

Interface air-mer
Couche ultrasuperficielle
Matériel particulaire
Variabilité spatiale
Slicks

Sea-air interface
Surface microlayer
Particulate matter
Spatial variability
Slicks

Hétérogénéité spatiale à petite échelle des structures d'accumulation du matériel particulaire à l'interface air-mer

J.-C. ROMANO, P. LABORDE

Centre d'Océanologie de Marseille, URA CNRS n° 41, Station Marine d'Endoume,
rue de la Batterie des Lions, 13007 Marseille, France.

Reçu le 23/4/86, révisé le 11/9/86, accepté le 15/9/86.

RÉSUMÉ

Par vent faible, la surface de la mer présente rarement un aspect uniforme, et on peut distinguer des zones dans lesquelles la surface a un aspect plus lisse que dans d'autres. C'est dans les zones les plus lisses, appelées « slicks », que l'on peut observer les accumulations les plus intenses de substances dissoutes ou particulières au niveau de la couche ultrasuperficielle (épaisseur $\sim 100 \mu\text{m}$). Ces phénomènes d'accumulation ont été étudiés, dans cet article, en comparant le matériel particulaire prélevé dans la couche ultrasuperficielle (au moyen d'un rouleau « de Harvey ») et celui de l'eau sous-jacente prélevée par pompage à 50 cm sous la surface. Les prélèvements ont été réalisés en zone néritique côtière (Golfe de Marseille), mais également plus au large, à 10 milles environ de la côte, où nous avons pu noter de forts taux d'accumulation dans la couche ultrasuperficielle. L'intensité de cette accumulation varie, bien sûr, en fonction de la vitesse du vent et de l'agitation de la mer, mais nos résultats montrent clairement que, dans un même contexte, les phénomènes d'accumulation peuvent être différents, non seulement à l'intérieur d'un « slick » individualisé, mais aussi d'un « slick » à un autre distant de quelques centaines de mètres seulement et présentant « à l'œil » un aspect tout à fait semblable. Pour un slick donné, l'hétérogénéité n'est pas aléatoire et les plus forts taux d'accumulation sont notés au centre de la structure. Le sens des différences observées d'un slick à l'autre est par contre plus difficile à interpréter, mais souligne en contre-partie les limites d'une extrapolation des mesures ponctuelles à toute la surface occupée par les slicks, en l'absence d'une approche plus dynamique de ces phénomènes.

Oceanol. Acta, 1987, 10, 1, 63-71.

ABSTRACT

Small-scale spatial heterogeneity in accumulation structures of particulate material at sea-air interface

Under slow wind speed conditions, the sea-surface appearance is rarely uniform, and slick structures can be distinguished from rippled areas. In a slick, an accumulation of dissolved or particulate material can be observed in the ultrasuperficial microlayer ($\sim 100 \mu\text{m}$). In this paper, accumulation processes are described by a comparison of particulate matter sampled in the surface microlayer (using a "Harvey's rotating drum device") with underlying water samplet pumped at 0.5 m depth. Studies were conducted, both in neritic Gulf of Marseilles, and oceanic areas where great accumulations, were noted. Our results clearly indicate that under fixed meteorological conditions, accumulation processes will be different in the inside of a given slick, and in two slicks a few hundred meters apart. This occurs in spite of the fact, that, by eye, their appearances are similar. Inside of a given slick, heterogeneity of particular matter distribution is not random and greatest accumulation factors occur at the middle point of the slick. Differences between two separated slicks are more difficult to explain but they obviously suggest that important errors can be made in extrapolating an isolated result to the whole area identified as slicks.

Oceanol. Acta, 1987, 10, 1, 63-71.

INTRODUCTION

L'interface air-mer est un lieu d'accumulation de substances particulières et dissoutes, soit produites dans le système océanique, soit qui lui sont exogènes. Cette accumulation, qui constitue le film de surface, se produit dans des structures particulières, appelées « slicks », n'apparaissant que lorsqu'un certain nombre de conditions météorologiques sont réunies. La durée de vie de ces structures est donc limitée et, sauf cas exceptionnel, le film ne se constitue pas de façon homogène sur toute la surface de la mer dans une zone considérée. Les « slicks » sont un bon exemple de cette hétérogénéité de la surface de la mer.

On reconnaît en général l'existence de deux types de slicks : d'une part ceux consécutifs à la présence de substances tensioactives anthropogéniques (hydrocarbures par exemple), dits « artificiels »; d'autre part ceux dits « naturels », formés soit par les cellules de convection de Langmuir, soit par l'action de vents de vitesse supérieure à $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Dietz, Lafond, 1950; Ewing, 1950). La première catégorie est fréquente dans les zones côtières fortement urbanisées, sans qu'il soit toujours possible de bien faire la différence avec la seconde catégorie.

Par rapport aux eaux de surface d'une mer calme, les slicks sont un lieu de concentration intense, non seulement de particules organiques inertes, mais aussi d'organismes planctoniques (Zaitsev, 1971; Champalbert, 1975; Wandschneider, 1979; Carlson, 1982 a; De Souza-Lima, Chrétiennot-Dinet, 1984).

Cette concentration d'organismes microneustoniques peut atteindre plus de 1000 fois les densités mesurées à quelques dizaines de centimètres seulement sous ce film de surface (Hardy, Apts, 1984; Estep, Remsen, 1984). L'incidence de ces accumulations dans l'économie des océans ne peut donc être négligée, notamment en ce qui concerne les transferts gazeux de part et d'autre de l'interface. Mais les tentatives d'intégrations de ce milieu particulier dans l'écologie marine se heurtent à leur aspect fugace et à leur hétérogénéité. Peu de travaux, hormis celui de Carlson (1983), concernent la variabilité à petite échelle de la composition de ces slicks. Or, on est en présence d'un phénomène dynamique pouvant amener une hétérogénéité de la structure du film de surface, avec de possibles conséquences, tant sur la richesse en microneuston que sur sa physiologie. Ces slicks se présentent en effet le plus souvent en réseau plus ou moins dense, et tendent à s'anastomoser ou au contraire à s'individualiser. Pour préciser le degré d'hétérogénéité de ces structures, nous avons voulu comparer, par des prélèvements séquentiels répétitifs, la composition de deux slicks, l'un en eau côtière, l'autre au large; puis nous avons étudié, le même jour et dans une zone côtière restreinte, la composition de deux slicks individualisés et deux surfaces calmes sans slicks.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Position des stations

Tous les échantillons, à l'exception du slick du large ont été prélevés en baie de Marseille (fig. 1). La station du large a été réalisée pendant la mission Eurhogli sur le N/O Noroit, dans le golfe du Lion (bassin nord-occidental de la Méditerranée) à environ 10 milles de la côte ($\varphi = 43^{\circ}10'N$; $G = 3^{\circ}52'E$).

Prélèvements

La microcouche de surface a été prélevée au rouleau de Harvey (1966), poussé par un Boston-Whaler mû par un moteur électrique (« Minn-Kota ») à vitesse régulée. Les eaux sous-jacentes de référence ont été recueillies au moyen d'une pompe péristaltique. Tous les échantillons d'eau sont préfiltrés sur filet nylon de $200 \mu\text{m}$ de vide de maille pour en éliminer la fraction particulaire grossière.

Pour l'étude réalisée le 7 mars 1983 en baie de Marseille, nous avons attendu qu'un slick nettement différencié se forme, avec une longueur estimée à environ 1 km pour une largeur d'une centaine de mètres. Le prélèvement des huit échantillons de microcouche et des huit d'eaux sous-jacentes a commencé à une de ses extrémités et s'est poursuivi le long de son grand axe. Sans que l'avance de l'embarcation et du rouleau soit jamais stoppée, les deux premiers litres de microcouche recueillis ont constitué le premier échantillon, puis les deux suivants, le deuxième, et ainsi de suite jusqu'à obtenir huit échantillons successifs de 2 l. Le positionnement dans la partie médiane du slick a été

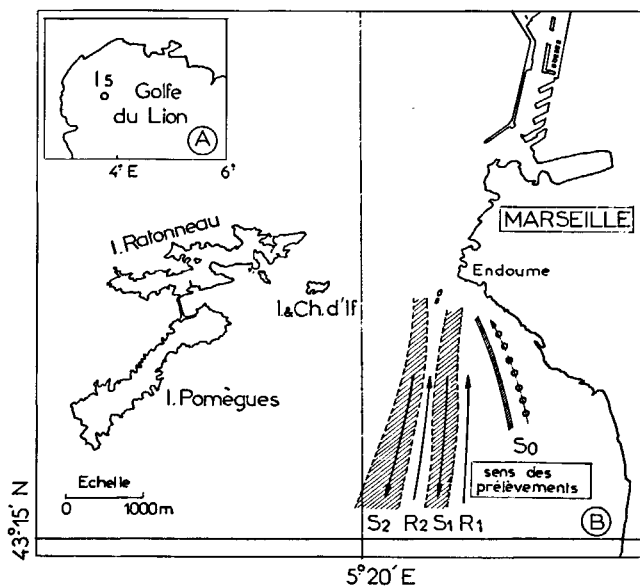


Figure 1

Localisation des prélèvements. A) Position du « slick du large » : station 15 de la mission Eurhogli. B) Prélèvements en baie de Marseille; S_0 : « slick côtier » étudié en 8 sous-échantillons; S_1 , S_2 , R_1 et R_2 : « slicks » et « zones ridées » échantillonnés le 10-06-83.

Sampling location. A) Slick in oceanic area: 15 station of "Eurhogli" cruise. B) Gulf of Marseilles; S_0 : Slick studied in 8 subsamples; S_1 , S_2 , R_1 and R_2 : Slicks and ripple zones sampled on 10-06-83.

Tableau 1

Valeurs du facteur de concentration (FC) pour l'ensemble de paramètres pendant l'étude du film superficiel en zone côtière. ATP = adenosine triphosphate; ADP = adenosine diphosphate; AMP = adenosine monophosphate; Chl. *a* = chlorophylle *a*; Pheo. = pheophytine *a*; Gluc. = glucides; PATot. = nombre total de particules.

Values of enrichment ratios (FC) for ATP (adenosine triphosphate), ADP (adenosine diphosphate), AMP (adenosine monophosphate), Chl. *a* (chlorophyll *a*), Pheo. (phaeopigments), Gluc. (carbohydrate) and PATot. (total number of particles) found during the study carried out on slicks in coastal waters.

| Paramètres | Numéro du prélèvement | | | | | | | |
|---------------|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ATP | 1,29 | 1,64 | 2,60 | 3,34 | 2,75 | 2,80 | 2,00 | 0,81 |
| ADP | 1,06 | 2,34 | 4,41 | 6,27 | 5,12 | 4,62 | 2,85 | 1,57 |
| AMP | 0,50 | 0,50 | 3,58 | 7,08 | 6,42 | 3,50 | 1,11 | 0,42 |
| ATP+ADP+AMP | 1,00 | 1,73 | 3,47 | 4,83 | 3,97 | 3,51 | 2,00 | 0,90 |
| Chl. <i>a</i> | 1,70 | 1,76 | 9,03 | 7,56 | 2,22 | 4,43 | 5,02 | 4,21 |
| Pheo. | 5,91 | 3,51 | 8,68 | 14,30 | 13,56 | 6,47 | 4,35 | 8,23 |
| Gluc. | 6,39 | 4,65 | 10,16 | 8,65 | 7,08 | 11,66 | 5,73 | 15,46 |
| PATot | 3,28 | 2,38 | 4,52 | 5,26 | 7,20 | 6,11 | 6,61 | 4,86 |

maintenu visuellement par les opérateurs, guidés par radio par un observateur situé en hauteur par rapport au point de prélèvement.

L'ensemble du prélèvement a duré environ une heure, et les échantillons ont été traités immédiatement au laboratoire. Après une préfiltration sur filet nylon de maille 200 µm, chaque échantillon a ensuite été séparé en deux aliquotes de 1 l chacun, et traité de façon identique pour chaque analyse, afin de discriminer les différences propres aux prélèvements et celles inhérentes aux méthodes d'analyse. On obtient ainsi pour chaque paramètre, 32 mesures (8 × 2 pour chacune des couches : film de surface et eaux sous-jacentes). Pour éviter tout « effet de volume » (Sutcliffe *et al.*, 1976; Romano, 1982) sur les mesures réalisées, pour chacune des deux séries (microcouche et 0,5 m), les volumes de filtration ont été identiques pour chaque variable suivie.

La même expérience a été reproduite lors de la mission Eurhogli à partir du N/O Noroit, dans le bassin nord-occidental de la Méditerranée, à 10 milles au large des côtes. Six prélèvements de microcouche de surface et d'eaux sous-jacentes ont été recueillis dans un même slick, et deux autres dans une surface d'eau ridée adjacente. Sur ces échantillons, préfiltrés à 200 µm et immédiatement traités à bord du Noroit, on a pu analyser le carbone et l'azote particulaire, ainsi que les chlorophylles et les phéopigments.

Enfin, le 10 juin 1983, dans le golfe de Marseille, nous avons échantillonné deux slicks (S1 et S2) et deux surfaces d'eau légèrement ridées (R1 et R2) au moyen du rouleau de Harvey. Dans ces structures juxtaposées (fig. 1), les eaux sous-jacentes de référence ont été prélevées à 0,5 m. Chaque prélèvement a été récolté en double. Seize échantillons ont ainsi été récoltés, avec des volumes unitaires de 2 l pour les deux couches.

Analyses

Les filtrations ont été conduites, le plus rapidement possible, après le prélèvement (délai maximum deux heures) pour éviter les conséquences du confinement et du stockage des eaux de microcouche sur la qualité biologique des échantillons (Laborde *et al.*, sous presse). Les protocoles d'analyse suivants ont été suivis :

- nucléotides adényliques (ATP, ADP, AMP) : filtres Sartorius (réf. SM 11106) de 0,45 µm de porosité; extraction selon Holm-Hansen et Booth (1966); dosage par bioluminescence selon la méthode de Pradet (1967);
- pigments (chlorophylle et phéopigments) : filtration sur Whatman GF/C méthode de Yentsch et Menzel (1963) modifiée par Holm-Hansen *et al.* (1965); fluorimètre Turner (mod. 111);
- carbone et azote particulaires : filtres Whatman GF/C; analyseur Perkin-Elmer (mod. 240);
- spectre de particules : analyseur Counter-Coulter (mod. TA II) avec sonde de 200 µm; chaque valeur représente la moyenne de trois mesures sur chacun des seize canaux; dilution éventuelle avec de l'eau de mer filtrée (deux fois successivement) sur membrane;
- sucres particulaires : filtration sur Whatman GF/C préalablement calcinés 5 h à 550°C et analyse selon la méthode colorimétrique de Dubois *et al.* (1956).

RÉSULTATS

Variabilité de la composition de la microcouche de surface à l'intérieur de slicks

Slick côtier

Les résultats sont présentés dans le tableau 1. Les valeurs du film de surface se différencient bien de celles des eaux sous-jacentes, se traduisant pour l'ensemble des paramètres ou des prélèvements pris deux à deux, par des facteurs de concentration (FC) supérieurs, voire très supérieurs, à 1. Les résultats sont d'autre part acquis avec une bonne reproductibilité analytique pour chaque prélèvement. Mais ces différences ne sont homogènes, ni selon le numéro d'ordre du prélèvement, ni selon les paramètres considérés. Nous présentons dans la figure 2 l'évolution de certains d'entre eux. Dans le film de surface, les concentrations les plus élevées sont rencontrées au milieu du trajet (prélèvements 3 à 6), mais c'est en général l'inverse pour les eaux sous-jacentes. Ceci amène une accumulation faible, voire nulle aux extrémités du slick, et élevée au centre.

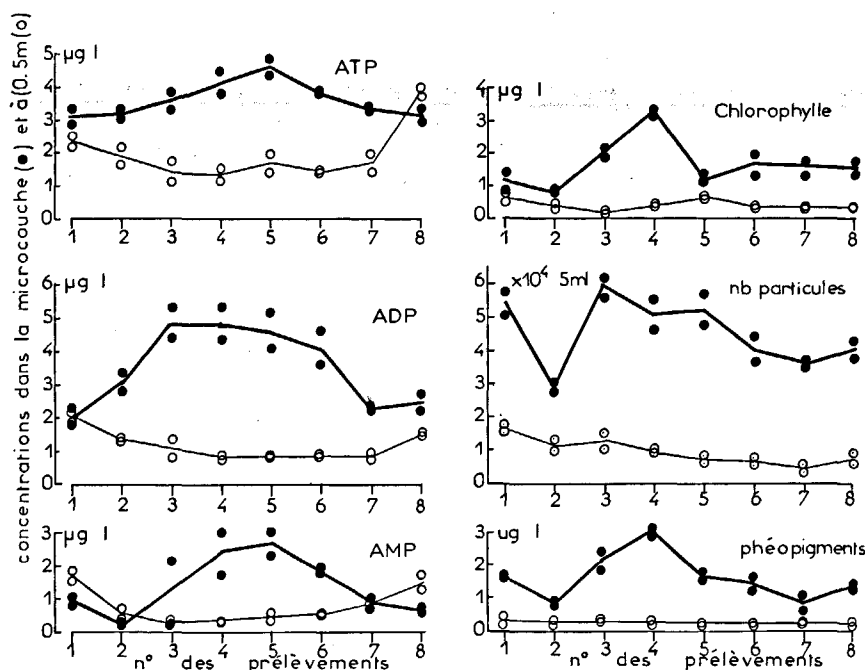


Figure 2
Évolution des paramètres étudiés dans la microcouche et les eaux sous-jacentes (0,50 m) pendant l'étude le long de l'axe longitudinal d'un slick côtier sur des prélèvements séquentiels et répétitifs.
Small scale temporal and spatial variations in replicate microlayer and underlying water samples collected while drifting in a coastal marine area.

Nous avons voulu savoir si les différences observées étaient purement aléatoires et directement attribuables à la variabilité propre aux techniques d'analyse, ou bien si ces différences traduisaient, au contraire, une hétérogénéité au niveau des différents prélèvements. Pour ce faire, nous avons, dans un premier temps, effectué une analyse de la variance, sous l'hypothèse nulle (H₀) que la position du prélèvement le long de l'axe du slick (numéro de prélèvement) était sans effet sur la valeur moyenne des variables mesurées. Les résultats de cette analyse montrent (tab. 2A) que l'hypothèse

nulle peut être rejetée avec un risque < 5% dans presque tous les cas, et ce aussi bien dans la microcouche que dans l'eau de référence prélevée à 50 cm sous la surface. On peut donc conclure de façon significative qu'il n'y a pas une distribution homogène des différentes variables du matériel particulaire le long de l'axe du slick (deux exceptions cependant : la distribution des sucres dans la microcouche et celle des phéophytines dans la couche de référence). Par ailleurs, nous avons vu (fig. 2) que les valeurs les plus élevées d'une variable donnée se rencontrent plutôt

Tableau 2

Analyse de la variance pour les différentes variables dans huit prélèvements de la microcouche de surface et dans huit de la couche de référence (50 cm). La source de variation est la position du prélèvement par rapport à l'axe du slick (n° d'ordre). Toutes les analyses ont été doublées.

A) Analyse globale : seules les valeurs de F sont indiquées, avec mention de la probabilité du risque α correspondant (Pα). N.S. : Pα > 0,05; (*): Pα < 0,05; (**): Pα < 0,01; (***) : Pα < 0,005.

Les degrés de liberté sont au nombre de 7 (8-1) pour la variance factorielle, et de 8 (16-8) pour la variance résiduelle, ce qui nous donne les valeurs seuils suivantes pour F : 3,50 pour Pα = 0,05; 6,18 pour Pα = 0,01 et 7,69 pour Pα = 0,005. N.S. signifie que H₀ ne peut être rejetée avec un risque α < 0,05.

B) Analyse avec regroupements des prélèvements en 2 catégories : périphérie du slick (n°s 1, 2, 7 et 8) et centre du slick (n°s 3, 4, 5 et 6). Les symboles figurant la probabilité de risques α sont les mêmes que dans A, mais les degrés de liberté étant différents (1 pour la variance factorielle et 8 pour la variance résiduelle), les valeurs seuils pour F sont les suivantes : 5,32 pour Pα = 0,05; 11,26 pour Pα = 0,01 et 14,69 pour Pα = 0,005.

Analysis of variance for each variable in eight samples of the ultrasuperficial microlayer and in eight of underlying water (50 m). Source of variation is the sampling location along the major axis of the slick (serial number). All the analyses were duplicated.

A) Global analysis: only F values are indicated with corresponding probability of error (Pα) by the following symbols: N.S. if Pα > 0.05; (*) if Pα < 0.05; (**) if Pα < 0.01 and (***) if Pα < 0.005. Degrees of freedom are 8-1 = 7 in number for factorial variance and 16-8 = 8 for residual variance; under these conditions, critical values of F are: 3.50 if Pα = 0.05; 6.18 if Pα = 0.01 and 7.69 if Pα = 0.005.

B) Analysis with only two groups: samples from the periphery (n°s 1, 2, 7 and 8) and samples from the inner side of the slick (n°s 3, 4, 5 and 6). Symbols for Pα are such as in A but, because of differences in degrees of freedom (2-1 = 1 for factorial variance and 16-8 = 8 for residual variance), critical values of F are: 5.32 if Pα = 0.05; 11.26 of Pα = 0.01 and 14.69 if Pα = 0.005.

| Variable | (A) | | | | (B) | | | | Facteur de concentration | | |
|---------------------|-------------|------|--------|------|-------------|------|--------|------|--------------------------|-------|---------|
| | Microcouche | | 50 cm | | Microcouche | | 50 cm | | U | Pα | Symbole |
| | F | Pα | F | Pα | F | Pα | F | Pα | | | |
| ATP | 7,54 | ** | 14,77 | *** | 39,19 | *** | 44,70 | *** | 0 | 0,014 | * |
| ADP | 10,00 | *** | 107,58 | *** | 62,72 | *** | 59,62 | *** | 0 | 0,014 | * |
| AMP | 4,25 | * | 18,29 | *** | 20,90 | *** | 64,39 | *** | 0 | 0,014 | * |
| Σ (ATP + ADP + AMP) | 12,72 | *** | 71,18 | *** | 81,56 | *** | 254,75 | *** | 0 | 0,014 | * |
| Chlorophylles | 14,82 | *** | 9,59 | *** | 31,34 | *** | 4,04 | N.S. | 3 | 0,100 | N.S. |
| Phéophytines | 19,46 | *** | 0,98 | N.S. | 65,63 | *** | 2,29 | N.S. | 2 | 0,057 | N.S. |
| Sucres | 1,70 | N.S. | 41,26 | *** | 0,026 | N.S. | 10,46 | * | 7 | 0,430 | N.S. |
| Particules (Total) | 9,97 | *** | 8,20 | *** | 22,09 | *** | 2,29 | N.S. | 4 | 0,171 | N.S. |

au centre du slick dans la microcouche, et plutôt à ses extrémités dans la couche de référence (0,5 m). Pour tester statistiquement cette hétérogénéité, nous avons effectué une analyse de la variance sur les mêmes données que précédemment, mais en analysant les différents prélèvements en 2 groupes seulement : d'une part les prélèvements effectués aux extrémités du slick (n°s 1, 2, 7 et 8), et d'autre part ceux qui étaient situés au centre du même slick (n°s 3, 4, 5 et 6), en considérant comme hypothèse nulle, que la moyenne des différentes variables est la même dans les deux groupes de prélèvements.

Les résultats de cette analyse (tab. 2B) confirment, pour la microcouche, que l'hétérogénéité constatée au plan général recoupe une hétérogénéité périphérie-centre au sein du même slick. Pour la couche de référence (0,5 m) par contre, on constate que l'hétérogénéité périphérie-centre n'est significative que pour les nucléotides adényliques et, à un moindre degré, pour les sucres. Ces différences d'hétérogénéité entre la microcouche et la couche de référence nous ont conduits à étudier les conséquences au niveau de la distribution des facteurs de concentration. Nous avons, pour ce faire, utilisé le test non paramétrique de Mann et Whitney, car le facteur de concentration est issu du rapport entre deux valeurs (microcouche/référence). Le test a été réalisé en effectuant les mêmes regroupements que pour l'analyse de variance (comparaison périphérie-centre). Les résultats montrent (tab. 2B) que l'hétérogénéité n'est statistiquement significative qu'au niveau des nucléotides adényliques, c'est-à-dire pour des variables plus spécifiquement liées à la biomasse. Au total, au sein d'une

Slick du large

Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Les eaux sous-jacentes apparaissent comme très homogènes d'un échantillon à l'autre et nettement moins riches que celles du slick côtier (tab. 1 et fig. 2). Il n'en est pas de même pour le film de surface. Les facteurs de concentration y sont très élevés puisque, tous échantillons confondus, on y obtient pour les chlorophylles un FC moyen de 75, de 76 pour les phéopigments, de 63 pour le carbone et de 90 pour l'azote particulaire. Dans le slick, les accumulations sont encore plus intenses que dans les n°s 7 et 8, correspondant aux zones ridées. En effet, les deux derniers échantillons de microcouche sont nettement moins riches. Un test de Mann et Whitney sur ces deux groupes d'échantillons de microcouche fait apparaître des valeurs « U », significatives au seuil $P_{0,05}$ pour les chlorophylles, les phéopigments et le carbone (tab. 4); par contre, dans les eaux sous-jacentes, les échantillons n'apparaissent pas significativement différents.

Au niveau des prélèvements dans le slick (échantillons de 1 à 6), les distributions sont beaucoup moins homogènes (tab. 3), puisque l'on passe de 8 mg/l (n° 2) à plus de 27 mg/l (n° 5).

Entre les deux séries de huit échantillons correspondant aux deux couches d'eau considérées, des tests « U » mettent d'ailleurs en évidence (tab. 4b) des différences très hautement significatives au seuil $P_{0,001}$ pour les quatre variables examinées.

On remarquera enfin que les concentrations dans le film de surface ont tendance à être plus élevées au

Tableau 3

Teneurs en carbone et azote organiques particulaires (COP et NOP en $\mu\text{g.l}^{-1}$), en chlorophylle *a* et phéophytine *a* (Chl. *a* en $\mu\text{g.l}^{-1}$), nombre de cellules phytoplanctoniques (cell.ml^{-1}) pour la microcouche et les eaux sous-jacentes (0,50 m), valeurs du facteur de concentration (FC) pendant l'étude du film superficiel au large avec des prélèvements séquentiels répétitifs.

Concentrations of particulate organic carbon and nitrogen (POC and PON in $\mu\text{g.l}^{-1}$), chlorophyll *a* and phaeopigments (Chl. *a* and Pheo. in $\mu\text{g.l}^{-1}$) cell densities (cell.ml^{-1}) in the microlayer (UC) and underlying waters (0,50 m) and enrichment ratios (FC) during the study on slicks in the open sea.

| Prélèvement | COP | | | NOP | | | Chl. <i>a</i> | | | Pheo. | | | Cell.ml ⁻¹ | | |
|-------------|--------|------|-------|-------|------|-------|---------------|------|-------|-------|------|-------|-----------------------|------|-------|
| | UC | 0,50 | FC | UC | 0,50 | FC | UC | 0,50 | FC | UC | 0,50 | FC | UC | 0,50 | FC |
| Slick | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 13 413 | 265 | 50,6 | 1 775 | 22 | 80,7 | 3,42 | 0,02 | 171,0 | 0,40 | 0,01 | 40,0 | 132,00 | 4,56 | 28,9 |
| 2 | 8 097 | 303 | 26,7 | 872 | 29 | 30,1 | 2,40 | 0,09 | 26,7 | 1,42 | 0,01 | 142,0 | 718,00 | 5,48 | 131,0 |
| 3 | 23 302 | 282 | 82,6 | 2 570 | 48 | 53,5 | 5,05 | 0,02 | 252,5 | 1,50 | 0,01 | 150,0 | 971,00 | 7,24 | 134,1 |
| 4 | 25 116 | 230 | 109,2 | 3 427 | 10 | 342,7 | 6,12 | 0,05 | 122,4 | 1,47 | 0,01 | 147,0 | 727,00 | 6,50 | 111,8 |
| 5 | 27 505 | 229 | 120,1 | 4 498 | 17 | 264,6 | 3,26 | 0,03 | 108,7 | 1,87 | 0,01 | 187,0 | 682,00 | 8,06 | 84,6 |
| 6 | 17 452 | 229 | 76,2 | 1 690 | 7 | 241,4 | 8,52 | 0,02 | 426,0 | 0,86 | 0,01 | 86,0 | 615,30 | 4,10 | 150,7 |
| Ridée | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 5 979 | 207 | 28,9 | 885 | 29 | 30,5 | * | * | * | 0,10 | 0,03 | 3,3 | 140,80 | 2,02 | 69,7 |
| 8 | 2 339 | 199 | 11,8 | 312 | 15 | 20,8 | 1,17 | 0,09 | 13,0 | 0,01 | 0,01 | 1,0 | 0,60 | 3,76 | 0,1 |

structure d'accumulation bien individualisée comme le slick côtier étudié, on peut constater une hétérogénéité qui se traduit par de plus fortes concentrations de matériel particulaire dans la microcouche, au centre de la structure; simultanément, on peut noter le phénomène inverse dans la couche d'eau sous-jacente, mais ceci ne se produit pas aussi nettement suivant le paramètre utilisé pour estimer le matériel particulaire. La conséquence immédiate est que l'hétérogénéité périphérie-centre du facteur d'accumulation à l'intérieur de ce slick n'est significative que pour la fraction du matériel particulaire qui est liée à la biomasse.

milieu du prélèvement qu'au début et à la fin, comme dans l'exemple précédemment traité de slick côtier.

Comparaison de la composition de deux slicks et de deux surfaces ridées présentes simultanément

Les résultats, exprimés par le facteur de concentration (FC), rapport des eaux de la microcouche aux eaux sous-jacentes, sont présentés dans le tableau 5 pour les deux slicks (S1 et S2) et les deux surfaces d'eau ridée (R1 et R2).

Tableau 4a

Slick au large. Comparaison entre les échantillons prélevés en présence (n° 1 à 6) et en l'absence de slicks (n° 7 et 8) par le test non paramétrique de Mann-Whitney dans la microcouche de surface.

Slicks in the open sea. Comparison of microlayer samples collected in presence (1 to 6) and absence of slicks (7 and 8) by Mann-Whitney U Test.

| | Chl. a | Pheo | COP | NOP | C/N | % Pheo. |
|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| U | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 6 |
| P (n ₁ = 2 et n ₂ = 6) | 0,036 * | 0,036 * | 0,036 * | 0,071 ns | 0,214 ns | 0,571 ns |

Tableau 4b

Slick au large. Comparaison entre la microcouche de surface (n = 8) et les eaux sous-jacentes (n = 8) par le test « U » de Mann-Whitney. Comparison between the two layers (microlayer and underlying) by Mann-Whitney U Test of samples collected in slicks in a open sea area.

| | Chl. a | Pheo | COP | NOP | C/N | % Pheo |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|-------------|
| U | 0 | 4 | 0 | 0 | 14 | 26 |
| P (n ₁ et n ₂ = 8) | 0,000 *** | 0,001 *** | 0,000 *** | 0,000 *** | 0,032 * | 0,287 ns |

*** = P 0,001

* = P 0,05

ns = non significatif

Tableau 5

Valeurs du facteur de concentration (FC) pour les différents paramètres étudiés dans deux slicks (S1 et S2) et deux surfaces ridées (R1 et R2). Enrichment ratios (FC) for various parameters in samples collected in slicks (S1 and S2) and rippled waters (R1 and R2).

| | FC pour chaque variable étudiée | | | | | | | | |
|----|---------------------------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------|-------|
| | FC moyen | ATP | ADP | AMP | ATP + ADP + AMP | COP | NOP | Chl. a | Pheo. |
| S1 | 8,4 | 6,98 | 4,94 | 12,17 | 6,77 | 6,79 | 5,41 | 4,06 | 4,00 |
| S2 | 26,2 | 12,89 | 16,45 | 24,90 | 15,82 | 46,83 | 49,00 | 15,53 | 7,00 |
| R1 | 1,7 | 1,27 | 1,23 | 1,35 | 1,27 | 4,22 | 3,51 | 0,53 | 0,60 |
| R2 | 2,6 | 2,29 | 2,33 | 2,19 | 2,29 | 4,04 | 5,00 | 1,60 | 2,44 |

Dans tous les cas (slicks ou mer calme-ridée), les FC sont nettement supérieurs à 1, traduisant une plus grande richesse du film de surface, et ce pour tous les paramètres suivis; mais, comme il a déjà été constaté (De Souza-Lima, Romano, 1983), les FC sont plus élevés pour les variables descriptives de la matière organique particulaire dans son ensemble (seston, carbone ou azote par exemple) que pour les composés spécifiques de la fraction vivante (série des adénylates). Les pigments photosynthétiques sont les seuls à présenter, dans un cas (R1), une valeur FC < 1, mais dans ce cas, l'enrichissement de la microcouche de surface est faible pour tous les composés. Ce déficit spécifique en pigments comparativement aux autres paramètres descriptifs, suggère une « disparition » sélective du matériel végétal de la microcouche.

On remarque également des changements importants dans le spectre des particules, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif (fig. 3). Les particules les plus fines sont les plus nombreuses, mais la diminution du nombre en fonction de la taille est plus rapide dans l'eau sous-jacente que dans la microcouche, ce qui signifie que, dans la couche d'extrême surface, les particules de 10 à 30 µm sont relativement mieux représentées. Ce type de distribution, net au niveau des slicks, est plus discret dans les zones ridées.

Si l'on compare les deux slicks et les deux surfaces ridées, les valeurs obtenues pour la microcouche de S2 sont de deux à cinq fois plus élevées que dans S1, qui lui est pourtant très proche (tab. 6). Les concentrations

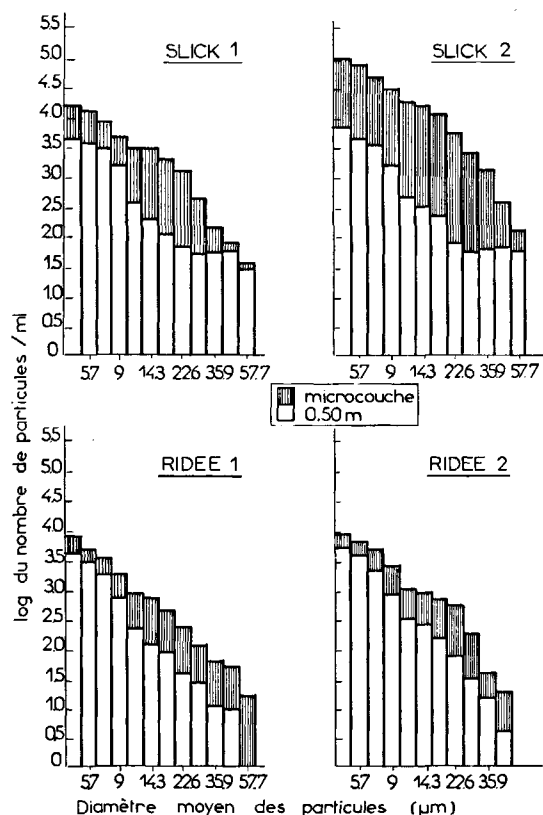


Figure 3

Spectre qualitatif et quantitatif des particules présentes dans la microcouche de surface (µ couche) et eaux sous-jacentes (0,5 m) pendant l'étude comparative de la composition de deux slicks (S1 et S2) et deux surfaces ridées (R1 et R2).

Particle-size distribution spectra for microlayer and underlying water samples during the comparative study of two slicks (S1 and S2) and two rippled surfaces (R1 and R2).

dans les eaux sous-jacentes y sont aussi plus élevées, mais les FC mesurés (tab. 5) sont néanmoins les plus forts pour l'ensemble des prélèvements. L'augmentation des concentrations entre S1 et S2 est vérifiée pour tous les paramètres, mais plus forte pour la matière organique globale que pour les index de biomasse.

Les deux surfaces ridées échantillonnées sont également différentes. Si les concentrations des eaux qui leur sont sous-jacentes sont très comparables (tab. 5), la microcouche de surface est nettement plus enrichie dans le second cas (R2). Pour R1, si l'accumulation de matériel organique particulaire est nette ($FC_{COP} = 4,2$; $FC_{NOP} = 3,5$; tab. 5), en ce qui concerne les facteurs estimatifs de la biomasse (série des adénylates), les FC sont très voisins de 1 et, en ce qui concerne les pigments, il y aurait même un léger déficit par rapport aux eaux sous-jacentes ($FC_{Chlo.} = 0,53$; $FC_{Phéo.} = 0,60$). L'étude des spectres de particules (fig. 3) conduit aux mêmes conclusions. L'allure des spectres S1 et S2 est voisine, mais le film de surface de S2 est plus riche en particules : de 5 à 6 fois plus pour tout le spectre. Pour la microcouche de surface des zones ridées R1 et R2, dans cette dernière, le nombre de particules est plus élevé.

Si l'on considère les facteurs de concentration en fonction de la taille, on peut voir (fig. 4) beaucoup plus nettement que sur la figure 3, que l'accumulation de matière porte préférentiellement sur les particules de taille comprise entre 10 et 30 μm , et ce, même dans les zones ridées, bien que le phénomène soit, ici, moins marqué.

Pour l'ensemble des échantillons d'eaux sous-jacentes recueillies sous les slicks ou sous les surfaces ridées (6 prélèvements) les différences sont peu sensibles, à l'exception d'un seul prélèvement, sous S1, où les concentrations sont nettement plus faibles. Si l'on admet en première analyse que les différences constatées entre les différents prélèvements des eaux sous-jacentes, sont l'image d'une variabilité spatiale à petite échelle des eaux côtières soumises à des influences très diverses, on peut conclure que les variations de plus grande ampleur constatées dans les microcouches de surface, d'un slick à l'autre, ou entre deux surfaces ridées, sont alors la conséquence de mécanismes pro-

pres à la constitution de ce film. On remarquera, en effet, que dans la plupart des cas, ces différences portent sur l'ensemble des variables suivies, avec des ordres de grandeur variables selon que l'on s'adresse à la matière organique dans son ensemble, ou à la fraction micro-

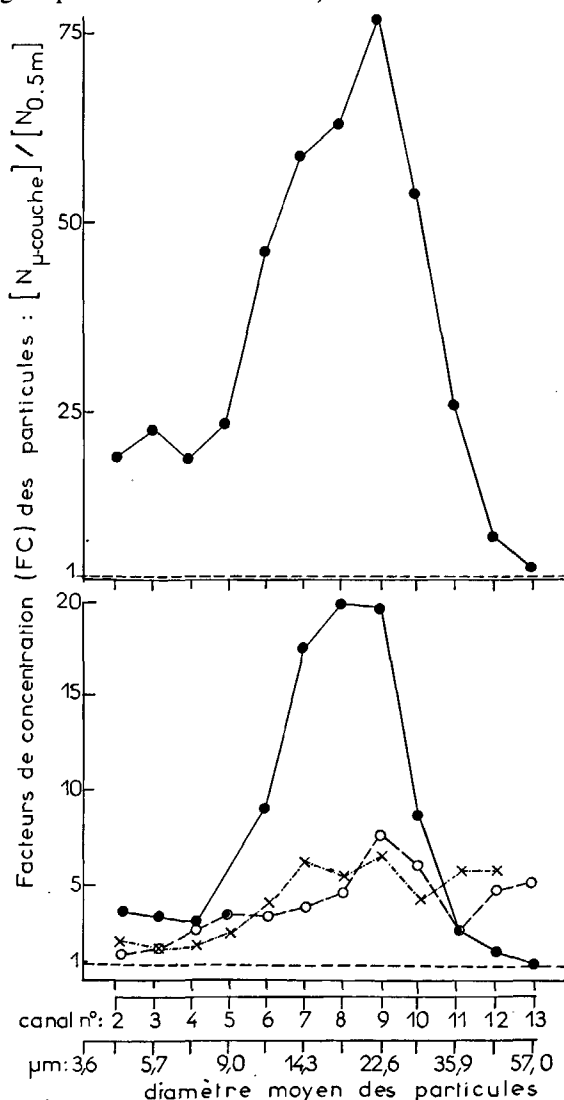


Figure 4

Valeurs du facteur de concentration ($FC = N_{\mu\text{couche}} / N_{0,5\text{m}}$) pendant l'étude comparative de la composition de deux slicks (S1 et S2) et deux surfaces ridées (R1 et R2).

Surface microlayer enrichment of particle numbers during the comparative study of two slicks (S1 and S2) and two rippled surfaces (R1 and R2).

Tableau 6

Valeurs du rapport entre les slicks S1 et S2 (S1/S2) et les surfaces ridées (R1/R2) pour l'ensemble des paramètres dans la microcouche de surface.

Microlayer ratio values for slicks (S1/S2) and for rippled waters (R1/R2).

| | ATP | ADP | AMP | ATP + ADP + AMP | COP | NOP | Chl. a | Pheo. | | | | | |
|-------|------------|-----|-----|-----------------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|-----|--|
| (x)S2 | 4,0 | 5,1 | 5,9 | 4,7 | 18,1 | 11,1 | 5,2 | 1,5 | | | | | |
| (x)S1 | | | | | | | | | | | | | |
| (x)R2 | 2,6 | 2,4 | 2,0 | 2,5 | 1,4 | 1,4 | 3,5 | 3,9 | | | | | |
| (x)R2 | | | | | | | | | | | | | |
| | Particules | | | | | | | | | | | | |
| Canal | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| (x)S2 | 6,9 | 6,9 | 6,1 | 6,8 | 6,4 | 5,6 | 6,2 | 4,6 | 6,2 | 9,9 | 4,9 | 4,7 | |
| (x)S1 | | | | | | | | | | | | | |
| (x)R2 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 2,3 | 1,6 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | |
| (x)R1 | | | | | | | | | | | | | |

neustonique. On assiste donc bien, dans une surface de dimension somme toute restreinte (de l'ordre du kilomètre carré) à la constitution d'une mosaïque de structures de surface, chacune de composition particulière.

Nous avons comparé dans le tableau 6 les richesses relatives des deux slicks S1 et S2 et des deux surfaces ridées R1 et R2, pour la composition de leur matière organique particulaire, et les spectres de particules. Les rapports mettent en évidence des différences beaucoup plus fortes entre les deux slicks qu'entre les deux surfaces ridées.

DISCUSSION

Les études de la microcouche de surface ont débuté surtout par une démarche d'inventaire. La première étape a consisté à mettre en évidence les caractéristiques globales de ce milieu particulier, tant sur les plans physico-chimiques (Garrett, 1972) que biologiques (Norkrans, 1980; Hardy, 1982).

La plupart des auteurs ayant travaillé sur ce film de surface ont estimé, en première approximation, que dans des conditions hydrologiques et météorologiques données, ce film était relativement homogène à petite échelle spatiale (de l'ordre du kilomètre). A partir des résultats exposés dans ce travail, on peut montrer qu'il n'en est rien.

Si l'on considère la première expérience, l'étude de la distribution le long d'un slick côtier met en évidence qu'une structure d'accumulation individualisée ne peut être considérée comme un tout homogène. La répartition du matériel particulaire n'y est pas aléatoire : le long de ce que l'on peut considérer comme son grand axe, l'accumulation apparaît plus intense au milieu qu'à ses extrémités, où se produit un mélange entre les eaux du slick et les surfaces d'eaux ridées. On ne peut cependant pas déterminer, sur la base de ces résultats, si cette hétérogénéité est la conséquence de variations dans la dynamique des mécanismes d'accumulation, ou si, ceux-ci restant relativement constants le long du slick, on assiste à un véritable effet de dilution aux extrémités. Il est intéressant de noter que dans le slick du large qui a été étudié, on retrouve sensiblement la même structure longitudinale. Cependant, dans ce cas, le réseau de slicks et de plages ridées était tel qu'il était impossible de définir un « centre » et des « extrémités » par la seule observation visuelle.

En comparant slicks côtiers et du large, il apparaît, d'une part qu'en zone néritique, les eaux sous-jacentes sont plus hétérogènes, et d'autre part, que l'accumulation de matériel particulaire peut être plus intense au large que près de la côte; on a obtenu, en effet, les plus fortes valeurs d'accumulation (FC) dans le slick du large.

Cette hétérogénéité spatiale à petite échelle se manifeste pour l'ensemble des composés organiques particuliers qui ont été mesurés, mais il apparaît que les processus d'accumulation eux-mêmes sont sélectifs. On retrouve en effet, pour la plupart des échantillons traités dans

cet article, un enrichissement plus prononcé en matière organique particulaire inerte que pour la fraction vivante, phénomène déjà constaté ailleurs (De Souza-Lima, 1981; Jullien *et al.*, 1982; De Souza-Lima, Romano, 1983; Kattner *et al.*, 1985).

Considérons une structure d'accumulation individualisée. Son existence consécutive aux mécanismes d'accumulation va introduire une discontinuité dans la masse d'eau, à laquelle viendront s'ajouter deux facteurs d'hétérogénéité : d'une part quantitative, tendant à enrichir plus sa partie centrale que ses extrémités; d'autre part qualitative, avec une prédominance des fractions organiques inertes. Une telle hétérogénéité peut passer totalement inaperçue si les eaux dites « superficielles » sont échantillonnées par des moyens classiques (seau, bouteilles hydrologiques) et ce, même si les conditions météorologiques favorisent la formation de slicks particulièrement chargés. En effet, en considérant un prélèvement « superficiel » présentant les caractéristiques suivantes : 20 cm de hauteur d'eau pour une section circulaire de 20 cm de diamètre (ce qui correspond sensiblement à un prélèvement au seau). Le volume d'eau provenant de la couche ultrasuperficielle sera de 3,14 ml (en prenant 100 μm d'épaisseur) soit, par rapport au volume total du prélèvement (6,28 l), une fraction de 1/2000. Une telle « dilution » est largement supérieure aux facteurs de concentration les plus forts que nous ayons rencontrés. Autrement dit, des valeurs aussi importantes que 20 à 30 mg.l^{-1} de carbone particulaire seront complètement masquées par un échantillonnage classique.

CONCLUSION

La part prise par ce film de surface dans les bilans de matière des eaux superficielles est très difficile à quantifier, même dans une zone de dimension restreinte. On peut estimer globalement, en un point et à un moment donnés, la surface couverte respectivement par les slicks et les surfaces ridées (où l'accumulation est beaucoup moins intense). Mais ceci postule une homogénéité des structures d'accumulation individualisées. En fait, tel n'est pas le cas. Si l'on compare les résultats obtenus entre deux slicks et deux surfaces ridées jointives, on a pu voir que d'un slick à l'autre, séparés par seulement quelques dizaines de mètres, les facteurs d'accumulation peuvent différer d'un facteur 5.

Pour l'expérimentateur, dans le milieu, l'identification d'un slick se fait visuellement, par son comportement différent vis-à-vis de la réflexion de la lumière; mais ce moyen visuel ne permet pas une différenciation au niveau de l'intensité des processus d'accumulation. Il apparaît donc nécessaire, comme conseillé par Carlson (1982b), de disposer d'un moyen moins subjectif comme, par exemple, de systématiser les mesures de tension superficielle (Kattner *et al.*, 1985). Le problème se pose moins pour l'étude d'une structure individualisée que quand on veut extrapoler l'étude du film de surface à une aire marine.

RÉFÉRENCES

- Carlson D. J., 1982 a. Phytoplankton in marine surface microlayers, *Can. J. Microbiol.*, **28**, 1226-1234.
- Carlson D. J., 1982 b. Surface microlayer phenolic enrichment indicates sea surface slicks, *Nature*, **296**, 5856, 426-429.
- Carlson D. J., 1983. Dissolved organic materials in surface microlayers: temporal and spatial variability and relation to sea state, *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 415-431.
- Champalbert G., 1975. Répartition du peuplement animal de l'hyponeuston. Étude expérimentale de la physiologie et du comportement des Pontellidés, *Thèse Doct., Univ. Aix-Marseille II*.
- De Souza-Lima Y., 1981. Interface océan-atmosphère. Aspects biologiques et écologiques du phytoneuston, *Thèse 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille II*.
- De Souza-Lima Y., Romano J. C., 1983. Ecological aspects of the surface microlayer. 1. ATP-ADP-AMP contents and energy charge ratios of microplanktonic communities, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **70**, 107-122.
- De Souza-Lima Y., Chrétiennot-Dinet M. J., 1984. Measurements of biomass and activity of neustonic microorganisms, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **19**, 167-180.
- Dietz R. S., Lafond E. C., 1950. Natural slicks in the ocean, *J. Mar. Res.*, **9**, 2, 69-76.
- Dubois M., Gilles K. A., Hamilton J. K., Rebers P. A., Smith F., 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substances, *Anal. Chem.*, **28**, 350-356.
- Estep K. W., Remsen C. C., 1984. The relationship of individual algal species to the surface microlayer of a small freshwater pond, *J. Plankton Res.*, **6**, 1, 123-135.
- Ewing G., 1950. Slicks, surface films and internal waves, *J. Mar. Res.*, **9**, 3, 161-187.
- Garrett W. D., 1972. Impact of natural and man-made surface films on the properties of the sea-air interface, in: *The changing chemistry of the oceans*, edited by D. Dyrssen and D. Jagner, Almquist and Wiksell, Stockholm, 75-91.
- Hardy J. T., 1982. The sea-surface microlayer: biology, chemistry and anthropogenic enrichment, *Progr. Oceanogr.*, **11**, 307-328.
- Hardy J. T., Apts C. W., 1984. The sea-surface microlayer: phytoneston productivity and effects of atmospheric particulate matter, *Mar. Biol.*, **82**, 293-300.
- Harvey G. W., 1966. Microlayer collection from the sea surface. A new method and initial results, *Limnol. Oceanogr.*, **11**, 608-614.
- Holm-Hansen O., Booth C. R., 1966. The measurement of adenosine triphosphate and its ecological significance, *Limnol. Oceanogr.*, **11**, 510-519.
- Holm-Hansen O., Lorenzen C. J., Holmes R. W., Strickland J. D. H., 1965. Fluorimetric determination of chlorophyll, *J. Cons. Perm. Inter. Explor. Mer*, **30**, 3-15.
- Jullien D., Cauwet G., Marty J.-C., Saliot A., 1982. La matière organique particulaire dans la microcouche de surface des eaux de mer. Bilan, accumulation et complexation, *C. R. Hebd. Acad. Sci. Paris, ser. 2*, **295**, 2, 367-370.
- Kattner G., Nagel K., Eberlein K., Hammer K.-D., 1985. Components of natural surface microlayers and subsurface water, *Oceanol. Acta*, **8**, 2, 175-183.
- Laborde P., Mimura T., Romano J.-C., De Souza-Lima Y., sous presse. Quelques aspects méthodologiques spécifiques des études biologiques sur les particules de la microcouche de surface, *Vie et Milieu*.
- Norkrans B., 1980. Surface microlayers in aquatic environment, *Adv. Microb. Ecol.*, **4**, 51-85.
- Pradet A., 1967. Étude des adénosines -5'-mono, di et triphosphate dans les tissus végétaux. 1. Dosage enzymatique, *Physiol. Vég.*, **5**, 209-221.
- Romano J.-C., 1982. Impact de l'échantillonnage sur la mesure des nucléotides adényliques (ATP, ADP, AMP) du microplancton. 1. Adaptation du volume de filtration à la charge sestonique, *Téthys*, **10**, 4, 384-389.
- Sutcliffe W. H., Orr E. A., Holm-Hansen O., 1976. Difficulties with ATP measurements in inshore waters, *Limnol. Oceanogr.*, **21**, 145-149.
- Wandschneider K., 1979. Vertical distribution of phytoplankton during investigations of a natural surface film, *Mar. Biol.*, **52**, 105-111.
- Yentsch C. S., Menzel D. W., 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence, *Deep-Sea Res.*, **10**, 221-231.
- Zaitsev Yu. P., 1971. Marine neustonology, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem.