

CAMPAGNE PACIPROD :
PRODUCTION DES UPWELLINGS COTIERS (PEROU)
ET EQUATORIAUX (ZONES DES ILES DES GALAPAGOS)

H.J. Minas (1)*, B. Coste (1)**,

Participants: André J.M. (2), Braconnot J.C. (3), Bricaud-Wehrlin A. (2), Brunet C. (4), Copin-Montégut C. (2), Germanique J.C. (2), Gostan J. (3), Goy J. (5), Goyet C. (4), L'Helguen S. (6), Louis F. (2), Marty Y. (6), Minas M. (1), Morel A. (2), Morin P. (6), Poisson A. (4), Raimbault P. (1), Rodier M. (1), Ruis Pino D. (4), Schauer B. (4), Slawyk G. (1), Taillez D. (2), Waser N. (4).

La campagne PACIPROD du N.O. Jean Charcot (8 août - 18 septembre 1986) avait pour but principal l'étude de la production pélagique dans les zones d'upwelling du Pacifique tropical oriental. La campagne s'est déroulée en deux parties:

Durant la première partie (Fi. 1A) l'upwelling côtier du Pérou a été prospecté au niveau d'une zone située à 15°S.

Durant la seconde partie (Fig. 1B) les études ont porté sur l'upwelling des Iles Galapagos, remontée d'eau faisant partie de la divergence équatoriale.

Le rapport détaillé des données brutes fait l'objet d'une publication par l'IFREMER dans la série des "Campagnes océanographiques françaises" (1).

OBJECTIFS ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE GÉNÉRAL

L'objectif principal consistait dans l'étude de la production pélagique dans les deux types d'upwelling, upwelling côtier et upwelling en océan ouvert.

Le fonctionnement des écosystèmes de la production pélagique est encore mal connu. Selon les régions océaniques, les mécanismes prennent des aspects différents.

* Chef de projet,
Chef de mission 1ère partie

** Chef de mission 2ème partie

La méthodologie de mesure de la production a été remise en question, comme en témoigne la controverse bien connue sur la méthode du ¹⁴C en régime oligotrophe. Des efforts particuliers ont été entrepris pour mieux comprendre la signification des résultats obtenus par les méthodes traditionnelles d'incubation *in vitro* et *in situ*. Dans le cadre des observations *in situ*, un intérêt particulier vise une meilleure compréhension de la production dite production communautaire nette. Cette dernière s'identifie avec la production "nouvelle", à savoir celle basée sur l'apport nutritif issu de la profondeur. Dans le Pacifique tropical oriental, les upwellings sont à l'origine d'une grande fertilité océanique. Ils ont un caractère quasi permanent tout au long de l'année avec cependant une variabilité saisonnière dont les conséquences biologiques sont encore mal connues. Une des principales caractéristiques de la productivité est l'importante variabilité interannuelle. Les années à El Niño introduisent des perturbations de grande envergure qui rendent l'étude des écosystèmes particulièrement complexe. Les dates choisies pour PACIPROD offraient l'occasion de décrire et d'analyser la situation que crée l'upwelling durant l'hiver austral, période pendant laquelle les phénomènes de remontées d'eau sont particulièrement intenses au large des

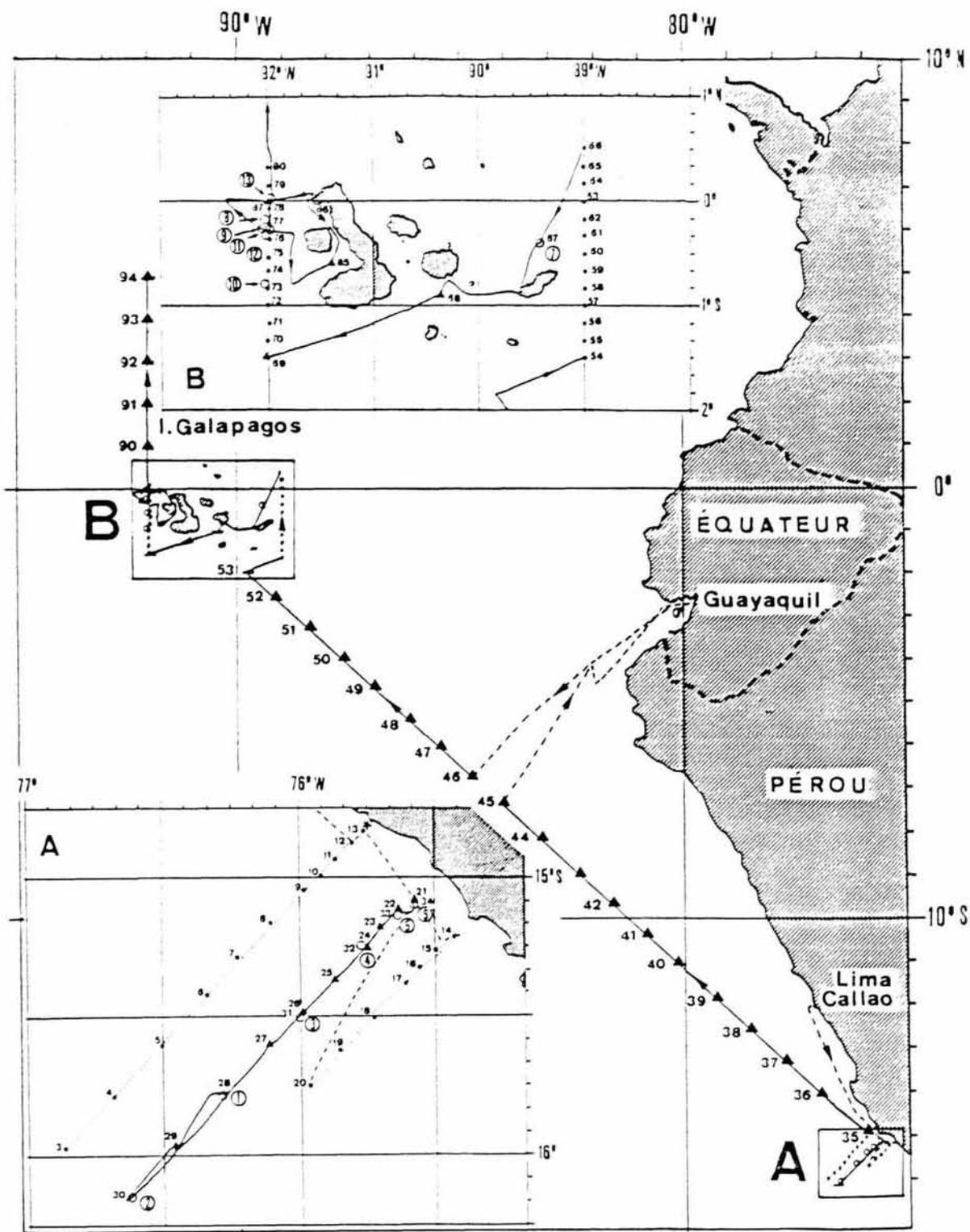


Fig. 1. Zone d'étude de la campagne PACIPROD:

A - upwelling côtier du Pérou

B - divergence équatoriale des Iles Galapagos

▲ stations hydrologiques; ● stations SHET; ○ stations de production

côtes du Pérou.

En dehors des observations *in situ*, un programme expérimental a été réalisé à bord sur les populations naturelles rencontrées. Ce programme concernait divers aspects de l'assimilation et de la régénération de l'azote par les communautés planctoniques ainsi que des relations photosynthèse-lumière dont la connaissance des paramètres intervenant est indispensable à la bonne compréhension du système producteur autotrophe en général. Un programme d'optique sous-marine comportait des mesures du rayonnement radiatif et de la pénétration dans la couche euphotique d'une part et des déterminations de propriétés optiques complémentaires d'autre part.

Les échanges gazeux océan-atmosphère sont particulièrement intenses dans les zones d'upwelling, surtout pour les gaz associés aux activités biologiques de photosynthèse et de respiration, à savoir le CO_2 et l'oxygène. On sait que les bilans d'échange air/mer contrôlent dans une large mesure l'évolution à long terme du CO_2 de l'atmosphère. En raison de l'importance du "problème CO_2 " à l'échelle planétaire, PACIPROD avait réservé une attention particulière à l'étude des échanges gazeux et principalement ceux du CO_2 . La bonne compréhension des échanges de CO_2 , dont l'intensité est dictée par la pression partielle de CO_2 à la surface de la mer, suppose aussi une connaissance générale fondamentale du système CO_2 c'est-à-dire de l'ensemble des paramètres intervenant dans les équations du système "acide carbonique-carbonates". Une équipe de spécialistes de ce type de mesures avait embarqué et a coopéré avec les océanographes biologistes de la production (2).

TYPE DES STATIONS ET NATURE DES TRAVAUX À LA MER

Deux types d'opérations ont été effectués :

-- stations classiques de bathysonde CTD, avec prise d'eau pour

mesures chimiques et biologiques; -- stations "SHET" (Système Hydro-Electrique Tracté) comprenant des mesures en continu des paramètres hydrologiques et chimiques soit sur la verticale (profils en station fixe) soit en horizontal (propriétés des paramètres de surface) avec le navire en déplacement à vitesse réduite.

La zone de l'upwelling côtier du Pérou a été prospectée sur des sections de ces deux types précédents, normales à la côte et atteignant environ 100 milles nautiques au large. Le nombre de stations et leur position sont indiqués sur la figure 1A. Les profondeurs pour les stations CTD situées au large du plateau continental atteignaient 1000 mètres.

La section hydrologique et chimique de liaison entre le Pérou et les Galapagos comprend des stations bathysonde CTD (st. 35 à 53) atteignant 2000 mètres de profondeur.

La zone des Iles Galapagos (Fig. 1B) a été principalement prospectée au moyen de stations SHET; la prospection verticale par le SHET intéresse la couche des premiers deux cents mètres. Les stations dites de production, au nombre de 13 (Fig. 1A et 1B) comprennent des prélèvements spéciaux (bouteilles Niskin de 30 litres) pour la mesure de la production avec incubation *in situ*. Ces mêmes stations comportent des opérations photométriques (quantummètre et spectroirradiance-mètre). Des pêches de zooplancton avec les divers types de filet ont eu lieu de manière générale à toutes les stations lorsque les conditions le permettaient.

MÉTHODES

L'ensemble des méthodes de prélèvement, de mesures physiques et d'analyses chimiques est exposé dans le détail dans le rapport des données (1). Nous nous limiterons ici à une énumération sommaire des différents types de mesures.

Prélèvements et mesures à la mer:

- stations CTD: sonde Guildline équipée d'une rosette de 11 bou-

teilles Niskin de 6 litres;
- stations SHET (système mis au point par Louis Prieur, LPCM, Villefranche/Mer): le SHET comprend deux sondes tractées *in situ* (sonde CTD Guildline et diffusiomètre) et une pompe alimentant en eau par un tube de 200 mètres de longueur, les différents stands de mesures chimiques à bord: analyseurs Technicon pour les sels nutritifs, oxymètre, pHmètre, fluorimètre et appareil de mesure de la pression partielle de CO₂ (3).

Température et salinité:
contrôle des mesures de la CTD par des thermomètres à renversement (thermomètres protégés et non protégés Richter et Wiese, Berlin). L'ensemble des prélèvements d'eau de la rosette a été analysé à bord au moyen d'un salinomètre de laboratoire Guildline.

Oxygène:
méthode de Winkler selon le procédé de Carpenter.

Sels nutritifs:
NO₂, NO₃, NH₄, Si(OH)₄; dosage sur autoanalyseur Technicon selon le procédé opératoire indiqué par Treguer et Le Corre.

Chlorophylle *a* et phaeopigments (4):
dosage portant sur les eaux des stations CTD dans la couche des premiers 100 mètres et sur les échantillons des stations de production (zone euphotique); méthode de dosage fluorimétrique (Fluorimètre Turner III) selon Holm-Hansen *et al.* et calcul des concentrations selon Lorenzen.

Carbone et azote particuliers (5):
dosage portant sur les échantillons des stations de production; filtration sur GF/F 25 mm et dosage au laboratoire à terre sur analyseur CHN Perkin Elmer, modèle 240.

Production primaire (6):
les prélèvements spéciaux (Niskin

de 30 litres) aux stations de production (P1 à P13) sont effectués à des immersions standards dans la couche superficielle des premiers 50, 60 ou 70 mètres. Sur les mêmes prises d'eau sont mesurés les paramètres chimiques et biologiques classiques ainsi que les taux d'assimilation de l'azote 15 et du carbone 13. La méthode du carbone 14 est utilisée avec incubation *in situ* sur une bouée dérivante pendant une demi-journée solaire. L'activité des filtres a été mesurée à bord au moyen d'un compteur à scintillation Packard modèle Tricarb 4430.

Parallèlement à la méthode du ¹⁴C, la méthode de l'oxygène a été utilisée; elle consiste à mesurer l'accroissement net d'oxygène (+ΔO₂) dans des flacons transparents exposés également *in situ* durant le même temps d'incubation (7).

Assimilation et régénération de l'azote minéral et organique:
la méthodologie ¹⁵N a été appliquée d'une part aux mesures de l'absorption de l'azote minéral (nitrate, nitrite et ammonium) et organique (urée) et d'autre part à celles de la régénération d'ammonium et d'urée. Les échantillons ont été prélevés à la bouteille Niskin (30 litres) à 6 profondeurs standards entre 0 et 50 mètres. L'eau a été filtrée sur une soie de 200 μm de vide de maille afin d'éliminer le mésoplancton, puis enrichie en ¹⁵N (environ 10% par rapport à la concentration initiale). L'incubation a été effectuée dans des bouteilles en verre ou en polycarbonate soit *in situ* pendant 12 heures (du lever au coucher du soleil) soit *in situ* simulé dans un incubateur pendant au moins 4 à 6 heures. L'enrichissement isotopique ¹⁵N de la fraction particulaire (récoltée sur filtre en fibre de verre Whatman GF/F) et de la fraction dissoute (filtrats congelés) a été déterminé au laboratoire par spectrométrie de masse. L'ammonium et l'urée ont été extraits des filtrats par diffusion et hydrolyse enzymatique respectivement. Les teneurs en azote de la fraction particulaire ont été cal-

culées à partir des signaux du spectromètre de masse lors de l'analyse isotopique des échantillons.

Zooplancton (8):

les récoltes ont été faites au moyen de traits verticaux de 200 à 0 mètres (100 à 0 m près des côtes) réalisés avec un filet triple comprenant un filet WP2 standard type UNESCO (200 µm de vide de maille), un filet FLO standard type UNESCO (500 µm de vide de maille) et un filet de 50 µm de vide de maille pour le phytoplancton. La biomasse est mesurée par la méthode des poids secs sur la moitié de la récolte du WP2, après filtration sur une soie pesée.

Expérimentation complémentaire effectuée à bord sur des populations algales naturelles récoltées en cours de campagne:

mesure de la photosynthèse en vue de la modélisation de la production primaire *in situ*; la principale manipulation consistait à établir des courbes P vs I c'est-à-dire taux de photosynthèse en fonction de l'énergie lumineuse (9). Ce sont les données de ces courbes qui permettent d'accéder par calcul à la production primaire, si l'on connaît par ailleurs l'énergie radiative disponible *in situ* pour la photosynthèse dans la couche euphotique (PARis).

Les activités photosynthétiques sont mesurées pour des expositions de courte durée (méthode du ^{14}C avec inoculation de $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ à forte activité) dans un incubateur dont on contrôle à la fois la température et le climat lumineux artificiel, en qualité spectrale (filtres bleus) et en intensité (filtres neutres).

Mesure des coefficients spectraux d'absorption de la matière particulaire (10): les mesures ont été faites à l'aide d'un spectrophotomètre Perkin-Elmer 571, en procédant selon la méthode de Trüper et Yentsch. Les valeurs spectrales de l'absorption de la lumière par le

phytoplancton déterminent la part d'énergie radiative capturée par les cellules vivantes; ce sont ces coefficients qui, en combinaison avec l'énergie lumineuse disponible pour la photosynthèse (PARis) et les paramètres photosynthétiques établis par la manipulation précédente, constituent les données d'entrée pour modéliser la production primaire *in situ*. Par ailleurs les coefficients d'absorption correspondant aux différentes populations naturelles rencontrées sont indispensables à la modélisation générale des propriétés optiques des différentes eaux de mer, notamment en ce qui concerne leur réflectance diffuse (couleur de la mer).

L'ensemble des données optiques constitue une base nécessaire à l'interprétation correcte des images de télédétection dont de nombreuses données historiques restent dans les archives du CZCS. On est conscient à l'heure actuelle de ce que la compréhension de la grande variabilité interannuelle de la productivité du Pacifique (phénomènes El Niño par exemple) ne peut passer que par l'investigation satellitaire à moyenne et grande échelles.

APERÇU SOMMAIRE SUR LA SITUATION RENCONTRÉE (11)

De nombreux travaux ont déjà décrit et analysé l'upwelling du Pacifique tropical oriental et ses conséquences biologiques. Des programmes spéciaux ont été conçus pour détecter les effets du phénomène El Niño sur la productivité primaire et la fertilité générale, notamment en ce qui concerne les ressources marines exploitables (pêche de l'anchois par exemple). Il se trouve que les caractéristiques des remontées d'eau en période hivernale (australe) n'ont jamais fait l'objet d'opérations de grande envergure. La campagne PACIPROD a rencontré une situation de résurgence de forte intensité à en juger par l'extension des eaux froides et riches en sels nutritifs. Les sections normales à la côte permettent

de montrer qu'à 100 milles nautiques au large, les eaux gardent une température basse et possèdent encore une richesse importante en sels nutritifs. La production primaire mesurée au moyen des méthodes d'incubation *in situ* est étonnamment faible pour une zone de résurgence côtière. Les valeurs ne dépassent pas $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ et les biomasses autotrophes restent à un niveau très bas à en juger d'après les concentrations de chlorophylle se cantonnant à des valeurs légèrement supérieures à $0,5 \mu\text{g l}^{-1}$. La grande dérive des eaux du courant du Pérou vers les Galapagos, traversée par la longue section de liaison (Fig. 1) transporte des eaux qui gardent encore des teneurs élevées en sels nutritifs ($\approx 10 \mu\text{g}$) lorsque la température (à plus de 200 milles au large) atteint 20°C . L'analyse des résultats dans le détail permettra de mieux comprendre quel est le facteur le plus important responsable d'une telle situation. Du point de vue des échanges gazeux, cette situation crée un aspect particulier en ce qui concerne les deux principaux gaz associés au système de production-régénération, à savoir l'oxygène et le gaz carbonique: l'étendue des vastes affleurements d'eaux sous-saturées en oxygène (à pression partielle de CO_2 élevée) provoque une importante pénétration d'oxygène atmosphérique et une évaporation de gaz carbonique vers l'atmosphère (12). Ce type de situation, habituellement cantonné dans une bande côtière beaucoup plus étroite, ne fait que traduire la très faible activité photosynthétique de cet upwelling existant au moment des observations de la campagne PACIPROD.

ABSTRACT

The main goal of the PACIPROD cruise was to study pelagic productivity in two upwelling areas of the Eastern tropical Pacific Ocean: coastal upwelling off Peru and upwelling of the equatorial divergence near the Galapagos

Islands.

The first leg was carried out off Peru including sections normal to the coastline near 15°S . Two types of stations were occupied: CTD hydrocast stations for water chemistry and continuous vertical profiles of chemical parameters in the upper 200 meter layer (SHET profiles). Special attention has been paid to the seawater chemistry concerning the CO_2 system, in order to study particular aspects of CO_2 air-sea exchange in these upwelled waters.

Selected biological stations were carried out mainly for primary productivity (*in situ* ^{14}C method), phytoplankton biomass and photometric measurements (quantum- and spectroirradiance-meters) in the photic zone. Zooplankton was collected at nearly all the stations of the cruise in order to determine biomass and species composition.

A long Peru-Galapagos connecting section with 19 stations was carried out for water chemistry down to 2000 meters.

The second leg was devoted to the equatorial upwelling by means of North-South section across the equator, west of the Galapagos Archipelago. Because of a more pronounced thermal stratification in this zone, measurements were mainly carried out with the SHET profiler, and CTD stations were done at productivity stations in the most interesting upwelling area off the west coast of Isabel Island.

Shipboard experiments were undertaken on natural microplanktonic populations of the encountered waters in order to focus investigations on complementary aspects of the pelagic environment:

- photosynthesis vs light functions
- optical properties of the water related to light absorption by particulate matter
- assimilation vs regeneration of nitrogen

Principal observations during the first leg display very strong upwelling situation which has never been studied in detail in earlier investigation, especially in regard to biological consequences.

Despite high nutrient concentrations, productivity and phytoplankton biomasses are extremely low for a coastal upwelling which is considered as one of the most fertile of the world ocean. As far as air-sea gas exchanges are concerned, the whole Peruvian upwelling zone has been recognized as a source for CO₂ and a sink for

oxygen, since sea surface partial pressures encountered there are high for CO₂ and low for oxygen. These conditions are explained by the low photosynthetic activity which maintains deep water properties of the upwelled water much longer, during its offshore transport at the surface.

Bibliographie :

- (1) B. Coste, H.J. Minas et M.C. Bonin, *in* Campagnes océanographiques françaises, IFREMER, 183 pp. 1989.
- (2) C. Brunet, D. Ruiz, S. Schauer et N. Waser, *in* (1), p. 65-98, 1989.
- (3) C. Copin-Montégut et P. Raimbault, *in* (1), 135-174, 1989.
- (4) P. Raimbault, *in* (1), p. 14-15, 1989.
- (5) P. Raimbault, *in* (1), p. 131-134, 1989.
- (6) M. Minas, *in* (1), p. 109-110, 1989.
- (7) M. Minas et B. Schauer, *in* (1), p. 111-127, 1989.
- (8) J. Goy, J.C. Braconnot et I. Palazzoli, *in* (1), p. 181-183, 1989.
- (9) J. Gostan, *in* (1), p. 99-102, 1989.
- (10) A. Bricaud, *in* (1), p. 103-108, 1989.
- (11) H.J. Minas, B. Coste, M. Minas et P. Raimbault, Symposium "Tour du Monde du Charcot"
- (12) C. Copin-Montégut, Symposium "Tour du Monde du Charcot".

Adresses des participants :

- (1) Centre d'Océanologie de Marseille, Faculté des Sciences de Luminy, Marseille.
- (2) Physique et Chimie marines, Université de Paris VI, Villefranche-sur-Mer.
- (3) Station zoologique, Université de Paris VI, Villefranche-sur-Mer.
- (4) Physique et Chimie marines, Université de Paris VI, Paris.
- (5) Ichthyologie, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris.
- (6) Océanographie chimique, Université de Bretagne Occidentale, Brest