

LE CLIMAT DE L'ATLANTIQUE ORIENTAL, DES AÇORES
AUX ILES DU CAP VERT

(d'après Denise de Brum Ferreira)

L'ouvrage de DENISE DE BRUM FERREIRA ⁽¹⁾ est, en langue française, le premier du genre puisqu'il aborde le climat d'un grand ensemble océanique. Certes, CLAUDE KERGOMARD s'est, depuis longtemps déjà, voué à l'océan Arctique et à ses annexes polaires. Par ailleurs, Isabelle Roussel, tout en traitant les climats côtiers de la mer Baltique, a envisagé l'espace maritime. MARTINE TABEAUD a, de son côté, affronté l'étude des processus énergétiques de l'océan Atlantique tropical austral. Pourtant, aucun climatologue-géographe n'avait, jusqu'ici, envisagé *tous les aspects climatiques* d'un grand espace océanique, avec combinaison intime des milieux atmosphériques et maritimes. Il s'agit donc d'un thème neuf et d'une recherche pionnière. Avec la thèse de DENISE DE BRUM FERREIRA, avec les travaux des chercheurs évoqués, l'étude climatique régionale cesse de s'appliquer aux seuls continents; ce qui est normal. En effet, si les océans jouent un rôle généralement connu sur les climats continentaux, ils apparaissent de plus en plus comme la clé de voûte de la climatologie planétaire. D'où l'importance prise par l'étude de la surface océanique, par celle de la dynamique des masses d'eau, et aussi par l'étude de la climatologie globale, où l'on retrouve l'intérêt porté à l'Oscillation Australe et à l'ENSO. Mais l'océan est aussi un espace de vie pour l'Homme, avec la pêche et les transports maritimes et aériens.

La thèse de DENISE DE BRUM FERREIRA a, certes, des jalons insulaires (Açores, Madère, îles Canaries, îles du Cap Vert). Cependant, ceux-ci,

(1) Thèse de doctorat d'Etat soutenue à Paris-Sorbonne, le 26 octobre 1989, dactylographiée, 1657 p., dont 1497 de texte et illustrations.

qui ont fait l'objet de travaux antérieurs de la part de l'auteur, ne constituent pas la base de l'analyse. Il ne saurait être question, en effet, d'étudier l'espace océanique à partir de ce qui se passe sur les seules îles. C'est que celles-ci sont fort peu de chose par rapport aux étendues maritimes. De surcroît, les îles sont un facteur de perturbation pour la dynamique atmosphérique et océanique. D'où la nécessité d'une approche directe de l'océan Atlantique oriental, ce que permettent les observations de bateaux et la pratique de l'imagerie satellitaire.

C'est à partir de là que l'importance est donnée aux relations océan-atmosphère. Il s'ensuit l'étude de deux *systèmes*: le *système océanique* et le *système atmosphérique*, en même temps que la maîtrise de leur coupage.

L'analyse systémique, qui est donc au centre du propos, s'appuie largement sur les renseignements fournis par la télédétection de l'atmosphère et par télédétection de surface. La problématique ainsi fixée ouvre la voie à la prise en compte des *flux de masse* (océaniques, atmosphériques) et des *flux d'énergie*, que l'auteur appréhende dans le cadre des bilans. Les bilans d'énergie sont étudiés dans les systèmes, et en transfert des uns aux autres. Ainsi, aboutit-on à la vision d'ensemble, c'est-à-dire au *système couplé océan/atmosphère*.

Le souci permanent de se référer à l'océan pour comprendre le climat sus-jacent implique une position ferme en ce qui concerne les espaces introduits dans la relation océan-atmosphère, aussi bien dans les volumes qu'en étendue. D'où la définition d'une *couche-limite océanique*, épaisse de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et limitée, à la base, par la thermocline, et celle d'une *couche-limite atmosphérique* allant de l'hectomètre au kilomètre et limitée, au sommet, par l'inversion des alizés. C'est surtout l'analyse de ces deux couches, ainsi que celle de leurs relations, qui seront prises en compte entre les 40° N et 15° N, c'est-à-dire des Açores aux îles du Cap Vert. Ceci va nécessiter la maîtrise des échelles. Dans le cas présent, le choix est simple. Seules les échelles macro et méso-régionales peuvent être appréhendées. La climatologie locale n'a pas de sens en pareil cas. D'où l'accent porté sur les effets zonaux et sur le découpage régional qu'impliquent la configuration de la masse océanique et celle de ses marges. Cette position appelle l'analyse de l'espace, du côté de l'Afrique, du côté du bassin atlantique occidental, du côté des régions *polaires* et du côté équatorial. C'est que le système océan-atmosphère défini dans sa spécificité par son implantation régionale, est un *système ouvert*. Il donne des impulsions à son environnement tout comme il en reçoit. A ce propos, le poids des régions équatoriales et polaires est fort important sur lui; ceci, d'autant plus qu'il est, sur certaines longitudes, le lieu de leur affrontement. C'est ainsi que les processus boréaux d'origine extratropicale ne sont pas négligeables dans la région capverdienne, qui marque pourtant la limite méridionale de l'espace étudié et la proximité avec les basses latitudes chaudes (qu'elles s'expriment en milieu océanique ou atmosphérique).

La thèse est divisée en tomes, livres, parties et chapitres. Nous ne retiendrons que la division en livres et parties.

Le livre I : «*L'océan Atlantique oriental: facteur d'un espace climatique*» exprime bien le lien établi entre le milieu océanique et le milieu atmosphérique.

La première partie caractérise l'ensemble du domaine. Nous retiendrons les points essentiels. Les températures de la surface de la mer, fondamentales pour l'argumentation, sont saisies, dans leur répartition spatiale majeure, à partir de la radiométrie infra-rouge. Or, la thermographie satellitaire, qui implique la notion de *température radiative*, est différente de l'image obtenue par les moyens conventionnels (mesures effectuées depuis les bateaux). L'écart peut être grand dans les régions équatoriales où l'atmosphère est hyperhumide; il est beaucoup plus faible dans les régions polaires. Cependant, les gradients thermiques, saisis horizontalement à la surface de l'océan, n'en sont pas moins conservés. Les masses d'eau et leurs mouvements, les fronts hydrologiques (fronts thermiques) apparaissent donc de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir recours au calage sur les températures-bateaux. Ainsi, même si l'imagerie satellitaire pose le problème des températures océaniques vraies, elle n'en est pas moins précieuse, en particulier pour la détection des courants marins. DENISE DE BRUM FERREIRA exploite à fond ces caractéristiques: son étude des *upwellings* fera date. C'est avec la même habileté qu'elle met en phase les courants marins et les observations de l'océanographie biologique; il y a un bon synchronisme, en mai-juin, entre le développement des fronts thermiques, tels qu'ils sont saisis par la télé-détection, et le déplacement des espèces migratoires de l'Atlantique oriental.

L'analyse de l'interface océan/atmosphère nécessite, par ailleurs, une bonne maîtrise des *bilans d'énergie*. D'où les développements relatifs à la radiation globale, au bilan radiatif net, aux flux d'énergies non radiatives (énergie latente, énergie sensible) et à l'importance que peuvent prendre les aérosols dans l'affaire; entre 1968 et 1972, beaucoup d'aérosols sont notés sur l'Atlantique oriental, qui correspondent à l'installation de la grande sécheresse sur le Sahel.

La *dynamique de l'océan* est également présentée avec bonheur. On notera, à ce propos, une excellente étude des thermoclines saisonnières, diurnes et transitoires, surtout engendrées par les transferts verticaux d'énergies thermique et mécanique au sein de l'océan. On constatera que la thermocline joue, dans l'eau, le même rôle que l'inversion thermique dans l'atmosphère, en stoppant la diffusion de chaleur vers la profondeur et en pesant sur les mouvements verticaux et horizontaux du fluide.

La deuxième partie du livre I montre l'articulation régionale de l'océan Atlantique oriental. Là encore, un certain nombre de points forts doivent être retenus, et tout d'abord, le *front thermique (front hydrologique) des Açores*. Le front des Açores est une zone barocline (analogie avec les zones baroclines des fronts atmosphériques) et, par conséquent, il est générateur d'un courant marin. Celui-ci porte à l'est, mais ne peut

être interprété comme le prolongement du Gulf Stream; c'est dire qu'il ne peut pas être intégré, comme le font habituellement les auteurs et comme l'illustrent les atlas, dans un vaste tourbillon anticyclonique océanique subtropical. *Le courant des Açores* (lié au front hydrologique des Açores, centré sur le 35° N, et qui sépare deux régions distinctes, l'une, au sud, source de chaleur toute l'année, l'autre, au nord, n'accumulant de la chaleur que superficiellement, entre mai et août), est une structure importante de l'Atlantique oriental; il est autonome par rapport au dynamisme océanique de l'ouest. Le rôle de ce courant est majeur dans l'équilibre énergétique du bassin oriental et dans son climat régional.

Les courants *froids* de la bordure océanique orientale sont également pris en compte: courants *froids* du Portugal (ou courant ibérique), courant des Canaries. Tous deux sont analysés à partir d'une documentation satellitaire remarquable et remarquablement maîtrisée (ex. le système de l'upwelling ouest-ibérique du 27 juin 1980).

Le courant portugais: on voit, à son propos, comment s'organisent les eaux froides par rapport à leur environnement plus chaud, avec, aux limites, présence de fronts thermiques. Ces derniers sont extrêmement divers, ce qui montre que le phénomène d'upwelling est beaucoup moins continu et uniforme que ne le laissent supposer les cartographies thermiques statistiques établies à l'échelle du mois, voire de la décade. Les relations entre le courant du Portugal et les vents sont étudiées. Ainsi est-il constaté que les brises littorales, qui viennent en renforcement du flux général de nord, jouent un rôle dans l'impulsion des eaux superficielles.

Le courant des Canaries se présente, lui aussi, avec une complexité que les schémas habituels ne permettent pas de soupçonner. Par ailleurs, l'anomalie thermique négative qu'il induit apparaît très puissante, au point qu'elle est de 600 km, en largeur, à la latitude des îles septentrionales du Cap Vert. Au sud, un front thermique tropical est réalisé, qui sépare les eaux froides du courant, d'eaux équatoriales dont la température varie, en moyenne, au cours de l'année, entre 25 et 27° C. Pas plus que pour le courant du Portugal, l'alimentation en eaux froides du courant des Canaries n'est monolithique. Cette alimentation correspond, en effet, à de multiples résurgences induites par les vents soufflant parallèlement aux côtes d'Afrique. Ces résurgences, qui naissent de proche en proche, imposent, là encore, une structure hétérogène qui va à l'encontre de la vision simplifiée que l'on donne le plus souvent de l'upwelling canarien.

La fin de la deuxième partie du premier livre ouvre la voie à l'hydroclimatologie de l'Atlantique oriental inter, sub et extratropical. Le propos prend en compte l'ensemble des grandes masses d'eau, qu'elles appartiennent ou non à l'espace océanique concerné dans la thèse. C'est que le système étudié est un système *ouvert*, comme nous l'avons déjà souligné; il subit, de ce fait, et en particulier, l'influence hydroclimatique polaire. Ce qui donne prétexte à des développements sans doute excessifs puisque le lecteur est conduit à prendre en compte jusqu'à l'hydrologie des parages de l'Islande. Il n'empêche qu'il convenait de montrer l'in-

terdépendance des différentes zones thermiques de l'Atlantique boréal, de même que les relations latérales, même s'il apparaît que les connexions avec l'ouest (Gulf Stream) ne sont pas celles auxquelles la littérature nous avait habitués (autonomie du courant des Açores).

Le livre II: Le climat de l'océan Atlantique oriental. Les éléments propices à l'étude du climat de l'océan Atlantique oriental étant en place, il convient maintenant de les utiliser en fonction de l'objectif dévolu à la thèse.

La première partie envisage la dynamique de l'atmosphère. Une part très importante du développement est consacrée à l'étude de la couche-limite atmosphérique, ce qui est l'occasion d'une analyse fine et très pertinente des transferts d'énergies sensible et latente à l'interface océan/atmosphère. Il apparaît que le flux global de chaleur injecté dans l'atmosphère est subordonné au signe du gradient thermique à cette interface, c'est-à-dire au sens du transfert de chaleur sensible. Aussi est-ce l'injection de *chaleur sensible* dans les basses couches atmosphériques qui sert de moteur à la turbulence, rendant possible la diffusion de la vapeur d'eau sur une grande épaisseur, surtout si la couche nuageuse s'organise en cellules ouvertes. Certains lieux particulièrement désignés pour fixer la turbulence. Il en est ainsi du front hydrologique et du courant des Açores, de même que du front hydrologique tropical. Les archipels jouent aussi un rôle en ce sens.

Les conditions anticycloniques, les systèmes perturbés, les vents et les flux d'altitude sont également envisagés dans cette première partie. Les effets relatifs du Jet Tropical d'Est (JTE) et du Jet d'Est Africain (JEA) sont évoqués; ils seront repris plus loin. Un point particulièrement important doit être, ici, retenu: la limite établie entre les circulations atmosphériques inter et extratropicales. Il s'ensuit une discontinuité atmosphérique majeure de la troposphère qui, toute l'année, se manifeste sur l'océan Atlantique oriental. Cette discontinuité ouvre, par ailleurs, la voie à l'étude de l'inversion des alizés, bien que celle-ci soit le résultat d'interactions nombreuses et qu'il n'en existe pas de type unique. DENISE DE BRUM FERREIRA confirme, au demeurant, les propos tenus jadis par PIERRE PAGNEY dans son étude du *Climat des Antilles*, en proposant 3 types d'inversions: inversion située à la limite des vents d'est intertropicaux et des vents d'ouest extratropicaux, cisaillement entre deux directions alizéennes, c'est-à-dire entre deux composantes d'est, inversion thermique de subsidence. Les problèmes posés par la stratification aérologique, dont nous ne donnons ici qu'un faible aperçu, font l'objet, de la part de DENISE DE BRUM FERREIRA, d'une analyse remarquable.

La deuxième partie est relative aux mécanismes du temps au-dessus de l'Atlantique oriental.

Les processus atmosphériques polaires sont les premiers abordés. C'est que le régime de blocage de la circulation d'ouest d'altitude inscrit plus ou moins profondément les événements polaires dans l'espace étudié. L'intérêt, à ce propos, vient du fait que la fréquence des blocages augmente considérablement, des Açores à la marge atlantique orientale

et, avec elle, celle des talwegs stationnaires et des gouttes froides. Ces talwegs et ces gouttes froides sont souvent au-dessus de Madère e des Canaries. On comprend alors pourquoi Madère, et plus encore les Canaries, se trouvent difficilement affectés par les anticyclones de blocage (c'est-à-dire les crêtes chaudes inscrites à l'ouest des talwegs). L'Atlantique oriental apparaît donc comme une région privilégiée pour la circulation de l'air froid d'altitude, particulièrement au plus près de l'Afrique. L'arrivée d'air froid dans d'étroits talwegs, jusqu'à la latitude des fles du Cap Vert, est ainsi éclairée. Les manifestations polaires se marquent là, non seulement en altitude, mais aussi à l'occasion, jusque dans les basses couches, l'ensemble étant responsable de modifications passagères de la structure de la troposphère, donc du temps. En outre, la pénétration d'un talweg froid jusqu'au cœur de la zone tropicale provoque un pont énergétique en altitude. La vapeur d'eau est alors mobilisée et un jet subtropical, situé sur le versant oriental du talweg polaire, peut la véhiculer vers les latitudes moyennes. On rejoint, par là, l'échelle de la circulation planétaire.

On pourrait penser que les poussées polaires les plus hardies en direction des basses latitudes sont le fait de l'hiver; il n'en est rien. C'est que les talwegs qui atteignent les fles du Cap Vert ont un évident caractère de permanence, comme l'attestent les images satellitaires. On les trouve donc en été boréal, ce qui laisse entendre que, même en été, alors que les fles capverdiennes sont soumises à la circulation tropicale et, à tout le moins, placées à sa limite, l'intervention des processus polaires dans le déclenchement des pluies doit être envisagée. Nous allons voir, justement, en quoi ce dispositif est considéré par DENISE DE BRUM FERREIRA comme susceptible, soit de déclencher la cyclogenèse tropicale, soit de la renforcer (comme cela a été le cas, dans la première quinzaine de septembre 1989, pour le cyclone Hugo).

Les processus atmosphériques tropicaux: ils sont appréhendés à partir des caractères de l'ennuagement. C'est qu'il convient, pour l'auteur, de cerner la convection au-dessus de l'Atlantique tropical oriental. Ainsi est prise en compte la Convergence Intertropicale, puisqu'aussi bien celle-ci remonte, durant la mousson ouest-africaine, jusque dans les parages des fles du Cap Vert et de Dakar. Les perturbations nuageuses d'échelle synoptique d'origine africaine et débordant sur l'océan sont également envisagées. En d'autres termes, c'est à un développement relatif à la cyclogenèse tropicale que l'on a affaire ici, par-delà l'analyse de l'instabilité convective. Ce qui permet de réinvestir les processus polaires d'altitude, parce que générateurs d'instabilité, et les courants-jets (JTE et JEA). La naissance des «ondes africaines» puis leur contrôle par les flux d'est d'altitude peuvent résulter (mais non nécessairement) d'advections d'origine polaire boréale. La question qui se pose alors est celle de savoir si ces advections jouent, à ces latitudes, par les qualités thermodynamiques des masses d'air ou par l'intervention des seuls processus cinématiques. L'auteur évoque ces dispositions sans vraiment se prononcer. Cependant, et c'est là l'intérêt majeur des points soulignés, DENISE DE BRUM FERREIRA se demande comment des perturbations

africaines en voie d'essoufflement et véhiculées vers l'ouest, peuvent passer, en l'espace d'une vingtaine de degrés en longitude, du stade d'affaiblissement au stade pré-cyclonique. La réponse est claire: il faut envisager un processus de relais énergétique donnant une nouvelle vigueur aux phénomènes continentaux; ce processus ne peut résulter que du passage des perturbations sur un océan chaud. C'est en ce sens que l'on doit considérer comme capitale l'étude de la trajectoire des amas convectifs durant l'été 1974 (après avoir circulé sur l'Afrique, ils poursuivent leur chemin vers l'ouest, au-dessus de l'océan). Ces dispositions ne donnent pas obligatoirement des ouragans tropicaux sur la Caraïbe, ou même des tempêtes tropicales. C'est que le dynamisme de la circulation tropicale au-dessus de l'Atlantique oriental est tout aussi complexe qu'au-dessus de l'Afrique et que l'activité cyclonique résulte de nombreux facteurs, difficiles à hiérarchiser, et même à fixer. En effet, quel rôle joue la température de la mer et son pouvoir convectif, par rapport au talweg polaire? Quel est le poids de l'antériorité *continentale* dans la régénération des ondes africaines? Autant de questions auxquelles DENISE DE BRUM FERREIRA apporte des éléments de réponse..., des pièces versées à un dossier encore largement ouvert.

Les processus atmosphériques subtropicaux: ils sont distincts, et des processus polaires et des processus tropicaux. Leur spécificité est d'ailleurs reconnue, en prolongement de ce qui a été dit jadis par DENISE DE BRUM FERREIRA dans une thèse de 3^e cycle consacrée à la partie centrale de l'archipel des Açores. C'est par le biais des perturbations que cette spécificité est abordée et qu'en est marquée la limite.

Les dépressions subtropicales, dont la pluviométrie peut être considérable, sont les premières étudiées. Elles s'observent principalement en saison froide: sur 273 perturbations de ce type comptabilisées dans l'espace de la thèse, 205 sont nées entre octobre et avril. Elles sont liées aux descentes froides d'altitude qui instabilisent l'atmosphère. C'est que ces descentes froides se dirigent vers les latitudes où, au contact de la mer, l'air est humide et doux. Il s'ensuit une intense convection et l'apparition de champs cumuliformes. C'est cependant à l'automne que l'activité convective est la plus spectaculaire. Il faut sans doute voir là l'importance que prend le contenu thermique des couches océaniques superficielles, après l'échauffement estival. Ce sont d'ailleurs ces dispositions que l'on retrouve en Méditerranée, au moment où, après l'été, interviennent les grandes circulations atmosphériques méridiennes et les perturbations très pluvieuses.

Les perturbations de type tropical sont mises à part, illustrées par de magnifiques documents satellitaires. Ceux-ci livrent l'image de véritables cyclones tropicaux. Le fait est que par leur aspect, leur faible rayon, leur date (les cyclones Emmy et France sont passés en début septembre 1976; c'est le moment de l'année où les grands cyclones frappent les Petites Antilles), leur trajectoire erratique, ces perturbations appartiennent bien à la famille tropicale. Le National Hurricane Center de Miami les signale d'ailleurs dans les bulletins d'alerte, depuis 1972.

La troisième partie du livre II est consacrée à la variabilité climatique récente sur l'Atlantique oriental.

L'analyse de la *variabilité pluviométrique* s'appuie sur la distribution régionale des régimes probables construits à partir des valeurs quantiles. Fondés sur la période 1947-1980, les résultats sont fort instructifs: *aux latitudes subtropicales*, il existe de nombreuses années où les régimes pluviométriques comportent des maxima sur novembre, janvier ou mars; ce qui explique la faible variabilité relative de ces mois; les années les plus abondantes ne correspondent pas à un type particulier de régime; la variabilité des régimes d'une année sur l'autre est essentiellement due à la mobilité temporelle de la position des maxima. C'est ainsi que la variabilité interannuelle des régimes est en grande partie corrélée avec les groupes de moins suivants: octobre-novembre; janvier-février; mars-avril-mai. *En milieu tropical* (l'espace capverdien), les dispositions changent nécessairement car la variabilité s'intègre dans la crise du Sahel. Au demeurant, les périodes de sécheresse prolongée constituent le caractère habituel du climat des îles. C'est ainsi que les pluies, qui se concentrent pratiquement toutes entre août et octobre, peuvent connaître, durant cette période, une grande mobilité. Celle-ci se manifeste aussi bien à travers les répartitions que du fait des totaux. Il n'empêche que, quel que soit l'endroit de l'archipel capverdien pris en compte, l'extinction totale des pluies durant une longue période est rare et ne dépasse jamais l'année, bien que 10 à 11 mois sans eau soient possibles. C'est dire que dans les îles du Cap Vert, le manque de pluie ne doit pas être considéré comme un accident climatique mais comme entrant dans la norme.

Le comportement thermique fait également l'objet d'une analyse, qui passe par la prise en compte des bilans radiatifs. A ce propos, DENISE DE BRUM FERREIRA fait d'intéressantes constatations. Durant la période 1947-1980, dans les parages des Açores, du Portugal et de Madère, il semble bien que des anomalies importantes du bilan énergétique océan/atmosphère se soient produites. Aux Açores, en particulier, un fort déficit d'énergie paraît s'être manifesté entre 1960 et 1974. Les causes de ce déficit (déficit de rayonnement) sont à rechercher au printemps et en début d'été, c'est-à-dire à l'époque de l'année où se constitue normalement le gain thermique océanique. Il faut sans doute voir là l'effet de modifications dans le régime des vents d'ouest d'altitude.

Le système couplé océan/atmosphère n'est donc statique ni aux latitudes subtropicales, en accord avec les vicissitudes de la circulation d'ouest, ni aux latitudes tropicales, en liaison avec le fonctionnement de la mousson ouest-africaine et des perturbations dérivées (ondes africaines, remontée de la CIT). D'où l'intérêt porté par DENISE DE BRUM FERREIRA à la circulation de Hadley, à la circulation de Walker et à l'ENSO, dans le cadre de la mobilité globale de l'atmosphère. Quoi qu'il en soit, la variabilité du schéma n'empêche pas la constance des éléments fondamentaux: les couches-limites, les interactions à leur contact (avec échanges radiatifs et non radiatifs), les flux atmosphériques et les *forçages* exercés sur la surface océanique, etc..., le tout dominé par les termes majeurs que constituent les eaux chaudes à l'ouest et au sud,

les eaux fraîches ou froides au nord et à l'est, les fronts hydrologiques, l'anticyclone des Açores, les perturbations subtropicales et tropicales. En somme, un milieu établissant le trait d'union entre l'océan profond et la moyenne et haute atmosphère, les latitudes extratropicales et les espaces intertropicaux.

Au total, une thèse monumentale qui fixe une problématique nouvelle, mobilise des connaissances considérables et une technicité éprouvée, en particulier dans l'interprétation satellitaire; une contribution qui force l'admiration et fait honneur à l'école française de climatologie géographique.

PIERRE PAGNEY