

La marée noire de l'Amoco Cadiz

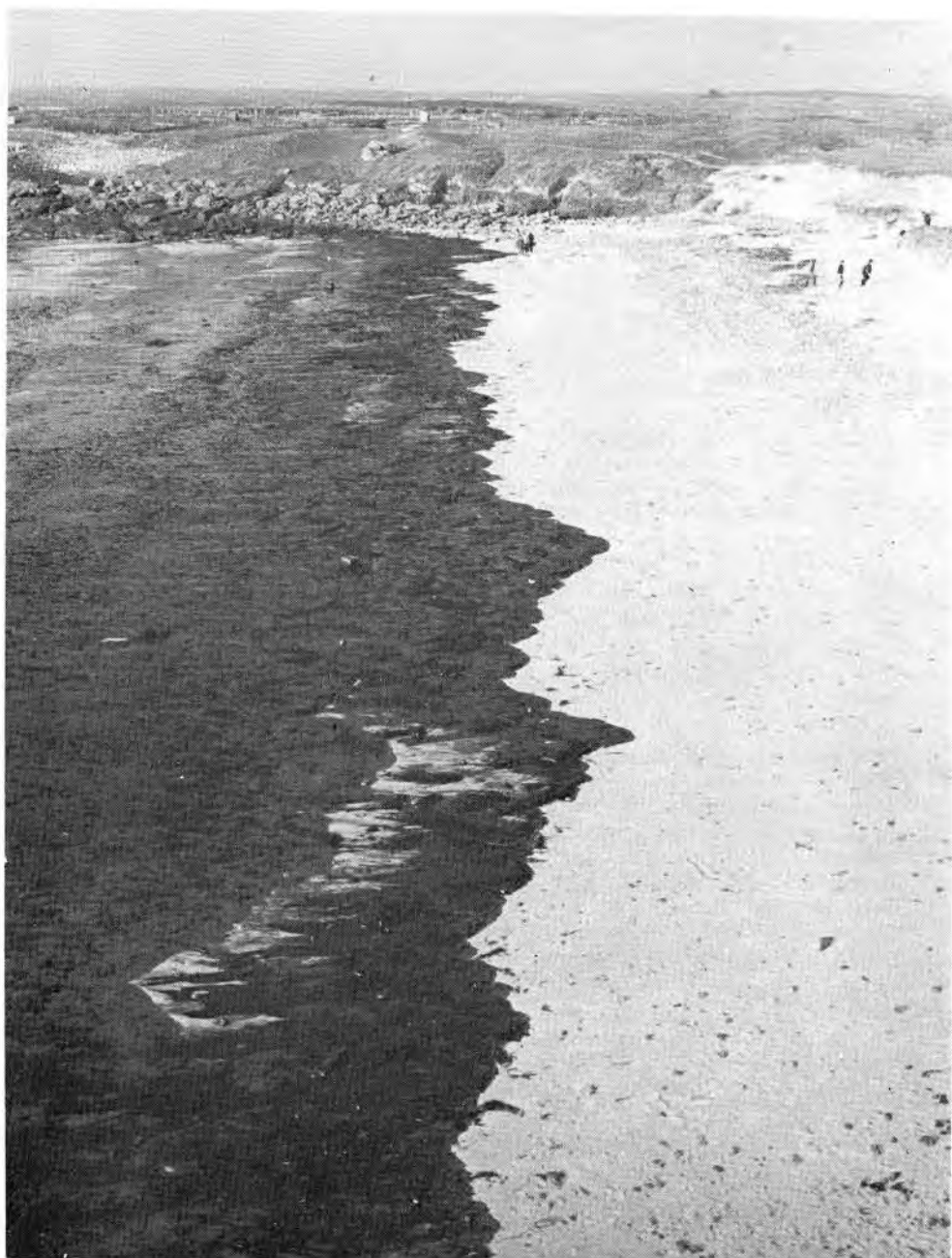
La quatrième marée noire qu'a connue la Bretagne, par suite de l'échouage du pétrolier géant Amoco Cadiz est, avec les 230 000 tonnes de pétrole brut répandu en mer, le record mondial absolu. Devant cette catastrophe écologique survenue sur les côtes bretonnes, la S.E.P.N.B. n'est pas restée inactive. Elle a créé des cliniques d'oiseaux mazoutés, elle a participé aux bilans écologiques, elle est intervenue auprès des autorités administratives pour éviter des erreurs, notamment à propos de l'usage des détergents, du stockage du mazout dans des fosses improvisées, du comblement de vasières polluées... Enfin elle a informé le public et participé aux manifestations contre les marées noires. Bref, du 17 mars à la fin juin, les militants de la S.E.P.N.B. étaient chaque jour dans l'action.

Pour réaliser un bilan objectif des conséquences de cette marée noire, il a fallu attendre quelques mois : le temps de rassembler et d'analyser les documents, de s'acquitter des rapports officiels, de rédiger et d'illustrer les articles destinés à Penn ar Bed.

Comme pour chaque numéro de notre revue, qui est à la fois scientifique et de vulgarisation, il y a eu un dilemme sans cesse répété entre, d'une part, la tentation de conserver toutes les données récoltées en les exprimant dans le langage des spécialistes et, d'autre part, le désir de devenir plus compréhensible, mais en perdant fatalement une partie de l'information. Le scientifique, qui connaît la valeur du détail et qui sait que toute simplification est une caricature, éprouve toujours beaucoup de difficultés à écrire pour un large public. C'est pourquoi je tiens à remercier ceux de mes collègues qui ont consenti à accomplir cet effort.

Albert LUCAS,

Rédacteur de « Penn ar Bed ».



Sur cette vue de la grève de Tréompan (Lampaul-Ploudalmézeau, Finistère), prise le 20 mars après-midi, on voit la montée inexorable de la mer noire sur le sable blanc.

(Photo Claude Roudot, Lanildut)

Caractéristiques et comportement du pétrole déversé à la mer

par Jean-Paul GUYOMARCH et Jean-Yves MONNAT

Faculté des Sciences de Brest

Lorsque survient un incident pétrolier, et quelle qu'en soit l'ampleur, les moyens d'information lui font toujours un très vaste écho. Rien de plus légitime. Mais le phénomène met en jeu des composants et des processus si variés et si complexes que les journalistes ne savent pas toujours très bien de quoi ils parlent ; assez rapidement le public se trouve ainsi inondé d'informations plus ou moins contradictoires, submergé de termes techniques qui, au gré des articles de presse ou des informations audiovisuelles, sont investis de significations diverses. Nous allons tenter ici d'ordonner un peu tout cela, de répondre aussi simplement que le permet la complexité du sujet à des questions immédiates comme : Qu'est-ce que le pétrole ? D'où vient-il ? Quel est son comportement lorsqu'il se déverse à la mer ?

1. LE PETROLE - COMPOSITION

On désigne sous le nom de *pétrole* des substances extrêmement variables d'aspect et de composition. Le pétrole peut se présenter à l'état gazeux (gaz naturel), ou liquide, auquel cas il porte le nom de brut, ou encore à l'état solide lorsqu'il s'agit d'asphaltes de bitumes ou de goudrons. Ce peut être aussi une combinaison de ces divers états. Ce que l'on nomme pollution pétrolière fait surtout référence à la pollution par les pétroles liquides, bruts ou produits plus ou moins raffinés comme les fuels, etc...

La composition chimique d'un brut peut varier à l'infini. Ainsi deux échantillons prélevés au sein d'un même gisement ne sont jamais tout à fait identiques, car un brut contient des milliers d'espèces chimiques en proportions variables. On peut les regrouper en 5 catégories : Hydrocarbures : plus de 90 % — Composés soufrés : moins de 6 % — Composés oxygénés : moins de 2 % — Composés nitrés : moins de 1 % — Composés métalliques : traces de plus de 10 éléments possibles (nickel, vanadium...) sous forme de composés organo-métalliques ou de sels.

Comme on peut le constater, le pétrole est en majeure partie composé d'hydrocarbures. Ce sont des substances dont la molécule est uniquement constituée d'atomes de carbone et d'hydro-

gène. Mais à partir de ces deux seuls éléments de base, le nombre de composés possibles est considérable. L'enchaînement des atomes de carbone constituant le squelette de la molécule peut être linéaire, ramifié ou fermé (cyclique), le nombre d'atomes de carbone peut varier entre 1 et plus de 30, les produits étant d'autant plus volatils qu'ils en comptent moins.

Les principaux hydrocarbures du pétrole appartiennent à trois familles : paraffines, naphthènes, aromatiques.

La molécule des *alcanes* ou *paraffines* est constituée par une chaîne ouverte d'atomes de carbone, chacun d'entre eux portant le maximum possible d'atomes d'hydrogène d'où leur appellation d'*hydrocarbures saturés*. Tous le monde connaît le méthane (1 carbone), le propane (3 carbones), le butane (4 carbones)... et la *paraffine* du commerce, mélange de paraffines à plus de 18 atomes de carbone par molécule.

Le squelette des *naphthènes* comporte un ou plusieurs cycles à cinq ou six carbones. Certains sont dits *insaturés* parce que, pour un même nombre de carbones, ils portent moins d'atomes d'hydrogène que les paraffines correspondantes. Ainsi, dans le cyclohexane, les six atomes de carbone occupent les sommets d'un hexagone.

L'hydrocarbure *aromatique* le plus simple est le benzène. Tous les composés de cette famille possèdent au moins un noyau benzénique. Ils sont moins bien représentés dans le pétrole que les paraffines et les naphthènes. En matière de pollution, leur importance tient à leur nocivité. Certains sont immédiatement toxiques et pourraient être responsables de cas de mortalité massive (toluène, benzène), beaucoup sont cancérogènes et peuvent s'accumuler dans les organismes (benzopyrènes).

Bien que contenus en faible quantité dans le pétrole, certaines substances autres que les hydrocarbures peuvent avoir des effets pernicieux sur la faune et la flore : c'est le cas de certains composés oxygénés et soufrés, et des composés métalliques.

2. LES SOURCES DE POLLUTION MARINE

Les sources de pollution marine par les hydrocarbures sont diverses. On peut les regrouper en 3 catégories essentielles :

- Biosynthèse par les organismes marins ;
- Pollutions accompagnant les processus géochimiques ;
- Pollutions provoquées par l'activité humaine, ces dernières étant les plus aiguës du fait de leur importance et de leur localisation à proximité des continents.

Les organismes marins et terrestres synthétisent naturellement des hydrocarbures. Ces substances sont libérées dans le milieu soit pendant la vie au cours des activités métaboliques normales, soit après la mort lors de la décomposition de ces organismes. On évalue ainsi entre 1 et 10 millions de tonnes la quantité d'hydrocarbures synthétisée annuellement par les êtres vivant dans le milieu marin.

La « pollution » d'origine géochimique est estimée à 600 000 tonnes par an en moyenne (de 0,2 à 1 million de tonnes). Elle provient pour l'essentiel des suintements naturels au niveau des accidents géologiques, mais aussi, accessoirement, de la dégra-

dition des sols et des sédiments. S'y ajoute une quantité inconnue, mais potentiellement significative, d'hydrocarbures atmosphériques provenant des incendies de forêts, de la combustion incomplète de fuels fossiles, etc...

Mais ce sont les activités humaines qui ont la part la plus importante dans les sources de pollution marine. Les origines en sont multiples comme le montre le tableau suivant.

TABLEAU I

Origines des hydrocarbures dans le milieu marin à l'échelle mondiale (estimation de l'Académie Nationale des Sciences des Etats-Unis) d'après CLARK et MACLEOD (1977).

Sources de Pollution	Estimation des pertes en 1973
EFFLUENTS TERRESTRES	
Raffineries	200 000
Huiles résiduaires écoulements, égouts	2 500 000
OPÉRATIONS MARITIMES	
Pétroliers utilisant le « load on Top »	310 000
Pétroliers n'utilisant pas le « load on Top »	770 000
Appontements pétroliers carénages	75 000
Collisions accidents en mer	300 000
Exploitations offshore	80 000
Suintements naturels	600 000
Retombées atmosphériques	600 000
TOTAL	6 110 000

Les routes maritimes empruntées par les pétroliers sont très concentrées dans les zones littorales (fig. 1). Les plus importantes se situent en bordure des côtes africaines, Nord-européennes et Sud-eurasiatiques.

L'activité, liée à la transformation et à l'utilisation des produits pétroliers, est la première source de pollution marine avec une perte dans le milieu marin de près de 3 millions de tonnes en 1973. En second lieu viennent les pertes au cours des manipulations habituelles du pétrole en mer : déballastages, opérations de pompage dans les ports, sans tenir compte des accidents. L'ensemble représente 1 830 000 tonnes en 1973.

En 1971, plus de 50 000 navires intervenaient dans les trans-



FIGURE 1 — Les grandes routes pétrolières (1974). Les chiffres sont à considérer en nombre de barils transportés par jour (d'après CLARK et MACLEOD, 1977 et l'Encyclopédie internationale du pétrole).

ports pétroliers et transportaient 1 335 millions de tonnes de brut. Par ailleurs, 250 millions de tonnes de produits raffinés circulaient aussi par voie maritime.

3. COMPORTEMENT ET DEVENIR DU PETROLE EN MER

Le pétrole commence à se modifier, à se dégrader dès son introduction dans le milieu marin. Les rythmes de dégradation seront eux-mêmes diversement influencés par la nature des composants qui sont produits au cours des processus d'altération du pétrole. Il y a une sorte d'effet en retour qui se traduit par un auto-freinage ou une auto-accélération des différents phénomènes physico-chimiques.

Les phénomènes intervenant dans cette altération sont de nature diverses (fig. 2) :

- *Physique* : étalement - évaporation - dissolution - émulsification - sédimentation ;
- *Chimique* : oxydation - polymérisation ;
- *Biologique* : bio-oxydation.

LES PROCESSUS PHYSIQUES

a) ÉTALEMENT - DÉPLACEMENT

Une fois déversé, le pétrole a immédiatement tendance à s'étaler, théoriquement jusqu'à former un simple film à la surface de l'eau. Ce processus, d'abord provoqué par la gravité, dépend aussi des caractéristiques physico-chimiques du pétrole concerné



Anse de Penfoul (Landunvez, Finistère) en avril 1978.

(Photo Claude Roudot, Lanildut)

(densité, viscosité, tension superficielle, etc..) et des qualités physiques de la mer au moment et à l'endroit du déversement.

Avec le temps, l'altération, modifie les caractéristiques physico-chimiques du pétrole, provoquant une augmentation de la résistance à l'étalement. Il y a auto-freinage du processus. En théorie, dans des conditions d'eau calme, une nappe va former un cercle régulier dont le diamètre peut augmenter huit fois dans la première heure et ensuite cinq fois entre une heure et une semaine, après quoi l'altération est telle que le comportement est totalement différent.

Mais le vent et les vagues contribuent à l'étirement, au déplacement et à la fragmentation de la nappe, sa vitesse de déplacement étant en général évaluée entre 1 et 3 % de celle du vent. Les courants marins interviennent de façon quasi négligeable dans la mobilité des nappes.

b) EVAPORATION

L'évaporation des produits volatils contenus dans le pétrole est immédiate et provoque une importante modification des propriétés physiques du reste de la nappe. Ce phénomène peut provoquer l'élimination de 30 à 50 % des hydrocarbures d'un



Le cimetière de Saint-Michel-en-Grèves (Côtes-du-Nord), fin mars 1978. C'est le vent qui a transporté le pétrole dont sont souillées les tombes.

(Photo Guy Daniel, Plestin)

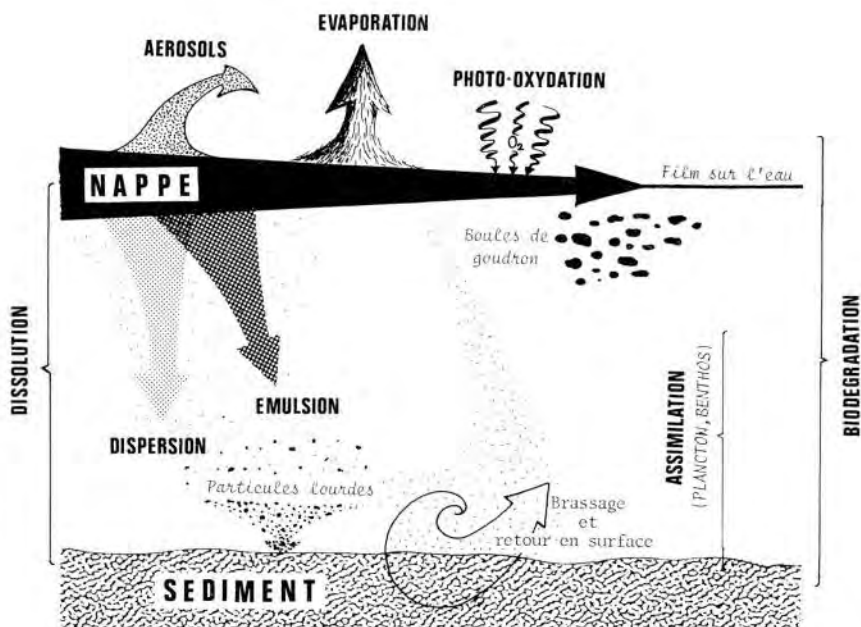


FIGURE 2 — Devenir du pétrole en mer. Diagramme représentant les différents processus intervenant dans l'évolution des nappes (d'après CLARK et MACLEOD, 1977).

brut typique et le taux de perte par évaporation décroît de façon exponentielle avec le temps.

Ainsi, la quasi totalité des hydrocarbures à moins de 15 carbones par molécule s'évapore dans les 10 jours, mais les plus légers disparaissent de la surface en quelques heures seulement. Les hydrocarbures qui comptent de 15 à 25 carbones s'évaporent en proportion moindre, la plupart restant dans la nappe. Ceux comptant plus de 25 carbones restent.

L'évaporation est favorisée par l'action du vent et des vagues, mais ralentie par l'épaisseur de la nappe.

Mais le vent et les vagues provoquent également la formation d'aérosols : les vagues provoquent des bouillonnements, des bulles dont l'éclatement projette des particules de pétrole dans l'atmosphère. Selon les conditions atmosphériques, ces particules peuvent être redéposées à quelques mètres seulement ou voyager plusieurs centaines de kilomètres.

c) DISSOLUTION

La solubilité de la plupart des composants du pétrole est faible, mais les volumes d'eau concernés sont tels qu'une quantité non négligeable peut passer en solution. Les éléments les plus solubles se rencontrent parmi les produits les plus légers, et pour un nombre déterminé d'atomes de carbone, la solubilité augmente avec la non-saturation des chaînes et la présence de noyaux cycliques.

Nbre de Carbones	Paraffines	Solubilité (ppm.) *	Cyclo Paraffines	Solubilité (ppm.) *	Hydrocarbures Aromatiques	Solubilité (ppm.) *
1	méthane	24	—	—	—	—
2	éthane	60	—	—	—	—
3	propane	62	—	—	—	—
4	n-butane	61	—	—	—	—
5	n-pentane	39	Cyclo-pentane	156	—	—
6	n-hexane	9.5	Cyclo hexane	55	benzène	1780
	2-méthyl pentane	13.8	—	—	—	—
7	n-héptane	2.9	—	—	toluène	515
8	n-octane	0.7	Cyclo octane	7.9	xylène	175
18	—	—	—	—	chrysène	0.002

* ppm. = parties par million.

En outre, au fur et à mesure de la dégradation du pétrole, de nombreux dérivés oxydés sont produits qui sont plus solubles que les hydrocarbures dont ils sont nés.

d) EMULSIFICATION

Ce facteur est très important dans les processus de disparition du pétrole de la surface de la mer. On en distingue deux types à savoir l'émulsion du pétrole-dans-l'eau que nous désignerons sous le nom de *dispersion*, et l'émulsion inverse d'eau-dans-le-pétrole fréquemment nommée « mousse au chocolat », à laquelle nous réserverons l'appellation *émulsion* proprement dite. L'eau et le pétrole n'étant pas miscibles, l'agitation de la mer (vent, vagues, courants) provoque la fragmentation des nappes en une infinité de gouttelettes de pétrole qui pénètrent dans la masse d'eau (dispersion) ou la pénétration de fines gouttelettes d'eau dans le pétrole (émulsion).

La dispersion peut être favorisée par des composés tensio-actifs naturellement produits par certains micro-organismes. Dans certaines circonstances, la fragmentation est telle que le diamètre des gouttelettes est aussi faible que 0,5 microns. Dans ce cas, un millilitre de pétrole peut former 16×12^{12} gouttelettes dont la surface totale est de 13 m² ! Il va de soi qu'une telle augmentation de la surface facilite dans d'énormes proportions la dégradation chimique et biologique des hydrocarbures. Dans nos régions, l'agitation est si constante que les gouttelettes en suspension ne regagnent jamais la surface (ce qui se produirait normalement en eaux calmes). Elles restent dans la masse d'eau jusqu'à leur dégradation



Plougasnou, mars 1978. Un exemple d'émulsion.

(Photo Michel Follorou, Plestin)

totale ou jusqu'à ce qu'elles tombent au fond (cf. paragraphe suivant).

On connaît mal les processus qui provoquent l'émulsion. Certaines « mousses au chocolat » peuvent contenir jusqu'à 80 % d'eau. Il s'agit là de mélanges en général très stables et peu accessibles aux divers processus de biodégradation.

e) SÉDIMENTATION

C'est le passage du pétrole de la masse d'eau ou de la surface vers les sédiments du fond. Ce phénomène est provoqué essentiellement par deux processus :

- l'adsorption des gouttelettes de pétrole dispersées par des particules de matières en suspension dans l'eau : limons, argiles, calcite, aragonite, particules siliceuses, etc... C'est le phénomène le plus important ;
- l'enfoncement du pétrole de surface devenu plus dense du fait de l'altération progressive (disparition des fractions les plus légères par dissolution et évaporation).

LES PROCESSUS CHIMIQUES

Ce sont des processus complexes et mal connus : des réactions d'oxydation, catalysées par la lumière, les métaux et des polymérisations.

Les plus importantes réactions sont sans doute les oxydations

photo-catalysées ; elles produisent des aldéhydes, des cétones, des acides carboxyliques de poids moléculaire plus bas et de solubilité plus élevée que les hydrocarbures dont ils dérivent. Des métaux comme le vanadium peuvent favoriser ces réactions d'oxydation, mais le soufre les contrarie.

Les polymérisations sont susceptibles de contracter les nappes et contribuent à la formation des boules de goudron.

LES PROCESSUS BIOLOGIQUES

BIODÉGRADATION

De nombreux microorganismes marins, bactéries, levures, champignons, peuvent attaquer les hydrocarbures, qu'ils soient gazeux, liquides ou solides, et les transformer en produits de plus en plus simples, de plus en plus solubles et réactifs, parmi lesquels des acides, des alcools, etc... L'aboutissement de cette simplification est toujours, en théorie, la formation de gaz carbonique et d'eau, par oxydation aérobie.

En réalité, certains dérivés intermédiaires peuvent être métabolisés, incorporés dans la « chimie » des êtres vivants, la formation des corps gras par exemple.

Cette dégradation biologique met en œuvre des enzymes aux fonctions spécifiques (oxygénases, oxydases...). Elle peut se produire à l'intérieur comme à l'extérieur des organismes ; dans ce dernier cas, les enzymes sont libérées dans le milieu naturellement ou après destruction des cellules.

Le pétrole peut aussi être dégradé par réaction anaérobie. Mais ce processus intervient pour une très faible part dans la bio-dégradation des hydrocarbures. En outre, la dégradation qu'il produit est presque toujours incomplète.

On trouve des microorganismes capables d'oxyder le pétrole dans toutes les parties du monde. Ils sont seulement plus abondants dans les zones les plus régulièrement affectées notamment dans les secteurs où se produisent des fuites naturelles. Ces microorganismes sont répartis dans toute la masse d'eau et dans les sédiments, mais dans ces derniers ils sont plus variés.

Dans la masse d'eau, on en distingue deux types : les microorganismes de surface ont une croissance optimale à des températures supérieures à 20° C, leur température minimale de croissance étant de l'ordre de 10° C. Ils sont très importants pour la dégradation du pétrole en surface, sa solubilisation et son émulsification. Les microorganismes de la colonne d'eau sont susceptibles de se développer au-dessus de 0° C, avec une bonne croissance pour certains entre 0° et 5° C et une meilleure croissance pour beaucoup entre 15 et 20° C. Au-delà d'une certaine profondeur, les conditions sont incompatibles avec la vie de tels microorganismes : seuls les processus de dégradation extra-cellulaires peuvent alors attaquer les hydrocarbures.

Les composés les plus facilement dégradés sont les chaînes longues non saturées. Mais certains organismes sont capables d'oxyder des composés aussi complexes que les polyaromatiques cancérigènes.

CONCLUSIONS

Dans les chapitres précédents nous avons vu que le pétrole déversé en mer était immédiatement attaqué, transformé, altéré, dégradé... par de nombreux agents. De là à penser ou même affirmer que les choses ne sont en définitive pas si graves puisque, théoriquement le pétrole, en tant que tel, est amené à disparaître plus ou moins rapidement, il n'y a qu'un pas (que certains n'hésitent d'ailleurs pas à franchir).

Mais, c'est cependant sans compter avec la toxicité plus ou moins apparente des dérivés qui apparaissent et avec la place qu'ils peuvent occuper parfois pendant très longtemps dans certaines biocénoses marines. Car en fait, les phénomènes intervenant dans la dégradation du pétrole ne sont pas tous bénéfiques pour le milieu. Essayons d'en analyser les conséquences.

L'étalement provoque la dissémination du pétrole en surface qui peut, par conséquent, atteindre des zones côtières d'autant plus étendues qu'il est important. L'atteinte à la faune de surface (avifaune, plancton) en est une conséquence directe. Il permet en contre-partie une augmentation de la surface de contact avec les agents de la dégradation.

L'évaporation n'a d'effets néfastes que sur les animaux à respiration aérienne. Elle permet l'élimination de produits très volatils dans les heures qui suivent l'écoulement, produits à vapeurs extrêmement toxiques pour l'homme et les animaux domestiques, tels le benzène et le toluène, etc... Le brut contenu dans l'*Amoco-Cadiz* présentait une teneur en hydrocarbures aromatiques relativement élevée entre 30 et 35 %.

La dissolution est entièrement nocive pour le milieu car elle ne s'accompagne d'aucune élimination significative. Bien qu'elle soit faible, elle est suffisante pour provoquer une toxicité directe pour les organismes marins. Dans le cas particulier de la catastrophe de l'*Amoco-Cadiz*, les masses d'eau concernées sont à la fois faibles et fermées, ainsi les organismes sédentaires les plus proches du littoral ont connu une mortalité massive les premiers jours et tant qu'il y a eu du pétrole à bord.

L'émulsification n'a pas le même effet selon qu'il s'agit d'émulsion ou de dispersion. Les émulsions ont le désavantage de rester en surface et d'être stables ; elles restent mobilisables pour polluer de nouvelles zones géographiques.

Les dispersions ont l'avantage de disparaître de la surface en grosses quantités et d'autant plus, dans le cas de l'*Amoco-Cadiz*, que le brut transporté était léger. Si elles augmentent aussi la surface d'attaque du pétrole par les microorganismes marins, elles atteignent en contre-partie les couches d'eau inférieures. Elles sont cependant bénéfiques à d'autres égards : en faisant disparaître le pétrole de la surface, elle éliminent d'autant les possibilités de contamination des animaux de surface (oiseaux, plancton) et de nouvelles zones côtières fragiles ou économiquement importantes.

Dans la présente marée noire, on peut se poser la question de l'utilité de la dispersion artificielle par les détergents ou dispersants, d'autant que les méthodes d'épandage utilisées étaient totalement inadéquates, notamment sans brassage simultané des nappes. On n'a donc fait qu'ajouter une nouvelle pollution sans

se poser la question de savoir si les produits utilisés ne rendaient pas inopérante la biodégradation sur les gouttelettes formées.

Dans la sédimentation, on doit distinguer deux aspects : sédimentation par piégeage ou par colmatage. Le piégeage se fait dans les sédiments sans grandes possibilités de biodégradation, par exemple certains fonds envasés d'estuaires, d'abers ou de baies. Par ailleurs, dans certains cas l'accumulation des hydrocarbures dans les sédiments rompt la cohésion entre les éléments constitutifs et favorise ainsi l'érosion massive de certains bancs de sable ou de certaines plages. Et puis le colmatage des fonds est une atteinte directe au milieu benthique et à la faune qui lui est associée : poissons de fond (poissons plats), poissons qui se nourrissent au fond (mulets, rougets), etc... De plus, il ne faut pas oublier l'engluement, parfois quasi général des plages, des estrans.

La photooxydation et la biodégradation contribuent pour une très grande part à la dégradation des hydrocarbures, mais pendant le déroulement de ce processus apparaissent des produits de nouvelle toxicité plus légers et aussi plus solubles.

La polymérisation est intéressante dans la mesure où elle contribue à la rétraction des nappes, mais elle induit aussi la formation de dérivés polyaromatiques lourds à pouvoir hautement cancérigène (benzopyrènes).

Tous ces niveaux de dégradation produisent certes des dérivés à pouvoir toxique direct, mais il faut aussi considérer au niveau des organismes de la chaîne alimentaire l'accumulation, la métabolisation, l'excrétion de nombreux nouveaux composés à différents états de dégradation dont la toxicité et les effets secondaires sont mal connus, voire inconnus. A ce chapitre figurent entre autres, les hydrocarbures cancérigènes pour les invertébrés marins, mais aussi pour l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

- AMOCO CADIZ — Premières observations sur la pollution par les hydrocarbures (1978). *Actes de colloques du CNEXO*, 6, 239 pp.
- CATASTROPHE DE L'AMOCO CADIZ (1978) — Résultats préliminaires des travaux entrepris par l'Institut d'Etudes Marines. *Université de Bretagne Occidentale, Brest*, 64 pp.
- CLARK R. C., Jr. ; MACLEOD W. D., Jr. (1977) — Inputs, transport, mechanisms and observed concentrations of petroleum in the marine environment. In " Effects of Petroleum on Arctic and subarctic Marine Environments and organisations ". *Ed. D. C. Malins*, vol. I, pp. 91-223.
- KARRICK N. L. (1977) — Alterations in petroleum resulting from physico-chemical and microbiological factors. In : " Effects of petroleum on Arctic and subarctic Marine environments and organisms ". *Ed. D. C. Malins*, vol. I, pp. 225-299.
- THE AMOCO CADIZ OIL SPILL (1978) NOAA/EPA — Special Report. A preliminary scientific Report. *Ed. U.S. department of commerce and U.S. environmental Protection Agency*, 283 pp., 66 planches couleurs hors-texte.
- THE FATE OF OIL SPILL AT SEA (1973) — Report by a Ministry of Defence working Party. *Defence Research Information Center. Orpington, Kent*.