



HAL
open science

Opération EUMELI: flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe - Programme Flux Océaniques

► To cite this version:

- Programme Flux Océaniques. Opération EUMELI: flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe. [Rapport de recherche] CNRS. 1989, 41p. hal-02103727

HAL Id: hal-02103727

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02103727v1>

Submitted on 18 Apr 2019

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

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

RP 246(2)

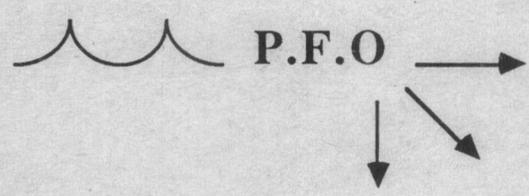
Programme Flux Océaniques



OPERATION EUMELI

Flux de matière dans l' Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe

TOE



Rapport N° 2
2^{eme} édition

Opération

Mai 1989

11 AOUT 1989

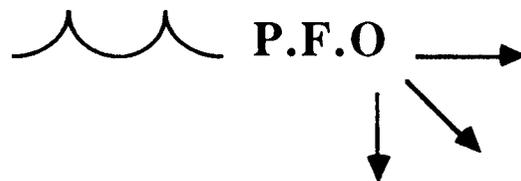
DB 111567

Programme Flux Océaniques



OPERATION EUMELI

Flux de matière dans l' Atlantique tropical
en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe



Rapport N° 2
2^eme édition

Opération

Mai 1989

Programme Flux Océaniques

Responsable exécutif	Guy JACQUES Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer
Président du Comité Scientifique	Jean-Claude DUPLESSY CFR, Gif-sur-Yvette
Président du Comité inter-organismes	Roger CHESSELET Directeur-Adjoint de l' INSU

Opération Eumeli

Responsable opération	André MOREL CEROV, Villefranche-sur-Mer
Chef de mission Eumeli 1	Guy AUFFRET IFREMER, Brest
Chef de mission Eumeli 2	Myriam SIBUET IFREMER, Brest
Chef de mission Eumeli 3	Guy JACQUES Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer

Documents PFO

- Rapport n° 1 **Journées Production Primaire en milieu oligotrophe.**
1988, 80 p. (co-édition avec le Groupe Mediproduct)
- Rapport n° 2 **Opération Eumeli. Flux de matière dans l' Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe.**
1989, 38 p.
- Rapport n° 3 **Opération Antares. Flux de matière dans l' Océan Austral.**
1989, 23 p.
- Rapport n° 4 **Programme Flux Océaniques. Fondements, objectifs, calendrier, moyens et organisation.**
1989, 20 p.
- Rapport n° 5 **Opération Frontal. Interactions physiques, chimiques et biologiques dans les fronts océaniques.**
1989, 28 p.
- Rapport n° 2 (2^{ème} édition)
Opération Eumeli. Flux de matière dans l' Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe.
1989, 39 p.

Programme de l'opération Eumeli 1989-1992



L'objectif majeur du Programme Flux Océaniques (PFO) est de déterminer, à une échelle globale, les flux depuis la surface jusqu'au fond de l'océan. Les particules, qui prennent naissance dans la couche superficielle éclairée, sédimentent à des vitesses différentes dans la colonne d'eau en subissant des transformations chimiques et biologiques. Certaines finissent par se déposer sur le fond océanique avant d'être enfouies définitivement. L'objectif d' Eumeli est d'étudier, pour la première fois de façon intégrée, les flux de particules à chacune des étapes de ce voyage, depuis leur formation jusqu'à leur enfouissement.

Ce flux de particules est d'abord un flux de carbone, essentiellement sous forme de molécules organiques édifiées par photosynthèse et également sous forme minérale (coccolithes et squelettes de foraminifères). Ce carbone est contenu dans le matériel vivant (phytoplancton, bactéries..) et dans les détritiques qui en dérivent (débris, cadavres, pelotes fécales..). Il doit être considéré aussi comme un flux d'énergie, en fait d'énergie solaire captée lors de la photosynthèse et stockée temporairement dans la matière organique sous forme d'énergie chimique libérable au cours des oxydations ultérieures. Enfin, ces particules sont aussi des transporteurs actifs, car, durant leur transit et au cours de leurs transformations chimiques et physiques (agrégation - désagrégation), elles échangent avec le milieu divers éléments: soit ceux qui, à côté du carbone, forment leurs constituants initiaux (N, P, Si, S, métaux..), soit ceux qui, par adsorption, s'y sont adjoints. L'importance potentielle de l'apport éolien vis-à-vis de la production primaire phytoplanctonique implique que ce flux, même s'il n'est pas étudié pour lui-même, soit pris en compte; ceci est particulièrement vrai pour les oligo-éléments comme le fer.

Pour atteindre l'objectif global du programme PFO, des observations synoptiques sont nécessaires. Les seules envisageables concernent les particules pigmentées de la couche superficielle, c'est-à-dire celles que fournirait un capteur "couleur de l'océan" placé sur satellite, la faisabilité ayant été démontrée par le capteur expérimental CZCS. Encore faut-il savoir relier quantitativement ces données sur les pigments chlorophylliens du plancton au flux de carbone organique qui quitte la source superficielle. Il importe également d'associer au cycle du matériel particulaire organique le cycle d'autres éléments, et ce, sur la totalité du parcours depuis la surface jusqu'au sédiment en place. Une étape impérative consiste à identifier et décrire les rouages et leurs engrenements, puis à modéliser les processus élémentaires impliqués et, enfin, à coupler les modèles dans les trois situations types qui constitueront le cadre de l'observation. En effet, le programme Eumeli repose sur un ensemble de campagnes qui permettront d'étudier un site eutrophe, un site mésotrophe et un site oligotrophe, même si cette dernière situation, représentative d'une fraction importante de l'océan mondial, sera privilégiée. Dans chacun de ces sites, sources et puits de matière particulaire seront décrits simultanément dans tous les compartiments qui s'étagent suivant la verticale: la couche euphotique, la colonne d'eau, la couche benthique, le sédiment superficiel (Fig. 1). Ces études intégrées, effectuées sur des sites distincts, sont

destinées à contraindre les modèles de processus et les modèles couplés, qui restent unidimensionnels. En retour, la stratégie d'échantillonnage dépendra de la conception des modèles, observation et modélisation étant indissociables. Le but ultime d'Eumeli, grâce à l'étude de ces trois cas d'école, est d'obtenir un schéma explicatif satisfaisant doublé d'un outil numérique validé par des mesures fines, et fiable quant à ses prédictions. C'est la voie obligatoire pour que les données satellitaires soient traduites en flux de particules à l'échelle de l'océan global.

A - Eumeli dans le contexte national (PFO) et international (JGOFS)

Les deux premières expériences du programme PFO en zone du large sont chacune orientées vers un processus particulier:

- Dyfamed vise à décrire le devenir océanique de la retombée atmosphérique et à évaluer les interactions entre cet apport externe et la chaîne trophique.
- Medatlante a pour objet l'étude des cinétiques d'évolution de la matière particulaire au sein d'une masse d'eau dynamiquement quasi-isolée (un "meddy", c'est-à-dire une lentille d'eau méditerranéenne) et donc soustraite aux effets advectifs mais, par contre, formant réceptacle à la "pluie" particulaire en provenance de la zone superficielle.

Eumeli peut encore être considérée comme une étude de processus car elle se cantonne à la dimension verticale sur des sites distincts au large des côtes mauritaniennes. Par contre, elle vise à une description plus détaillée et plus intégrée car, en un même point, tous les compartiments de la colonne d'eau sont étudiés simultanément y compris le sédiment superficiel. Les acquis expérimentaux de Dyfamed et Medatlante (quantification de certains flux, usage de pièges etc....), tout comme les modèles de processus testés à l'occasion de ces premières campagnes, seront à la base de la stratégie expérimentale et de la modélisation pour Eumeli.

Dans le cadre de l'action internationale concertée JGOFS, la première opération prévue, dite "Etude Pilote", débutera en 1989 pour durer environ deux ans. Il s'agit d'une étude de processus, préliminaire à l'élaboration d'un programme de détermination des flux de matière à l'échelle d'un bassin. La zone choisie est l'Atlantique nord-est le long du méridien 20°W, de l'Islande à Madère. Le long de cette coupe, des campagnes seront effectuées en alternance par des équipes anglaises, américaines, allemandes et hollandaises. L'accent sera mis sur l'étude des floraisons phytoplanctoniques qui, aux latitudes moyennes et élevées, sont génératrices d'une production de matériel particulaire abondante mais temporaire. De plus, deux sites (47 °N et 63 °N) seront équipés de réseaux de pièges pour étudier les séquences du flux de matière parvenant aux divers niveaux en fonction de la saison.

En 1990, un site plus au sud, en zone oligotrophe permanente, sera à son tour équipé. Il y a tout lieu de penser que ce site sera le site oligotrophe retenu pour Eumeli, ce qui permettra de bénéficier d'une coopération internationale intense. Par ailleurs, la zone générale choisie pour Eumeli constitue le verrouillage vers le sud du dispositif coordonné par JGOFS.

B - Objectifs scientifiques et stratégie

1 - Modélisation

La colonne d'eau sera divisée en quatre compartiments principaux (Fig. 1) comprenant chacun plusieurs réservoirs internes; ceci conduira finalement à un modèle à une quinzaine de boîtes. La modélisation sera plus complexe que celle développée précédemment car l'ambition est d'atteindre un niveau de précision plus élevé dans la description des processus élémentaires mis en jeu à l'intérieur de chacune des boîtes. Le programme expérimental à la mer sera corrélativement plus élaboré afin de pouvoir paramétriser ces processus avec le même souci de détail: paramètres physiologiques pour la photosynthèse et le broutage, cinétique d'assimilation des diverses formes de l'azote, différenciation des comportements selon la classe de taille, rôles respectifs de la photosynthèse et de la chimiosynthèse, des biophages et des saprophages etc.....Le programme expérimental comportera aussi un volet benthique qui permettra de quantifier les échanges entre la couche benthique, les sédiments et les eaux interstitielles ainsi que le rôle de la bioturbation dans les processus chimiques et diagénétiques.

La modélisation sera également plus intégrée: le flux quittant chaque réservoir constitue une entrée pour les réservoirs sous-jacents. Ainsi, le couplage entre boîtes constitue une contrainte forte sur les processus internes à chacune d'elles. La redondance des paramètres saisis impose la compatibilité numérique des équations décrivant leurs évolutions respectives. Le jeu d'équations doit rendre compte des échanges à l'état stationnaire d'abord, mais pouvoir aussi prédire l'évolution en régime non-stationnaire. Pour citer les principales étapes dans l'analyse des processus et en procédant de la surface vers le fond, il s'agit de modéliser:

pour la couche superficielle

(1) la couche de mélange, y compris la migration nyctémérale de la "turbocline"; cette modélisation prend en compte les forçages physiques (bilan radiatif, convection, turbulence induite par le vent) et doit rendre compte des apports verticaux en sels nutritifs, comme de la dispersion des particules.

(2) la pénétration du rayonnement efficace pour la photosynthèse en fonction de la biomasse phytoplanctonique présente et de la composition spectrale de ce rayonnement.

(3) les taux de croissance du phytoplancton à l'aide des paramètres physiologiques et radiatifs, si possible pour les des diverses catégories de taille et dans des conditions nutritives variées.

(4) les trajectoires des cellules algales (liaison avec 1), leur production à l'intérieur de la couche euphotique (couplage avec 2 et 3), et leur possible sortie de cette couche.

(5) de construire un modèle trophique, à greffer en particulier sur (4), ayant une résolution suffisante pour répondre aux perturbations de courtes constantes de

temps. Il doit pour cela inclure plusieurs classes de producteurs et de consommateurs dont les cinétiques varient avec la taille: par exemple, deux classes de phytoplancton, deux classes d'herbivores, des carnivores et des détritivores, des bactéries (cette multiplication des compartiments n'est pas prise en compte sur la Fig. 1). Il faut noter qu'un tel modèle doit être modifiable selon la nature (oligo, méso, eutrophe) du domaine où il s'applique, dans la mesure où les relations trophiques y sont différentes.

(6) les vitesses d'assimilation des diverses formes d'azote (NH_4 , NO_3 notamment) ainsi que les taux de régénération (N, P, Si) au sein de la couche euphotique (jointes aux modèles 1 et 3) doivent fournir les éléments d'une modélisation prédictive concernant le rapport production primaire nouvelle / production primaire totale.

(7) ce rapport, tout comme l'évolution de pCO_2 ou de O_2 dissous, est le reflet d'une intégration dans le temps dépassant les pas envisagés dans les modèles précédents. Ils fournissent, vis-à-vis de ceux-ci, des conditions de fermeture permettant de les vérifier.

Cet ensemble, à la condition d'inclure l'effet cyclique des migrations de certaines espèces prédatrices, quantifiera les sorties de la couche euphotique (ou de la couche de mélange) et les fonctions d'entrée au sommet du compartiment "colonne d'eau". Les pièges à sédiments à l'interface, et autres déterminations concernant le matériel dissous à ce niveau valideront la modélisation mise en oeuvre et la cohérence avec les mesures effectuées au-dessus. Pour partie, la modélisation évoquée ci-dessus est d'ores et déjà mise en oeuvre dans le programme Dyfamed.

dans la colonne d'eau sous-jacente (au-delà de la thermocline saisonnière)

Les phénomènes radiatifs, convectifs et les actions mécaniques du vent disparaissant, la production photosynthétique n'étant plus réalisable, la modélisation se simplifie dans la colonne d'eau. L'échelle de temps à considérer augmente, car les transports sont plus longs et les réactions chimiques plus lentes que dans les eaux de surface. L'étude de la géochimie des éléments associés au cycle du carbone et l'utilisation des traceurs minéraux, isotopiques, radioactifs et organiques, doit alors s'accroître. Dyfamed, et surtout Medatlante qui vise à étudier ces problèmes dans le cadre privilégié d'une bulle d'eau isolée, apporteront une contribution importante à la compréhension de ces processus et à leur modélisation.

Toutefois, certains modèles développés pour la couche superficielle resteront applicables, après quelques modifications, aux couches profondes. Cette remarque concerne les modèles trophiques limités aux carnivores et détritivores (incluant les bactéries fixées et libres si l'information est suffisante) qui devront prendre en compte les migrations verticales des organismes. Il faudra leur adjoindre:

- des modèles physiques sur l'agrégation/désagrégation, sur le spectre de taille des particules et leur vitesse de sédimentation.
- des modèles chimiques sur l'interaction dissous-particules (adsorption, désorption).

Conjointement, ces modèles doivent permettre de cerner l'évolution du flux net de particules avec la profondeur et les modifications de sa composition chimique.

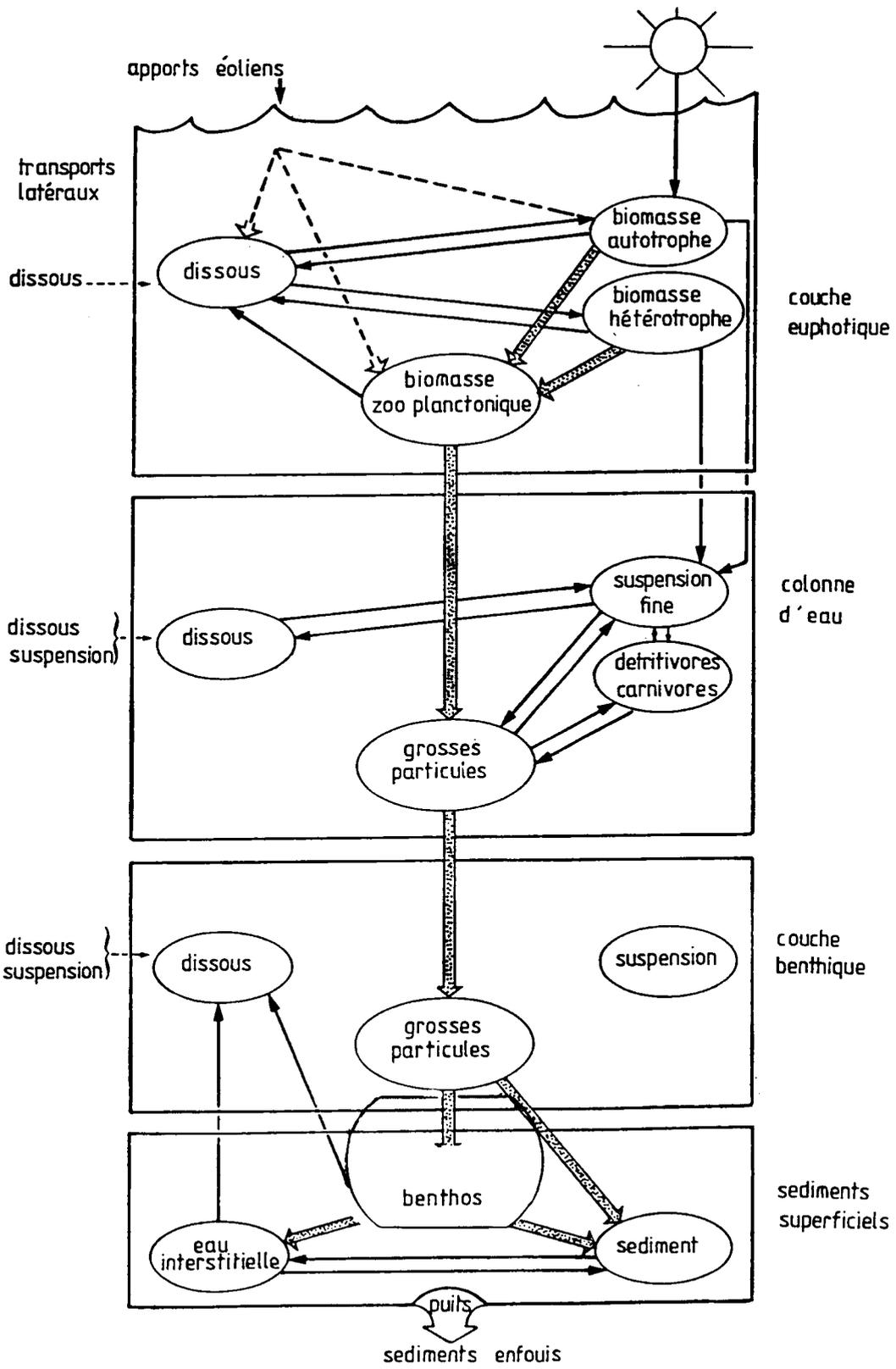
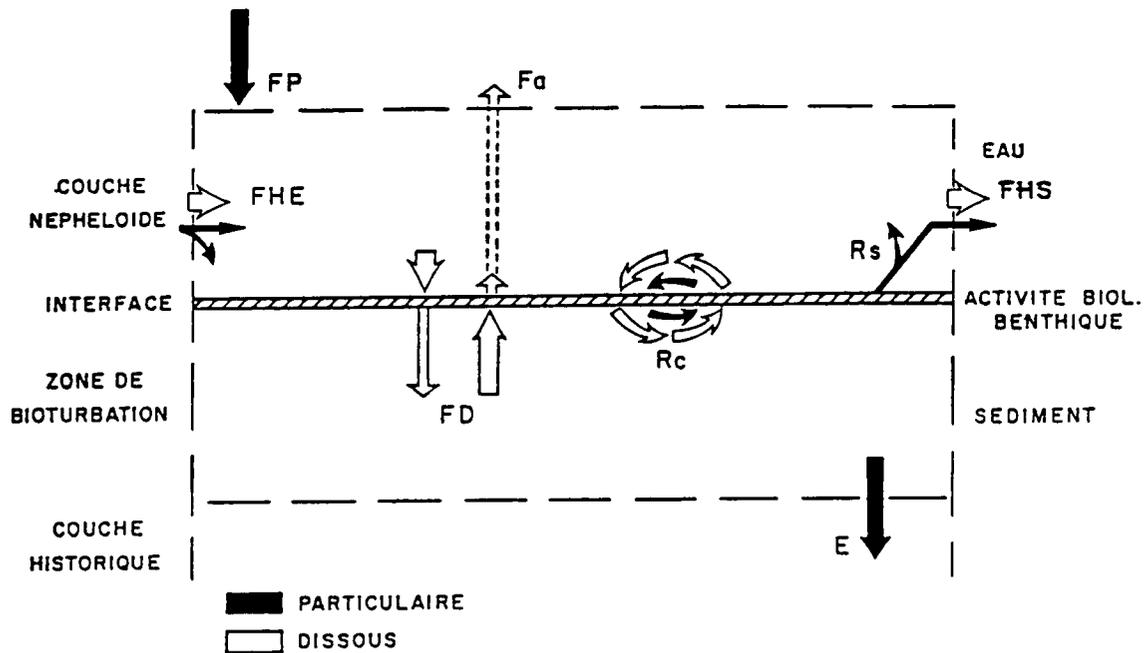


Fig. 1 Schéma de la colonne d'eau découpant le système en strates et compartiments

pour les boîtes profondes de la couche benthique et du sédiment superficiel

A ce niveau, des échanges chimiques, physico-chimiques, biogéochimiques nouveaux apparaissent: l'apport énergétique, donc la valeur nutritionnelle, du flux de particules parvenant au sédiment, ainsi que sa variation déterminent la vie benthique. En retour, celle-ci régule nombre d'échanges chimiques et de séparation de phases solide/dissous. La matière particulaire ayant sédimentée subit là les dernières transformations avant son enfouissement (Fig. 2).



- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| FP : FLUX PARTICULAIRE | Fa : FLUX ASCENDANT |
| FHE : FLUX HORIZONTAL ENTRANT | Rc : RECYCLAGE BIOLOGIQUE |
| FHS : FLUX HORIZONTAL SORTANT | Rs : RE-SUSPENSION |
| FD : FLUX DIFFUSIFS | E : ENFOUISSEMENT |

Fig. 2 Schéma conceptuel des flux de matière à l'interface eau-sédiment

La principale réaction bio-catalysée est l'oxydation de la matière organique, couplée à la réduction d'accepteurs d'électrons, en particulier la réduction de l'oxygène dans la majorité des sédiments pélagiques. Ce processus, inverse de la photosynthèse, conduit à des redistributions entre solides et solutés car il modifie le pH et le potentiel rédox du milieu. Au sein de la couche benthique, les processus s'apparentent à ceux déjà décrits dans la colonne d'eau. A l'interface eau-sédiment la faune benthique utilise, comme nourriture, la matière particulaire et perturbe, par son activité, la distribution du solide et des solutés au sein du sédiment.

Pour décrire le devenir de cette matière particulaire au sein du sédiment et relier son flux à celui des matières dissoutes à l'interface eau-sédiment, l'effort de modélisation devra porter sur:

(1) la quantification des phénomènes de transport au sein des eaux surnageantes, en tenant compte du forçage des niveaux supérieurs et latéraux.

(2) le développement de modèles trophiques décrivant l'activité de la communauté benthique en terme de respiration.

(3) le développement de modèles décrivant l'ensemble des transformations pré-et diagénétiques qui sont basés sur la connaissance des constantes cinétiques; ces constantes doivent être obtenues grâce à des expériences *in situ* de durée variable selon le processus biogéochimique impliqué. Ces modèles sont nécessaires pour quantifier les taux d'échanges, les bilans de matière, l'incorporation du carbone organique, la consommation des accepteurs d'électrons, la dissolution de débris calcaires et la précipitation des minéraux authigéniques.

(4) l'influence de perturbations spatio-temporelles (variabilité des apports de matière particulaire, hétérogénéités des remaniements du sédiment par la faune benthique et les courants de fond) sur le système benthique, permettant de préciser les temps de retour à l'état stationnaire et la variabilité des flux de matières à l'interface sédiment-océan.

Le développement de l'ensemble de ces modèles est intimement assujetti au programme expérimental.

2 - Le choix des sites Eumeli

Les flux verticaux dans l'océan sont éminemment variables dans l'espace et dans le temps, même si l'on considère l'océan "ouvert", où l'influence des apports fluviaux de matériel terrigène et la resuspension du sédiment côtier peuvent y être négligés; en revanche, des apports éoliens épisodiques peuvent être importants. La variation géographique sera abordée d'une façon volontairement simplifiée par une étude de quelques situations-types sélectionnées d'après les connaissances antérieures sur la productivité primaire océanique, connaissances affinées grâce à la télédétection. Ces études concerneront trois cas :

- une situation oligotrophe, conduisant à une production minimale de particules dans la zone superficielle.
- une situation eutrophe, conduisant au résultat inverse.
- une situation mésotrophe intermédiaire.

Ces trois situations (Tabl. 1) seront étudiées en gardant "constants" le plus grand nombre de facteurs possibles: les sites doivent donc être situés à une latitude voisine pour que les forçages physiques liés à la climatologie, les propriétés des masses d'eau et les apports latéraux soient similaires, la flore, la faune et les réseaux trophiques assez voisins. Il est ainsi espéré que, à un moment donné, seule une variation d'intensité de la source superficielle de matière particulaire distinguera les divers sites. Cette hypothèse peut être assez aisément satisfaite

pour les sites oligotrophe et mésotrophe; *a priori*, elle le sera plus difficilement pour la situation eutrophe: celle-ci, seulement rencontrée en zone de remontée côtière, revêt un caractère impulsif avec des modes de fonctionnement propres.

Tabl. 1 Valeurs typiques des paramètres de production primaire dans les trois sites d' Eumeli

Site	Profondeur de la couche euphotique (Z_e en m)	Teneur moyenne Chl <i>a</i> (mg.m^{-3})	Biomasse intégrée Chl <i>a</i> (mg.m^{-2})	COP intégré (gC.m^{-2})	Production primaire ($\text{gC. m}^{-2}. \text{j}^{-1}$)	Efficacité photosynthétique %
oligotrophe	> 100	< 0.05	~ 5	~ 2.5	0.05 - 0.1	0.01
mésotrophe	~ 50	~ 0.5	~ 25	~ 5	0.2 - 0.5	0.06 - 0.1
eutrophe	< 20	> 5	~ 200	~ 15	3 - 5	0.3 - 0.6

- Les valeurs intégrées le sont pour la couche de 0 m à la profondeur Z_e .
- Efficacité photosynthétique = rapport de l'énergie stockée par photosynthèse dans la couche euphotique à l'énergie solaire incidente (IR compris).

Les trois sites d'études (Fig. 3) sont situés sur une section E-W de 1400 km coupant la circulation générale (courant des Canaries), et à des latitudes voisines de 20 °N, c'est-à-dire assez basses pour que les effets saisonniers aient une ampleur modérée: irradiation en surface, bilan thermique, stabilité de la couche superficielle*. A cette latitude, l'alizé est permanent et le régime du vent (tension et orientation) est parmi les plus stables de la planète. Il est nécessaire également que la source de matériel particulaire soit la plus "pure" possible (c'est à dire phytoplanctonique), donc que la zone soit choisie hors de l'influence de particules terrigènes fluviales. Cette condition est satisfaite puisque le continent proche est désertique; cependant, l'apport éolien épisodique de poussières sahariennes ne pourra être ignoré.

La station oligotrophe du large

Elle sera choisie dans la plaine abyssale à un emplacement où les perturbations éventuelles dues au relief sous-marin seront minimisées. La campagne Eumeli 1 qui se déroulera en 1989 aidera au positionnement de cette station. En effet, à partir d'Eumeli 2 consacrée au compartiment benthique, seront régulièrement effectués des mouillages à long terme: module autonome multi-fonctions, modules de colonisation, filières de pièges. Le réseau de mesures comprendra notamment 3 mouillages dans un quadrilatère de quelques dizaines de kilomètres de côté afin d'appréhender la variabilité méso-échelle dans la zone euphotique. Les opérations benthiques seront menées au sein de ce réseau.

* A partir de données historiques, l'amplitude annuelle du gain calorifique net est < 100 W. m^{-2} pour ces trois sites. La valeur moyenne annuelle, légèrement positive au site eutrophe (90 W. m^{-2}), diminue vers le large pour s'annuler au site oligotrophe où le transport advectif de calories est nul. L'amplitude des variations thermiques de la couche 0-100 m au cours de l'année est < 3 °C aux trois sites, avec des valeurs moyennes de 17,5 °C, 19 °C et 23 °C respectivement pour les sites eu-, méso- et oligo-trophe.

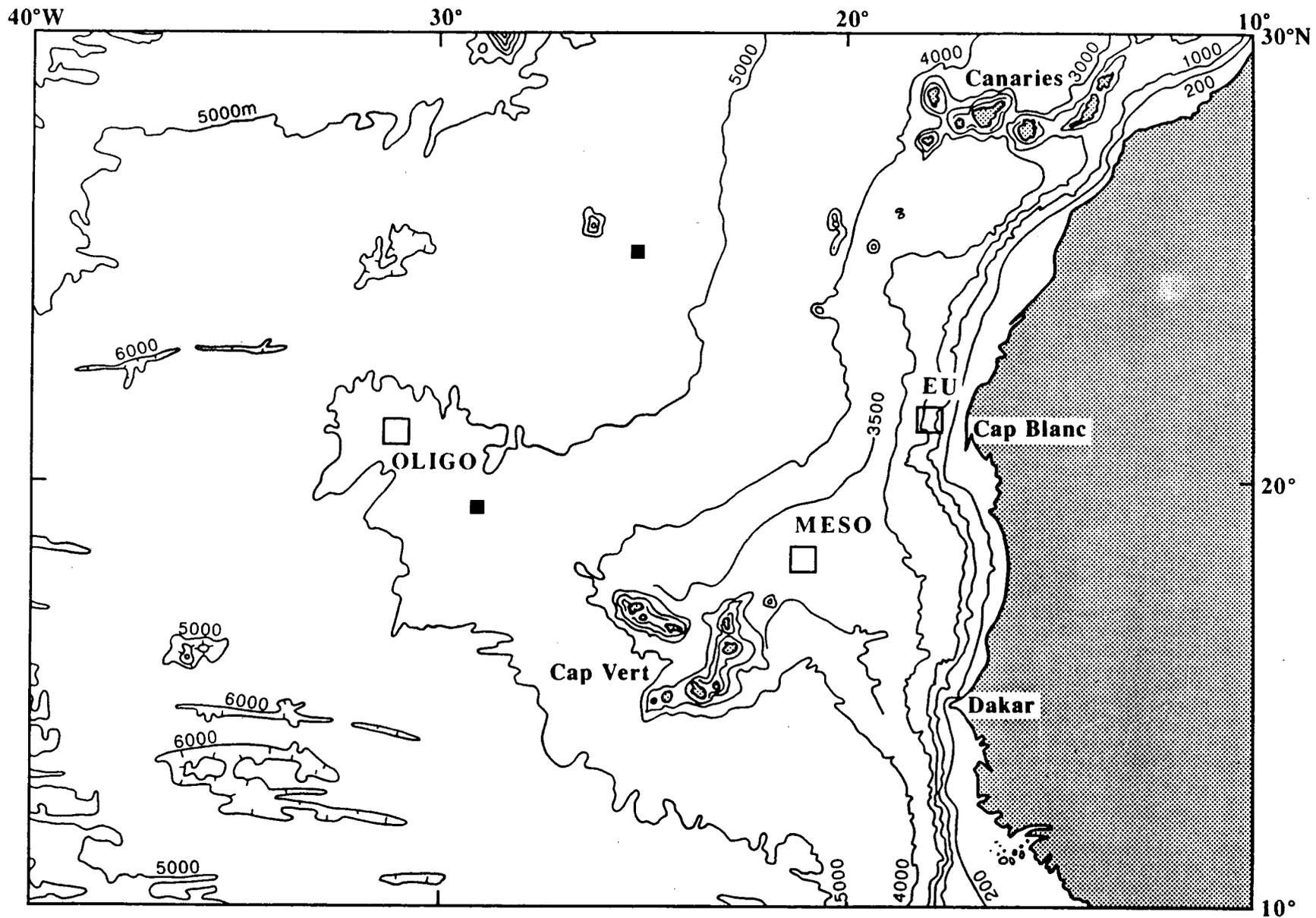


Fig. 3 Position des sites Eutrophe, MESOtrophe et OLIGOtrophe de l'opération Eumell
 ■ indiquent les positions des deux sites Seabed 80.

La station Intermédiaire

Située sur une terrasse à 3000 m, ce site tire son caractère mésotrophe de l'influence de la remontée d'eau côtière mauritanienne qui reste sensible en dépit de la distance (> 300 km); l'étude de l'archive CZCS devrait permettre de préciser la localisation précise et les fluctuations affectant la production au cours des saisons.

La station eutrophe

Située sur des fonds de 500 à 2000 m environ, elle est aussi proche que possible de la bande active de la remontée. La zone côtière voisine est aride et dénuée de fleuves; cependant, le sédiment remobilisé depuis le fond (lorsqu'il est inférieur à 40 m) rend la bande côtière turbide. La station doit être placée nettement hors de cette influence. Dans la région du Cap Blanc, toujours soumise à l'alizé, la remontée d'eau profonde est permanent; même si elle est modulé par la migration saisonnière de la convergence inter-tropicale, la situation d'eutrophie est maintenue avec toutefois un paroxysme au printemps.

3 - La variabilité temporelle

Cette variabilité et, donc, la représentativité des mesures qui seront effectuées à diverses échelles de temps et d'espace constitue un problème majeur. Cette variabilité peut être envisagée à plusieurs échelles:

La variabilité saisonnière

C'est celle qui est peut-être la mieux connue actuellement par les données historiques de campagnes et les données satellitaires. Au cours d'Eumeli, elle sera imparfaitement étudiée, d'une part parce que seuls certains paramètres seront enregistrés en continu ou de façon séquentielle et que, d'autre part, ceux mesurés au cours des campagnes le seront seulement à deux ou trois reprises dans l'année. Volontairement la zone a été choisie pour présenter une variabilité saisonnière réduite. L'exploitation de l'archive CZCS devrait apporter des arguments supplémentaires pour conforter cette hypothèse; d'ores et déjà l'imagerie récemment produite par la NASA montre la permanence du caractère oligotrophe du site du large, bien que l'oligotrophie y soit peut-être moins marquée que celle indiquée (Tabl. 1).

La variabilité liée à la circulation horizontale méso-échelle

Les fluctuations spatiales à méso-échelle de la circulation générale et donc des flux associés ont une intensité bien plus importante que la circulation générale moyenne elle-même. Quoique nécessaire, une description dynamique du transport eulérien associé à cette circulation méso-échelle ne pourra être abordée d'une façon totalement satisfaisante dans le cadre d'Eumeli. Pour la couche superficielle, on s'affranchira de cette difficulté en décrivant la couche euphotique de façon lagrangienne. Dans la colonne d'eau, une estimation de la variabilité et, donc, de la représentativité des mesures sera tentée en déployant un réseau de quelques mouillages de courantographes dans un quadrilatère de quelques dizaines de kilomètres de côté. Près du fond, où les déterminations sont nécessairement eulériennes, les courants correspondant à la circulation méso-échelle sont généralement moins intenses; ils seront surveillés et pris en compte grâce à des mesures classiques de courantométrie.

La variabilité à courte constante de temps (le jour)

Elle est pour l'instant mal connue, que ce soit pour la couche superficielle ou pour la couche limite benthique, où elle peut également exister. Les mesures à haute cadence en surface répondent à cette préoccupation et permettent, dans le même temps, de valider les modèles couplant la dynamique de la couche mélangée aux réseaux trophiques et, *in fine*, au flux de particules. De tels modèles permettront:

- de décrire la manière dont les flux de particules sont affectés (amortissement et déphasage) à toute profondeur par les processus à courte échelle de temps.
- de justifier sur cette base des modèles plus simples, applicables à de plus grandes échelles de temps et d'espace, qui concerneraient aussi bien la couleur de l'océan superficiel que les flux de particules en profondeur.

Sur le fond océanique, des mesures à long terme seront effectuées pour certains paramètres: courant, température, particules en suspension, colonisation du substrat, pièges séquentiels, structure des communautés par photographies etc.... Une instrumentation spécifique permettra la simultanéité de ces mesures. Les variations spatio-temporelles des paramètres biologiques et biochimiques nécessitant des prélèvements de sédiment ou de faune par carottage ou chalutage seront étudiées seulement à partir des prélèvements ponctuels à l'occasion des campagnes à la mer.

Pour revenir au propos initial sur l'apport des données satellitaires, des voies autres que la seule imagerie de la couleur de l'océan, peuvent s'ouvrir, si les modélisations envisagées se révèlent efficaces; en effet, la température de surface, l'irradiation incidente et la tension de vent sont aussi des paramètres accessibles depuis l'espace. Ces données, assimilées dans les modèles physiques de couche de mélange, doivent en permettre la prédiction; le "pompage d'Ekman" et son corollaire le "pompage de sels nutritifs" peut être dérivé du champ de vent combiné aux données historiques sur les teneurs des couches profondes. En principe, la production primaire dans la couche superficielle serait donc prévisible; il s'agira d'ailleurs de la production "nouvelle", la plus intéressante pour l'étude des flux, d'autres hypothèses étant nécessaires pour accéder à la production totale ("nouvelle" + "régénérée"). Cette méthode indirecte, utilisant d'autres données satellitaires, pourrait constituer une validation de la méthode "directe", c'est-à-dire de l'imagerie couleur.

L'originalité de l'approche proposée pour Eumell est de prendre en compte les phénomènes depuis la surface jusqu'au fond avec un maximum d'études intégrées. Celles-ci représentent un effort unique permettant de déterminer l'importance relative des différents compartiments d'un modèle général et d'identifier les processus influant sur le cycle du carbone dans l'océan ouvert.

Position de la communauté scientifique française

A - La communauté scientifique française

Notre communauté est bien placée pour contribuer significativement aux programmes devant se dérouler sous l'égide de JGOFS. Grâce à son expérience antérieure, ses compétences nouvelles et sa motivation vis-à-vis du Programme Flux Océaniques, son apport peut être original, et compléter les travaux que d'autres nations envisagent de mener, notamment dans l'Atlantique.

Pour simplifier, les compétences requises se situent dans trois domaines: la biologie pélagique et benthique, la géochimie, incluant la chimie du sédiment superficiel et la modélisation, outil interdisciplinaire qui introduit la physique sous-jacente. Cette séparation entre disciplines ne correspond aucunement à une séparation des communautés scientifiques qui, lors d'actions et campagnes antérieures, ont eu de multiples occasions de coopérer. Qu'il suffise de rappeler:

- l'ensemble des campagnes menées dans le cadre international CINECA (Cooperative Investigations of the Northern part of the Eastern Central Atlantic) essentiellement par le groupe Mediproduct, ORSTOM et IFREMER.
- les séries de campagnes axées sur la production planctonique et la chimie des éléments nutritifs: Mediproduct en Méditerranée occidentale, Guidôme sur le dôme de Guinée, RCA sur la remontée des côtes portugaises, Antiproduct dans le secteur indien de l'Océan Austral et Paciproduct au large de la remontée péruvienne dont le maître d'oeuvre était le Groupe Mediproduct.
- la compétence des équipes ORSTOM pour les problèmes de l'oligotrophie et de l'océan tropical qui s'accroît avec les programmes Piral, puis Propac/Surtropac (ces campagnes sont liées aux opérations TOGA/Pacifique).

Production planctonique

Pratiquement, toutes les techniques concernant les mesures de production primaire et son environnement (^{14}C , O_2 , ^{15}N , ^{13}C , pigments, automatisation des dosages des sels nutritifs, flux radiatifs) ont été mises en oeuvre et améliorées durant ces campagnes, y compris les mesures continues de pCO_2 , pH, turbidité, fluorescence. La quantification des liens entre production secondaire et production primaire, des flux liés aux pelotes fécales et aux circuits bactériens ont donné lieu à des progrès spectaculaires, en particulier pour le rôle des différentes classes de taille d'organismes dans le réseau trophique.

Géochimie

La préoccupation géochimique est à l'origine des campagnes Phycemed I et II, puis Fluxatlante. Les pompages et prélèvements de grands volumes, les filtrations et comptages *in situ* sont des techniques mises au point à cette occasion, tandis que les méthodes analytiques progressaient de leur côté pour les éléments métalliques traces, les molécules organiques utilisées comme traceurs, les radioéléments et la chimie isotopique. La maîtrise instrumentale concernant le CO_2

et le système des carbonates a été acquise à l'occasion des opérations directement consacrées à ces questions en Mer Rouge et dans le sud de l'Océan Indien: Mériou, Indigo, Indivat.

Modélisation

La modélisation est apparue progressivement dans chacune des disciplines, provoquant leur rapprochement; en effet, la paramétrisation des causes, des effets et des rétroactions fait le plus souvent appel à des connaissances "interdisciplinaires". Allant des modèles physiques (couche mélangée en réponse aux forçages externes, couche euphotique, transport vertical de nutriments) aux modèles géochimiques (boîtes, sédimentation et dissolution), en passant par les modèles biophysiques (énergétique de la photosynthèse) et biologiques (réseau trophique), la panoplie est d'ores et déjà fournie, même si quelques lacunes subsistent.

Ecosystèmes benthiques

L'IFREMER (Département Environnement Profond et Département Géosciences Marines) contribue à l'avancée probante dans l'étude de l'écosystème benthique et du sédiment superficiel, grâce à un développement technologique important. Des mesures et expériences *in situ* sont actuellement possibles. Les techniques et appareillages ont été mis au point au cours des campagnes menées dans le Golfe de Gascogne sur des sites permanents: campagnes Biogas, Epi, Epaugas (mettant en oeuvre l'Epaulard) Sargas (le SAR) et Biocyan (le submersible CYANA).

La description de certains processus benthiques résulte de la mise en place de mouillages de longue durée de divers instruments: pièges à particules, module multiparamétrique (paramètres physiques et séries photographiques), modules de colonisation et dispositifs expérimentaux mis en oeuvre par submersible permettant l'incubation *in situ* de traceurs (chambres benthiques, carottiers à injection). La poursuite de cet effort instrumental devrait permettre les mesures de l'activité respiratoire avec des enceintes adaptées à la taille des organismes.

Sédiments profonds

Le carottier-interface construit à Bordeaux a fait ses preuves lors des campagnes Interabys puis Fluxatlante. Le Laboratoire de Géologie Dynamique de Paris VII, afin de dresser des bilans diagénétiques et d'estimer les flux de matières dissoutes à l'interface eau/sédiment, compte disposer d'un instrument de prélèvement *in situ* sous pression pour les eaux interstitielles.

Compte tenu du programme expérimental prévu pour Eumeli, reste un point crucial: celui de l'utilisation des pièges à particules, dérivants ou ancrés. Grâce à l'opération Dyfamed (PFO), une expérience s'acquiert dans le maniement et l'interprétation des données ainsi recueillies. Les campagnes Medatlante de 1989 (PFO) constitueront un exercice préparant encore mieux l'opération Eumeli en raison de la similarité des situations oligotrophes. Des compétences affirmées existent à l'étranger dont le concours sera probablement indispensable.

La reconnaissance des sites, avant la mise en place de l'instrumentation, fera appel à des couvertures avec le sondeur multifaisceaux Seabeam et le SAR, puis à des couvertures photographiques grâce à l'Epaulard. La conduite de certaines expériences sur le fond impliquera l'intervention de submersibles pouvant être mis en oeuvre à l'occasion de campagnes spécialisées vers la fin d'Eumeli.

Tabl. 2 Techniques et appareillages à la mer à mettre en oeuvre durant Eumell
Les appareillages devant faire l'objet d'un développement sont signalés par le signe x

Techniques de prélèvement engins	Principales équipes concernées	A développer ou accroître
• Pompage/filtration d'air, impacteurs, collecteur	CFR	
• Irradiation solaire en surface	LPCM	
• Système hydroélectrique tracté (SHET)?	LPCM	
• Profileur de courant Doppler	LPCM	
• Capteurs/pompage <i>in situ</i> (0-200 m)		
• CTD-O ₂ + diffusiomètre + fluorimètre + rosette/Niskin-Go Flo (0-4000 m) + calculateurs	ORSTOM?	
• Bouteilles Niskin, Go Flo (métaux et production primaire)	LPCM, CFR	x
• Filets à plancton, filet à nappes	GRECO P4, SZV	
• Préleveurs métalliques grand volume (analyse organique)	LPCM	x
• Profileurs optiques (PAR, spectroradiométrie, diffusion etc..)	Arago, LPCM	
• Mouillage optique	?	
• Pompe POP	CFR	
• 2 pièges dérivants à immersion programmable	INSU/PFO	x
• 25 pièges grande surface de collection	AIEA/PFO/COB	x.
• 6 pièges petite surface pour mesures "spécifiques"	AIEA/PFO	
• 4 modules de colonisation	IFREMER Brest DERO/EP	
• 2 modules autonomes sur le fond (MAP)	IFREMER Brest DERO/EP	
• Carottiers Usnel, carottiers interface	IFREMER Brest/IGBA	
• Préleveur d'eau interstitielle	IGBA	x
• Respiromètre ou chambre benthique	IFREMER Brest DERO/EP	x
• Néphélomètres profonds	IFREMER Brest DERO/EP	
• Nasses pour carnivores	IFREMER Brest DERO/EP	
• Module caméra autonome	IFREMER Brest DERO/EP	
• 6 pièges à ancrer près du fond	IFREMER Brest DERO/EP	
• Nasses autonomes, chaluts à perche	IFREMER Brest DERO/EP	
• Instrumentation submersible: enceintes de marquage, carottiers à injection, bouteilles à injection	IFREMER Brest DERO/EP	
AIEA	Agence Internationale pour l'Energie Atomique, Monaco.	
Arago	Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer.	
CFR	Centre des Faibles Radioactivités, Gif-sur-Yvette.	
COM	Centre d'Océanologie de Marseille.	
GDR Ecopr.	Groupe de Recherches "Ecoprophyce".	
GDR P4	Groupe de Recherche "Production Pélagique et Phénomènes Physiques".	
IFREMER Brest DERO/EP	Département Environnement Profond	
LGE	Laboratoire de Géochimie des Eaux, Paris VII.	
LPCM	Laboratoire de Physique et Chimie Marines, CEROV, Villefranche-sur-Mer.	
GRGS	Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse.	
SZV	Station Zoologique de Villefranche, CEROV, Villefranche-sur-Mer.	
UBO chimie	Laboratoire de Chimie, Université de Bretagne Occidentale, Brest.	

Tabl. 3 Techniques analytiques à mettre en oeuvre durant Eumell

Principales méthodes analytiques et paramètres saisis	Equipes compétentes	A développer ou à améliorer
<u>Echanges de gaz</u>		
DMS, COS, pCO ₂ atmosphérique	CFR/LPCM/GRGS	
aérosols/métaux	CFR/LPCM	
aérosols/fraction organique	CFR/LPCM	
<u>Hydrologie</u>		
Profils bathysonde (CTD 0-6000 m) avec néphélomètre	IFREMER Brest/LPCM	
Profils de courants	LPCM	
<u>Pigments</u>		
Spectrofluorimétrie	Arago	
HPLC	LPCM, COM	x
Cytométrie de flux	Arago, Roscoff	
Epifluorescence/comptage-taille	Roscoff, SZV, ORSTOM	
Biomasse bactérienne	COM, ORSTOM	
<u>Nutriments</u> (dont NO ₃ haute sensibilité)	ORSTOM, COM, UBO chimie	x
<u>Production primaire</u> ¹⁴ C, O ₂		
Techniques <i>in situ</i> , <i>in situ</i> simulée	GDR P4, ORSTOM	
P vs I courbes	SZV	
Vitesse d'assimilation ¹⁵ N/ ¹³ C	COM, ORSTOM	
Assimilation Si,P (Ge/Si, ³² P- ³³ P)	UBO chimie	x
Assimilation N ₂ moléculaire	?	x
<u>Activité hétérotrophe et matière organique</u>		
Activité hétérotrophe	ORSTOM, SZV	
POC, PON, DOC, DON	LPCM, ORSTOM, UBO chimie	x
<u>Géochimie</u>		
Biomarqueurs organiques	LPCM	
Géochimie isotopique (¹³ C, ¹⁴ C, ¹⁵ N)	CFR, LGE, GRGS	x
Radionuclides (Th, U, Pb)	CFR, AIEA	x
Eléments métalliques-traces	CFR, AIEA, LPCM, GRGS	
<u>Géochimie et hydrodynamique</u>		
Datation sédiments ²¹⁰ Pb, ¹⁴ C, ¹⁸ O	CFR	
Carbone organique, lipides, glucides, acides aminés	IFREMER DERO/EP, GDR Ecopr.	
Opale, carbonates, sulfures	LGE	
Eaux interstitielles: Fe, Ca, Mn, nutriments, TCO ₂	LGE	
Hydrodynamique (courantométrie-néphélométrie)	IFREMER DERO/EP	
<u>Processus benthiques</u>		
Apports trophiques	DERO/EP, GDR Ecopr., Ecomarge	
Composition faunistique et trophique	DERO/EP, GDR Ecopr., Ecomarge	
Distribution spatiale des peuplements	DERO/EP, GDR Ecopr., Ecomarge	
Densité et biomasse benthiques	DERO/EP, GDR Ecopr., Ecomarge	
Dégradation de la MO par activité bactérienne	DERO/EP, GDR Ecopr., Ecomarge	
Activités métaboliques (nutrition, respiration)	Coll. avec chercheurs USA	

Les tableaux 2, 3 et 4 présentent succinctement les techniques de prélèvement et les techniques analytiques à mettre en oeuvre ainsi que les laboratoires et formations où le savoir-faire existe.

Tabl. 4 Matériel national IFREMER ou INSU nécessaire durant les campagnes de l'opération Eumeli

Sans être exhaustive, la liste ci-dessous mentionne les principaux appareils nationaux qui devraient être disponibles pendant les campagnes. Il va de soi que le matériel océanographique associé (treuils, câbles électriques, câbles porteurs, grues, portiques, ...) devra être fonctionnel.

- Bathysonde CTD-O₂ Neil-Brown 0-6000 m avec son conteneur et sa rosette
- Sonde à oxygène Neil Brown (0-6000 m) et son conteneur
- Carottiers Küllenberg et Usnel
- Sondeur multifaisceaux Sea-Beam
- SAR
- Système de prospection vidéo SCAMPI
- Epaulard
- Balises acoustiques (Eumeli 1)
- Nautile (Eumeli 6).

B - Coopérations avec les équipes étrangères

Certaines sont déjà engagées, parfois de longue date; elles doivent être précisées et organisées dès que le principe des campagnes à la mer Eumeli sera retenu. Quelques équipes ont déjà déclaré leur intention de coopérer, mais l'ouverture, notamment vers des équipes européennes, devra être renforcée:

- Lamont Doherty (P. Biscaye): traceurs isotopiques.
- University of California de Santa Barbara (R.C.Smith): expériences bio-optiques et mouillage d'instruments (irradiance, fluorescence) pour des enregistrements de longue durée.
- University of California de San Diego (D. Kiefer): modélisation production et expériences physiologie/production.
- University of California de Los Angeles: expérimentation par incubation ¹⁵N/¹³C, modélisation du rapport production nouvelle/production régénérée.
- Bedford Institution (T. Platt) et Dalhousie University (M. Lewis) à Halifax: nouvelles techniques de production primaire; modélisation de l'ensemble production/sédimentation.
- Texas A & M University, Department of Oceanography (G. Rowe): étude du métabolisme à l'interface eau-sédiment avec un respiromètre-prototype autonome équipé d'un système photographique.
- Skidaway Institute of Oceanography, Savannah, Géorgie (R. Janke): mouillage d'une chambre benthique pour analyse de la consommation d'éléments dissous à l'interface eau-sédiment.

Stratégie et calendrier

A - Calendrier et programmation générale

Diverses contraintes existent et certaines priorités ont été retenues pour établir ce calendrier (Fig. 4):

(1) Le nombre de pièges fixes (sur mouillage) disponibles permettra au mieux d'équiper complètement un site et plus sommairement un second. Cela est également vrai pour les dispositifs benthiques. C'est l'hypothèse réaliste retenue, dont découle l'agencement des six campagnes successives.

(2) La fréquence des campagnes (relevage et nouveau mouillage) est en grande partie déterminée par la nécessité d'obtenir une quantité de matière suffisante dans les pièges, des modifications significatives de la structure des peuplements benthiques ainsi qu'une activité mesurable des processus biogéochimiques à l'interface eau-sédiment.

(3) Si l'étude complète de la variabilité saisonnière est hors d'atteinte, le fait d'occuper les sites à des saisons "opposées" est nécessaire, même si l'instrumentation laissée en place est restreinte. Les pièges séquentiels, les modules d'observation ou de mesure à long terme apporteront, de toute façon, des informations relatives à la variation saisonnière.

(4) L'accent est mis sur le site oligotrophe pour le maintien en place de l'instrumentation: quatre périodes s'étendant sur près de deux années. Ce choix résulte de la faiblesse des flux, de la plus grande difficulté des mesures et finalement de la relative méconnaissance que l'on a de la situation d'oligotrophie, alors qu'elle est la plus fréquente à l'échelle de l'océan mondial.

(5) Le site mésotrophe sera probablement instrumenté durant deux périodes consécutives, couvrant au total un an.

(6) Le site eutrophe pourrait être instrumenté durant la période de haute production de la remontée (printemps 1991). Si le parc instrumental le permet, la période "calme" de l'upwelling sera également couverte par la suite.

(7) La stratégie concernant le site eutrophe est moins bien cernée, essentiellement en raison des fluctuations liées aux pulsations de la remontée et, donc, de la représentativité des mesures obtenues dans ce régime. Il est préférable de repousser l'étude de ce site vers la fin de l'opération Eumeli, afin de bénéficier de l'expérience acquise. Notons, par contre, que certains problèmes méthodologiques seront simplifiés en raison de l'abondance du matériel particulière.

(8) Avant d'instrumenter le fond avec différents modules d'observation et de mesures (chambres benthiques, pièges, courantomètres), une reconnaissance préalable est nécessaire (couverture Sea-Beam, carottages, SAR, etc ...).

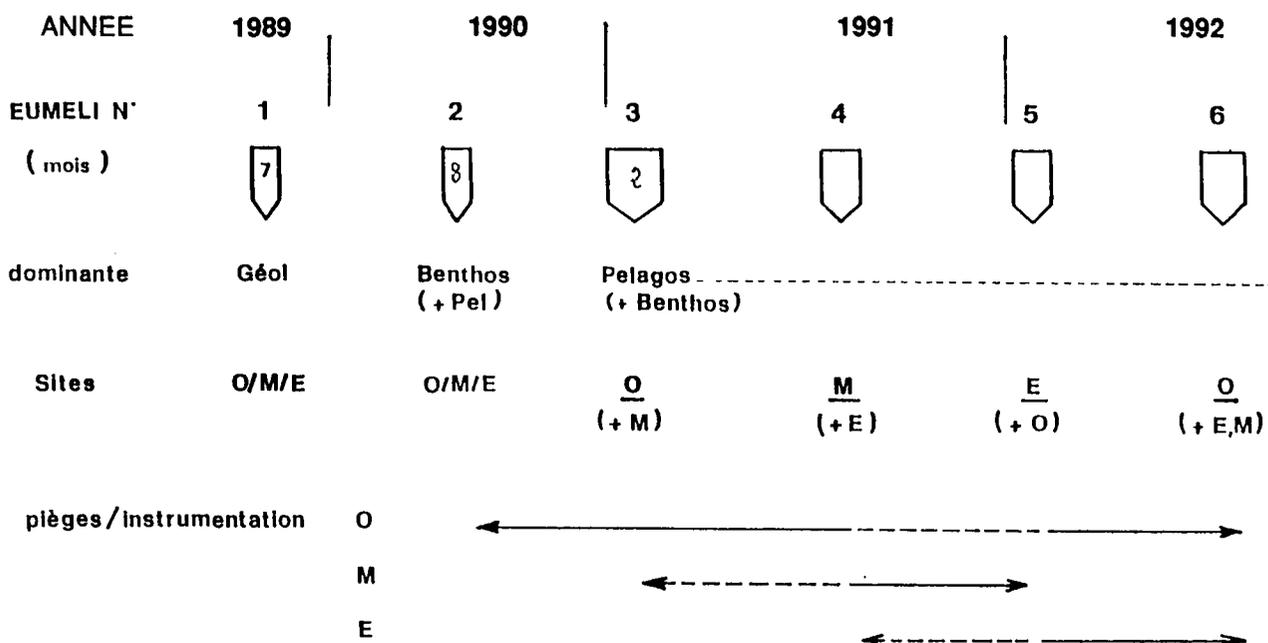


Fig. 4 Calendrier des différentes campagnes de l'opération Eumell

Elle sera effectuée durant la campagne Eumeli 1 de 1989: géologie-sédimentologie, chef de mission G. Auffret (IFREMER DERO/GM).

(9) Le déploiement de pièges dérivants durant les stations de longue durée (étude "intensive") sera parallèle à la saisie des données à partir de la surface, la stratégie étant de surveiller une masse d'eau superficielle et, donc, de dériver avec elle.

(10) Les pièges mouillés pourraient être utilisés de deux façons: pendant les campagnes, ils seront tous placés à des profondeurs modérées (<1000 m) et concentrés sous la couche euphotique, où le flux de matière est important. Entre les campagnes, ils seront répartis sur toute la colonne d'eau à des positions déterminées en fonction des données hydrologiques au cours d'Eumeli 2. Les pièges INSU et IFREMER seront équipés de barillets pour obtenir des prélèvements séquentiels.

(11) Enfin, le projet d'expérimenter sur de grandes enceintes dérivantes, sans être définitivement retenu, demeure attractif. En dépit de défauts connus ou de difficultés pratiques de mise en oeuvre, cette technique apporte, pour l'étude de la couche euphotique, l'avantage irremplaçable d'observer l'écosystème dans des conditions quasi-naturelles tout en permettant l'expérimentation.

Elles commencent, lors d' Eumeli 1, par la reconnaissance sédimentologique des trois sites et de leurs abords. Ensuite, les différentes campagnes auront soit une dominance benthos - interface eau-sédiment (Eumeli 2, Eumeli 5), soit une dominante pélagos - colonne d'eau (Eumeli 3, Eumeli 4). Cependant, le compartiment qui ne sera pas étudié à fond lors d'une campagne bénéficiera toujours d'un suivi léger.

Eumeli 2, prévue au milieu de l'année 1990, débutera les études des phénomènes biologiques, chimiques et physiques à l'interface eau-sédiment. Eumeli 3, débutera les études des processus physiques, chimiques et biologiques dans la couche euphotique et la colonne d'eau. Cette campagne est prévue au début de 1991, soit environ six mois après Eumeli 2, cette périodicité étant maintenue tout au long du programme pour assurer les relevés-mouillages de pièges et autres instruments.

La stratégie d'observation dépendant largement de la modélisation prévue, l'ordre de présentation retenu dans ce chapitre passe des observations à l'interface océan/atmosphère, aux expériences consacrées à l'activité photosynthétique dans la couche éclairée et, ensuite, aux processus dominants de la colonne d'eau, avec la saisie des paramètres chimiques et physiques nécessaires à sa description et à la modélisation. Enfin, les opérations relatives à la couche benthique et aux interactions eau/sédiment sont succinctement présentées. Par ailleurs, certaines études nécessitant l'usage d'un submersible et l'expérimentation *in situ* feront l'objet d'une campagne spéciale (Eumeli 6). La série de campagnes Eumeli 1 à Eumeli 6, fait l'objet des fiches annexes 1 et 2. Cependant, Il n'y a pas lieu de décrire séparément les campagnes Eumeli 2 à 5, qui se dérouleront, à quelques nuances près, suivant le même scénario.

La stratégie des mesures est commandée par la modélisation choisie. Les paramètres à saisir sont, au minimum, ceux qui entrent dans les modèles et ceux qui doivent les valider. La liste des opérations prévues (ci-dessous) remplit cette condition et même au-delà; en effet, il est clair que la modélisation demeure simplificatrice vis-à-vis des phénomènes impliqués et certains d'entre eux, pour ne point entrer dans le schéma conceptuel, n'en méritent pas moins d'être étudiés. Ceci est particulièrement le cas pour certains aspects physiologiques (capacité de photosynthèse, cinétique de fluorescence etc...), analytiques (diverses méthodes pour la détermination des pigments) ou écologiques (rôle comparés du pico- et du nano-plancton). Eumeli constitue un cadre approprié pour mener ces études dont les résultats permettront, ultérieurement, l'amélioration des modèles.

1 - Reconnaissance bathymétrique et sédimentologique

Cette reconnaissance (annexe 2) est nécessaire pour que l'instrumentation des sites ne soit pas faite en aveugle. De plus, pour chacun des sites sélectionnés, il faut s'assurer que la situation est "stable", c'est à dire que le substrat reflète un équilibre à long terme entre apports sédimentaires et nutritifs et distribution des peuplements benthiques. C'est également une recommandation de JGOFS. Brièvement, les opérations consistent à effectuer:

- une couverture Sea-Beam pour obtenir une bathymétrie précise.

- un relevé de la couverture sédimentaire: nature et modelé avec le sondeur latéral SAR, structure verticale grâce au sondeur à sédiment (3,5 KHZ).
- des prélèvements du sédiment superficiel (carottier Kullenberg, carottier Usnel, carottier interface IGBA).
- des relevés photographiques.
- mise en place au fond, au vu des résultats en cours de mission, de pièges à particules et de modules autonomes de longue durée.

2 - Données météorologiques et prélèvements atmosphériques

L'importance des forçages physiques comme paramètres d'entrée dans le modèle de couche de mélange implique une observation météorologique renforcée, en particulier en matière de rayonnement et de bilan radiatif. Cette observation locale, pour indispensable qu'elle soit serait insuffisante sans l'extension d'échelle permise, si possible en temps réel, par les données satellitaires (AVHRR, Météosat) ou météorologiques. Les scalaires ou vecteurs dont les champs doivent être connus sont: la température superficielle de l'océan (de nuit, de jour), l' eau précipitable, la nébulosité, l'insolation, le vent (tension et rotationnel), la teneur en aérosols, les trajectoires des masses d'air.

Les prélèvements atmosphériques, en station et en route, concerneront les composés soufrés (DMS-COS), divers composés organiques volatils et particulaires, Il s'agit essentiellement de mettre en oeuvre, en continu, des engins de pompage et de filtration. Ces mesures permettront, en particulier, d'estimer le rôle des apports éoliens vis-à-vis du cycle des métaux (Al, Mn, Fe, terres rares, Pb) dans les eaux superficielles et leur contribution à la sédimentation détritique.

3 - Opérations concernant la couche euphotique et la colonne d'eau

Le pas de temps adopté pour la modélisation des processus physiques, biologiques et bio-géochimiques au sein de la couche mélangée et de la couche euphotique rend nécessaire une haute cadence d'acquisition des paramètres essentiels et, pour la cohérence, une haute définition verticale; ceci explique l'accent mis sur les levés continus.

Une maille spatiale et temporelle plus lâche est compatible avec les processus et modèles relatifs à la colonne d'eau sous la couche euphotique, même si les techniques et engins (bathysonde de 0 à 6000 m, prélèvements de grands volumes, pompage/filtration *in situ*) ne sont pas foncièrement différents de ceux mis en oeuvre pour la couche supérieure. Pour des raisons de logistique, l'exploration de la couche profonde par ces engins se fera en même temps que celle du reste de la colonne d'eau.

Les engins intégrateurs que sont les pièges ancrés ou dérivants, tout comme la surveillance de l'évolution lente de paramètres tels que pCO₂ et O₂ dissous doivent fournir les fermetures des modèles évoqués ci-dessus.

Schématiquement, les opérations consisteraient en:

levés de profils continus (0 à 200 m)

- les divers capteurs *in situ* installés sur le Système Hydro-Electrique Tracté (SHET) permettent le levé continu de: C, T, D, O₂, seston total par diffusiométrie. Il est envisageable qu'un fluorimètre profileur puisse aussi être utilisé.
- une pompe immergée, installée sur le même système permet de remonter l'eau à bord où les dosages de pigments, sels nutritifs, pCO₂ et pH peuvent être effectués en continu.
- le même levé CTD-O₂-seston est effectué également avec les bathysondes classiques équipées de rosettes permettant le prélèvement de plus grands volumes à immersions déterminées. C'est le moyen mis en oeuvre, en complément du SHET, pour la couche superficielle (0-200). C'est l'unique moyen utilisé pour l'ensemble de la colonne d'eau (0-4000 m).
- il est envisageable aussi d'obtenir, à diverses immersions de la couche euphotique, des enregistrements de longue durée pour les paramètres du champ radiatif et de la biomasse (spectre de l'énergie radiative, fluorescence naturelle du phytoplancton, absorption et diffusion optiques). Des instruments de ce type, mouillés sur les mêmes lignes que les pièges, sont déjà opérationnels et leur utilisation est prévue par les équipes américaines participant à JGOFS. Des accords sont à négocier si la construction de tels instruments n'est pas envisagée en France.

obtention de paramètres concernant photosynthèse et production primaire.

Certains besoins sont couverts par les opérations énumérées ci-dessus: profils de biomasse phytoplanctonique, teneurs en sels nutritifs, prélèvements de quantités d'eau suffisante pour l'expérimentation physiologique sur le phytoplancton. S'ajoutent à cela des opérations spécifiques:

- spectroradiométrie du flux radiatif à tous niveaux de la couche euphotique et variation diurne du flux total PAR (Photosynthetic Available Radiation); profils des propriétés d'absorption et de diffusion de la lumière dans la couche euphotique et au-delà, par exemple jusqu'à 1000 m.
- spectroradiométrie de l'absorption par les particules: discrimination entre les particules détritiques et les particules phytoplanctoniques (mesures *in vitro*).
- production primaire selon les techniques *in situ* (flacons inoculés suspendus sur une ligne dérivante) et *in situ* simulée (sur le pont avec simulation du régime lumineux et du régime thermique) par marquage au ¹⁴C et incorporation simultanée de l'azote et du carbone (marquage ¹⁵N/¹³C).

- paramètres de la courbe photosynthétique obtenus par incorporation rapide de ^{14}C (incubateurs artificiels à multiples compartiments). Discrimination entre les capacités photosynthétiques du pico- et du nano-plancton par filtration différentielle et cytométrie de flux.
- paramètres liés à la cinétique d'incorporation des nutriments (incubation) ainsi qu'à l'excrétion d'azote par la technique de dilution isotopique.
- étude physiologique de la cinétique de fluorescence et de ses liens avec la capacité photosynthétiques.
- analyses taxinomiques concernant le phytoplancton, les cyanobactéries, les bactéries hétérotrophes et analyses détaillées des pigments (cytométrie, HPLC, spectrofluorimétrie) permettant une approche biochimique de la structure des communautés.
- traits de filets pour l'estimation de la biomasse zooplanctonique.

Cet ensemble permettra d'analyser avec un détail suffisant les différents chaînons de l'activité photosynthétique: état physiologique, capacité d'absorption de l'énergie radiative, rendements quantiques de photosynthèse et de fluorescence, fractions nouvelles et régénérées.... Il fournira également les données d'entrée pour la modélisation. Les conditions de fermeture concernant la production nette de particules à la base de la couche euphotique seront fournies par l'analyse du matériel des pièges.

- des pièges dérivant sous la couche euphotique.
- des pièges fixes placés durant l'exécution de la campagne à des immersions faibles allant de 250 à 1000 m.

Obtention des paramètres relatifs aux flux dans la colonne d'eau (sous la couche euphotique)

Les composés les plus fragiles (N, P, composés soufrés, pigments, composés organiques) ne seront probablement accessibles qu'à partir des échantillons recueillis par les pièges dérivants ou les pièges fixes peu profonds travaillant à cadence rapide d'échantillonnage. A l'inverse, les éléments stables (Ca, Si, argiles, métaux tels Pb, Mn, Cr, Cd, Nd, Sr et autres traceurs isotopiques ou radionuclides), pour qui le problème de conservation ne se poserait pas, sont, du moins pour certains d'entre eux, très peu abondants. *A priori*, ce sont les échantillons provenant des pièges fixes laissés en place entre les campagnes qui, recueillant plus de matière, fourniront l'information valable.

Le nombre de pièges disponibles à l'époque d'exécution des campagnes n'est pas connu; aussi, la stratégie d'utilisation reste encore à définir et certains tests à poursuivre en 1989 dans le cadre de l'opération Dyfamed et des campagnes Medatlante. C'est dire qu'il serait aventureux de définir trop précisément la stratégie du déploiement à adopter; toutefois un dispositif "minimal" peut être imaginé:

- pour la couche superficielle, deux pièges dérivants réglés à la même immersion devraient être simultanément utilisés.
- pour instrumenter la colonne d'eau, il faut distinguer entre deux utilisations des mêmes pièges programmés différemment:
 - les pièges fixes, dans la gamme d'immersion 200 - 1000 m, mis en place durant la période d'exécution de la campagne (\approx 1 mois).
 - les pièges fixes, dans la gamme d'immersion 500 m - fond, mis en place durant la période séparant deux campagnes (\approx 5 mois).

Afin d'assurer l'instrumentation complète d'un site et une instrumentation restreinte d'un second, 25 pièges au moins sont nécessaires: 20 seraient disposés sur quatre mouillages formant un quadrilatère sur le site d'étude; une seule ligne avec quatre pièges permettrait d'instrumenter plus légèrement le second site. Il a déjà été dit que les moyens pour explorer la totalité de la colonne d'eau diffèrent peu de ceux mis en oeuvre pour la couche euphotique à quelques nuances près qu'il convient de préciser maintenant :

- les prélèvements de grands volumes sont indispensables, ce qui implique l'utilisation de bouteilles particulières garantissant la non-contamination: bouteilles métalliques pour la matière organique dissoute et particulaire et étude des biogéotraceurs organiques, bouteilles téflonnées pour l'étude des traces métalliques.
- les comptages de particules et filtrations *in situ* (dispositif POP du CFR).
- les traits de filet pour récolte des pelotes fécales.
- les traits de filet profond pour l'évaluation quantitative de la biomasse zooplanctonique; la migration nycthémerale pourrait être mise en évidence grâce aux techniques acoustiques mais également par utilisation du filet à nappes.

4 - Couverture par télédétection

L'apport des techniques satellitaires comporte deux aspects, échelonnés dans le temps: l'un durant la phase préparatoire à Eumeli, le second, opérationnel, durant la phase d'exécution des mesures à la mer.

Le premier aspect consiste essentiellement à évaluer la représentativité du site sélectionné vis-à-vis des situations "idéales" qu'on voudrait y rencontrer: l'oligotrophie, la mésotrophie et l'eutrophie permanentes. L'archive CZCS sera utilisée pour cette évaluation, ainsi que pour estimer l'ampleur de la variabilité saisonnière dans la mesure où elle subsisterait en dépit des choix faits pour l'éviter. Cette connaissance est indispensable pour la compréhension et l'interprétation des mesures qui seront pratiquées. Cette étude doit être entreprise dès maintenant.

Au voisinage du centre de remontée, l'apport vertical de nutriments qui gouverne la production nouvelle, a une signature thermique marquée. L'imagerie infra-rouge (AVHRR et canal 6 de CZCS) permet d'étudier ce phénomène, même si la quantification de l'écart thermique négatif en terme de flux de nutritif, puis de production nouvelle n'a pas encore été vraiment tentée; c'est une voie à explorer.

Durant la phase opérationnelle, il y avait jusqu'alors tout lieu de penser qu'aucun capteur "couleur de l'océan" ne serait encore satellisé. Les dernières

informations sont plus optimistes, le capteur Sea-Wifs devant voler en 1991 (puis Meris et Modis en 1995). De façon à utiliser au mieux cette information synoptique et répétitive, il est nécessaire de renforcer les études permettant de relier quantitativement les teneurs en pigments chlorophylliens au flux de carbone particulaire quittant la source superficielle.

Par contre, des suivis de la situation thermique et de l'apport solaire en surface seront possibles sans difficulté majeure (AVHRR/NOAA et Meteosat) et doivent absolument être exploités (Satmos). Il en va de même pour les données relatives au champ de vent qui devraient commencer à affluer (scattéromètre d'ERS-1 en 1990 et NSCAT en 1991, en principe). Pour revenir à un propos de l'introduction, c'est la voie "indirecte" qui sera actuellement privilégiée, dans l'attente de l'utilisation directe de la couleur de l'océan dans l'étude des flux de matière.

5 - Biomasse, processus biogéochimiques à l'interface eau-sédiment en relation avec les conditions hydrodynamiques et trophiques

Hydrodynamique

Les phénomènes dynamiques qui agissent sur les flux de matière sont l'advection et la diffusion. Les échanges auprès de l'interface, soumis aux remises en suspension, ne peuvent être étudiés sans mesures dynamiques **simultanées**. Par ailleurs, les flux de particules dans la couche profonde sont affectés par la présence d'une **couche néphéloïde** plus ou moins épaisse et plus ou moins intense. La notion de variabilité de ces facteurs est très importante.

⇒⇒ Néphélométrie, courantométrie, photographies et profils de température de 50 cm à 120 m au dessus du fond, obtenus de façon simultanée à partir de mouillage de modules autonomes de longue durée (6 à 9 mois). Structure hydrologique et néphélométrie de la couche profonde à partir de la bathysonde 0-6000 m IFREMER: CTD, oxygène dissous, néphélométrie.

Biogéochimie du sédiment et des particules près du fond

Pour la composition et la concentration des différents composés biogéochimiques du sédiment et des particules récoltées dans des pièges, l'approche quantitative est primordiale. Afin d'obtenir des données représentatives d'une région, la variabilité spatiale doit être testée mais il est, également, indispensable de suivre l'évolution des ces mêmes paramètres dans la colonne d'eau. Des études comparables des trois zones sont souhaitables même si l'effort principal porte sur le site oligotrophe.

⇒⇒ Carottier multi-tubes et IGBA, pièges à particules dont un à la limite de la couche néphéloïde, bouteilles de grand volume.
(Opérations liées à celles menées sur la colonne d'eau).

Structure des peuplements benthiques

Biomasse et structure spatiale de la faune benthique

Certaines caractéristiques quantitatives des peuplements doivent être analysées. Il est nécessaire d'évaluer la densité et la biomasse des diverses catégories dimensionnelles de la faune (bactéries, méiofaune, macrofaune et mégafaune) et de caractériser les groupes trophiques dominants en tenant compte des données

zoologiques. Pour la biomasse, il sera difficile d'échantillonner de manière appropriée les variations temporelles de la biomasse de la méiofaune et de la macrofaune. Ceci sera, par contre, tenté pour la mégafaune en comparant les prospections avec l'Epaulard lors d'Eumeli 2 et avec le Nautile lors d'Eumeli 7.

⇒⇒ Plongées Epaulard (réseau de 4 profils) et autres systèmes photo-vidéo, carottages type Usnel (10 à 15 carottages par zone).

Biomasse et distribution des carnivores nécrophages dans la couche néphéloïde

Il faut souligner qu'une des composantes originales de l'écosystème abyssal est la communauté des carnivores nécrophages nageurs (crustacés amphipodes et poissons) qui correspond à une biomasse importante. Par ses migrations, elle assure un transfert d'énergie du fond vers la colonne d'eau et contribue par son activité (alimentation, féces, carcasses) au flux de matière dans la colonne d'eau et à l'interface.

⇒⇒ Mouillages autonomes de nasses et de systèmes photo-vidéo avec appât.

Processus benthiques

Etudes expérimentales de la dégradation de la matière organique

Les flux de matière organique à l'interface sont directement tributaires de la qualité de la matière organique et de l'activité biologique à ce niveau. L'influence de facteurs de l'environnement tels que courant de fond, nature du sédiment, conditions physiques et chimiques, bioturbation est susceptible d'apporter des modifications du schéma d'origine. L'étude des transformations subies par la matière organique au niveau du fond et sa distribution dans les différents compartiments de cette interface nécessite différentes approches expérimentales. A l'encontre d'une théorie qui admet que les processus de dégradation sont très lents en milieu abyssal, certaines mesures (par exemple dans la zone-atelier du Golfe de Gascogne) tendent à prouver l'utilisation rapide de matériel particulaire qui atteint le fond, notamment après les floraisons planctoniques de surface:

- quels organismes utilisent cette matière organique?
- à quelle vitesse est-elle utilisée?
- quel est le taux de consommation?

Les expériences proposées se dérouleront principalement *in situ* même si certaines approches *in situ* simulé sont envisagées:

⇒⇒ dégradation à long terme (six mois) à partir de modules de colonisation.

⇒⇒ dégradation à court terme (quelques jours) à partir d'incubation *in situ* simulé et *in situ* avec des carottiers à injection manoeuvrés à partir de submersibles ou un carottier autonome à incubation.

Seront ainsi suivies:

- la cinétique de dégradation des différents composés, notamment des composés réfractaires tels que les dérivés de la lignine et les substances humiques.
- l'activité bactérienne hétérotrophique (¹⁴C-glucose, ¹⁴C-glutamate).

⇒⇒ dégradation de la matière organique dans la couche néphéloïde à partir de cellules à parois filtrantes.

Rôle des organismes dans la mobilisation et la transformation de la matière organique

Les interactions entre les flux de matière et la faune benthique peuvent être abordées à différentes échelles de temps en tenant compte du métabolisme des organismes. Sur certaines espèces dominantes et appartenant à la catégorie de la mégafaune, l'énergie mobilisée sera quantifiée à partir de la respiration (bilan à l'échelle de l'heure), de la nutrition (à l'échelle de quelques jours) et de la reproduction (à l'échelle de quelques mois), de la durée de vie des organismes.

⇒⇒ transfert ce carbone organique au niveau de la méiofaune par utilisation des sources trophiques potentielles marquées au ^{14}C : diatomées, fèces, glucose, glutamate.

⇒⇒ processus de nutrition sur quelques groupes de la mégafaune: récolte par chalutage puis expérimentation à bord en enceintes pressurisées, utilisation de nasses de marquage, approche expérimentale *in situ* lors de la campagne de plongée.

Respiration

Une approche globale permettant d'évaluer la consommation d'oxygène, le cycle du CO_2 et de certains éléments dissous est indispensable. La nécessité de réaliser des prélèvements séquentiels d'eau *in situ* avec une chambre benthique implique des collaborations, notamment avec des équipes américaines dotées et habituées à utiliser ce type de matériel.

Annexe 1

Personnel affecté à la réalisation de l'opération

Cette liste, qui évoluera notablement au cours du temps, est constituée de l'ensemble des chercheurs sur poste qui se sont engagés dès l'origine à participer au programme Eumeli. Les thèmes indiqués représentent leur principal champ d'activité.

Modélisation

V. Andersen (CNRS, SZV, Villefranche)
H. Le Treut (CNRS, LMD, Paris)
J.-F. Minster (CNRS, MOUETTE, Toulouse)
A. Morel (Professeur, LPCM, Villefranche)
P. Nival (Professeur, SZV, Villefranche)
J.-Y. Simonot (LODYC, Paris)

Phytoplancton (identification, triage, fluorescence)

D. Vault (CNRS, Roscoff)
C. Courties (CNRS, Roscoff)
H. Jupin (Professeur, Perpignan)
J. Neveux (CNRS, Arago, Banyuls)
L. Lazzara (Université Florence)

Phytoplancton (production primaire, mécanismes et paramètres photosynthétiques)

G. Jacques (CNRS, Arago, Banyuls)
C. Descolas-Gros (CNRS, Arago, Banyuls)
M. Panouse (CNRS, Arago, Banyuls)
M. Fiala (CNRS, Arago, Banyuls)
J. Gostan (CNRS, SZV, Villefranche)
M. Denis (CNRS, COM, Marseille)
H.-J. Minas (CNRS, COM, Marseille)
M. Minas (CNRS, COM, Marseille)
Le Bouteiller (ORSTOM, Nouméa)
Y. Dandonneau (ORSTOM, Nouméa)
Y. Collos (CNRS, CREMA, l'Houmeau)

Bio-optique, optique

A. Bricaud (CNRS, LPCM, Villefranche)
C. Dupouy (ORSTOM, Nouméa)

Physique

P. Hisard (ORSTOM)
V. Radenac (ORSTOM)
A. Vangiesheim (IFREMER, DERO/EP)

Assimilation/régénération azote/nutritifs

B. Coste (CNRS, COM, Marseille)
P. Le Corre (MC, Brest)
P. Raimbault (CNRS, COM, Marseille)
G. Slawyk (CNRS, COM, Marseille)

CO₂, DOC/POC/DON/PON

C. Copin (CNRS, LPCM, Villefranche)
G. Copin (MC, LPCM, Villefranche)
C. Andrie (ORSTOM, LODYC, Paris)
C. Oudot (ORSTOM, Dakar)

Silicium

P. Treguer (MC, Brest)

Composés soufrés

S. Belviso (CNRS, CFR, Gif-sur-Yvette)
B.- C. Nguyen (CNRS, CFR, Gif-sur-Yvette)

Hétérotrophes, bactéries, microzooplancton, broutage

M. Colon (ORSTOM, Thonon)
P. Dufour (ORSTOM, Thonon)
J.-P. Torreton (ORSTOM, Abidjan)
F. Rassoulzadegan (CNRS, SZV, Villefranche)
G. Gorsky (CNRS, SZV, Villefranche)
J. Garnier (ENS, Paris)
D. Fontvieille (Université Savoie)
P. Lavandier (Université P. Sabatier)
A. Bianchi (CNRS, Ecologie Microbienne, Marseille)
M. Bianchi (CNRS, Ecologie Microbienne, Marseille)
R. Daumas (CNRS, Ecologie Microbienne, Marseille)

Ecologie mathématique, écho- sondeur multifréquence

F. Ibanez (MC, SZV, Villefranche)
S. Dallot (MC, SZV, Villefranche)
M. Etienne (CNRS, SZV, Villefranche)

Zooplancton, micronecton

M. Pagano (ORSTOM, Marseille)
J. Cuzin (CNRS, SZV, Villefranche)
J. Sardou (MC, SZV, Villefranche)
P. Geistdoerfer (CNRS, Muséum, Paris)

Métaux, radionuclides, relation avec C-N/Particules, traceurs

C. Jeandel (CNRS, MOUETTE, Toulouse)
F. Grousset (CNRS, MOUETTE, Toulouse)
J.-P. Bethoux (CNRS, LPCM, Villefranche)
P. Courau (CNRS, LPCM, Villefranche)
E. Nicolas (CNRS, LPCM, Villefranche)
J.- L. Reyss (CNRS, CFR, Gif-sur-Yvette)
P. Buat-Ménard (CNRS, CFR, Gif-sur-Yvette)
C. Lambert (CNRS, CFR, Gif-sur-Yvette)
S. Fowler (AIEA, Monaco)
M. Heyraud (AIEA, Monaco)
J.-C. Miquel (AIEA, Monaco)
J. La Rosa (AIEA, Monaco)
G. Bergametti (LPCA, Paris)
D. Cossa (IFREMER)

Matières organiques

J.-C. Marty (CNRS, LPCM, Villefranche)
A. Saliot (Professeur, LPCM, Paris)
P. Scribe (CNRS, LPCM, Paris)

J. Laureillard	(CNRS, Paris)
J. Dagaut	(CNRS, Paris)
J.-C. Relexans	(MC, IGBA, Bordeaux)
P. Alberic	(MC, Orléans)

Processus benthiques

G. Auffret	(IFREMER DERO/GM) + collaboration IGBA
D. Desbruyères	(IFREMER DERO/EP)
A. Kripounoff	(IFREMER DERO/EP)
L. Laubier	(IFREMER DERO/EP)
M. Sibuet	(IFREMER DERO/EP) + collaboration Rowe (USA)
A. Vangriesheim	(IFREMER DERO/EP)
G. Cahet	(Paris VI, Arago, Banyuls)
F. de Bovée	(CNRS, Arago, Banyuls)
J. P. Féral	(CNRS, Arago, Banyuls)
L. Guidi	(CNRS, Arago, Banyuls)
A. Guille	(Paris VI, Arago, Banyuls)
J. Soyer	(Paris VI, Arago, Banyuls)
A. Dinét	(CNRS, Arago, Banyuls)
R. Daumas	(CNRS, Ecologie Microbienne, Marseille)
S. Charmasson	(CEA)
P. Geistdoerfer	(CNRS, MNHN, Paris)

Annexe 2

Fiches concernant les quatre principaux types de campagnes

Les fiches suivantes présentent succinctement les quatre types de campagnes de l'opération Eumeli:

- Eumeli 1 pour la reconnaissance sédimentologique des zones eu-, méso- et oligo-trophe.
- Eumeli 2 principalement consacrée aux études descriptives et expérimentales sur le benthos et l'interface eau-sédiment.
- Eumeli 3 (de même que Eumeli 4 et Eumeli 5) focalisée sur la description et l'étude des mécanismes au sein de la couche euphotique et dans la colonne d'eau.
- Eumeli 6 à dominance benthique et utilisant le Nautille pour des observations et de l'expérimentation *in situ*.

Objectifs

Le programme Eumeli se propose, parmi divers objectifs, de tenter une modélisation de l'ensemble d'un système écologique soumis *a priori* à différents régimes de la production primaire. Ainsi, il est envisagé de mettre en relation l'importance des flux verticaux et les caractéristiques de la biomasse dans les trois zones eutrophe, mésotrophe et oligotrophe. Pour atteindre un tel objectif, il faut implanter les stations d'observations là où le substrat reflète un équilibre, à l'échelle du millénaire, entre les apports sédimentaires et nutritifs et la distribution des peuplements benthiques.

Cette contrainte implique une reconnaissance de sites présumés stables, à l'exception du site eutrophe, situé par nature au niveau de la pente continentale. En effet, ici les phénomènes d'instabilité sont la règle et seul un levé détaillé permettra éventuellement de localiser une zone relativement stable.

Stratégie

La zone-type pourrait être un rectangle de 21 km x 15 km. La durée nécessaire à cette reconnaissance à l'aide du SAR, remorqué à la vitesse de 2 m. s⁻¹ et couvrant à chaque passage un couloir de 1 km de large, est de 45 heures. Il faut ajouter à ce temps une durée équivalente pour les manoeuvres de mise à l'eau, de récupération et les virages; il est donc nécessaire de prévoir 4 jours pour un levé. Il faut également prévoir une journée par station pour des travaux annexes: carottages Küllenberg et Usnel et étalonnage des images du SAR. Une partie de l'implantation des stations d'observation ou de mesures pourra être faite, au cours des campagnes suivantes, d'après une carte au 1/20 000° des zones reconnues. Les pièges à sédiment devraient être déposés dès Eumeli 1.

Suite logique de cette première partie de la campagne, une seconde partie permettra de localiser, sur les sites explorés d'une superficie de 21 x 15 km, une zone de 10 km x 10 km (ou plus réduite) qui constituera la zone d'investigation proprement dite. Cette dernière fera l'objet de travaux portant sur la reconnaissance de l'abondance et de la nature de la biomasse benthique. L'estimation de la biomasse et de la densité pour toutes les catégories dimensionnelles de la faune benthique et épibenthique nécessite différentes recherches sur la micro-, la macro- et la mégafaune. L'exigence de nombreux replicats conduit à rechercher l'information dans les stations explorées au cours de la première partie de Eumeli 1.

Chaque station sera délimitée par un champ de trois balises acoustiques espacées de 6 km, permettant de positionner les prélèvements benthiques.

Reconnaissance sédimentologique des sites

⇒⇒ Montagne sous-marine oligotrophe	4 jours SAR + Sea-Beam 1 jour prélèvements	5 jours
⇒⇒ Plaine abyssale au pied de la montagne	1 jour SAR 1 jour prélèvements	2 jours
⇒⇒ Pente continentale zone mésotrophe	4 jours SAR + Sea-Beam 1 jour prélèvements	5 jours
⇒⇒ Pente continentale zone eutrophe	4 jours SAR + Sea-Beam 1 jour prélèvements	5 jours

Opérations benthiques par station

(1) Prélèvements au carottier de surface 0,25 m² type Usnel. Une série de six prélèvements est prévue pour :

- l'étude de la biochimie du sédiment:
- teneur en glucides, protides, lipides et de leurs fractions dissoutes, labile et hydrolysable.

- valeur calorimétrique des différentes fractions assimilables de la matière organique au niveau du sédiment.
 - évaluation de l'activité bactérienne et de ses potentialités enzymatiques.
 - étude qualitative et quantitative de la méiofaune.
 - étude quantitative de la macrofaune et des relations trophiques et énergétiques.
- (2) Prises de vue près du fond
Deux séries de prises de vues à l' Epaulard sont prévues pour l'étude quantitative de la mégafaune ainsi que l'analyse des traces et terriers dus à la bioturbation.

Soit une campagne d'un minimum de 30 jours dont 22 jours de travail sur zone et 8 jours de transit

Objectifs

Eumeli 2 constitue un élément de l'ensemble de l'opération Eumeli du Programme Flux Océaniques. Eumeli vise à déterminer, dans un océan tropical, le flux de carbone à chacune de ses étapes, depuis sa naissance dans la couche euphotique jusqu'à son enfouissement dans le sédiment. Eumeli 2 sera la première campagne consacrée aux transferts de matière et d'énergie dans les profondeurs et à leur utilisation, notamment biologique, à l'interface eau-sédiment. Trois facteurs sont connus pour contrôler ce flux en zone abyssale: la profondeur, la productivité de surface et la distance à la côte. Le schéma classique envisageait un flux lent et stable dans le temps des éléments produits dans la couche euphotique, plus ou moins dégradés et transformés, soit par l'action des microorganismes, soit encore par les consommateurs primaires, ce qui impliquait une grande stabilité des processus géochimiques et biologiques. Les travaux récents, développés à partir de pièges à particules, ont montré qu'en fait ces flux étaient à la fois rapides et saisonniers; aussi, était-il raisonnable de penser que les activités biologiques répondaient à ces apports impulsionsnels.

L'acquis scientifique des groupes Ecoprophyce et Ecomarge permet d'aborder, dans le cadre d'Eumeli, les thèmes suivants:

- instabilité, variabilités spatiale et temporelle au niveau de l'environnement, de la structure des peuplements et des cycles biologiques.
- processus biogéochimiques de dégradation de la matière organique et rôle des peuplements benthiques dans la transformation des particules qui sédimentent.
- estimation globale des flux benthiques: bilan, dynamique, modélisation.

Stratégie

Eumeli 2 se consacrera à l'interface océan-sédiment, comprenant:

- la couche d'eau contrainte par les processus à l'interface, ou couche néphéloïde.
- la couche superficielle du sédiment (interface eau-sédiment proprement dite).
- les premiers centimètres du sédiment.

Eumeli 2 doit également assurer les opérations de relevé-déploiement des mouillages à long terme, l'expérimentation sur le fonctionnement de l'écosystème abyssal du site oligotrophe et une surveillance des paramètres majeurs du système pélagique.

La campagne, qui comportera deux parties, permettra de réaliser les opérations suivantes:

⇒⇒	Mise en place du champ de balises acoustiques	1 j.
⇒⇒	Plongées de l'Epaulard sur les 3 sites	6 j.
⇒⇒	Réseau de 15 à 20 stations bathysonde 0-6000 m sur des zones de 30x30 milles sur chacun des 3 sites	8 j.
⇒⇒	Mouillages à long terme d'engins autonomes sur le site oligotrophe	1,5 j.
⇒⇒	Mouillage-récupération de nasses, respiromètre et module expérimental	9 j.
⇒⇒	Prélèvements avec carottiers Usnel et multitubes, chalutages et traits de filets à plancton	9 j.
⇒⇒	Programme pélagique	3 j.

Soit une campagne d'environ 50 jours dont 38 jours de travail sur zone et 12 jours de transit

Méthodes

Pour caractériser l'environnement benthique des trois zones eu-, méso- et oligotrophe, il est nécessaire de rechercher, pour chaque type de phénomène physique, sédimentologique, chimique et biologique quels sont les degrés de variabilité dans l'espace et dans le temps, d'où un large spectre méthodologique:

Hydrodynamique

Mesures de la variabilité des courants et des caractéristiques de la couche néphéloïde en relation avec les masses d'eau.

Mouillages de modules autonomes pluridisciplinaires pour des durées de près de six mois.

Biogéochimie du sédiment et des particules près du fond

Composition et concentration des différentes composantes biogéochimiques du sédiment, des particules de la couche néphéloïde et de celles récoltées dans les pièges profonds:

- carottier multitubes.
- pièges à particules profonds.
- prélèvements par bouteille de grand volume.

Structure des peuplements benthiques

Evolution de la densité des diverses catégories dimensionnelles en caractérisant les groupes trophiques dominants:

- plongées de l'Epaulard et d'autres systèmes photo-vidéo.
- prélèvements par chaluts et carottier Usnel.
- mouillage de nasses à appâts équipées de systèmes photo-vidéo (carnivores nécrophages de la couche néphéloïde).

Processus benthiques

Etudes expérimentales (dégradation de la matière organique, rôle des microorganismes, activité respiratoire) couplées à des mesures de base de certaines activités telle que le taux de sédimentation, les indicateurs chimiques, les pigments chlorophylliens, les radiotraceurs:

- expérimentation (assimilation de substrats marqués) sur les échantillons de sédiments remontés à la surface et incubés à la température de l'eau de fond sous 1 atmosphère.
- expérimentation *in situ* avec le carottier multitubes équipé d'un système d'injection (ou avec une chambre benthique si celle-ci est développée à temps).
- dégradation à long terme de la matière organique à partir du Module de Colonisation.
- dégradation à court terme de la matière organique dans la couche néphéloïde à partir de cellules à paroi filtrante.
- marquages *in situ* du sédiment.

Objectifs

Eumeli 3 constitue un élément de l'ensemble de l'opération Eumeli du Programme Flux Océaniques. Son objectif est de déterminer, dans un océan tropical, le flux de carbone à chacune de ses étapes, depuis sa naissance dans la couche euphotique jusqu'à son enfouissement dans le sédiment. Eumeli 3 sera la première campagne de la série à dominante pélagique et se focalisera particulièrement sur le site oligotrophe, marquant ainsi l'intérêt de ce type de zone dans l'établissement des bilans globaux du cycle du carbone et des éléments biogènes associés. Couvrant près de 80% de l'océan mondial, ces régions oligotrophes demeurent encore peu connues, la simple estimation de leur production primaire, point de départ du flux de matière, étant encore un sujet de controverse.

Cependant, Eumeli 3 assure également la continuité du programme qui aura débuté par la campagne Eumeli 1 (1989), consacrée à la reconnaissance géologique et écologique des sites eutrophe, mésotrophe et oligotrophe et se sera poursuivi par Eumeli 2 (printemps 1990) centrée sur l'étude de l'écosystème benthique et de l'interface eau-sédiment. Aussi, à côté des aspects dominants précités, Eumeli 3 devra assurer:

- le suivi saisonnier du flux de particules par les pièges fixes: d'où une opération de relevé-prélèvement-remise à l'eau des lignes de mouillage des sites oligo- et mésotrophe, six mois après leur mise en place.
- la continuité des observations sur le fonctionnement de l'écosystème benthique abyssal du site oligotrophe et de son environnement physico-chimique: relevé-mouillage des divers modules expérimentaux, mesures métaboliques à court-terme (enceintes de marquage et chambres benthiques).
- étude légère du site mésotrophe, aussi bien pour le fonctionnement du système de production de la couche éclairée que pour le système de régénération des premiers mille mètres.

Stratégie

De façon à identifier et décrire rouages et engrenages, puis modéliser les processus élémentaires impliqués et, enfin, coupler les modèles, Eumeli implique une étude simultanée des compartiments qui s'étagent selon la verticale: la couche euphotique, la colonne d'eau, la couche benthique et le sédiment superficiel. L'approche multiple (description fine - expérimentation *in situ* - expérimentation à bord sur les processus) ainsi que les opérations logistiques impliquent un tel nombre de spécialistes que nous proposons trois parties lors d'Eumeli 3:

- la première, rapide et effectuée avec une douzaine de personnes, pour les opérations de relevé-mouillage des divers modules expérimentaux et les mesures métaboliques à court-terme sur l'écosystème benthique abyssal des sites oligotrophe et mésotrophe.
- la seconde mettra l'accent sur la couche euphotique (production primaire) et ses frontières avec l'atmosphère et la couche sous-jacente.
- la troisième étudiera les processus chimiques et biologiques (réseau microbien, zooplancton) dans la couche aphotique.

Leg 1 Logistique des pièges et expérimentation benthique

Site oligotrophe

- ⇒⇒ Relevé-mouillage des pièges fixes.
- ⇒⇒ Relevé-mouillage du Module Autonome Pluridisciplinaire.
et du Module de Colonisation.
- ⇒⇒ Expérimentation benthique à court-terme.
- ⇒⇒ Description rapide de la structure pélagique.

3 j.

- Site mésotrophe**
- ⇒⇒ Relevé-mouillage pièges fixes et Module de Colonisation. 2,5 j.
 - ⇒⇒ Expérimentation benthique à court-terme.
 - ⇒⇒ Description rapide de la structure pélagique.

- Site eutrophe**
- ⇒⇒ Relevé-mouillage du Module de Colonisation. 0.5 j.

Leg 2 Couche euphotique

- Site oligotrophe**
- ⇒⇒ Analyse descriptive par profils verticaux (SHET, profileur de courants) d' une zone de 50 x 50 milles autour du site 3 j.
 - ⇒⇒ Programme expérimental sur les processus dominants (paramètres de photosynthèse, broutage, assimilation sels nutritifs, métabolisme microbien) par deux suivis de longue durée d' un piège dérivant: 2 x 6 j. 12 j.

- Site mésotrophe**
- ⇒⇒ Analyse descriptive et programme expérimental léger. 3 j.

Leg 3 Colonne d' eau (au-delà de la thermocline saisonnière)

- Site oligotrophe**
- ⇒⇒ Etude descriptive et expérimentale (chimie traceurs, réseau microbien, zooplancton). 12 j.

- Site mésotrophe**
- ⇒⇒ Etude descriptive et expérimentale (chimie traceurs, réseau microbien, zooplancton). 3 j.

Soit une campagne d'environ 60 jours dont 42 jours de travail sur zone 18 jours de transit

Méthodes

L' opération Eumeli représente le prototype de l' approche pluridisciplinaire faisant appel à la plupart des techniques de l' océanographie. En effet, si la chimie et la biologie sont au coeur de l' étude des flux, Eumeli implique également des études en océanographie physique (bathysonde, courantomètres, profileur de courants), en optique (quantamètre, diffusiomètre, spectro-irradiancemètre) et en géologie (carottages). Dans les deux disciplines centrales, l' approche sera très complète:

- en chimie: sels nutritifs, matière organique dissoute et particulaire, métaux, traceurs radioactifs.
- en biologie: phytoplancton et production primaire, classes de taille par cytométrie de flux, métabolisme et migrations du zooplancton, microbiologie, fonctionnement de l' écosystème abyssal, rôle des poissons pélagiques et des migrants abyssaux.

D' autre part, Eumeli vise à une modélisation complexe qui implique un niveau de précision élevé dans la description des processus élémentaires mis en jeu à l' intérieur de chacune des "boîtes": couche euphotique, colonne d' eau, couche benthique et sédiments superficiels. Cette approche nécessite un programme expérimental développé afin de paramétrer les processus: paramètres physiologiques de la photosynthèse et du broutage, cinétiques d' assimilation des sels nutritifs, photosynthèse et chimiosynthèse, vitesses d' incorporation des molécules organiques par les organismes benthiques, rôle respectif des biophages et des saprophages etc.....

(1) Moyens communs mobiles

- Navigation intégrée (satellite, Loran C) pour la recherche des lignes de mouillage (cette recherche sera facilitée si les lignes sont équipées de balises Argos) et le suivi, pendant plusieurs jours, d' un piège dérivant subsuperficiel (200 m) du type Vertex équipé d' un radio-flash.
- conteneur "propre" pour la chimie.
- conteneur "propre" pour la production primaire.
- au moins 2 lignes de mouillages avec pièges à particules, courantographes, largueurs etc....

(2) Equipements

- bathysonde 0-6000 m+ rosette de bouteilles Go-Flo+ néphélomètre.
- profileur de courants.
- sondes optiques: quanta-mètre, spectro-irradiancemètre, diffusionmètre intégrateur.
- pompe POP pour filtration *in situ* de grands volumes.
- filet à nappes.
- chalut pélagique Isaac-Kid.
- chaînes d'analyse automatiques dont 2 pour analyses nanomolaires des formes azotées.
- spectrofluorimètre et fluorimètre.
- cytomètre de flux.
- incubateurs lumière - production régulés.
- compteur à scintillation.
- chromatographe liquide haute précision.
- analyseur C et N organique dissous.

= NautEumeli (Eumeli utilisant le Nautille)**Objectifs**

La principale source d'énergie arrivant sur le fond est le flux de matière organique particulaire qui quitte l'océan superficiel pour alimenter la surface du sédiment. Le devenir de cette matière organique qui sédimente est encore mal défini:

- quelle part prennent les différentes catégories animales dans le recyclage de cette matière organique?
- quel est le siège de la dégradation biologique du carbone? est-ce la couche limite benthique, l'interface eau-sédiment, les dix premiers centimètres du sédiment qui jouent le rôle majeur?
- quelle est la vitesse de renouvellement de la matière organique à la surface du sédiment?

Les mesures réalisées par des mouillages peuvent apporter des éléments de réponse, mais elles ont l'inconvénient d'être effectuées "en aveugle". Ainsi, le dépôt superficiel à l'interface eau-sédiment est délicat et difficile à prélever par un carottage effectué depuis le bord du bateau car l'engin arrivant brusquement sur le fond provoque un effet de chasse qui prive le prélèvement de ce film superficiel et souvent également de la petite faune épigée. L'utilisation de préleveurs automatiques actionnés par le submersible évite cet inconvénient et le contrôle visuel permet, en outre, d'estimer la fiabilité des résultats obtenus.

Le devenir de la matière organique qui sédimente dépend également de l'activité benthique de la faune. L'étude de la bioturbation se fait par le dépôt en surface de traceurs inertes dont on suit le déplacement dans le sédiment au cours du temps. Cette expérimentation nécessitant le retour sur le site exact du traçage après quelques jours, voire quelques semaines, pour effectuer des carottages; elle requiert donc l'utilisation d'un submersible.

L'évaluation de la vitesse et de l'importance de la transformation de la matière organique dans le tube digestif d'invertébrés suspensivores ou détritivores s'effectue sur des animaux sessiles ou peu mobiles qu'il serait statistiquement improbable de rencontrer avec un engin autonome "en aveugle" et que l'expérimentation *in situ* maintient dans des conditions physico-chimiques viables.

Le choix des points de prélèvements par contrôle de la topographie du fond, la possibilité d'observer des organismes de grande taille qui échappent à beaucoup de moyens de prélèvements autonomes constituent autant d'arguments supplémentaires qui justifient le bien fondé d'une campagne avec un submersible. De plus, un emploi du temps judicieusement établi lié à l'utilisation d'un dispositif "porte-modules" (ascenseur), permettra la réalisation simultanée de plusieurs études en relation avec les différents maillons de la chaîne alimentaire.

Méthodes

Les processus biologiques, biogéochimiques et sédimentologiques seront abordés avec une stratégie similaire à celle utilisée, pour la première fois, lors des campagnes Biocyan. Toutefois, ce programme devra bénéficier d'une approche comparée en milieu littoral pour définir l'expérimentation et valoriser l'utilisation d'un submersible pour l'étude de processus, notamment le métabolisme de la nutrition et de la respiration de certains invertébrés dominants.

L'outillage submersible a été développé depuis 1982 et comprend maintenant un nouveau système d'aspirateur à barillet, les carottiers à injection et un dispositif d'injection équipant le bras du submersible, des carottiers tubes, des bouteilles à injection et un ascenseur autonome permettant la mise à disposition types d'instrumentations.

(1) Moyens communs mobiles

- submersible Nautille.

- navigation acoustique avec un champ de 4 balises.
- balise pour marquer la zone permanente nécessaire pour un positionnement à long terme du champ d'expérimentation.
- ascenseur autonome protégeant les divers instruments à transporter au fond et à ramener avec le minimum de perturbation.
- si possible, conteneur laboratoire supplémentaire sur la plage arrière.

(2) Equipements

- aspirateur simple et à barillet, avec système adapté au prélèvement particules.
- système d'injection grand volume.
- carottiers tubes (2 diamètres) avec 60 tubes environ.
- quatre carottiers à lames à injection.
- modules d'injection: six de 60 ml, quatre de 2 litres.
- bouteille à injection.
- enceintes de marquage (divers modèles suivant type d'expérience avec traceurs dissous ou particulaires).
- boîtes de prélèvement.
- cerceau avec dispositif d'injection.
- nasses.

Liste de documents sur l'étude des flux

ECOMARGE (France)

- Colloque international d'Océanologie. ECOSystèmes de MARGES continentales, Perpignan, 23-26 juin 1987. CIESM, 1987: 96 p.

FMO (France)

- Programme F.M.O "Flux de Matière dans les Océans (1986-1991): 67 p.
- Mesure de la "production primaire" dans le cadre du projet Flux de Matière dans l'Océan. Séminaire, Paris, décembre 1985: 26 p.
- Rapport technique "Exercice d'intercomparaison de deux trappes à sédiments en Méditerranée. Avril - Juin 1987", 1988: 20 p.

FRONTAL

- Techniques et stratégie d'échantillonnage en zones frontales. Table ronde, Marseille-Luminy, septembre 1988, 1988: 22 p.
- Echelles spatio-temporelles pour les phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans les zones frontales, Paris le 2 mars 1988, 1988: 17 p.

PFO (France)

- Journées "Production primaire en milieu oligotrophe". Marseille, 2 - 3 juin 1988. Le Courrier de Mediproduct n° 5 et PFO, Rapport n° 1, 1988: 80 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Eumeli. Flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe. PFO, Rapport n° 2, 1989: 38 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Antares. Flux de matière dans l'Océan Austral. PFO, Rapport n° 3, 1989: 23 p.
- Programme Flux Océaniques. Fondements, Objectifs, Calendrier, Moyens et Organisation. PFO, Rapport n° 4, 1989: 21 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Eumeli. Flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe. PFO, Rapport n° 2, 2^{ème} éd., 1989: 39 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Frontal. Interactions physiques, chimiques et biologiques dans les fronts océaniques. PFO, Rapport n° 5, 1989: 28 p.

JGOFS (International soutenu par le SCOR)

- The Joint Global Ocean Flux Study: Background, goals, organization, and next steps. Report of the International Scientific Planning and Coordination Meeting for the Global Ocean Flux Studies, sponsored by SCOR. Paris, 17-19 February 1987. SCOR, 1987: 42 p.
- The Joint Global Ocean Flux Study : North Atlantic Planning Workshop. Paris, 7-11 September 1987. SCOR, 1987: 133 p.
- Report of the first Session of the SCOR Committee for the Joint Global Ocean Flux Study. Miami, 25-28 January 1988. SCOR, 1988: 50 p.
- Report of the First Meeting of the JGOFS Pilot Study Cruise Coordinating Committee. Plymouth, 13-15 April 1988. SCOR, 1988: 23 p.
- Report of the Second Meeting of the JGOFS Pilot Study Cruise Coordinating Committee. Den Haag, 16-17 September 1988. SCOR, 1988: 23 p.
- Report of the JGOFS Working Group on Data Management. Bedford Institute of Oceanography, 27-28 September, 1988. SCOR, 1988: 31 p.

- Report of the Third Meeting of the JGOFS Pilot Study Cruise Coordinating Committee. Moss Landing, 3 December 1988. SCOR, 1988: 17 p.

USGOFS (U.S.A)

- A global Ocean flux study. J. H. Steele, 1984, *Eos*, 4: 683-684.
- Global Ocean Flux Study. Proceedings of a Workshop. *Nat. Acad. Press*, Washington D. C., 1984: 360 p.
- U.S. GOFS. Report 1, 1986: 98 p.
- U.S. GOFS. Report 2, 1986: 52 p.
- U.S. GOFS. Report 3, 1986: 141 p.
- U.S. GOFS. Report 4. Modeling in GOFS, 1987: 142 p.
- U.S. GOFS. Report 5. Benthic studies in GOFS, 1987: 149 p.
- U.S. GOFS. Report 6. Ocean margins in GOFS, 1987: 245 p.
- U.S. GOFS. Overview. Towards a science plan for GOFS: program elements, priorities and planning, 1987: 19 p.
- U.S. GOFS. Report 7. Upper ocean processes, 1988: 88 p.
- U.S. GOFS. Report 8. Data management, 1988: 52 p.
- U.S. GOFS. Report 9. Pacific planning report, 1988: 192 p.

DIVERS

- Particulate biogeochemical processes. Report of SCOR Working Group 71, July 1988: 44 p.
- Earth system science. A program for global change. NASA, Washington D.C., 1988.
- Particle flux in the ocean. Proceedings of a workshop held at the Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey, 23-28 June 1986. E.T. Degens, E. Izdar & S. Honjo eds. *Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, 1987: 308 p.