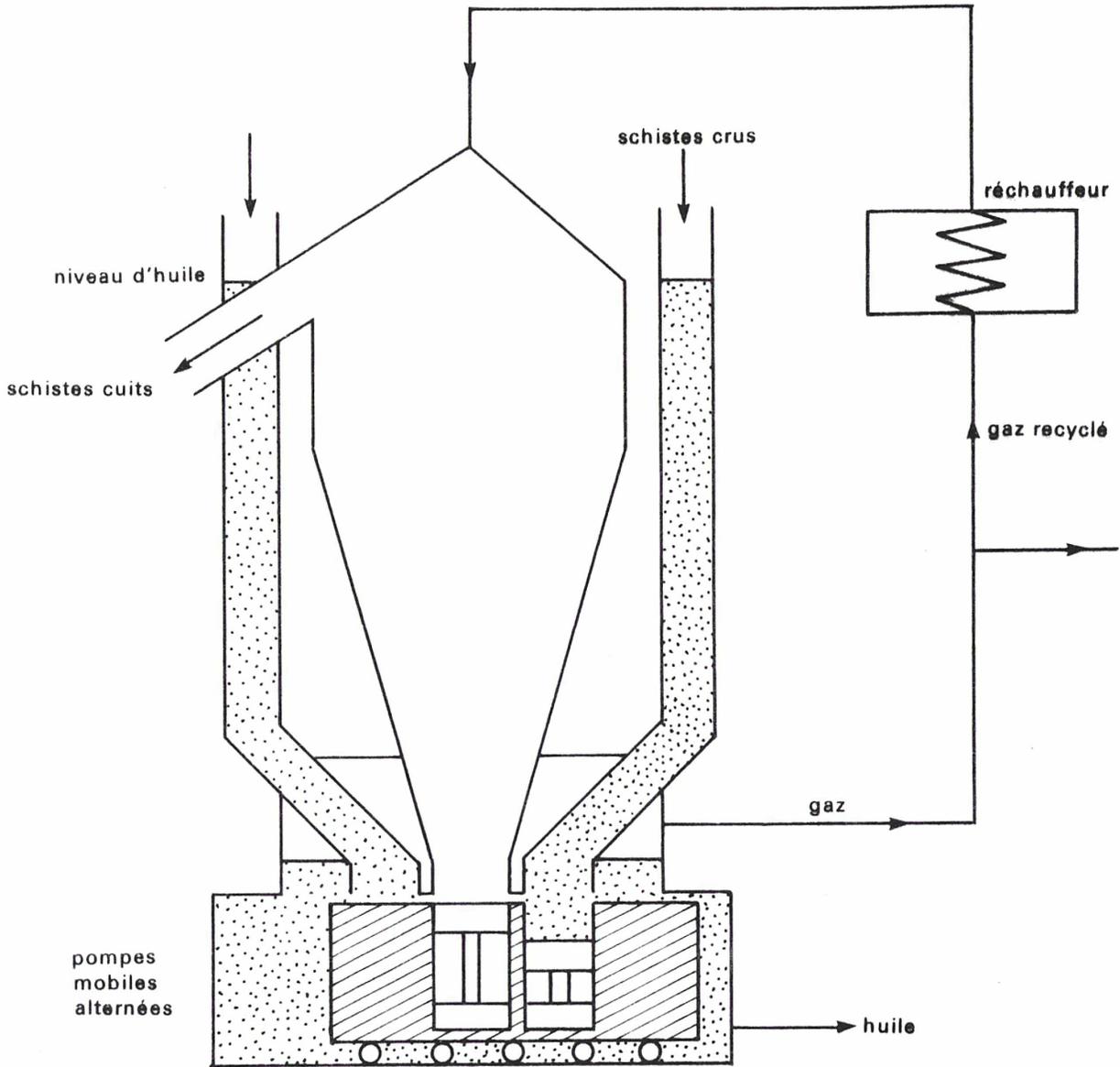
PROCEDE PETROSIX



PROCEDE TOSCO II



PROCEDE UNION OIL A



PROCEDE UNION OIL B

A N N E X E I I

L'EXPLOITATION PILOTE DES SCHISTES BITUMINEUX
A SAO MATEUS DO SUL - BRÉSIL

Compte rendu de la mission effectuée au Brésil
du 2 au 9 février 1980 par :

MM.	R. DUDAN	B.R.G.M. Rio
	J. GONI	B.R.G.M. Orléans
	P. SOLETY	B.R.G.M. Orléans
	B. DUPRAZ	Ingénieurs-élèves des Mines
Mme	T. MARTINET	Stagiaires à la Direction des Hydrocarbures

par B. DUPRAZ et T. MARTINET

8'

A la suite de l'expérimentation du pilote de SAO MATEUS DO SUL, le Brésil a pris la décision de passer au stade industriel en lançant une unité de production de 2,5 Mt/an d'huile de schiste.

La mission du B.R.G.M. avait, dans ce contexte, pour objet de mettre à jour et de compléter les informations recueillies par MM. GONI, COMBAZ et TISSOT lors d'une précédente mission en avril 1975, en particulier sous l'angle du bilan énergétique.

On ne rappellera donc pas ici les éléments fournis dans le rapport de 1975.

S O M M A I R E

- I - La situation énergétique brésilienne
- II - Les schistes bitumineux brésiliens
 - II.1. Les schistes de la vallée de la PARAIBA
 - II.2. Les schistes de l'IRATI
- III - Le pilote de SAO MATEUS DO SUL
 - III.1. La carrière
 - III.2. La préparation des schistes
 - III.3. L'unité de pyrolyse
 - III.4. Le réaménagement
- IV - Le projet industriel
 - IV.1. Données techniques sur le projet
 - IV.2. Le bilan énergétique
- V - Conclusion

I - La situation énergétique brésilienne

Cinquième pays du monde par sa superficie (8,5 millions de km²), sixième par sa population (113 millions d'habitants en 1978), le Brésil est en développement rapide : la croissance du PNB y a été de 7,4 % par an, de 1970 à 1976.

L'évolution de la situation énergétique du Brésil, de 1967 à 1977, et les prévisions établies pour 1985 par le Ministère des Mines et de l'Energie sont présentées dans le tableau 1.

De 1967 à 1977, la consommation totale d'énergie a doublé avec un taux moyen d'accroissement de 7,2 % par an.

Le tableau 1 met en évidence trois pôles énergétiques en 1977 :

- les ressources "non commerciales" (bois, charbon de bois, bagasse) constituent un poste relativement important, même si leur part respective diminue régulièrement,

- l'hydroélectricité a connu une croissance spectaculaire qui devrait se poursuivre,

- le pétrole est, pour la plus grande part, importé. En effet, de 1967 à 1977, la production brésilienne étant restée de l'ordre de 8 Mt/an, les importations sont passées de 12 à 41 Mt/an, ce qui pèse lourdement sur la balance commerciale. Actuellement concentrée dans les bassins de Bahia et de Sergipe, la production devrait augmenter sensiblement dans les prochaines années pour atteindre 20 Mt/an d'ici 1984 avec la mise en production des gisements offshore du bassin de Campos.

Afin de réduire sa dépendance énergétique, le Brésil met en œuvre une politique volontariste dans plusieurs directions :

- réalisation d'un programme d'équipement hydroélectrique de 40 000 MW. à la hauteur du potentiel du pays,

- à la suite de la confirmation récente d'importantes réserves de charbon, mise en place d'un plan visant à quintupler la production d'ici 1985,

- lancement d'un programme "alcool" ambitieux visant à intensifier l'utilisation de l'alcool comme combustible et comme matière première pour l'industrie chimique et à accroître la production d'alcool de 800 millions de litres en 1975 à 20 milliards de litres en 1985, pour mélange, puis substitution à l'essence,

- relance de l'exploration pétrolière sur près de 4 millions de km² de terrains sédimentaires relativement mal connus,

.../...

- enfin, passage à la dimension industrielle dans l'exploitation des schistes bitumineux avec le lancement d'une usine produisant 2,5 Mt/an d'huile de schiste, à la suite de l'expérimentation en cours d'achèvement du pilote de Sao Mateus do Sul.

II - Les schistes bitumineux brésiliens

Les réserves brésiliennes d'huile de schiste seraient les secondes du monde avec un potentiel de 130 milliards de tonnes. Mais il existe probablement de nombreux gisements encore inconnus au stade actuel de l'exploration. Les principaux gisements actuellement connus sont donnés sur la figure 2. Les mieux étudiés sont les schistes de la vallée de la PARAIBA et de la formation IRATI.

II.1. Les schistes de la vallée de la PARAIBA

Ces schistes sont situés à l'est de Sao Paulo et couvrent une surface d'environ 200 km², dans laquelle PETROBRAS a étudié une zone de 123 km². Les réserves mesurées s'élèvent à 119 millions de barrils ; elles correspondent à une couche épaisse de 30 m sur une zone étudiée de 10 km² pour une teneur de 4 % (en base humide). Dans la zone principale de dépôt (115 km²), on estime à environ 800 millions de barrils les réserves récupérables en admettant une récupération de 60 % et les réserves supposées sont de 1 300 millions de barrils (cf. tableau 3).

La lithostratigraphie des dépôts est assez homogène et la formation a une épaisseur totale de 36 m, dont environ 30 m de schistes pyrobitumineux et 6 m d'argile stérile disposée en deux couches intercalées dans les schistes.

La partie bitumineuse est caractérisée par trois types de sédiments :

- des horizons très fins (10-15 à 50-60 cm d'épaisseur) appelés "papiers" pour leur faculté à se séparer en très fines lamelles. Ces schistes, avec une teneur de 8 à 13 %, sont les plus riches de la série,

- intercalés entre ces schistes "papiers", des schistes "semi-papiers" qui se séparent en lamelles moins fines et moins riches en huile, avec une teneur de 3 à 9 %.

- un troisième type de sédiments présentant des fractures semi-conchoïdales et pauvres en huile.

Les morts-terrains recouvrant ces dépôts sont constitués de sédiments non consolidés, principalement des sables et des argiles.

II.2. Les schistes de l'IRATI

Située dans le bassin sédimentaire du Parana, la formation de l'IRATI, constituée de sédiments d'âge permien, s'étend sur plus de 2 000 km. Elle affleure à l'est du Mato Grosso et dans les états du sud du Brésil (Sao Paulo, Parana, Santa Catarina et Rio Grande do Sul), avant de pénétrer en Uruguay.

Des études systématiques d'exploration suivant un programme géologique en quatre phases (premières investigations, recherches pionnières, recherches de semi-développement et recherches de détail) ont d'ores et déjà permis de préciser les réserves de l'IRATI dans quatre régions prioritaires, qui représentent un potentiel de 2 milliards de barrils d'huile de schiste (cf tableau 4).

Les horizons bitumineux, sous un recouvrement de morts-terrains, sont au nombre de deux, séparés par une couche intercalaire stérile.

III - Le pilote de Sao Mateus do Sul

En activité depuis 1972, cette usine devait permettre de tester les paramètres techniques et économiques en vue de la réalisation d'un projet industriel. Le coût de tous les travaux nécessaires, y compris les investissements, est évalué jusqu'à présent à 130 millions de dollars 1979.

Les différentes phases du processus qui permet d'obtenir l'huile de schiste sont les suivantes.

III.1. La carrière

Elle marche, en moyenne, à un poste/j.

L'abattage qui se fait sur un front de 550 m est réalisé à l'explosif pour les schistes et la couche intermédiaire. Les morts-terrains sont enlevés par une dragline de 6 cy, utilisée aussi pour la couche intermédiaire.

Les trous de mine sont forés avec une foreuse de 115 cV dont la vitesse d'avancement est 1 m/mn dans les schistes et 5 m/mn dans la couche intermédiaire. La maille varie suivant la nature des terrains :

- 4 x 4 m dans la couche supérieure,
- 6 x 8 m dans la couche intermédiaire,
- 3 x 3,5 m dans la couche inférieure.

.../...

L'explosif est un mélange de nitrate et de fuel avec 2 à 3 % d'alumine. Là aussi, les consommations sont différentes :

- 120 g/m³ dans la couche supérieure,
- 130 g/m³ dans la couche intermédiaire,
- 270 g/m³ dans la couche inférieure.

Le chargement des schistes est assuré par trois pelles dont une de réserve. Avec une capacité de 1,25 cy, elles consomment 18 l/heure de gazole et peuvent charger entre 90 et 120 t/heure. La souplesse de cette opération est améliorée par l'utilisation de deux chargeurs-transporteurs sur pneus.

Le transport jusqu'au concasseur primaire se fait uniquement par camions. Le parc est de 10 camions de 10 t et 3 camions de 15 tonnes.

III.2. La préparation des schistes

Elle comprend deux étages de concassage. Les schistes passent tout d'abord dans un concasseur à mâchoires de 260 t/heure dont l'ouverture est réglée à 8 pouces (200 mm). Une bande transporteuse amène ces schistes vers deux concasseurs secondaires de même capacité, mais dont la maille est 0,25 - 2,5 pouces (6-60 mm) avec 10 % de fines. On trouvera dans le tableau 5 quelques caractéristiques techniques du matériel de la carrière.

III.3. L'unité de pyrolyse

La cornue de 65 tonnes/heure est suivie d'unités de récupération de l'huile de schiste et de gaz, qui permettent actuellement une production de 700 bl/jour.

Les grands consommateurs d'énergie électrique sont surtout des compresseurs de 4 800 cV et 250 cV.

III.4. Le réaménagement

Ces essais de réaménagement des sols sont effectués à l'arrière de la carrière. Ils consistent à déposer tout d'abord le schiste cuit suivi d'une couche d'argile imperméable.

Compte tenu de la teneur importante en pyrite, la température des schistes, qui est de 76°C au début de l'opération, est contrôlée en plongeant dans les déblais un tube à 11m de profondeur qui permet de suivre son évolution. Le sol altéré est reconstitué : on y ajoute du calcaire dolomitique, de 2,5 t/ha à 7,5 t/ha et des engrais N.P.K. à raison de 100 kg/ha, 200 kg/ha et 300 kg/ha respectivement. Trois espèces végétales sont testées : Pinus Toeda, Mimosa Scabrela et Eucalyptus Viminalis.

IV - Le projet industriel

Plusieurs scénarios ont été envisagés suivant qu'on s'arrêta à une épaisseur de morts-terrains de 30 m, 35 m, 40 m et 45 m. La valeur de 30 m a finalement été retenue. Compte tenu de ces contraintes géomorphologiques et d'une durée d'exploitation de 30 ans, la taille de la carrière a été fixée à 112 000 tonnes de schistes/jour. Cela correspond ainsi à un mouvement de terrains de l'ordre de 400 000 t/j, sur deux postes.

IV.1. Quelques données techniques sur le projet

Ainsi définie, la carrière représentera en totalité une surface de 65 km².

L'extraction des schistes se fera en deux carrières identiques, suivant les mêmes méthodes employées pour le pilote. Il y aura deux draglines par carrière et une pour le réaménagement du site.

Des camions de 160 t sont prévus pour le transport (comme c'est actuellement le cas, mais avec des camions plus petits). Alors qu'il y a deux étages de concassage pour le pilote, trois sont prévus pour l'exploitation industrielle, avec un silo de stockage intermédiaire.

Un briquetage des fines de concassage est envisagé à ce stade. Les schistes seront pyrolysés dans 20 unités de même taille. Les cornues auront une capacité de 260 t/h. Une de ces nouvelles cornues est construite et va être prochainement testée sur le site du pilote.

En ce qui concerne les problèmes d'environnement, des solutions ont été étudiées pour minimiser la pollution des eaux et de l'atmosphère.

Une retenue d'une capacité de 2 millions de m³ doit permettre de rejeter des eaux écologiquement saines (au vu de la législation en vigueur au Brésil) dans le Rio Iguazu, ceci par un canal de 2 700 m.

Des capteurs sont en place pour mesurer les quantités des divers rejets dans l'atmosphère.

Pour les schistes cuits, la solution envisagée est celle décrite plus haut (III.4.). Elle devrait empêcher leur oxydation et leur lixiviation par dépôt d'une couche imperméable au-dessus des cendres.

IV.2. Le bilan énergétique

Les résultats obtenus sur ce point pour le pilote sont difficilement extrapolables tels quels, et surtout globalement, au projet industriel.

En effet, actuellement, la quasi-totalité de l'électricité et toute la vapeur nécessaires sont fournies par une centrale où l'on brûle 50 m³/j de l'huile de schiste produite.

Dans l'exploitation industrielle, l'énergie électrique sera fournie par le réseau extérieur car il y a des réserves hydroélectriques importantes. Ainsi, toute l'huile produite sera envoyée par un pipe à la raffinerie REPAR, à l'exception près de celle nécessaire à la demande thermique de l'usine.

La totalité du gaz produit sera utilisée comme combustible.

Par contre, le gaz liquéfié de pétrole et le soufre seront commercialisés.

Le tableau ci-dessous donne les quantités prévues dans le projet :

Huile de schiste	GPL	Soufre
44 600 bl	500 t	900 t

Produits de la pyrolyse

(en quantité par jour)

Pour assurer la production de ces 44 600 bl/j, il est prévu une consommation énergétique totale équivalente à 254 MW. Celle-ci se répartit de la manière suivante :

Secteur	Consommation MW	Pourcentage %
Carrière	31	12
Préparation	43	17
Pyrolyse	150	59
Traitement des gaz	10	4
Hydrogénation	13	5
Mise en réservoir et pipe	7	3
Total	254	100

Consommation énergétique

Le bilan énergétique en ce qui concerne l'extraction et la pyrolyse sera donc le suivant :

Pour 112 000 t/j de schistes on consommera :

Energie extérieure	Puissance de 254 MW
Gaz autoconsommés	1.7 10 ⁶ m ³
Huile autoconsommée	500 m ³

soit pour 1 t de schistes et exprimé en kilogramme - équivalent - pétrole une consommation de :

Energie extérieure	12.5 kgep
Gaz autoconsommé	10.5 kgep
Huile autoconsommée	4.5 kgep

Total	27.5 kgep
-------	-----------

La production brute sera, soufre non compris :

Huile	67.5 kgep
GLP	4.5 kgep
Gaz	10.5 kgep

Total	82.4 kgep
-------	-----------

Le taux d'autoconsommation est donc de l'ordre de 33 %. Ce taux, élevé pour la richesse des schistes, est largement dû à l'absence d'utilisation dans l'immédiat du carbone résiduel des schistes cuits. Sur le plan économique, le coût estimé de l'huile de schiste était en janvier 1978 de l'ordre de 11 \$/bbl. Les investissements se situent en 1980 de 1 000 à 2 000 M\$.

V - Conclusion

En conclusion, on retiendra les trois points suivants :

1) le taux d'autoconsommation équivalente pour la production d'huile à partir des schistes est de l'ordre de 33 %,

2) les Brésiliens estiment envisageables des essais sur les schistes français dans le pilote Petrosix (quantité : au moins 10 000 t),

3) Le tableau ci-après met en évidence l'importance des délais nécessaires pour aboutir à l'exploitation industrielle des schistes bitumineux de Sao Mateus do Sul.

.../...

Chronologie du développement de Sao Mateus do Sul	
1957	Début des essais sur les schistes de l'Irati
1969	Début de la construction du pilote
1972	Début du fonctionnement du pilote
1977	Prise de décision du passage au stade industriel
1980	Fin de l'élaboration du projet
1984	1er stade de la production : 1,25 Mt/an
1986	Stade final : 2,5 Mt/an

Tableaux et figures

1. Consommation d'énergie primaire au Brésil
2. Les gisements de schistes bitumineux brésiliens
3. Réserves de la vallée de la PARAIBA
4. Réserves de la formation IRATI
5. Principal matériel de la carrière de SAO MATEUS DO SUL

Sources	1967		1977		1985	
	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%
Pétrole	17,4	34	43,0	42	58,5	35
Gaz naturel	0,1	0,2	0,5	0,5	1,2	0,7
Charbon	2,0	4	4,1	4	10,0	6
Bois	19,3	37	20,9	20	19,3	12
Bagasse	2,8	5	4,7	4,6	8,4	5
Charbon de bois	1,0	2	2,5	2,4	3,6	2,2
Alcool	0,4	0,7	0,5	0,5	3,5	2,1
Hydraulique	8,5	17	27	26	57,8	34,6
Nucléaire	-	-	-	-	3,5	2,1
Huile de schiste	-	-	-	-	1,2	0,7
Total	51,5	100	103,2	100	167	100

Tableau 1
Consommation d'énergie primaire au Brésil
(en 1967, 1977 et prévisions pour 1985)

Classification des réserves	Surface (km ²)	Découverture moyenne (m)	Epaisseur utile (m)	Teneur moyenne (%)	Réserves (millions bbl)
mesurées	10	20,4	30	4	119
supposées	115		30	4	1 300

Tableau 3
Réserves de la vallée de la PARAIBA

Localisation	Couche	Surface (km ²)	Découverte moyenne (m)	Épaisseur utile (m)	Teneur moyenne (%)	Potentiel de production (essai Fischer)			
						huile 10 ⁶ bbl	GLP 10 ⁶ t	gaz 10 ⁹ m ³	soufre 10 ⁶ t
Sao Mateus do Sul (Parana)	1	60,0	17,5	6,4	7,3	560	3,9	19,0	8,7
	2	64,5	-	3,2					
Rio Negro Rio Iguacu (Parana)	2	60	30,0	3,1	7,2	173	1,2	5,9	2,7
Papanduva Tres Barras (Santa Catarina)	1	45	25,0	7,0	6,8	580	4,0	19,7	9,0
	2	110	-	3,1					
Sao Gabriel Dom Pedrito (Rio Grande do Sul)	2	275	17,8	2,9	6,9	705	5,0	24,3	11,0
TOTAL DES RESERVES						2 018	14,1	68,9	31,4

Tableau 4

Réserves de la formation IRATI

Engins	Capacité	Consommation ou puissance	Performance
1 foreuse		115 cv	1 m/' schiste 5 m/' stérile
3 pelles	1,25 cy	18 l/h	90 - 120 t/h
10 camions	10 t		
3 camions	15 t		
1 dragline	6 cy	1 500 kw	300 cy/h
1 concasseur primaire		160 cv	260 t/h
concasseur secondaire		160 cv	260 t/h

Tableau 5

Principal matériel de la carrière de Sao Mateus do Sul