

**Zeitschrift:** Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure  
**Herausgeber:** Vereinigung Schweizerischer Petroleum-Geologen und -Ingenieure  
**Band:** 45 (1979)  
**Heft:** 108

**Artikel:** Les premiers stades de la diagénèse organique et de la diagénèse minérale. Première partie, Zonéographie par la maturation de la matière organique  
**Autor:** Kubler, Bernard / Betrix, Marc-Aurèle / Monnier, Frédéric  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-203877>

#### Nutzungsbedingungen

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

#### Conditions d'utilisation

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

#### Terms of use

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

**Download PDF:** 11.01.2026

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

## **Les premiers stades de la diagénèse organique et de la diagénèse minérale**

une tentative d'équivalence

### **Première partie: Zonéographie par la maturation de la matière organique**

par Bernard KUBLER, Marc-Aurèle BETRIX et Frédéric MONNIER\*

**MOTS-CLEFS:** Fenêtre à huile potentielle, kérogènes, charbons, réflectance, vitrinite, enfouissement, gradient géothermique, pression, migration.

**RESUME:** Quantité, qualité des extraits organiques: alcanes, hydrocarbures ( $> C_{15}$ ), résines, asphaltènes ont permis de définir la fenêtre à huile potentielle qui représente bien un état de maturation sous l'action de la température et de la durée d'exposition. Gradient géothermique, vitesse de subsidence, taux de sédimentation, durée, nature chimique de la MO ont une influence sur l'apparition et la disparition de la FHP et sa comparaison avec la houillification. La vitrinite, dénominateur commun de comparaison est utile à la reconstitution de l'histoire thermique et doit être corrigée pour des effets de lithologie, de rassemblement: charbons, ou de dispersion: kérogènes. La migration peut compliquer la signification des paramètres physiques et chimiques. Le rôle de la pression est encore contradictoire.

**Table des matières**

|  | page    |
|--|---------|
| Introduction . . . . .   | 2       |
| Zonéographie d'après la nature et l'abondance de la matière organique extraite par solvant, en particulier les hydrocarbures . . . . . | 3       |
| Comparaison des fenêtres à huile potentielles: FHP . . . . .   | 4       |
| Fenêtre à huile potentielle et réflectance de la vitrinite . . . . .   | 7       |
| Le rôle de la pression . . . . .   | 10      |
| Influence de la migration . . . . .  | 12      |
| Zonéographie de la matière organique, brèves conclusions . . . . .   | 12      |
| Bibliographie . . . . .  | 14      |
| Figures 1 - 8 . . . . .  | 16 - 22 |

\* Laboratoire de minéralogie, pétrographie, géochimie, institut de géologie, Université de Neuchâtel, CH-2000 Neuchâtel 7.

## Introduction

La zonéographie de la diagenèse peut être abordée par l'étude des transformations et la migration des composés les plus sensibles des sédiments qui sont: la matière organique, sous ses différentes formes, charbons, hydrocarbures, kérogènes, l'eau, les minéraux des argiles et des zéolites.

Pour la matière organique, la réduction des innombrables composés d'origine biologique est fantastique puisqu'ils se transforment en un seul corps: le carbone élémentaire dans les zones très profondes de la diagenèse ou les premiers stades du métamorphisme. Les minéraux argileux subissent aussi une réduction importante des variétés et états transitoires de cristallisation; dans les zones profondes ils aboutissent à 2 seules espèces: les micas et les chlorites.

La destinée des zéolites est plus complexe. Elles disparaissent et leurs ions se retrouvent dans des amphiboles, épidotes et autres minéraux de réactions à la partie supérieure des schistes verts.

Tous les sédiments se déshydratent au cours de la diagénèse; le lieu, le temps, la durée de cette déshydratation dépend étroitement de la lithologie: grès, mudstone, shale, calcaire ou grauwacke.

Pour un phénomène, en principe, aussi simple que la déshydratation, l'accord entre les différentes tendances n'est pas souvent réalisé. Il est très rare, en effet, de mesurer les paliers de déshydratation avec l'enfoncissement par les méthodes de la géologie de subsurface (diographies différées,  $\Delta t_{sh}$ , sonic, densité, impédance, etc) alors que par l'étude de la transformation des minéraux argileux, certains croient possible de distinguer 1, 2 ou même 3 stades de déshydratation. Les phénomènes de sous-compaction sont certainement responsables aussi de la difficulté d'accéder à un schéma raisonnable qui fasse l'accord entre ces différentes tendances. Ils peuvent se révéler très importants dans l'interprétation des données de la géochimie organique, de la minéralogie et de la géochimie des eaux.

Ainsi que l'écrivait SHAW (1964) «tout influe sur tout» et c'est dans cet esprit qu'il faut lire cette tentative.

Dans cette première partie nous tenterons d'établir une correspondance entre la zonéographie de la matière organique dispersée (MOD) et de la matière organique rassemblée: les charbons et leur rang. Il n'est pas question de procéder à une révision de tous les critères de la géochimie organique et de la pétrographie des charbons. On consultera à ce sujet TISSOT & WELTE (1978). Nous avons voulu rassembler et harmoniser les données principales de quelques exemples cités par les auteurs et les comparer en quantité, qualité, âge, profondeur, température et pour lesquels des données sur la réflectométrie, la minéralogie des argiles, les productions éventuelles: gaz, huile, étaient publiées.

## Zonéographie d'après la nature et l'abondance de la matière organique extraite par solvant, en particulier les hydrocarbures

La matière organique extraite par des solvants divers comprend non seulement des hydrocarbures mais aussi des résines et des asphaltènes dont l'ensemble est groupé sous le nom de bitumes ou d'extrait organique EO. Comme le rappellent très justement TISSOT et WELTE (1978); LARSKAYA et ZABREV (1964), LOUIS (1966) et PHILIPPI (1965) avaient remarqué une augmentation des EO avec l'enfouissement, qu'il s'agisse des séries mésozoïques et tertiaires du Bassin du Kouban-Azov, des shales du Toarcien du Bassin de Paris ou des séries mi-oplicènes des bassins de Los Angelès et de Ventura. Ces extraits passent par un maximum, puis décroissent à plus grande profondeur comme les travaux de LE TRAN et al. (1974) l'ont montré, par exemple en Aquitaine (Jurassique-Crétacé). Ils sont alors relayés par une forte augmentation des gaz humides, puis des gaz secs. La génération des HC liquides s'effectue donc dans une fourchette de température (par conséquent de profondeur) restreinte qui a conduit tout naturellement les géochimistes à reconnaître, par le moyen des extraits organiques, une «fenêtre à huile potentielle» qui serait, pour la maturation de la matière organique, l'équivalent du «liquid window concept» de PUSEY III (1973) pour l'occurrence en température, profondeur et temps des gisements d'huile (fig.5).

La distinction de cette fenêtre à huile potentielle appelle toutefois quelques remarques:

Il nous apparaît que souvent il existe une certaine distance entre les faits et la schématisation.

En Aquitaine Sud-Ouest, LE TRAN et al. (1974) ont analysé 65 échantillons, provenant de carottes et déblais de 31 forages, prélevés de 110 à 6000 m. Les extraits organiques, en milligrammes par gramme de carbone, répartis selon la profondeur, s'ordonnent à l'intérieur d'une courbe dont seules les valeurs les plus fortes dessinent l'enveloppe. La schématisation pour l'ensemble du bassin et des trois formations (fig. 1B) est parfaite et excellente aussi bien pour les extraits organiques EO que pour les HC liquides. Si la définition de la fenêtre à huile potentielle est excellente, on remarquera qu'il existe en de nombreux points de faibles valeurs à l'intérieur de la courbe enveloppe. Cela signifie que la définition est, en quelque sorte, d'autant meilleur que le nombre d'analyses est plus élevé. Elle est statistique.

Il arrive cependant que sur un seul puits les valeurs s'ordonnent selon une courbe croissant avec la profondeur (Bassin de Los Angelès, PHILIPPI, 1965, Bassin d'Aquitaine, CONNAN, 1971).

Cependant la quantité de bitume et d'hydrocarbures extraits dépend étroitement de la nature de la matière organique. Si celle-ci est d'origine xylo-herbacée elle appartient à la même lignée que les charbons humiques (DURAND et al. 1976), c'est-à-dire aux kérogènes du type III, selon les diagrammes de Van KREVELEN (1961) in TISSOT et WELTE, (1978).

Dans le Crétacé supérieur de Douala au Cameroun, les extraits tirés des échantillons des forages de Logbaba passent bien par un maximum (ALBRECHT et OURISSON, 1969), (fig.2). Toutefois les rapports alcanes sur carbone organique sont en moyenne dix fois plus faibles qu'en Aquitaine si l'on compare les données d'ALBRECHT (1969), reprises par RUMEAU et SOURRISSE (1972). Même avec de faibles valeurs, que l'on prenne la schématisation d'ALBRECHT et OURISSON (1969), celle de RUMEAU et SOURRISSE (1972) (fig. 2), on a admis que les maximums définissaient bien la fenêtre à huile potentielle. Or, les seuls indices découverts dans ce bassin ont été des HC

gazeux principalement avec parfois de la gazoline, mais de toute façon avec des GOR de 10000 env. Pour DURAND et al. (1976), les kérogènes sont du type III. Pour RUMEAU et SOURRENNE (1972) on doit conclure à l'existence de zones sous-compactées (fig. 2). Quelle que soit l'explication, on constatera donc que le maximum défini par les extraits organiques, bitumes, hydrocarbures totaux ou alcanes, peut certes indiquer un stade de maturation optimale pour la production d'huile, encore faut-il que la nature de la matière organique et les conditions physiques des roches soient favorables. C'est pourquoi nous tenons à qualifier de potentielles les fenêtres à huile définies par les extraits organiques.

D'après TISSOT et al. (1978) l'origine de l'huile des gisements de Uinta est attribuée à la maturation de la matière organique de la Green River formation. D'après leur composition élémentaire, les kérogènes appartiennent au type I, riches en lipides. Par l'action de la température, de telles matières organiques sont relativement riches en alcanes par rapport aux aromatiques. Cependant sur 38 extraits organiques répartis selon la profondeur, un seul dépasse 500 mg/g de carbone. Aucun maximum ne se dessine, les valeurs plafonnant autour de 200 mg/g dès 2000' jusqu'à 20000' environ. On ne peut donc pas définir, comme avec les autres exemples, de fenêtre à huile potentielle. Les auteurs ont imaginé de rapporter les bitumes extraits à un «useful carbon», c'est-à-dire à un carbone pyrolyposable et extractible qui n'est qu'une fraction du carbone organique total. Il se dessine un maximum vers 17000' qui peut servir d'indicateur de la fenêtre à huile potentielle (voir fig. 3). On peut se demander si cette façon de procéder doit être réservée aux composés originellement riches en lipides ou si elle doit dorénavant être systématisée aux kérogènes des types II et III. On remarquera en plus que la détermination du carbone organique total passe obligatoirement par l'élimination des carbonates par attaque acide. Le carbone restant ne peut être attribué qu'au carbone organique. D'après nos études sur les sédiments actuels du lac de Neuchâtel, jusqu'à 45% de la matière organique sédimentée est hydrolysée par HC liquides.

Le carbone organique total est alors la source d'un carbone organique solubilisé et d'un carbone organique insoluble (KUBLER et al. 1979a). Il apparaît que les lipides par exemple étant relativement sensibles à l'hydrolyse, le carbone organique de référence n'est que notre carbone organique insoluble, c'est-à-dire une fraction du carbone organique total. Il y a donc plusieurs façons d'approcher la notion du «useful carbon».

On remarquera que la notion de maturation ne repose pas seulement sur la quantité d'extraits organiques liquides, mais sur toutes les déterminations concernant leurs constituants: alcanes et leur parité, isoprénoides, cyclo-alcanes, aromatiques, leurs rapports entre eux, etc.

### Comparaison des fenêtres à huile potentielles: FHP

La définition de la FHP et la comparaison par bassin n'est, pour le moment, que qualitative. Cela provient de la disparité des données.

Pour que cette définition, ou plus précisément pour que l'on puisse procéder à des comparaisons quantitatives, il faudrait une harmonisation des méthodes analytiques et des résultats. En effet, la quantité et la nature des extraits dépendent des solvants utilisés. Heureusement il semble que les extractions au chloroforme tendent à se généraliser.

Comme déjà mentionné, ces extraits appelés parfois bitumes se composent en gros de 4 familles de composés: les asphaltènes, les résines, les aromatiques et les saturés.

- Les données sur lesquelles repose la définition de la FHP sont soit: les extraits organiques totaux,
- les extraits organiques totaux,
  - les hydrocarbures qu'il faut alors comprendre comme la source des aromatiques et des saturés,
  - les saturés, somme des cyclo- et des alcanes en chaîne.
  - les alcanes normaux et iso.

Ces valeurs peuvent être exprimées en ppm rapportés à la roche totale, plus judicieusement en milligramme d'extrait par gramme de carbone organique, dans certains cas, nous l'avons vu, en milligramme par gramme de carbone organique utile, enfin en pourcent de l'extrait total.

Dans certains exemples présentés par les auteurs, le début et le maximum de la génération d'HC liquides dépendent des composés retenus comme critère de définition. Ainsi dans le Jurassique-Crétacé de l'Archipel arctique canadien, dans le forage de référence de North-Sabine H-49, la progression des extraits commence à 5000 - 6000', celle des hydrocarbures (saturés et aromatiques) à 9000'. Ceux-ci passent par un maximum à près de 12000' dans une formation triasique «Schei Point formation» à matière organique différente. Pour les auteurs (POWELL et al., 1978) le décalage entre la progression des bitumes et des hydrocarbures est typique pour une matière xylo-herbacée (woody herbaceous) dont les rapports H/C inférieurs à 0.80 en font l'équivalent du kérogène type III des diagrammes de van KREVELEN.

Dans la «Schei Point formation» au contraire, la matière organique amorphe est abondante, les rapports H/C plus élevés rappellent un kérogène de type II, la progression des extraits débute à 5000', celle des HC entre 6000 et 7000'. Le maximum s'étend, dans ce cas, entre 7000' et 12000'. Si l'on se réfère donc à la distribution des HC, la FHP, pour un kérogène de type III, se situe 3000' à 4000' plus bas et pour un kérogène de type II 1000' à 2000' plus bas que la progression des extraits totaux.

Ces faits ont amené POWELL (1978) à constater que dans ce bassin de Sverdrup en général le début de la génération des HC pour une matière xylo-herbacée coïncide avec le maximum de production des mêmes HC liquides pour une matière organique de type II.

Nous retiendrons de ces exemples que la profondeur de la FHP dépend de la nature de la matière organique. Il faut de plus grandes profondeurs et températures pour que les kérrogènes de type III atteignent le même stade de transformation que les kérrogènes de type II. Enfin la définition plus rigoureuse de la FHP doit tenir compte des extraits et des HC.

Par ailleurs, dans le bassin de Uinta la très grande profondeur de la FHP (5000 à 6000 m) ne se laisse pas reconnaître par la progression des extraits rapportés au carbone organique mais rapportés à un carbone utile (useful organic carbon) pyrolysable et extractible (TISSOT et al., 1978, cf. ci-dessus). Par contre, à partir de ce kérogène de type I le maximum des extraits coïncide avec celui des HC saturés (fig. 2), comme pour le kérogène de type II de POWELL et al. (1978).

Cependant la grande profondeur ne doit pas être attribuée uniquement au faible gradient géothermique, d'après TISSOT et al. (1978), mais à l'abondance des chaînes aliphatiques. L'énergie, pour briser les liaisons carbone-carbone, est plus élevée que celle nécessaire à la rupture des liaisons hétéroatomiques ou autres liaisons plus faciles à rompre.

Donc, selon la nature de la matière organique on pourrait constater que le seuil de génération des hydrocarbures est plus profond et exige des températures plus élevées pour des kérrogènes riches à l'origine, en lipides ou riches en matières organiques xylo-herbacées. Dans l'état actuel des exemples publiés, on devrait conclure que les kérrogènes

de type II, heureusement les plus fréquents, (TISSOT et WELTE, 1978), réagissent à des températures et profondeurs moindres.

Dans la comparaison que nous avons tentée à la figure 4, toutes les FHP ne portent pas sur des matières organiques de même nature. On assimilera au type II les kérogènes de l'Ouest canadien, de l'Est saharien, du Bassin de Paris, éventuellement d'Aquitaine, du Tertiaire de l'Afrique occidentale et éventuellement celui de Californie. Pour le Bassin de Uinta qui présente les plus forts extraits et la plus forte profondeur, le kérogène est de type I. Pour le Bassin de Douala, qui a les plus faibles quantités en alcanes, le kérogène est de type III. Ces différences de quantités reflètent bien la différence entre une matière organique «oil prone» et «gaz prone».

Les exemples de FHP sont ordonnés à la figure 4 par âge décroissant. En moyenne la profondeur et les températures requises pour le début de la génération des HC liquides sont faibles dans le Paléozoïque et plus fortes dans le Tertiaire supérieur, suivant en cela le facteur thermo-temporel d'ARRHENIUS, (CONNAN, 1974, CORNELIUS, 1975). Tout ceci est vrai si le gradient géothermique est constant. Dans les forages de Logbaba (fig. 4 D), la déflection des alcanes est à moins faible profondeur en raison d'un gradient géothermique plus fort d'après les auteurs.

Pour le Bassin de Uinta (fig. 4E), d'après TISSOT et al. (1978) la grande profondeur est due aussi à un gradient géothermique plus faible et à une vitesse de sédimentation élevée au cours du Tertiaire inférieur. Le début de la FHP est très semblable à Karlsefni et Los Angelès (fig. 4G et H) du moins en profondeur. Le gradient géothermique est beaucoup plus élevé à Los Angelès pour des terrains beaucoup plus jeunes (10 millions d'années) qu'à Karlsefni où les couches sont de l'Ecocène inférieur à Danien (60 - 65 millions d'années) et à gradient géothermique normal.

Il nous apparaît donc que la profondeur et la température de la FHP, ou du moins de son apparition, dépend:

- de la durée d'exposition à la température requise (cf. CORNELIUS, 1975),
- du gradient géothermique, par conséquent de la vitesse de sédimentation et de la vitesse de subsidence,
- de la nature de la matière organique, kérogène types I et III plus profonds, par conséquent température plus élevée ou durée plus grande.

Pour déterminer l'influence de chacun de ces facteurs, il faudrait disposer de valeurs sûres au sujet du véritable enfouissement, de la véritable température et de la véritable durée. Or, aucun de ces paramètres n'est évident.

L'exemple de la Ruhr est particulièrement instructif. D'après M. TEICHMUELLER (1970), R. TEICHMUELLER (1973), BARTENSTEIN et R. TEICHMUELLER (1974), M. TEICHMUELLER (1975) la houillification aurait duré 12 millions d'années par un gradient géothermique aussi élevé que celui du Haut-Rhin. Elle se serait terminée avant la phase asturienne de plissement (Westphalien D-Stéphanien).

Une telle succession d'événements thermiques a été invoquée pour le massif de Brahm ainsi que pour les off-shore méridionaux de la Mer du Nord (CORNELIUS, 1975).

Pour remédier à l'imprécision qui entache les valeurs de température et d'enfouissement actuel, le recours à la réflectance de la vitrinite a été particulièrement poussé.

## Fenêtre à huile potentielle et réflectance de la vitrinite

On trouvera une présentation résumée entre les rangs des charbons d'Amérique du Nord, d'Allemagne et de France, la réflectance de la vitrinite et la fenêtre à huile potentielle in KUBLER et al. (1979 b).

La réflectance de la vitrinite peut presque être assimilée à une mesure calorimétrique. Elle augmente avec le nombre de calories, c'est-à-dire avec la température corrigée par la durée d'exposition.

La progression de la réflectance avec la profondeur et la température n'est pas linéaire, mais forme une courbe comme dans le Bassin de Uinta (fig. 6).

Cependant la progression n'est pas toujours aussi uniforme.

Ainsi, dans le Bassin de Douala (forages de Logbaba) alors qu'il existe deux solutions pour le gradient géothermique (voir fig. 2), qui sont toutes deux linéaires, le gradient  $R_O$  manifestement assimilable à deux droites de pente différente (fig. 7). L'intersection se produit à un  $R_O$  de 0,7% environ au début de la FHP, le point d'inflexion à 1% environ, c'est-à-dire au maximum probable de la FHP. Les deux gradients de la réflectance ne peuvent être expliqués que par deux gradients géothermiques différents que les courbes des températures actuelles ne reproduisent pas.

Comme on ne connaît aucun cas de rétromorphose de la réflectance, celle-ci est un excellent paléothermomètre (dans l'hypothèse d'une durée d'exposition constante), on admettra que la courbe  $R_O$  reflète les paléogradientes de température. On remarquera par ailleurs que l'entrée dans les zones sous-compactées se traduit souvent par une anomalie thermique positive; le sommet de la zone sous-compactée calculée, avec difficulté du reste par RUMEAU et SOURRISSE (1972) pourrait être éventuellement descendue de quelques centaines de mètres.

Des anomalies du gradient de  $R_O$  à l'approche de champs productifs sont du reste fréquentes. ROBERT (1976) en a présenté de beaux exemples sur une quinzaine de puits d'Aquitaine Sud-Ouest.

Si l'on admet que la réflectance peut être comparée d'une part aux rangs des charbons et d'autre part à la FHP, on postule obligatoirement des vitesses de réaction égales pour des trois types de matière organique. En conséquence le début ou le maximum de la FHP devrait correspondre au même  $R_O$  quelles que soient les profondeurs et températures actuelles, quel qu'ait été le gradient géothermique ou la durée d'exposition.

HOOD & GUTJAHR (1972) se sont préoccupés de cette comparaison. Nous avons rapporté leur valeur à la fig. 8. On remarquera que les HC extraits sont encore plus faibles que les alcanes de Logbaba, donc on peut supposer un caractère encore plus «gas-prone» de la MO qu'à Logbaba. L'échelle de progression des  $R_O$  prise comme échelle de référence n'est malheureusement pas uniforme. Elle se révèle avoir 3 gradients et 2 points d'inflexions. La progression des  $R_O$  avec l'enfouissement est encore plus complexe qu'à Logbaba.

Il serait préférable de comparer tous les  $R_O$ , à l'avenir, à partir d'une même courbe de progression avec l'enfouissement, selon un gradient géothermique moyen et une durée convenable qui pourrait être de 5 à 20 millions d'années par exemple.

VASSOYEVITCH et al. (1969) ont présenté une telle courbe moyenne de réflectance qu'ils comparent à la température, à trois gradients géothermiques différents et au temps d'exposition nécessaire dans chaque cas pour la phase principale de génération des HC liquides. Pour ces auteurs, par un gradient de 45°C/km, la durée est de 20 à 60 millions d'années. Elle est de 160 à 350 millions d'années pour un gradient de

20°C/km. Il est difficile de travailler avec cette relation durée-gradient géothermique parce qu'en fait le gradient géothermique, même après correction des différents coefficients de conductibilité thermique, dépend du flux thermique et de l'équilibre entre les vitesses d'accumulation et les vitesses de subsidence. Aucune de ces trois variables n'est constante sur des durées qui dépassent 20 millions d'années. Il nous apparaît plus logique de se rabattre sur le facteur thermotemporel exprimé ainsi:

$$\log t = A/T - B \quad (1)$$

où CONNAN (1974), par l'application de cette loi aux seuils de la phase principale de génération d'huile définis par leur âge et leur température, a trouvé a solution suivante:

Si la durée  $t$  est exprimée en millions d'années et la température  $T$  en degrés Kelvin, la relation devient:

$$\log t = (3.014/T) - 6.498 \quad (2)$$

Pour une durée de 10 millions d'années la température serait, selon cette relation, de 130° C et pour 100 millions d'années, de 81° C. Certes cette relation ne tient pas compte de la loi exponentielle de montée en température en fonction de l'enfouissement et de la compaction. Elle exprime tout simplement la durée nécessaire au début de la FHP par une température moyenne constante.

Une des conséquences assez surprenantes de la relation de CONNAN, c'est qu'elle validerait les températures enregistrées dans le Paléozoïque. Certes le nombre d'exemples sur lequel repose cette relation devrait être augmenté.

Cependant qu'il s'agisse de la houillification ou de «l'huilification» («oilification») tous les auteurs partent des mêmes hypothèses.

La maturation de la matière organique est une somme de réactions chimiques dont le taux dépend de la température et de la durée d'application (le temps:  $t$ ).

Si  $n_0$  est le nombre de réactants au départ

$$\ln \frac{n_0}{n} = f(t, T) \quad (3)$$

$\ln \frac{n_0}{n}$  peut être aussi bien appliqué à la vitrinite, aux alcanes et autres hydrocarbures qu'aux charbons ou pétroles.

La décroissance du nombre de réactants est assimilée à la loi de décroissance appliquée à la radioactivité.

$$\ln \frac{n_0}{n} = k t \quad (4)$$

La constante  $k$  ou constante du taux de réaction pour une température donnée est calculée par la relation d'ARRHENIUS:

$$k = A \exp \left[ - \frac{E}{R T} \right] \quad (5)$$

- où A est le nombre de groupes de molécules réagissant avec chaque autre groupe par unité de temps, cette grandeur est souvent appelée le facteur d'ARRHENIUS, le facteur d'impact ou le facteur de fréquence
- et E est l'énergie d'activation en kcal/mole.

Le taux de houillification ou de «oilification» peut alors être formulé ainsi:

$$\ln \frac{n_0}{n} = A \cdot t \exp. \left[ -\frac{E}{RT} \right] \quad (6)$$

D'après KARWEIL (1975) l'équation (6) a servi de base à tous les calculs de taux de maturation de la matière organique.

L'énergie d'activation est différente pour chaque type de liaison dont l'énergie nécessaire à la rupture peut être en plus influencée par la longueur des chaînes, la proximité d'autres groupes fonctionnels ou substitués. C'est pourquoi les auteurs (CONNAN, 1974, TISSOT & WELTE, 1978) préfèrent travailler avec une pseudo-énergie d'activation ou énergie d'activation apparente.

CONNAN (1974), par l'application de sa loi à 12 exemples, obtient des pseudo-énergies d'activation de 11 à 14 kcal/mole, valeurs remarquablement faibles en accord avec celles de TISSOT (1969). Pour briser une liaison carbone-carbone CONNAN cite des E de 56 kcal/mole et TISSOT de 80 kcal/mole. Pour expliquer les faibles valeurs des énergies apparentes on peut faire intervenir les actions catalytiques des argiles.

Cependant l'approche de TISSOT (résumée in TISSOT & WELTE, 1978) nous semble particulièrement élégante.

La multiplicité des E apparentes, reflet de la distribution des divers types de liaison de la MO, est représentée par une courbe de fréquence de 0 à 80 kcal/mole. Les types de kérogènes I, II, et III sont caractérisés par des fréquences et un mode. Celui-ci est à 70 kcal/mole pour le type I (UINTA p. ex.), à 50 pour le type II et à 60 pour le type III. Cela signifie que, d'après les valeurs choisies par TISSOT, l'énergie pour la génération d'HC liquides est la plus faible pour le type II. Ce qui confirme donc les faits concernant Uinta et le Nord-canadien.

Le spectre des énergies apparentes d'activation s'étendant de 8 à 65 kcal/mole, la matière organique au cours de son transit dans des couches de plus en plus chaudes, passe donc par toute la gamme de ces énergies apparentes. Tout se passe donc comme si l'énergie apparente augmentait avec la température. Cela expliquerait les faibles valeurs calculées par TISSOT (1969) et CONNAN (1974) pour le début de la FHP et les valeurs plus élevées retenues pour les modes des kérogènes II, III et I.

Pour la houillification (CONNAN, 1974, citant GALWEY, 1969) et LOPATIN (1971), l'énergie apparente d'activation est de 24 kcal/mole pour la formation de benzène à partir de tourbe; elle s'étend de 8.4 à 30 pour la carbonisation naturelle. Pour TISSOT & WELTE (1978) citant HANBABA et JUNGREN (1969) elle est comprise entre 50 et 65 kcal/mole. KARWEIL (1975) arrive, pour 2 filons de la Ruhr, à 8.4 kcal/mole. Quoique quelques-unes de ces valeurs soient vraiment faibles, leur fourchette de variation est comparable à celle de la FHP. Peut-être faudrait-il appliquer à la houillification la même méthode que celle de TISSOT à la «huilification» et admettre aussi que l'énergie apparente d'activation croît avec la température?

Cette hypothèse serait renforcée par les 4 «sauts» constatés par M. TEICHMUELLER (in STACH et al., 1975) dans la progression comparée de la reflectivité de la vitrinite et des paramètres chimiques de la houillification.

Le premier saut ( $R_O = 0.6\%$ , MV: 43% et C: 80% env.) marque la fin de la forte diminution de l'humidité (moisture) et le début d'un gradient négatif plus élevé des teneurs en matières volatiles. Le second saut ( $R_O = 1.3\%$ , MV: 29% et C: 87%) correspond à une réduction marquée de l'oxygène par perte de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  formés. Les troisième et quatrième sauts, sont marqués par un départ plus énergique encore de l'hydrogène sous forme de méthane et par une condensation accrue des carbones en forme de cycles (aromatisation).

Certains de ces sauts se marquent dans des transformations accrues de comportement des autres macéraux. Par exemple le premier qui correspond à peu près au passage des Braunkohle au Steinkohle, des lignites au charbon est marqué par un même saut dans les liptinites. Le second dans les exinites dont la réflectance augmente si fortement qu'elle pourra égaler celle de la vitrinite et même la dépasser (STACH, 1975, in STACH et al., 1975).

Or, si l'on compare, d'après les rapports élémentaires O/C et H/C, les kérogènes de TISSOT & WELTE (1978) et les macéraux de VAN KREVELEN (1961), les exinites auraient une composition se rapprochant de celle du kérogène II, tandis que la vitrinite est typique du kérogène III.

Tout indique donc que dans la houillification il doit exister des spectres de distribution des énergies d'activation avec, suivant les macéraux et les charbons, des modes différents.

Si ceci est vérifié on doit en conclure que la réflectance de la vitrinite des charbons doit se corréler le mieux avec les kérogènes de type III, celle des liptinites-exinites avec ceux du type II.

Dans la corrélation des FHP avec  $R_O$  de la fig. 8, le début de la génération des HC liquides est à peu près le même pour HOOD & GUTJAHR (1972) et pour le Bassin de Doulala:  $R_O$  0.6 à 0.65%. Dans les 2 cas le maximum de génération se situe à 0.8%  $R_O$  environ. Il n'est dès lors pas étonnant que le maximum de la FHP de Uinta - kérogène de type I, corresponde à des  $R_O$  plus forts: 1.1%. On pourrait de cette manière comprendre aussi pourquoi certains auteurs voient le début de la FHP à 0.5%  $R_O$ . Il s'agit là d'une comparaison d'un kérogène de type III: la vitrinite à un kérogène de type II. Karlsefni (fig. 8 D) pourrait, par certains de ses échantillons, être assimilée à un tel kérogène (début de la FHP à 0.5%  $R_O$ ).

En conclusions la comparaison directe de la réflectance de la vitrinite à la FHP doit tenir compte de la nature des kérogènes. Dans certains cas on devrait préférer la réflectance des liptinites-exinites, kérogène de type II ou presque.

Plus généralement les rangs des charbons pourront mieux être comparés à la zonéographie des HC lorsqu'on disposera d'un modèle analogue, pour les charbons, à celui de TISSOT pour les kérogènes, c'est-à-dire le classement des énergies apparentes d'activation, leurs fréquences et leur mode.

Il subsiste toutefois d'autres difficultés dans ce type de comparaison l'une est la pression.

## Le rôle de la pression

Dans les charbons, la pression peut amener à un confinement empêchant l'échappement des gaz produits par la réaction chimique et retardant ainsi la houillification et l'évolution des macéraux (STACH et al., 1975, p.45).

Pour KARWEIL (1975) contrairement aux kérogènes disséminés dans les roches qui bénéficient ainsi d'un réseau poreux plus perméable, les pores dans les charbons sont si ténus, la pression capillaire si forte, jusqu'à 1 kbar, que les gaz produits ne peuvent expulser les produits huileux formés. Le confinement de cette phase favorise les réactions solide-liquide, il en résulte parallèlement une viscosité qui s'étend de celle des liquides à celle de la matière solidifiée. Le taux de réaction des processus d'houillification s'en trouve fortement affecté. En effet, par l'augmentation de la température, liquides visqueux et solides commencent à réagir sous la forme d'une dissolution des solides ou des produits solidifiés, augmentant ainsi le facteur d'ARRHENIUS et diminuant les énergies d'activation. Pour KARWEIL donc une subsidence rapide, accompagnée par une augmentation rapide de la pression géostatique, favorise le rapprochement des réactants, augmente donc aussi le facteur d'ARRHENIUS et diminue l'énergie d'activation. Interprétant les travaux de HUCK et PATTEISKI (1955), l'auteur remarque que l'influence de la pression, confinant les phases fluides, «retarde» les critères chimiques utilisés pour la zonéographie des rangs, mais favorise l'orientation des «systèmes aromatiques» donc l'augmentation de la réflectance ou de la résonnance magnétique électronique.

Cependant, comme la maturation de l'huminite-vitrinite s'accomplice aussi par une transformation chimique, il nous apparaît qu'il serait bon de préciser dans quel domaine, ou à partir de quel rang de quel charbon, l'orientation physique du «système aromatique» dans le champ d'une pression de type hydrostatique s'opère de telle manière qu'elle en augmente la réflectance de la vitrinite par exemple.

Nous aurions tendance à croire que les pressions anormales auxquelles fait appel KARWEIL auraient aussi pour effet de retarder la réflectance de la vitrinite, du moins jusqu'à la fin de la FHP, c'est-à-dire au second saut de houillification.

Pour les roches argileuses, des subsidences rapides sont à l'origine de pressions de formation anormales, comme dans les zones de sous-compaction. Ces pressions peuvent aussi avoir comme conséquences de retarder l'évolution des kérogènes par confinement des gaz et liquides produits. En principe elles peuvent aussi avoir comme conséquence de diminuer le facteur d'ARRHENIUS et augmenter l'énergie apparente d'activation. Comme au droit de ces zones les gradients géothermiques sont souvent plus élevés, il y a compétition entre l'effet retardateur des pressions anormales et l'effet de la température plus élevée.

Par ailleurs ces zones sous-compactées sont peu perméables. Elles se signalent par des teneurs en gaz HC adsorbés et en EO plus élevés. On admet que la migration n'a pas eu lieu. Cela pose la question fondamentale de la signification de EO pour l'exploration. En effet si les EO sont élevés, cela signifie que toutes les conditions de formation d'HC liquides sont réalisées, que le kérogène est du type II, éventuellement du type I. Cela signifie aussi que les HC n'ont pas migré.

Si la migration a eu lieu, les teneurs que l'on peut extraire doivent être faibles. Cette difficulté logique est préoccupante mais il y a plusieurs moyens de la résoudre. Par exemple, compte-tenu du type de kérogène, de la température, du temps, on peut estimer la quantité d'extraits formée. La différence entre la quantité réellement mesurée et la quantité que l'on devrait trouver, peut donner le volume migré.

Il n'en reste pas moins que de faibles extraits peuvent avoir une double signification: matière organique du type xylo-herbacé ou migration. Cette ambiguïté explique la raison pour laquelle des études sont nécessaires sur la composition même des extraits, celle de la matière organique insoluble ou sur le comportement de la fluorescence pour des kérogènes encore en contact avec leurs produits de réaction et ceux qui les ont perdu par migration.

La matière organique dispersée (MOD) dans les roches, contrairement aux charbons, bénéficie du réseau poreux et perméable de celles-ci. On peut imaginer que les produits de transformation de la vitrinite par exemple sont plus facilement évacués que dans les charbons. De là viendraient peut-être les écarts constatés entre les réflectances (toutes conditions étant égales par ailleurs) des shales, des calcaires, des grès ou des filons charbonneux. Selon les résultats rapportés par BOSTIK et FOSTER (1975),  $R_O$  augmente des grès, par les siltstones, les argiles, aux charbons selon donc des perméabilités décroissantes. Cela serait peut-être le signe que pour l'augmentation de la réflectance, la présence des produits de transformation est nécessaire (cf. KARWEIL, plus haut).

Cela signifie en tout cas que les  $R_O$  doivent être comparés par isolithologie. On en concluera que le rôle de la pression est encore bien ambigu. D'un point de vue purement chimique, une pression exerçant un confinement retarde les vitesses de réaction mais accélérerait l'augmentation de la réflectance de la vitrinite. Pour le moment, dans la maturation de la MOD il n'y a pas d'exemple pour préciser si la génération des HC liquides suit la loi du premier ou du second type.

Pratiquement on retiendra qu'en toute logique la maturation conduisant à la FHP est difficile à corrélérer aux rangs des charbons. Elle ne devrait être comparée qu'aux macéraux de la matière organique dispersée,  $R_O$  de la vitrinite et si possible à la liptinite (exinite) suivant la nature du kérogène. Les  $R_O$  ne devraient être comparés que par isolithologies.

### Influence de la migration

En général la migration se fait des roches-mères plus profondes vers les réservoirs moins enfouis. Cette migration s'accompagne d'une migration de calories. On sait, d'après toutes les études géothermiques, que les transferts de chaleur sont beaucoup plus efficaces par les vecteurs fluides que par la conductibilité thermique des roches.

Si la composante verticale de la migration est importante, la différence de température entre les roches-mères et les roches-magasins peut-être forte.

On doit admettre que ces anomalies thermiques sont susceptibles d'augmenter la réflectance de la vitrinite, par exemple. Il n'est pas exclu que les sauts de  $R_O$ , enregistrés par ROBERT (1976) en Aquitaine, soient provoqués par la migration. Les  $R_O$  passent de 0.5 à 2.0% sur quelques centaines de mètres. L'épaisseur de cette zone de transition est la plus faible au droit des champs productifs, la plus forte sur les flancs. Elle disparaît au N vers Parentis et à l'E vers Tarbes. L'élévation de la réflectance ne serait alors que le résultat de l'élévation de la température due à la migration des fluides, dans notre cas les gaz de Lacq.

La réflectance devrait alors être interprétée comme une conséquence de la migration des HC et non comme un indicateur d'un stade de transformation de la matière organique anté-migration.

### Zonéographie de l'évolution de la matière organique: Brèves conclusions

La FHP peut être définie par la progression des extraits organiques et dans ceux-ci par la progression des HC. Pour les kérogènes type III l'augmentation de la parité des  $n$ -alcanes précise le maximum de la FHP.

La profondeur et la température peuvent varier avec la nature du kérogène; début et maximum dépendent du type de kérogène reflétant ainsi la distribution par fréquen-

ces des énergies apparentes d'activation. La comparaison de la FHP peut-être tentée avec la réflectance de la vitrinite, mais de préférence dispersée dans les roches et en respectant si possible l'effet lithologique. Cette comparaison doit aussi tenir compte du type de kérogène. Elle devrait être la plus efficace avec les kérogènes type III, corrigée pour la comparaison avec les types II et I.

FHP et rangs des charbons forment 2 zonéographies parallèles qu'on ne peut corrélérer entre elles par le biais de la réflectance de la vitrinite qu'en tenant compte des conditions particulières d'aromatisation tant dans les roches que dans les filons de charbons.

Les pressions anormales des zones sous-compactées peuvent biaiser la validité des indicateurs chimiques et physiques.

La migration peut éléver les  $R_O$ .

La somme de ces facteurs perturbants n'interdit pas une comparaison qualitative entre les différentes échelles, au contraire, mais elle rend difficile une comparaison quantitative.

C'est pourquoi on a souvent recours à une échelle comparative des transformations minéralogiques.

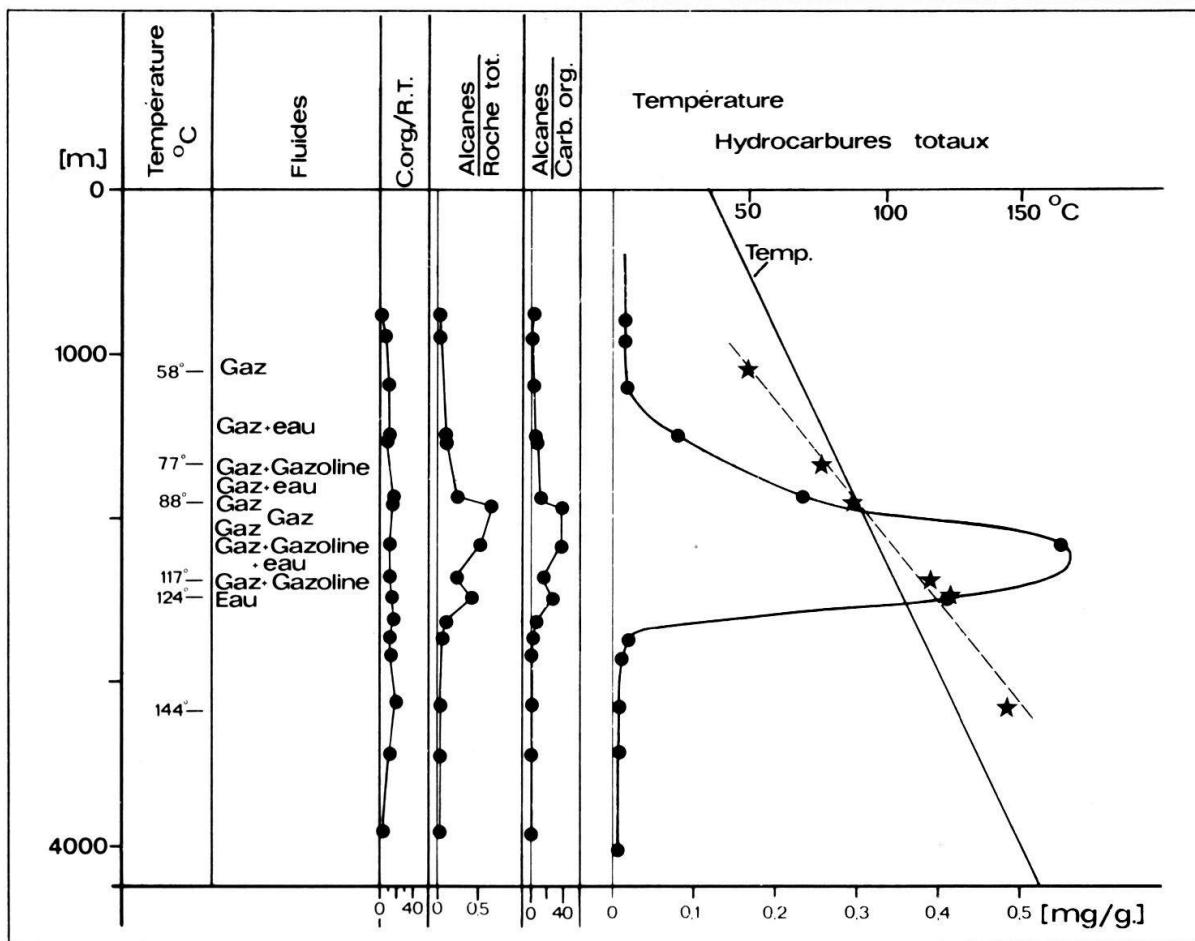
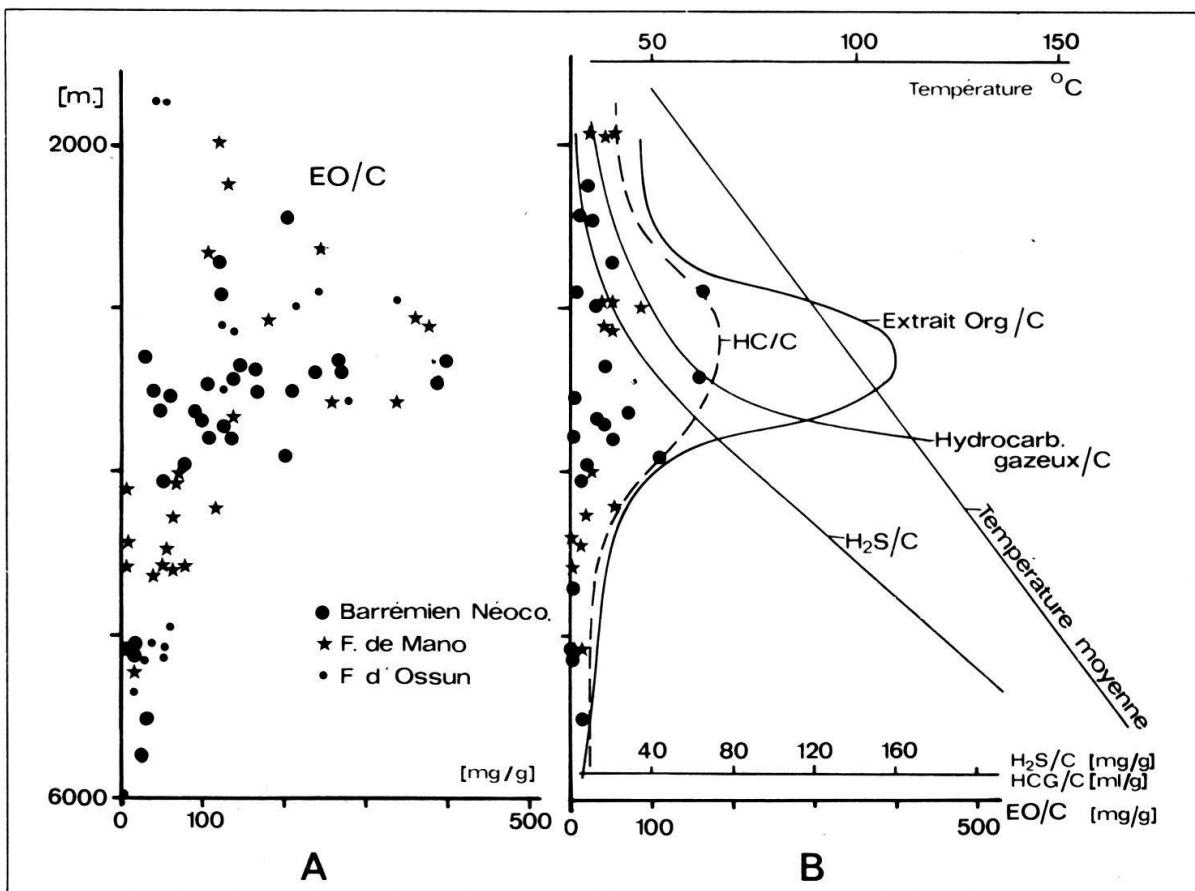
#### *Remerciements*

Nos remerciements vont à la Direction d'EASTCAN pour l'autorisation de publier les résultats de Karlsefni (Amerada Minerals Corporation of Canada Ltd., Aquitaine Company of Canada Ltd., Agip Canada Ltd., Gulf Oil Canada Ltd., Sun Oil Company Ltd., Total of North America Inc. and Total Eastcan Exploration Ltd.) ainsi qu'à l'INRS-pétrole.

## Bibliographie

- ALBRECHT, P. (1969): Constituants organiques des roches sédimentaires. - Thèse Université Strasbourg.
- ALBRECHT, P., & OURISSON, G. (1969): Diagenèse des hydrocarbures saturés dans une série sédimentaire épaisse (Douala, Cameroun). - Géochim. Cosmochim. Act. 33, 138-142.
- BARTENSTEIN, H. & TEICHMUELLER, R. (1974): Inkohlunguntersuchungen, ein Schlüssel zur Prospektierung von paläozoischen Kohlenwasserstoff-Lagerstätten? - Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 24, 129-160.
- BOSTIK, N.H. & FOSTER, J.M. (1975): Comparison of vitrinite reflectance in coal seams and in Kerogen of sandstones, shales and limestones in the same part of a sedimentary section. - Colloque Intern. Pétrogr. matière organique des sédiments, CNRS, Paris, 15-17 sept. 1973, 14-25.
- CONNAN, J. (1971): Evolution diagénétique de la matière organique du forage La 104 (Bassin Sud Aquitaine). - Rapport Soc. Nation. Pétroles Aquitaine, inédit.
- (1974): Time-temperature relationship in oil genesis. Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 58, 2516-2521.
- CORNELIUS, C.-D. (1975): Geothermal aspects of hydrocarbon exploration in the North-Sea Area. - Norg. geologis. undersøk. 316, 29-67.
- DUNOYER DE SEGONZAC, G. (1969): Les minéraux argileux dans la diagénèse, passage au métamorphisme. - Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. Strasbourg, 29, 320 p.
- DURAND, B. & ESPITALIE, J. (1976): Geochemical studies on the organic matter from the Douala Basin (Cameroun). II. Evolution of kerogen. - Geochim. Cosmochim. Act., 40, 801-808.
- GALWEY, A.K. (1969): Heterogenous reaction in petroleum genesis and maturation. - Nature, 223, 1257-1260.
- HANBABE, P. & JUENGTE, H. (1969): Zur Übertragbarkeit von Laboratoriumuntersuchungen auf geochemische Prozesse der Gasbildung aus Steinkohle. - Adv. in Org. Geochem. 1968, 459-471.
- HOOD, A. & GUTJAHR, C.C.M. (1972): Organic metamorphism and the generation of petroleum. - Paper read ann. meet. Geol. Soc. America, Nov. 1972, Minneapolis.
- HUCK, A. & PATTEISKY, K. (1964): Inkohlungsreaktionen unter Druck. - Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 12, 551-558.
- KARWEIL, J. (1975): The determination of paleotemperatures from the optical reflectance of coaly particles in sediments. - Colloque Intern. Pétrogr. matière organique des sédiments, CNRS, Paris, 15-17 sept. 1973, 195-203.
- KREVELEN, D.W. van (1961): Coal.-Elsevier, Amsterdam - London - New York - Princeton, 514 p.
- KUBLER, B., BETRIX, M.-A. & FAUGUEL, Ph. (1979): Répartition de quelques éléments dans les sédiments de surface du lac de Neuchâtel, modèle sédimentologique et géochimique. - Bull. Soc. Neuchâtel Sc. Nat., 101, (sous presse).
- KUBLER, B., HEROUX, Y., PITTON, J.-L., CHAROLLAIS, J. & WEIDMANN, M. (1979): Sur le pouvoir réflecteur de la vitrinite dans quelques roches du Jura, de la Molasse et des nappes préalpines, helvétiques et penniques (Suisse occidentale et Haute Savoie). - Eclogae géol. Helv., 72/2 (sous presse).
- LARSKAYA, Y.S. & ZHABREV, D.V. (1965): Effect of stratal temperature and pressure on the composition of dispersed organic matter. - Akad. Nauk. URSS Doklady 157/4, 897-900, english transl.: 157, 135-138.
- LE TRAN, K., CONNAN, J. & DE LA PASTURE, B.M. (1974): Diagenesis of organic matter and occurrence of hydrocarbons and hydrogen sulfide in the SW Aquitaine Basin (France), - Bull. Centre Rech. Pau-SNPA, 8, 111-137.
- LOPATIN, N.V. (1971): Temperature and geologic time as factors in coalification. - Akad. Nauk. URSS, ser. geol. Izvestiya, 3, 95-106. English transl. by N.W. Bostick.
- LOUIS, M. (1966): Etudes géochimiques sur les schistes cartons du Toarcien du Bassin de Paris. - Adv. in Org. Geochem., 1964, 85-94.
- LOUIS, M. & TISSOT, B. (1967): Influence de la température et de la pression sur la formation des hydrocarbures dans les argiles à kérogène. - 7th World Petr. Congr. Proc., 2, 47-60.
- PHILIPPI, G.T. (1965): On the depth, time and mechanism of petroleum generation. - Geochim. Cosmochim. Act., 29, 1021-1049.
- POWELL, T.G. (1978): An assessment of the hydrocarbon source rock potential of the Canadian arctic islands. - Comm. géol. Canada, paper 78-12, 82 p.

- POWELL, T.G., FOSCOLOS, A.E., GUNTER, P.R. & SNOWDON, L.R. (1978): Diagenesis of organic matter and fine clay minerals: a comparative study. - *Geochim. Cosmochim. Act.*, 42, 1181-1197.
- PUSEY III, W.C. (1973): How to evaluate potential gas and oil source rock. - *World Oil* 176/5, 71-75.
- ROBERT, P. (1976): Approche de la géothermie des séries sédimentaires par l'étude de la diagénèse organique: relation avec la tectonique profonde de l'écorce. - *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, 10, 271-285.
- RUMEAU, J.-L. & SOURRISSE, C. (1972): Compaction, diagénèse et migration dans les sédiments argileux. - *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, 6/2, 313-346.
- SHAW, D.M. (1964): Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines. - Masson, Paris, 237 p.
- STACH, E., MACKOWSKY, M.-Th., TEICHMUELLER, M., TAYLOR, G.H., CHANDRA, D., & TEICHMUELLER, R. (1975): Stach's Textbook of coal petrology. - Borntraeger, Berlin - Stuttgart, 428 p.
- STACH, E. (1975): The microscopically recognizable constituents of coal. - In: Stach's Textbook of coal petrology, 54-174.
- TEICHMUELLER, M. (1970): Bestimmung des Inkohlungsgrades von kohligen Einschlüssen in Sedimenten des Oberrhein-Grabens. - Ein Hilfsmittel bei der Klärung geothermischer Fragen. - In: ILLIES, H. & MÜLLER, St. (eds): Graben Problems. - Intern. Mantle Project, Sci. Rep. No. 27, 124-142, Schweizerbart: Stuttgart.
- (1971): Anwendung kohlenpetrographischer Methoden bei der Erdöl-Erdgasprospektion. - Erdöl u. Kohle, 24, 69-76.
  - (1974): Generation of petroleum-like substances in coal seams as seen under the microscope. - In: Adv. org. Geochem., 1973, 321-348.
  - (1975): Origin of the petrographic constituents of coal. - In: Stach's Textbook of coal petrology, 176-238.
- TEICHMUELLER, R. (1973): Die paläogeographischfazielle und tektonische Entwicklung eines Kohlenbeckens am Beispiel des Ruhrkarbons. - *Z. dtsch. geol. Ges.*, 124, 149-165.
- TISSOT, B. (1969): Premières données sur les mécanismes et la cinétique de la formation du pétrole dans les sédiments. Simulation d'un schéma réactionnel sur ordinateur. - *Rev. Inst. Fr. Pétr.* 24/4, 470-501.
- TISSOT, B., DEROO, A. & HOOD, A. (1978): Geochemical study of the Uinta Basin; formation of petroleum from the Green River Formation. - *Geochim. Cosmochim. Act.* 42, 1469-1486.
- TISSOT, B. & WELTE, D.H. (1978): Petroleum formation and occurrence. - Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 538 p.
- VASSOYEVITCH, N.B., KORCHAGINA, Y.I., LOPATIN, N.V. & CHERNYCHEV, V.V. (1969): Principal phase of oil formation. *Moscov. Univ. Vestnik* 6, 3-27. English Transl.: 1970. - *Geol. Rev.* 12, 1276-1296.



◀ Fig. 1 *Données d'analyse et schématisation de la fenêtre à huile potentielle*

D'après LE TRAN et al. (1974) légèrement modifié.

- A. Distribution des extraits organiques avec la profondeur à partir de plusieurs forages du Jurassique-Crétacé d'Aquitaine Sud-Ouest. Les résultats s'ordonnent selon une courbe enveloppe à l'intérieur de laquelle de nombreux extraits ont des valeurs plus faibles.
- B. Schématisation de la fenêtre à huile par la courbe enveloppe des extraits ( $\text{HC} > \text{C} 15$ , résines et asphaltènes). Les valeurs maximales des HC dessinent aussi une courbe enveloppe. En profondeur on notera l'augmentation brusque des gaz et du  $\text{H}_2\text{S}$  (particulier à ce bassin carbonaté) en relais de la fenêtre à huile potentielle.

◀ Fig. 2 *Fenêtre à huile potentielle des forages de Logbaba, Crétacé sup., Cameroun*

D'après ALBRECHT (1969), ALBRECHT & OURISSON (1969), RUMEAU & SOURISSE (1972).

On notera que pour reproduire la courbe d'ALBRECHT & OURISSON, l'échelle de référence a été multipliée par 10. Les HC sont 10 fois plus faibles qu'en Aquitaine; les seuls indices sont du gaz avec un peu de gazoline (GOR 10000).

Le kérogène est de type III (DURAND et al., 1976) donc plutôt à «gaz prone».

Le gradient géothermique (trait continu) est celui d'ALBRECHT & OURISSON. Le second gradient (étoiles et traitillés) a été calculé d'après les températures et profondeurs de RUMEAU & SOURRISSE. Nous ne croyons pas que ces gradients représentent les gradients au moment de la maturation.

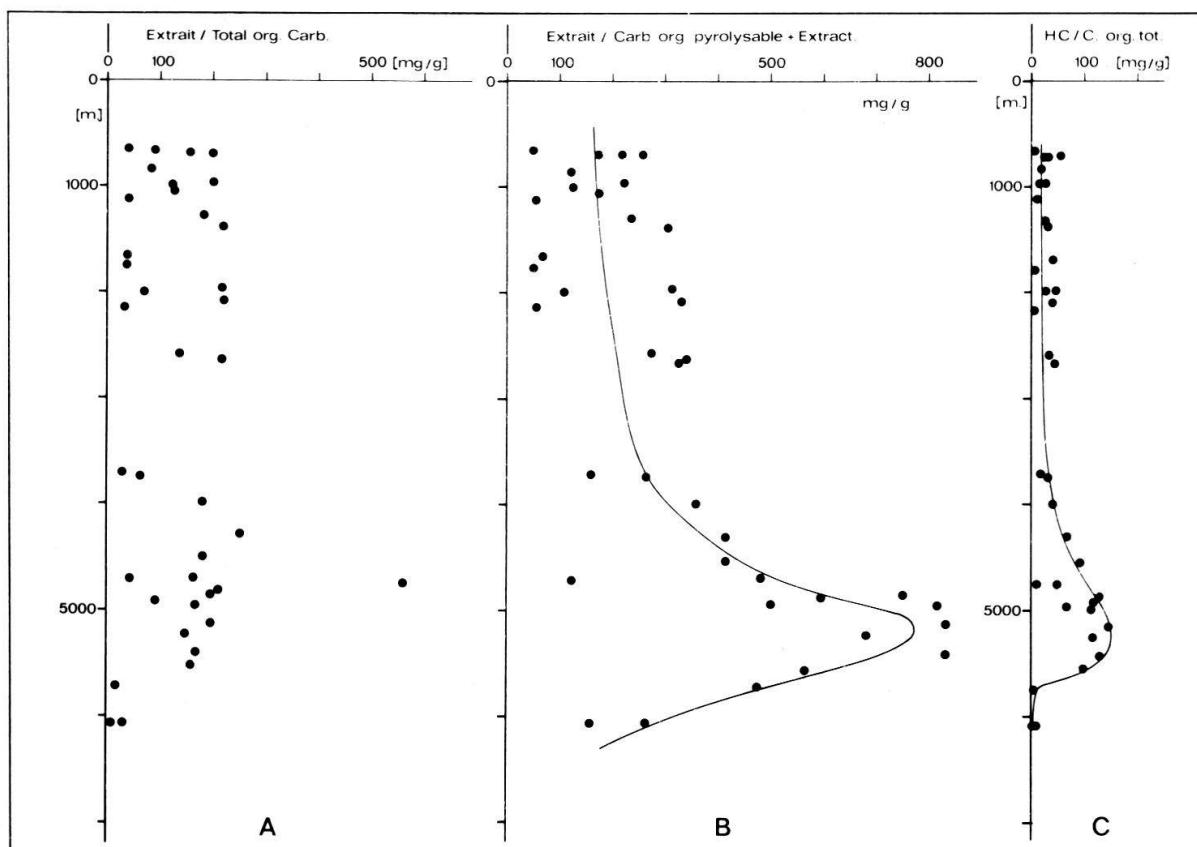
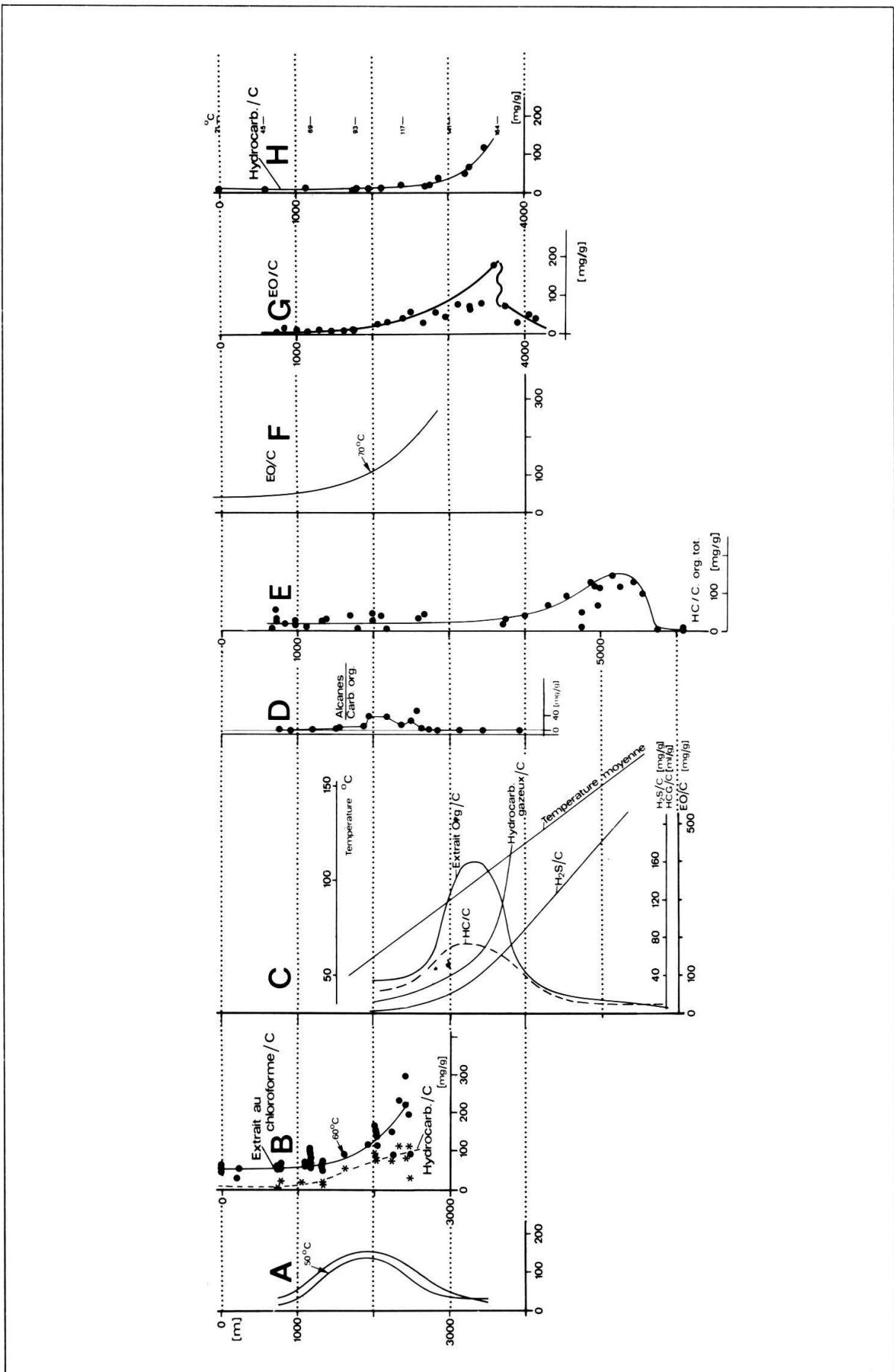


Fig. 3 *Fenêtre à huile d'un kérogène type I*

Bassin de Uinta, Green River Shales. D'après TISSOT et al. (1978).

Tout au long de la colonne sédimentaire le kérogène I donne des extraits organiques abondants, les valeurs maximales sont supérieures à 200 mg/g. Une seule valeur s'écarte (sup. à 500 mg/g). Les valeurs brutes ne dessinent pas une FHP. Par contre les HC, dans ces extraits, arrivent à des teneurs comparables à celle d'Aquitaine: 200 mg/g et définissent bien la FHP. En rapportant les extraits organiques au «useful carbon» c'est-à-dire le carbone organique pyrolyposable et le carbon organique extractible par solvant, TISSOT et al. ont retrouvé un Maximum qu'ils ne définissent pas comme LE TRAN et al., par une courbe enveloppe mais par une courbe moyenne.



◀ Fig. 4 Profondeur comparée des FHP

- A. D'après TISSOT & WELTE (1978).  
Devonien sup., 350 millions d'années, Ouest Canada, Est Sahara.
  - B. D'après LOUIS & TISSOT (1967).  
Bassin de Paris, Jurassique inf. 180 millions d'années.
  - C. D'après LE TRAN et al. (1974).  
Bassin d'Aquitaine Sud-Ouest, 160 à 110 millions d'années.
  - D. D'après ALBRECHT (1969), ALBRECHT & OURISSON (1969), RUMEAU & SOURISSE (1972).  
Bassin de Douala, Crétacé.
  - E. D'après TISSOT et al. (1978).  
Bassin de Uinta, Green River Shale, 50 millions d'années.
  - F. D'après TISSOT & WELTE (1978).  
Afrique occidentale, Tertiaire, 35 millions d'années.
  - G. D'après EASTCAN and ASSOCIATES et INRS-PETROLE.  
Labrador offshore, 65 à 50 millions d'années.
  - H. D'après PHILIPPI (1965).  
Bassin de Los Angelès, 10 millions d'années.

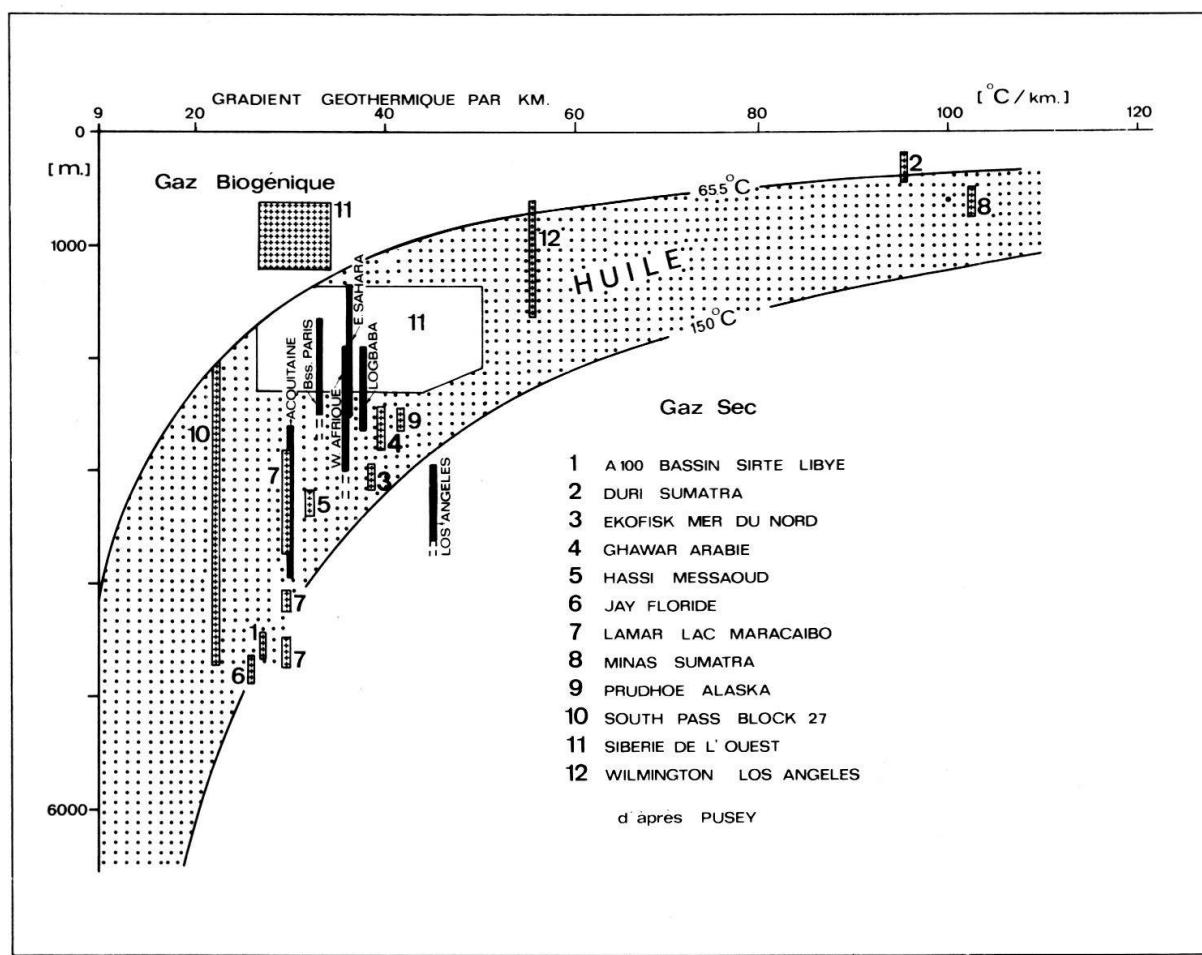
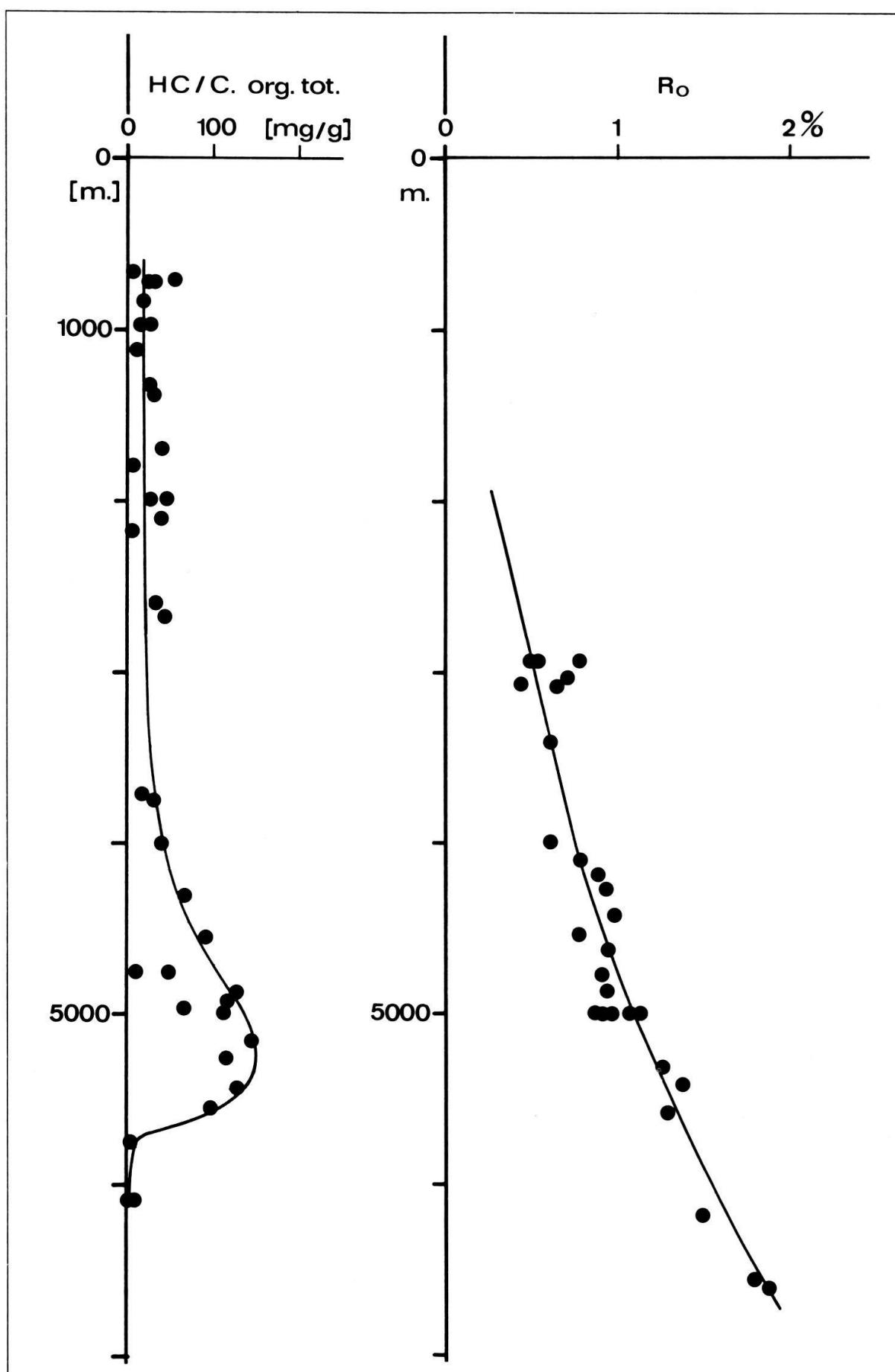


Fig. 5 «*Liquid Window concept*»

D'après PUSEY III (1973).

Existence des productions d'huile en fonction de la profondeur et des gradients géothermiques, selon PUSEY. Nous avons superposé les FHP dont le gradient géothermique était publié. Aux limites figurent les températures calculées d'après les gradients géothermiques et les profondeurs indiquées.



◀ Fig. 6 Comparaison FHP, Kérogène type I, réflectance de la vitrinite  $R_o$

D'après TISSOT et al. (1978). Bassin de Uinta.

La progression de  $R_o$ , avec la profondeur, est continue, en forme de courbe. Le maximum de la FHP correspond à un  $R_o$  supérieur à 1%.

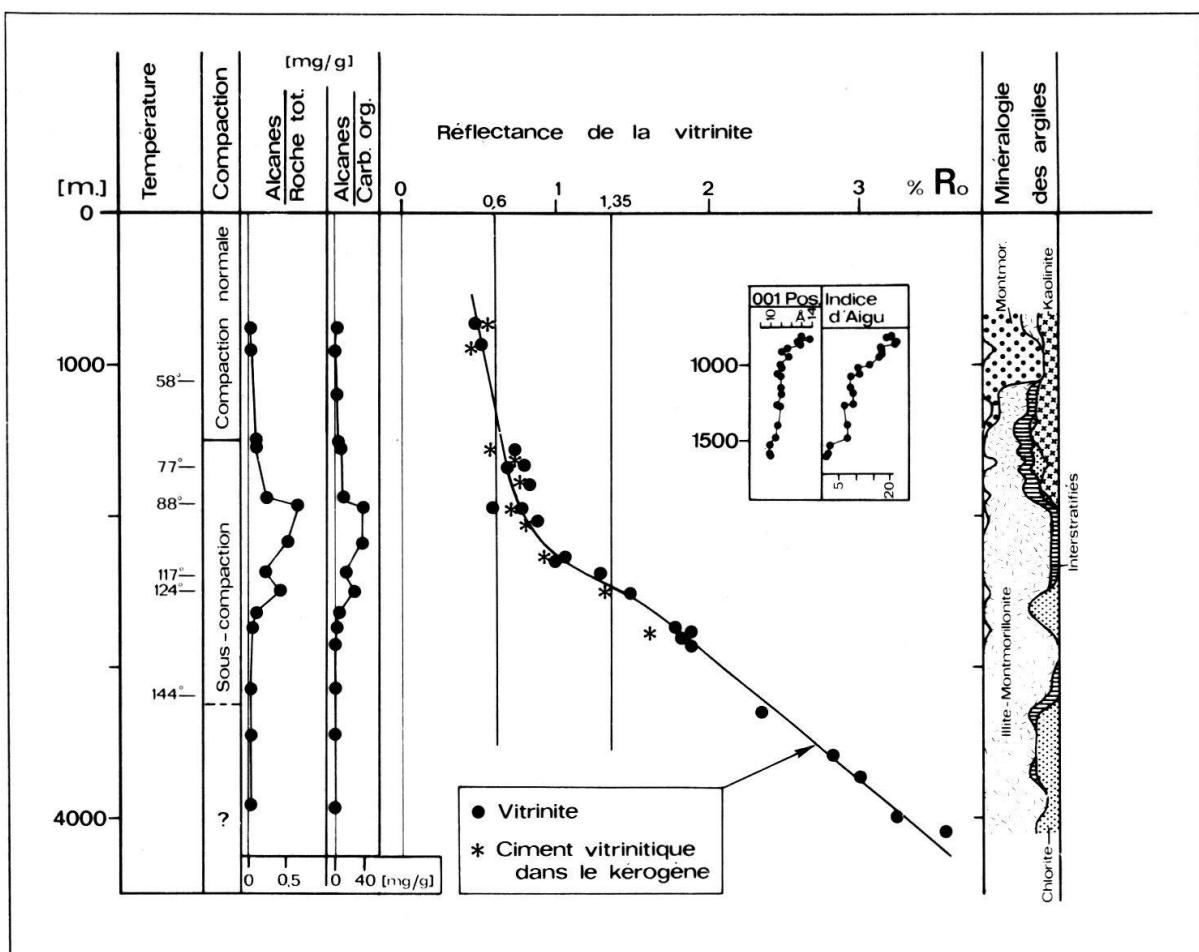


Fig. 7 FHP, kérogène type III,  $R_o$ , température, sous-compaction, disparition des smectites, de la kaolinite, cristallinité et migration des pics de diffraction

Logbaba, Cameroun.

D'après ALBRECHT (1969), RUMEAU & SOURRISSE (1972), DUNOYER DE SEGON-ZAC (1969), TISSOT & WELTE (1978) et SNPA, inédit.

La rupture de la progression  $R_o$ /profondeur, détermine 2 gradients et correspond au maximum des alcanes extraits. Sous-compaction, disparition des smectites, fin de la migration des pics interstratifiés-smectites et de la diminution rapide de l'indice d'aigu du complexe smectite-interstratifiés (exprimé en angle de diffraction  $2\theta \text{ Cu K}_\alpha$  multiplié par 10) se produit 500 m plus haut pour un  $R_o$  de 0.6%.

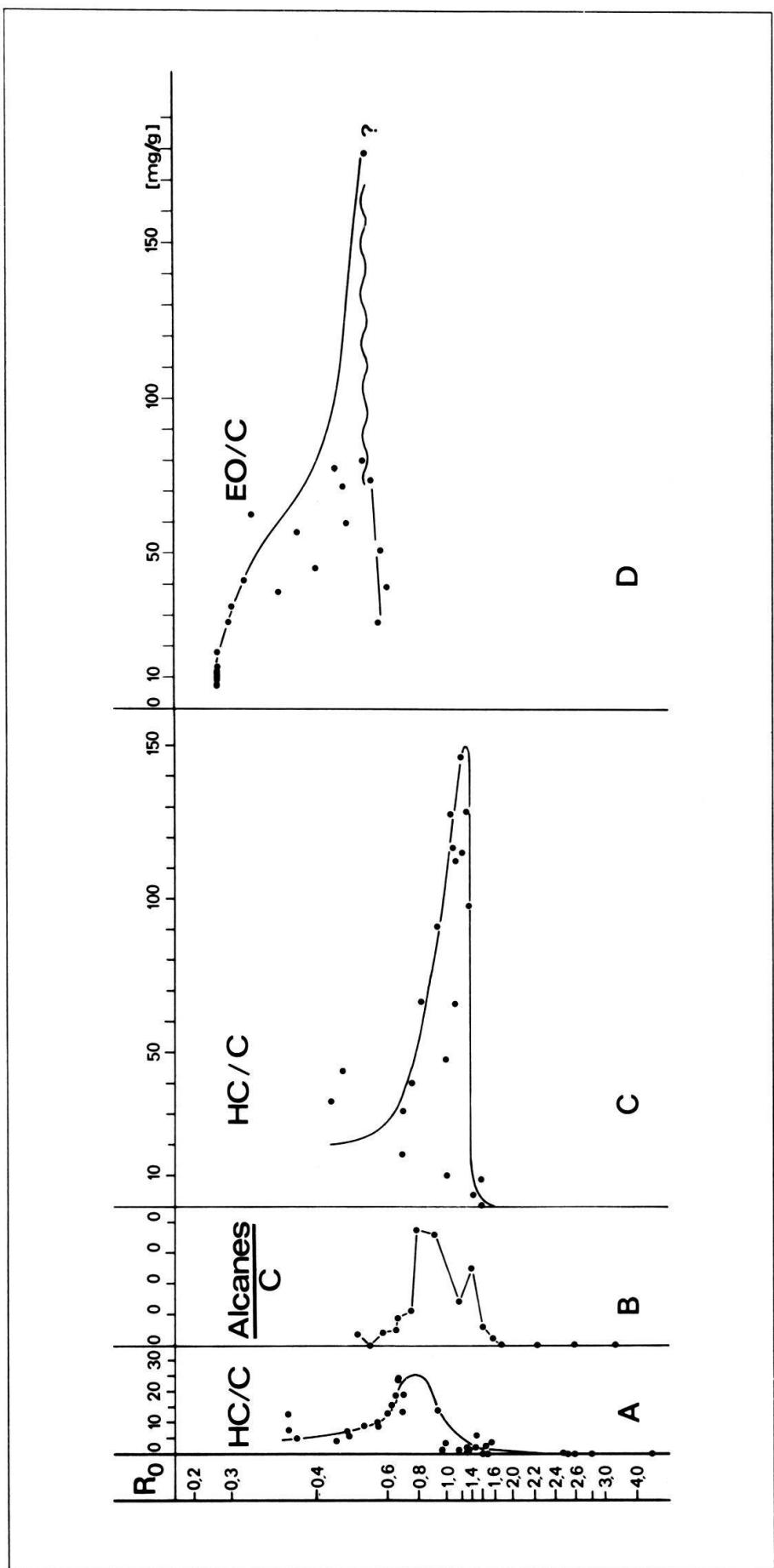


Fig. 8 Comparaison des FHP et  $R_o$

- A. D'après HOOD & GUTJAHR (1972).  
HC/C sont faibles, matière organique charbonneuse, kérogène type III.
- B. Logbaba (cf. fig. 7) HC/C.
- C. Uinta (cf. fig. 6) HC/C.
- D. Karlsefni EO/C. La FHP ne fait que débuter, elle est tronquée par un changement draconien dans le type de MO qui passe du type II probable au type III.