

respectif, l'eau et l'air, et l'interface ne recevait que peu d'attention. L'intérêt actuel des gouvernements pour la mer, son exploitation, la révolution technologique de l'informatique et de l'astronautique ont modifié peu à peu cet état d'esprit et depuis une quinzaine d'années une impulsion nouvelle a été donnée à la dynamique des fluides où la prise de conscience du rôle de l'océan sur la stabilité des climats du globe est un des aspects les plus intéressants. Parler de «système océan-atmosphère», «d'interactions océan-atmosphère» ou de «bilan énergétique» est actuellement au goût du jour chez les géophysiciens.

Très tôt, les météorologues ont soupçonné l'influence que les régions tropicales (qui sont essentiellement océaniques) exercent sur la circulation zonale de l'atmosphère extratropicale par leur rôle de source d'énergie. Des études empiriques, récemment des travaux théoriques et l'utilisation des modèles mathématiques ont démontré que les tropiques ont une influence significative à la fois sur le déplacement et le blocage des ondes planétaires de la circulation d'ouest des latitudes moyennes. Les océans tropicaux sont donc envisagés actuellement comme une pièce maîtresse du mécanisme des climats du globe. Ce sont d'immenses réservoirs énergétiques qui, par l'intermédiaire de l'évaporation, lancent vers l'atmosphère, tout au long de l'année, des flux importants de chaleur latente et de vapeur d'eau. C'est sous les zones de convergences atmosphériques de la zone tropicale (C. I. T.) que ces transferts sont captés pour alimenter des systèmes convectifs très actifs (cloud clusters) qui injectent chaleur et humidité dans la haute troposphère. Cette énergie potentielle est ensuite exportée en direction du nord par l'intermédiaire d'une circulation méridienne (cellule de Hadley) et elle est transformée en énergie cinétique aux latitudes moyennes. Les météorologues croient donc tenir la solution du problème de l'équilibre et des mécanismes de la circulation atmosphérique autour du globe en étudiant minutieusement les interactions entre l'océan et l'atmosphère des régions tropicales. Or, ces régions sont de loin les moins bien connues. Leur réseau d'observations météorologiques a toujours été très lâche et déficient et l'hydrologie de la plus grande partie des océans tropicaux est très imparfaitement connue. On comprend alors l'effort actuel pour combler ces lacunes.

Cette nouvelle orientation des recherches météorologiques et climatologiques a été vivement encouragée par l'O. M. M. et l'I. C. S. U. (1) depuis une dizaine d'années. Les campagnes météorologiques et océanographiques conjointes se sont multipliées sur les océans tropicaux dans le cadre du G. A. R. P. (2). Leur préparation et leurs résultats ont donné naissance à la mise en place de banques de données, à de nombreuses publications malheureusement très dispersées et à quelques ouvrages de base dont on distinguera trois atlas qui ne manqueront pas de donner un appui fondamental à tous les chercheurs qui s'intéressent aux inte-

A PROPOS DE QUELQUES ATLAS RÉCENTS SUR LES OcéANS TROPICAUX

S'il y a toujours eu des chercheurs s'intéressant à la mer, son étude approfondie est restée longtemps négligée en partie à cause de la difficulté d'obtenir des informations hydrologiques et météorologiques en nombre raisonnable, en partie aussi parce qu'on avait pris l'habitude de la regarder passivement comme «une grande étendue d'eau salée», selon la définition la plus courante des dictionnaires; elle était là, couvrant 70 % de notre planète. De plus, jusqu'à une époque très récente, à quelques exceptions près, océanographes et physiciens de l'atmosphère, chacun de leur côté, se penchaient sur les problèmes de leur fluide

(1) O. M. M., Organisation Météorologique Mondiale. I. C. S. U., International Council of Scientific Unions.

(2) G. A. R. P., Global Atmospheric Research Programme.

ractions océans-atmosphère ou à d'autres phénomènes liés à la mer (biologie, ressources naturelles...). Il s'agit de:

Atlas Hydrologique Saisonnier de l'Océan Atlantique Intertropical par J. MERLE, O. R. S. T. O. M., Paris, 1978. 184 p.

Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans par S. HASTENRATH et P. J. LAMB. University of Wisconsin Press, 1977. 112 p.

Heat Budget Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans par S. HASTENRATH et P. J. LAMB. University of Wisconsin Press, 1978. 90 p.

L'*Atlas Hydrologique Saisonnier de l'Océan Atlantique Intertropical* de J. MERLE est un atlas purement océanographique qui présente la distribution moyenne annuelle et saisonnière des principaux paramètres habituellement utilisés pour caractériser l'hydrologie de l'océan, à savoir: la température, la salinité, la teneur en oxygène, l'anomalie de densité Sigma-T à différents niveaux bathymétriques standards et la hauteur dynamique par rapport au niveau de référence 500 décibars. L'atlas est complété par trois planches donnant les moyennes saisonnières et annuelles de l'immersion de l'isotherme 21° soit une estimation précieuse de la profondeur de la thermocline.

Le cadre géographique est limité par les parallèles 20° N-20° S et par les méridiens 15° E-60° W. Ce cadre a un double avantage. Il fournit une image globale du Bassin Atlantique tropical trop souvent coupé net à l'équateur dans les cartographies hémisphériques. Il exclut l'excroissance occidentale du Bassin Atlantique que constitue la Caraïbe. Cette région est d'ailleurs assez bien connue. Elle a fait l'objet de nombreux travaux d'océanographes américains (Iselin, Fuglister, Stommel...) depuis 1930 à la recherche de la racine et des mécanismes du Gulf Stream, et aussi de météorologues (Palmén, Riehl...) travaillant à la prévision des trajectoires des cyclones tropicaux. Elle continue à être une des régions océaniques les plus étudiées par les méthodes de thermographies infrarouges (dynamique des fronts thermiques du Golfe du Mexique et des tourbillons cycloniques du Gulf Stream et en Mer des Sargasses). L'originalité de l'atlas de J. MERLE est donc de fournir le maximum de renseignements sur les parties les moins bien connues du Bassin Atlantique Intertropical.

Les données utilisées ont été extraites des fichiers organisés par le *National Oceanographic Data Center* américain, jusqu'à l'année 1972, et de quelques campagnes océanographiques auxquelles la France a participé entre 1906 et 1974. La densité des données dans une région océanique aussi vaste et à l'écart des principales routes maritimes est forcément très irrégulière. Elle est maximum au long des côtes africaines et d'Amérique du Sud alors qu'elle est pratiquement nulle au centre du bassin. Ainsi, la répartition des données a-t-elle fait apparaître des écarts mensuels importants. Par exemple, les données de 439 stations seulement étaient disponibles pour le mois de janvier mais celles de plus de 1700 stations pour le mois de mars. Le groupement en trimestres a permis à l'auteur d'amortir ces écarts au minimum souhaitable. C'est

ce qui explique la représentation saisonnière et non mensuelle des différents paramètres dans l'atlas.

Le traitement des données des 12 500 stations retenues, après contrôle de qualité, a été réalisé automatiquement à l'ordinateur. La densité des informations a permis l'emploi d'un maillage de 4° de longitude par 1° de latitude entre 10° N et 10° S mais de 4° de longitude par 2° de latitude seulement pour les deux zones nord et sud extérieures à la bande 10° N-10° S. A l'intérieur de chaque carreau ainsi défini, la moyenne arithmétique des valeurs est représentative et elle est matérialisée par une isocourbe qui a reçu un lissage final. Pour chaque planche présentée où le souci de rigueur et de représentativité est toujours présent, l'auteur a eu le soin d'indiquer en carton le nombre d'observations sur lequel a porté les calculs. Ainsi en chaque endroit du bassin océanique, il est possible d'estimer la valeur du tracé des isoplèthes.

Les deux atlas élaborés par S. HASTENRATH et P. J. LAMB, de leur côté, illustrent bien la tendance actuelle de la climatologie. Ils ont la même base cartographique et ils se complètent admirablement. Ils ont été réalisés à partir des mêmes données des observations de plus de 7 000 000 de navires sélectionnés qui ont sillonné l'Atlantique tropical et le Pacifique oriental entre 1911 et 1970. Les données ont été traitées automatiquement et leur densité a permis l'utilisation d'un maillage de la surface océanique de 1° de côté. Le cadre géographique couvre entièrement la zone tropicale entre 30° N et 30° S des côtes africaines au 100° W.

Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans, comme son titre l'indique est un atlas exclusivement climatique qui donne en 96 planches la distribution moyenne mensuelle et annuelle des principaux éléments météorologiques suivants: pression, direction et vitesse des vents résultants, divergence, vorticité, nébulosité totale, fréquence des nuages bas et des précipitations. Pour la première fois, un atlas climatique permet d'apprécier les processus de transferts de chaleur à l'interface océan-atmosphère avec l'adjonction d'autres paramètres comme la température de l'eau en surface, la différence de température entre l'eau et l'air, l'humidité spécifique de l'air.

Cependant c'est dans le second atlas, *Heat Budget of Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans* que S. HASTENRATH et P. J. LAMB proposent une image encore peu commune des échanges énergétiques entre les eaux tropicales et l'atmosphère. Depuis la parution de *Atlas of the Heat Balance of the Earth* (en russe) de M. I. BUDYKO (1963), indirectement connu par la plupart d'entre nous à travers la traduction anglaise de l'ouvrage russe du même auteur, *Climate and Life* par l'Academic Press en 1974, c'est la première tentative de représentation cartographique détaillée des composantes du bilan énergétique à l'échelle mensuelle sur une vaste région du globe. En fait, cet atlas est l'aboutissement de nombreux travaux géophysiques menés par HASTENRATH et LAMB ainsi que par bien d'autres chercheurs américains dont on trouvera une liste succincte à la page XI de l'introduction.

La description des méthodes de compilation des données et de calcul du bilan thermique océanique, les remarques sur l'analyse des composantes principales de ce bilan constituent une introduction d'une rigueur et clarté exemplaires. Introduction fondamentale, si l'on songe à la diversité des méthodes de calcul des bilans énergétiques présentés jusqu'à présent où chaque auteur essaie d'imposer sa méthodologie et de la présenter évidemment comme la meilleure. En fait, depuis les travaux pionniers de JACOBS⁽³⁾ et de BUDYKO, une profusion de calculs a été testée sur des régions toujours restreintes des bassins océaniques et rien ne permet de penser qu'on puisse passer du cas particulier à la généralité avec autant d'aisance. Les résultats sont d'ailleurs concluants si l'on essaie de faire la synthèse des travaux très dispersés sur le bilan énergétique du Bassin Atlantique. On aboutit à des conclusions divergentes, parfois contradictoires, sur le bilan d'une même région. Les comparaisons entre différents points du bassin océanique deviennent même impossibles en utilisant des auteurs différents. De plus, l'absence de standardisation du système d'unité employé pour exprimer les flux énergétiques rend la tâche encore plus difficile. Dans ce contexte, l'atlas de HASTENRATH et LAMB vient mettre un peu d'ordre. L'unité employée est celle du système international, soit le watt par mètre carré; les moyennes mensuelles des flux radiatifs nets en ondes courtes, le bilan infrarouge, le bilan radiatif net, les flux de chaleur sensible et latente et le gain thermique net océanique ont été calculés à l'aide d'équations aérodynamiques utilisant les paramètres météorologiques les plus usuels: pression atmosphérique, vitesse du vent, température de l'air et de l'océan en surface, température du point de rosée et nébulosité totale. Le calcul du bilan radiatif a reçu une attention particulière car c'est une des composantes du bilan énergétique qui varie le plus selon les auteurs. Il a été estimé à partir d'équations qui prennent en considération l'humidité atmosphérique et la turbidité de l'air. Pour le Bassin Atlantique tropical boréal surtout et le Pacifique oriental situés au vent de déserts qui fournissent une grande quantité de poussières, la prise en compte des aérosols paraît effectivement fondamentale. Comme le notent les auteurs eux-mêmes dans leur introduction, ces équations aboutissent à des estimations de bilans radiatifs plus faibles que celles effectuées par BUDYKO et même par BUNKER⁽⁴⁾. La radiation solaire incidente a évidemment une valeur plus faible en utilisant cette méthode et de leur côté, les pertes énergétiques dues au rayonnement infrarouge renvoyé sont plus fortes. Ce qui, en fait, doit être assez proche de la réalité. Quant aux autres composantes du bilan énergétique (flux de chaleur sensible et latente, évaporation...), les valeurs sont également légèrement plus faibles que celles de BUDYKO

(3) JACOBS, W. C., 1942 — «On the energy exchange between sea and atmosphere», *Jour. of Mar. Res.*, vol. V, p. 37-66.

(4) BUNKER, A., 1976 — «Computation of surface energy flux and annual sea-air interaction cycles of the North Atlantic Ocean», *Mon. Wea. Rev.*, vol. 104, p. 1122-1140.

et de BUNKER. L'un dans l'autre, cependant, le gain thermique net de l'océan reste à peu près le même d'après ces trois auteurs. Les différences viennent également du fait que le maillage de 1° de côté de la surface océanique permet de descendre à un détail plus grand. Les 82 cartes traitent ces différents paramètres en isocourbes ayant reçu un lissage minimum afin de rester le plus près possible des valeurs brutes. L'aspect cartographique en pâtit un peu car certains contours apparaissent assez irréguliers. Mieux vaut toutefois sacrifier l'aspect esthétique à la rigueur. Dans les régions où les données étaient trop éparpillées, les isoplèthes ont été tout simplement omises, les détails des côtes et certains archipels comme celui du Cap Vert ou les Petites Antilles ont été supprimés. Il est certain que la présence de l'obstacle que ces îles opposent aux courants marins perturbe profondément le champ thermique de l'océan en surface et entraîne une modification thermodynamique de l'air au point d'influencer sérieusement le bilan énergétique local. C'est justement pour cette raison que les auteurs n'ont pas hésité à s'abstraire de ces perturbations puisque la représentation cartographique choisie vise à mettre en valeur les contrastes à l'échelle régionale.

Cet ensemble de cartes est complété par un jeu de graphiques montrant l'évolution annuelle des différents flux énergétiques en 20 régions choisies du Bassin Atlantique tropical et du Pacifique oriental. Enfin, signalons une série de 5 tableaux qui ne manqueront pas de rendre de précieux services à ceux qui étudient les bilans énergétiques zonaux. Ils fournissent les valeurs des flux moyens calculés par bandes latitudinales espacées de 5° entre 30° N et 30° S pour chacun des mois de l'année.

Ces trois atlas complémentaires, parus au même moment, constituent sans aucun doute un événement important dans la cartographie océano-météorologique et fournissent une base de travail sans précédent à tous ceux qui s'intéressent aux processus physiques qui opèrent dans l'océan, dans l'atmosphère et à l'interface.

DENISE DE BRUM FERREIRA