

LES DEPRESSIONS CONVECTIVES DU BASSIN ATLANTIQUE NORD SUBTROPICAL ORIENTAL

DENISE DE BRUM FERREIRA

En automne et en hiver, les très fortes pluies qui accompagnent certains systèmes nuageux de l'Atlantique Nord subtropical ont souvent des effets catastrophiques sur les îles macaronésiennes et les régions littorales du sud-ouest de la Péninsule Ibérique. Chaque année, deux jours, en moyenne, dans les régions basses, et une vingtaine sur le toit des îles montagneuses, les intensités journalières dépassent les 50 mm. Les lames de plus de 300 mm par jour ne sont pas inconnues: Izaña (Ténérife) a enregistré 350 mm le 23 octobre 1955; 428 mm dans la seule journée du 12 novembre 1950 en totalisant 750 mm du 6 au 12 novembre. Durant cette même période, le Pic d'Arieiro (Madère) enregistrerait 349 mm en 3 jours. Du 5 au 8 novembre 1969, il tomba plus de 620 mm de pluie au sommet de la caldeira de l'île Faial et encore 150 mm en bordure de mer. Les quantités de plus de 400 mm en deux ou trois jours consécutifs se répètent presque chaque année au-dessus de 1000 m d'altitude aux Açores, à Madère et aux Canaries. Certains de ces événements ont laissé de funestes souvenirs dans la mémoire des populations locales. Les fortes intensités, la concentration spatiale des chutes provoquent le gonflement ou l'apparition de torrents dont le pouvoir érosif laisse des cicatrices irrémédiables dans le paysage des versants abrupts des îles montagneuses, et des flots de boue et de blocailles dans les régions basses, arasant maisons, infrastructures et cultures. Les épisodes les plus sévères ont également leur bilan de victimes: 30 morts à Madère, le 4 novembre 1956 et encore 12, le 20 janvier 1979; 68 morts aux Açores, le 3 septembre 1976; dans la région de Lisbonne, plus de 400 morts, le 20 novembre 1967, et 7, le 19 novembre 1983...

La brutalité des chutes de pluie, l'indécision de la trajectoire suivie par les systèmes nuageux, leur intensification inattendue sont autant de facteurs qui laissent impuissants les prévisionnistes, et qui remettent en cause la conformité de leur formation et de leur structure avec les schémas traditionnels. Les dépressions auxquelles ils sont associés sont, dans l'ensemble, de dimensions plus réduites que celles liées à l'activité frontale polaire. Elles ont une origine très diverse mais où interviennent toujours activement les processus convectifs. Elles atteignent parfois une intensité cyclonique remarquable à tel point que leur spirale nuageuse prend l'allure de celle des dépressions tropicales (exemple: le 10 décembre 1975, le 30 juillet 1976, le 4 octobre 1978, le 5 octobre 1980, toutes dans la région açoréenne). Elles intéressent surtout la moitié fraîche de l'année, entre septembre et mars. Elles présentent un maximum de fréquence en novembre, janvier et mars surtout sur la marge orientale de l'Atlantique subtropical, entre le Golfe de Cadix et les Canaries. Dans la région açoréenne, elles peuvent éclore à n'importe quel moment de l'année. Même en été, alors que l'abri anticyclonique est plus sûrement établi au milieu de l'Atlantique, elles affectent encore les îles. En cette saison, elles sont toutefois plus éphémères, ont des effets très localisés mais non moins violents.

Avec l'avènement de l'imagerie satellitaire, le repérage de ces dépressions convectives qui naissent et se développent en pleine zone subtropicale de l'Atlantique est devenu plus aisé. L'objet de cet article est justement de présenter les résultats préliminaires d'une étude en cours sur ce type de phénomène, pour la période 1967-1983⁽¹⁾. Nous avons largement utilisé les mosaïques hémisphériques des images ESSA et TIROS publiées par la NOAA ainsi que toutes les images infrarouges de GOES-E et METEOSAT disponibles pour cette période au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (France). Nous avons ensuite confronté cette documentation, d'ailleurs de valeur très inégale, avec l'information synoptique journalière. Ainsi avons-nous abouti à des résultats qui permettent déjà d'émettre quelques hypothèses sur les processus qui interviennent dans la formation de dépressions très convectives et dans leur entretien.

(1) Cet article reprend, en grande partie, le texte d'une communication présentée le 24 août 1984 au Symposium "Climatologie Tropicale et Etablissements Humains", réalisé à Dijon (France), et intégré dans le Congrès International de Géographie.

L'apparition de pluies violentes accompagne toujours un développement rapide et important de nuages à grand développement vertical qui s'organisent en amas compact ou en spirale. Ces perturbations nuageuses locales paraissent être la cause de l'apparition de nouvelles dépressions ou de l'intensification des préexistantes. Ce sont ces évolutions particulières que nous avons regroupées sous la désignation générique de *dépression convective*. L'accroissement soudain de l'activité convective résulte de diverses évolutions où participent activement les circulations polaire et/ou tropicale, et leur interaction, à l'échelle locale, dans la couche-limite, avec le champ nuageux préexistant et l'environnement océanique. Les images infrarouges ont révélé deux principales sources convectives en zone subtropicale de l'Atlantique, qui peuvent éventuellement se combiner en donnant naissance à des systèmes nuageux complexes très pluvieux. Ce sont les irruptions d'air froid sur une surface océanique chaude et les rencontres de systèmes nuageux d'échelle et d'origine différentes.

1 — LES COULÉES D'AIR FROID

Elles sont la caractéristique des courants de secteur nord dirigés par la bordure orientale d'un anticyclone atlantique, lui-même parfois prolongé par une apophyse polaire bien marquée. C'est le mode de formation de la plupart des dépressions qui naissent et s'amplifient au long de la côte portugaise, dans le Golfe de Cadix et la région canarienne. Elles ont un maximum de fréquence au printemps et en automne. Dans la région açoréenne, en toutes saisons, c'est également la principale source convective. Ces arrivées d'air froid expliquent, en partie, le maximum pluviométrique principal axé sur novembre dans toute la région orientale et la part des très fortes pluies dans le bâti des régimes (fig. 1). Elles soulignent les périodes de circulation polaire méridienne dans la troposphère supérieure. Leur fréquent blocage sur le fuseau euro-africain s'explique d'un côté, par leur progression en bordure continentale et, de l'autre, par leur évolution convective au-dessus de régions océaniques au comportement thermique particulier. Ce sont les fronts thermiques soulignant les digitations des eaux tropicales lors de leur translation saisonnière entre les Açores et la côte portugaise puis, le dôme d'eau chaude permanent de la Baie Ibéro-marocaine.

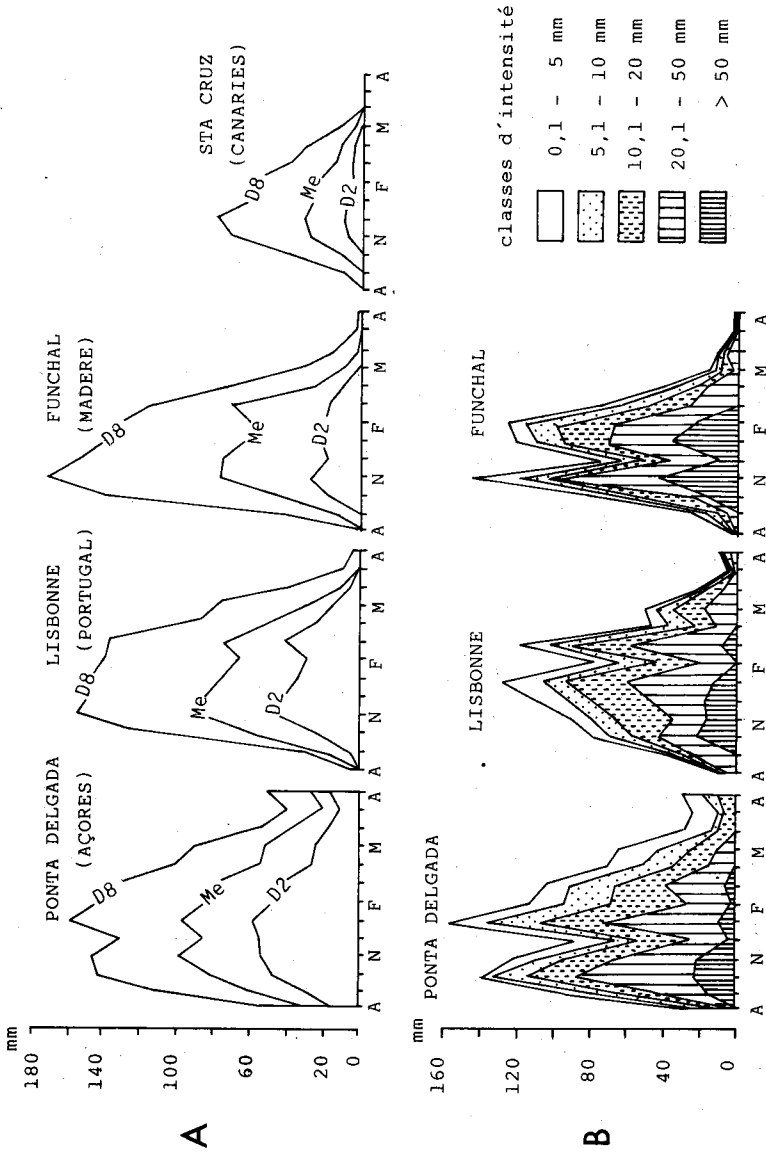


Fig. 1 — Régime et intensité des pluies dans les îles macaronésiennes et au Portugal.
 A — Régimes probables (séries centennaires). Mc, médiane; D2 et D8, 2.^o et 8.^o déciles.
 B — Décomposition du régime moyen en classes d'intensité données (étude sur 15 années)

Dès que le régime méridien de la circulation polaire est bien établi, trois évolutions rapides peuvent se présenter au sud du 40.^o parallèle. Ce sont l'isolement d'une goutte d'air froid en altitude, la formation d'une nouvelle dépression dans le secteur postérieur froid d'une perturbation à partir d'une zone enrichie en nuages convectifs et, enfin, la régénération de la portion méridionale d'un front froid.

La situation du 26 au 28 mars 1968 (fig. 2a) peut servir d'exemple au premier type d'évolution. Elle a été accompagnée de pluies torrentielles sur l'île de Madère avec des totaux supérieurs à 150 mm sur les hauts plateaux et encore de 30 à 50 mm en bordure de mer durant la journée du 27 mars.

Dans les trois cas, la présence simultanée d'une couche d'air marin chaud et d'une advection d'air froid suffisamment basse dans la moyenne troposphère entraîne la construction de gradients thermiques verticaux voisins de celui de l'adiabatique sèche, favorisant l'ascendance rapide de l'air chaud et humide et l'éclosion de cumulo-nimbus. La comparaison de séquences chronologiques d'images infrarouges, des bulletins météorologiques et des sondages amènent à penser que la recrudescence du nombre de cumulo-nimbus au-dessus d'une même région prolonge la vie des dépressions et favorise leur stagnation en renforçant le minimum dépressionnaire d'altitude et en fixant la goutte froide (figs 2b et 2c). L'expérience GATE (1974) dans l'Atlantique intertropical oriental avait déjà mis l'accent sur le fait que l'énorme dégagement de chaleur latente de condensation dans les couches moyennes d'une zone de cumulo-nimbus de la CIT était un des processus les plus actifs à évoquer pour expliquer les creusements dépressionnaires localisés et ainsi confirmait les vues pionnières de Riehl (1954) développées plus tard par Charney et Eliassen (1964) dans leur théorie de la C.I.S.K. (conditional instability of second kind). Cette théorie paraît pouvoir s'appliquer également en zone extratropicale (Rasmussen, 1979) et a été dernièrement utilisée dans les travaux de R.M. Thépenier (1976, 1983) sur la cyclogenèse en Méditerranée et dans la région du Gulf Stream. Cet auteur admet, en outre, que les amas de cumulo-nimbus renforcent la goutte froide d'altitude. Ce refroidissement supérieur est attribué à l'évolution thermodynamique de l'air dans le nuage: dépassement de la position d'équilibre statique de la particule ascendante dans l'air nuageux (effet d'"overshoot"), rayonnement de la partie supérieure du nuage, phénomène d'évaporation... Les coupes chronologiques rassemblées dans les figures

a

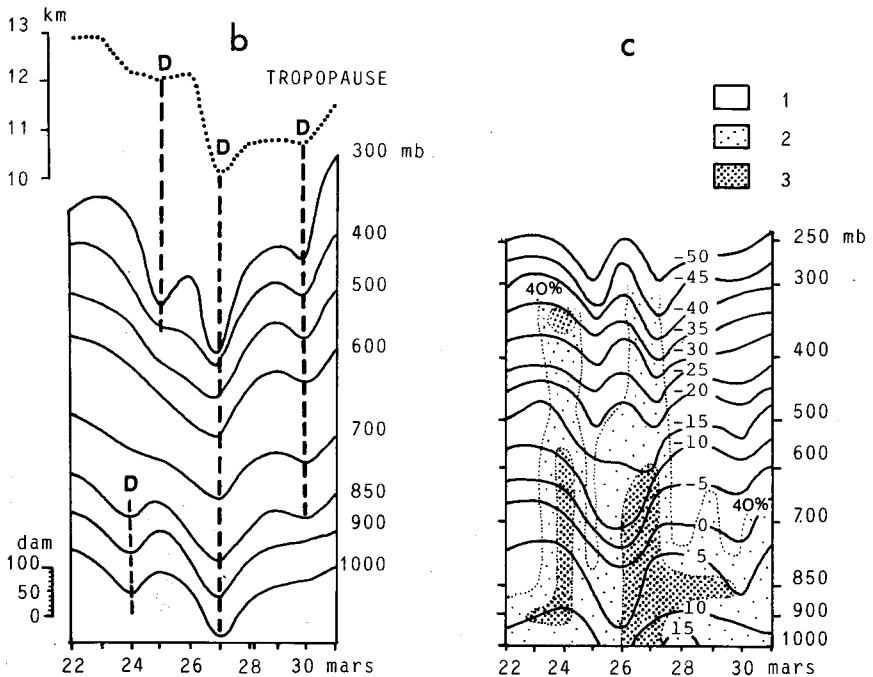
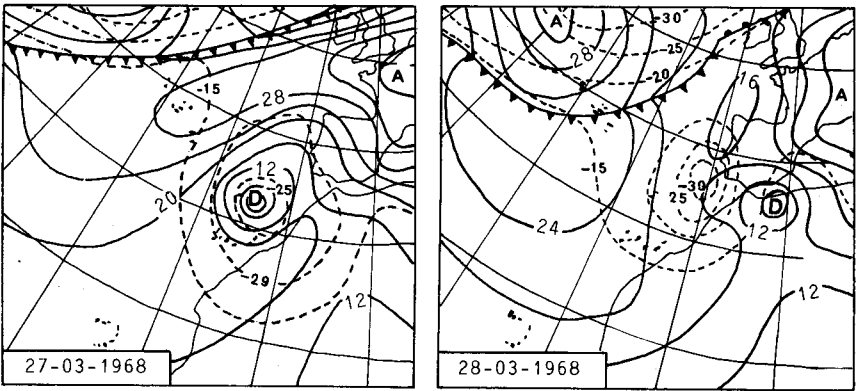


Fig. 2—La dépression convective de mars 1968.

a—Evolution de la dépression entre le 27 et le 28 mars (situation en surface à 12 TU et isothermes à 500 mb).

b—Coupe chronologique verticale des géopotentiels au-dessus de Funchal du 22 au 30 mars 1968 (D, dépression).

c—Coupe chronologique verticale des températures et de l'humidité relative à Funchal. 1, Hu inférieure à 40%; 2, Hu entre 40% et 80%; 3, Hu supérieure à 80%.

2b et 2c montrant les transformations survenues dans l'atmosphère au-dessus de l'île Madère lors du creusement de la dépression de mars 1968, paraissent prouver ce rôle des nuages convectifs. Le centre dépressionnaire de surface occupe la même position que la dépression froide d'altitude, le 26 mars, alors qu'il existe une hausse de température dans la troposphère supérieure. Le réchauffement des couches moyennes évolue de pair avec la croissance des nuages convectifs et avec le volume des précipitations tombées. La goutte froide associée à la dépression d'altitude se fixe au-dessus des amas convectifs et se renforce le 28 mars alors que le système est en déclin comme si elle était le témoin résiduel de la profondeur de la convection des jours précédents. Ces faits constatés dans la plupart des dépressions de ce type, amènent à penser qu'il existe réellement un lien entre le développement de la cyclogénèse et les phénomènes convectifs.

2— L'INTERACTION DE SYSTÈMES NUAGEUX D'ÉCHELLE ET D'ORIGINE DIFFÉRENTES

L'analyse des images infrarouges a permis de repérer une profusion d'interactions sur le Bassin Atlantique subtropical qui aboutit toujours au développement de dépressions très pluvieuses.

a) *Rencontre de systèmes nuageux d'origine polaire*

Elle est très fréquente en hiver et dérive de l'évolution convective des amas nuageux liés aux invasions décrites plus haut. Elle peut prendre un grand nombre de variantes: rencontre de deux courants perturbés de direction et de vitesse différentes, rencontre de perturbations frontales avec des amas convectifs isolés en phase de développement à une latitude subtropicale, fusion de systèmes nuageux liés à la présence de plusieurs sources froides en altitude... Dans n'importe quel cas, il existe, au point de rencontre, une croissance explosive de cumulo-nimbus et une augmentation concomitante de l'intensité des pluies. Ces évolutions sont surtout fréquentes au nord du 30.° parallèle et affectent les Açores en toutes saisons. Dans les régions madéroise et canarienne, elles sont plus nombreuses de janvier à mars et se réalisent presque toutes en situation de blocage de type "oméga".

b) *Interactions des circulations polaire et tropicale*

En premier lieu, c'est la rencontre de dépressions ou perturbations frontales polaires avec des bandes de nuages élevés matérialisant le flanc oriental de grandes vallées planétaires dans la haute troposphère et auxquelles est associé le jet subtropical. Ces bandes cirriformes sont orientées SW-NE à partir du sommet des amas convectifs les plus évolués sur la CIT. Les dépressions froides régénérées par ces rencontres ont une distribution préférentielle dans l'Atlantique subtropical et leur fréquence présente une grande variabilité interannuelle. L'examen des mosaïques hémisphériques d'images entre 1971 et 1980 a montré que la haute troposphère du Bassin Atlantique subtropical oriental reçoit les bandes nuageuses issues des cumulo-nimbus du Golfe du Mexique et du Venezuela, de l'Atlantique intertropical occidental et de l'Amazonie et enfin de la région capverdienne. Quand elles sont suffisamment développées, les premières se dirigent vers les Açores et la France (en moyenne 12 bandes par an), les secondes aboutissent sur la Péninsule Ibérique et la Méditerranée occidentale (19 bandes/an) et les dernières ont une trajectoire presque entièrement continentale au-dessus de l'Afrique saharienne et de l'Asie Mineure (14 bandes/an). Le tableau I ci-dessous donne la fréquence mensuelle des bandes nuageuses intertropicales au-dessus de l'Atlantique subtropical oriental en fonction de leur origine. Les bandes issues du Golfe du Mexique ont une distribution qui présente un maximum principal en octobre et un maximum secondaire en mai. Celles originaires d'Amazonie ont une distribution pratiquement symétrique avec un maximum axé sur janvier. Celles issues de l'Atlantique intertropical au sud-ouest de Cap Vert ont une distribution plus étalée au long de l'année entre septembre et mai, avec un maximum de fréquence en mars.

Les sondages effectués sous ces bandes révèlent toujours la présence d'un vent fort de SW au-dessus de 250 mb et son renforcement à chaque nouvelle invasion froide dans la troposphère supérieure. Nul doute que ces alignements cirriformes dévoilent la présence du jet subtropical. Les systèmes se développant à une latitude subtropicale sous les versants orientaux des vallées polaires les plus profondes entrent ainsi périodiquement en phase avec la circulation des basses latitudes en passant sous le jet subtropical (D. Brum Ferreira, 1983). A la rencontre, il n'est

TABLEAU I

Répartition mensuelle des bandes nuageuses d'origine intertropicale (nombre total de bandes observées entre 1971 et 1980)

origine	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
G. Mexique	2	4	9	13	17	9	4	0	7	26	15	9
Amazonie	42	29	20	16	14	9	2	0	6	14	19	25
SW Cap Vert	13	15	22	17	13	5	2	2	9	11	11	12

pas rare que la bande cirriforme supérieure se déforme ou se rompe et prenne à son tour un tourbillon cyclonique rapidement occupé par un amas convectif en forme de virgule. D'après ce que nous avons pu observer à plusieurs reprises, la dépression froide s'enrichit en cumulo-nimbus qui s'organisent en lignes convergentes autour d'un amas central. La spirale nuageuse finit ainsi par ressembler davantage à celle des dépressions tropicales qu'à celle de la dépression froide originelle. La fréquence de ces dépressions présente une grande variabilité interannuelle car leur éclosion dépend non seulement de l'intensité convective de la CIT mais aussi de son action en phase avec des descentes froides suffisamment puissantes pour intéresser les latitudes subtropicales. C'est entre septembre et janvier qu'elles sont les plus nombreuses entre les Açores et Madère, avec un maximum de fréquence en novembre. Elles ont des effets pluviométriques particulièrement brutaux sous l'accrétion nuageuse marquant la connection des deux circulations.

La situation du 23 au 26 novembre 1967 est un exemple particulièrement démonstratif de l'activité pluviométrique de ces interférences. Un système nuageux très convectif, stationnaire depuis le 17 novembre sur l'île de Madère et formé sous une advection froide supérieure (fig. 3a), a été pris en étau entre un front froid à caractère orageux circulant des Açores en direction de la Péninsule Ibérique et une advection chaude au sud-est, dirigée par le jet subtropical (figs. 3b et 4). La convergence des deux circulations à l'endroit-même où évoluait la dépression madéroise,

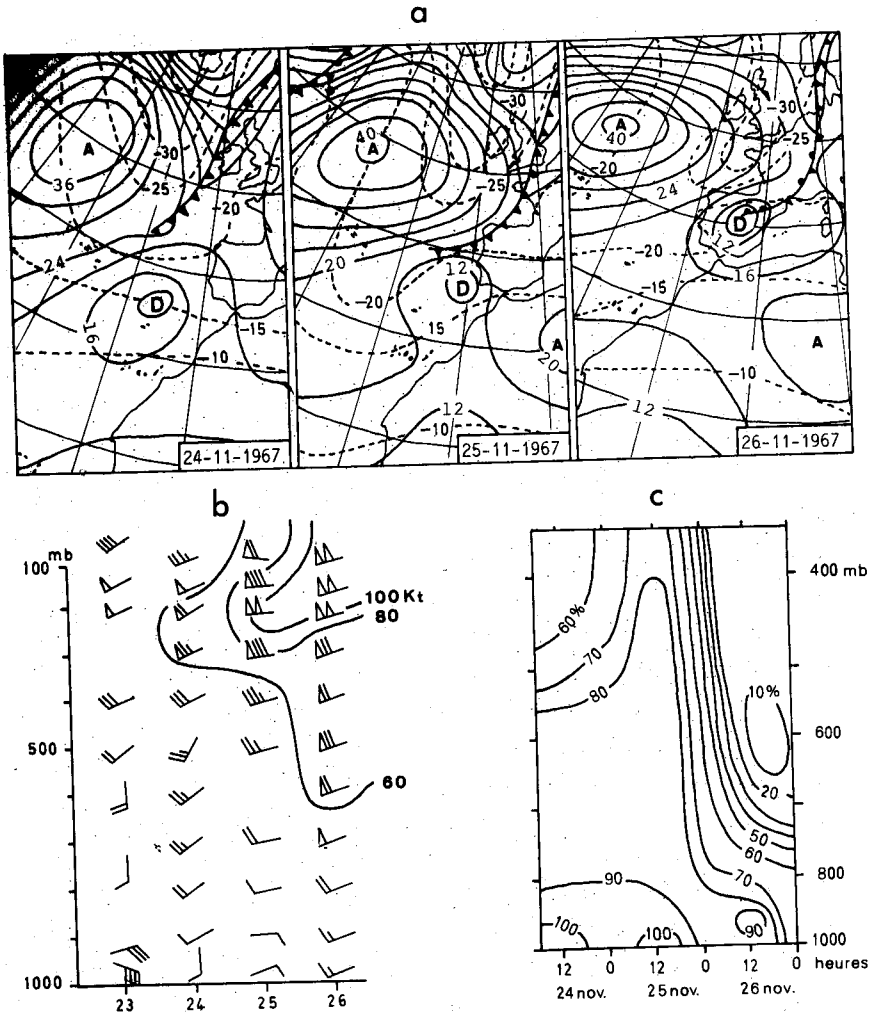


Fig. 3—La dépression convective de novembre 1967.

a—Evolution de la dépression du 24 au 26 novembre (situation en surface à 12 TU et isothermes à 500 mb).

b—Direction et vitesse du vent au-dessus de Kenitra (Maroc) du 23 au 26 novembre à l'observation de 12 TU. 1 triangle, 50 kt; une barbule, 10 kt; une demi-barbule, 5 kt.

c—Coupe chronologique verticale de l'humidité relative au-dessus de Lisbonne, du 24 au 26 novembre.

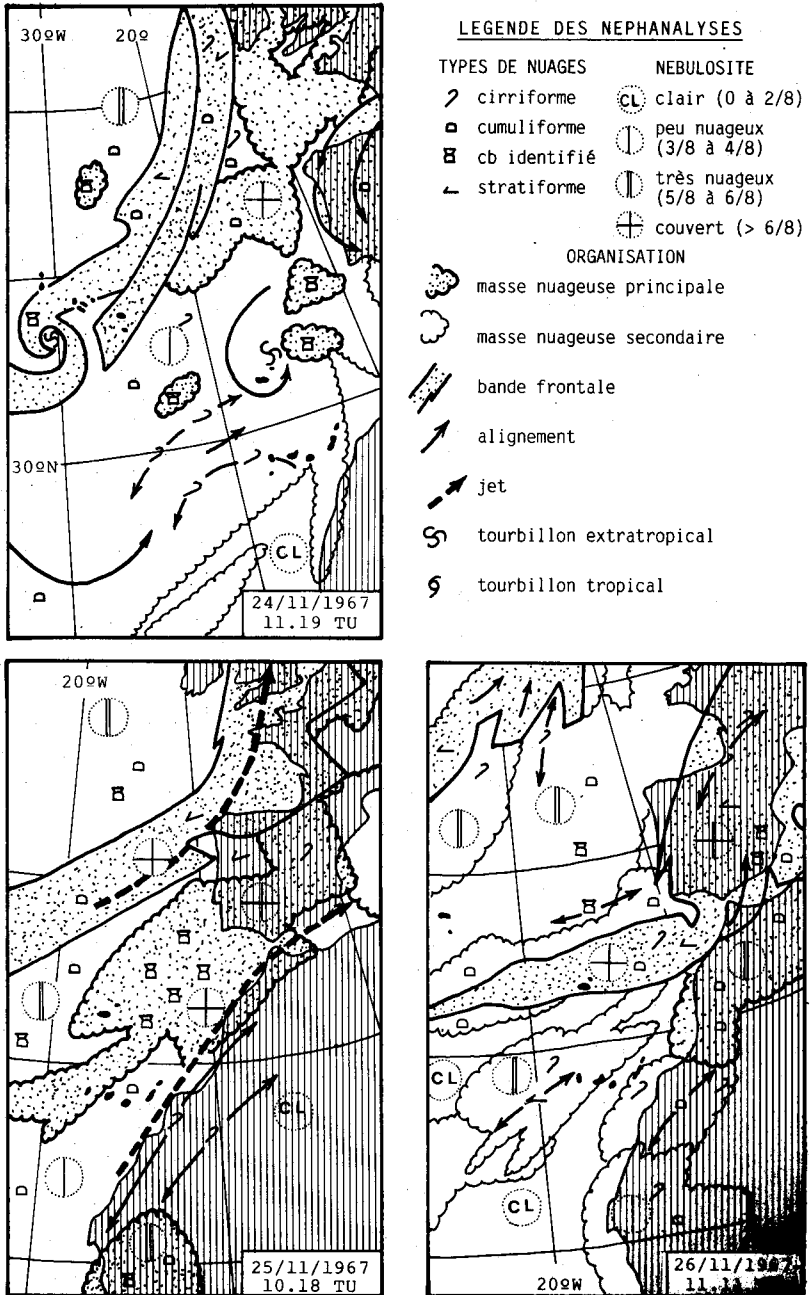


Fig. 4 — Néphanalyses du 24 au 26 novembre 1967, effectuées sur images ESSA-6.

dans la journée du 25 novembre, provoque un développement explosif des cumulo-nimbus sur sa face nord et leur entraînement en direction de la Péninsule Ibérique. Leur trajectoire SW-NE à l'avant du front froid est soulignée par des chutes de pluies diluviennes dans toute la vallée du Tage, dans la nuit du 25 au 26 novembre. La montée d'air chaud et très humide (fig. 3c) sur la face orientale de la dépression, le fort gradient horizontal de température de part et d'autre du front froid, l'accélération verticale du vent expliquent l'abondance des nuages convectifs au moment de la connection et les valeurs élevées des intensités pluviométriques horaires alors enregistrées. Le 25 novembre, entre 20 h et 21 h, il est tombé 60 mm de pluie sur la Baie de Cascais, 30 mm sur Lisbonne.

Ce type de dépression convective intéresse surtout la marge subtropicale orientale de l'Atlantique en automne et début d'hiver. Le rapprochement des circulations polaire et tropicale s'effectue le plus souvent en mer au sud du 35.^o parallèle et non à la côte, comme ce fut le cas en novembre 1967 ou en novembre 1983. Pour cette raison, c'est l'archipel de Madère qui est le plus exposé et dans une moindre mesure les îles Canaries.

Entre septembre et novembre, également dans des trajectoires de sud et de sud-ouest, des dépressions froides régénérées par des cyclones tropicaux en provenance des Antilles passent sur les Açores. Ces dépressions ont toujours un système nuageux tourbillonnaire compact où dominent les cumulo-nimbus. Elles provoquent de redoutables tempêtes en mer et des pluies copieuses en passant sur les îles. Nous avons étudié ailleurs (D. Brum Ferreira, 1981) le cas d'Emmy et de France qui ont été la cause de la chute d'un avion vénézuélien au large de l'île de Terceira en 1976. Depuis, six autres évolutions de ce genre se sont répétées dans les parages des Açores, toutes en fin d'été.

Le point de départ de l'évolution est la fragilisation de l'anticyclone subtropical par un talweg d'altitude. Quand l'advection froide est assez puissante, l'anticyclone finit par se scinder en deux cellules séparées par un couloir dépressionnaire méridien ou orienté SW-NE. Ce dispositif provoque toujours une dégradation du temps, des orages et parfois de forts abats pluviométriques sur les îles açoréennes. Ces couloirs ouverts jusqu'aux basses latitudes, jouent un rôle fondamental pour attirer les cyclones tropicaux hors de la zone intertropicale. L'accentuation de la convergence en surface et la proximité de l'air froid en altitude, la pré-

sence d'un jet de SW dans la troposphère supérieure, provoquent un soutirage des cyclones qui évoluent d'est en ouest sous le flanc sud de la cellule anticyclonique orientale. En arrivant sur le fuseau du couloir, ils modifient de façon décisive leur trajectoire qui devient SW-NE. Ils passent ainsi sur la face nord de l'anticyclone subtropical et se placent sous la dépendance du courant polaire. Ils perdent leur identité en s'incluant dans les dépressions froides. La suture des deux systèmes se réalise au sud-ouest des Açores dans le secteur chaud des perturbations polaires ou à l'extrémité méridionale des fronts froids (planche I). La dépression résultante régénérée par l'apport de chaleur et d'humidité et par l'advection de tourbillon se creuse de nouveau (parfois de plus de 20 mb) et a des effets pluviométriques remarquables lorsqu'elle heurte les îles surtout si elles sont montagneuses. Emmy et France, du 1 au 6 septembre 1976 ont déversé entre 100 et 150 mm de pluie sur les côtes des îles centrales de l'archipel açoréen dont les trois quarts dans la seule journée du 4 septembre. Sur les sommets, les pluviomètres ont débordé dès le 2 septembre (capacité de 200 mm).

La fréquence de ce type de dépression mixte est très variable d'une année à l'autre. Elle dépend non seulement de l'établissement d'une circulation méridienne lente sur le fuseau des Açores mais aussi du champ thermique océanique. Nous avons constaté que, si pour une raison quelconque, la dépression tropicale cesse d'être guidée par le courant polaire au sud-ouest des Açores, elle stagne, son système nuageux se désagrège et perd son tourbillon. Attirés en milieu subtropical, les cyclones tropicaux ont donc besoin de l'intervention d'un facteur externe (advection froide d'altitude) pour entretenir leur activité convective. L'océan sur lequel ils circulent est loin d'avoir la température requise au maintien d'un dégagement de chaleur latente suffisant dans le corps nuageux. Nous avons également remarqué que ce sont les automnes où la température de surface est la plus forte au centre de l'Atlantique subtropical ou sur la moitié orientale du bassin que les cyclones tropicaux sont les plus actifs lors de leur annexion à la circulation polaire sur les Açores (1967, 1974, 1976, 1978 à 1980). Le cyclone tropical Gloria, par exemple, conservait encore une forte intensité au nord du 30.° parallèle, le 13 septembre 1979 (975 mb et vents de 85 kt) avant de se placer sous la dépendance d'une puissante vallée polaire, en circulant sur des eaux dont la température variait entre 27.° et 25.° (fig. 5).

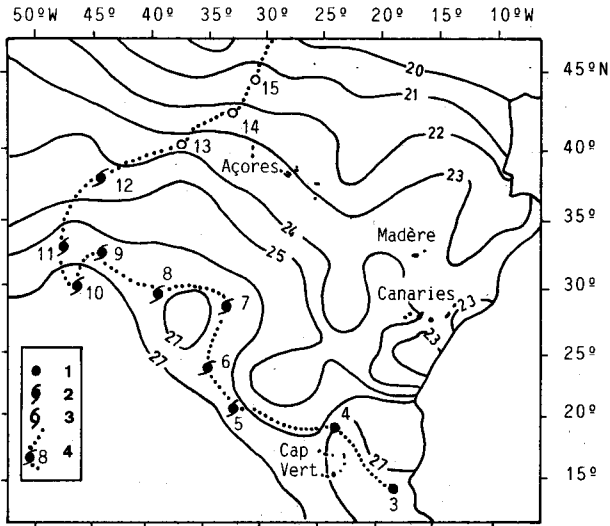


Fig. 5 — La trajectoire de Gloria du 3 au 15 septembre 1979 et les températures de l'océan en surface durant la première décade de septembre 1979 (d'après *Gosstcomp SST*, NOAA). 1 formation du tourbillon; 2, intensification de la convection et du tourbillon; 3, phase d'intégration dans le front polaire et de désagrégation; 4, trajectoire et position du centre du tourbillon à 12 TU de la date indiquée.

3 — LES ÉVOLUTIONS DE TYPE TROPICAL

L'influence de l'environnement océanique chaud prend toute son importance dans la transformation d'un système nuageux évoluant sur l'Atlantique subtropical en amas convectif de type tropical. Ces amas s'apparentent à ceux des cyclones tropicaux par leur faible rayon, leur organisation en spirale convective, leur évolution souvent erratique exclusivement marine. Ils se marquent par un minimum de pression en surface moins creusé que pour les cyclones; ils sont néanmoins accompagnés de vents forts et de pluies torrentielles. Cette évolution convective souvent brutale, qualifiée de "bombe" dans un article récent de Sanders et Gyakum (1980), est surtout bien connue dans l'Atlantique occidental aux abords du Gulf Stream. Les dangers qu'elle représente pour la navigation ont fait que le *National Hurricane Center* de Miami la signale dans les bulletins d'alerte depuis 1970. Aucune surveillance

n'est faite dans le bassin oriental, pourtant le phénomène existe également. Entre 1967 et 1983, les images ont révélé 8 évolutions cycloniques subtropicales nettes dont l'intensité permettait l'existence d'un œil au centre de la spirale nuageuse. Toutes se sont formées au sud du 35.° parallèle, entre les méridiens 20.° W et 35.° W, de septembre à janvier. Un peu plus fréquents sont les amas convectifs compacts plus ou moins circulaires aux bords nets, mais sans œil (22 cas en 17 ans), de dimension plus grande que celle des cyclones subtropicaux. Leur distribution spatio-temporelle est moins bien définie. Leur éclosion résulte de deux types d'évolution bien distincts dans un environnement maritime chaud. C'est, d'une part, la transformation d'une onde de l'est et, d'autre part, celle d'un tourbillon froid extratropical. La figure 6 et la planche II donnent un exemple de chaque type.

À la suite de la fermeture d'un couloir dépressionnaire méridien, il n'est pas rare de pouvoir observer, pendant plusieurs jours, une cicatrice en U renversé pénétrant dans le flanc sud de l'anticyclone subtropical et entraînée ensuite vers l'ouest par l'alizé. Ainsi est née une onde de l'est. Certaines ondes de l'est seraient donc issues des fronts froids et vieilles occlusions des latitudes moyennes. P. Pagny (1966) avait proposé le terme de "onde de l'est polaire" pour les distinguer de celles d'origine purement cinématique et tropicale. Ces ondes conservent une structure barocline et apparaissent de plus en plus fréquemment à partir de septembre avec la reprise d'une circulation polaire méridienne dans la moyenne troposphère sur la marge orientale du Bassin Atlantique. Leur effet se fait sentir à une latitude bien plus septentrionale que pour les ondes cinématiques. C'est l'origine de la perturbation observée sur les Canaries le 23 septembre 1978 et dont un amas convectif, sur son extrémité nord, entraîné par l'alizé, évoluera les jours suivants dans la dépression subtropicale IRMA, au sud des Açores (fig. 6). Dès le 27 septembre, l'amas nuageux, qui jusque-là n'a subi aucun changement important, va se transformer. Il entre dans une zone de l'Atlantique où la disposition météo-océanique suscite des étendues calmes, ensoleillées, avec des températures élevées. L'apport de chaleur et de vapeur d'eau à la base de la masse nuageuse renforce l'enrichissement en nuages convectifs et le mouvement tourbillonnaire. Le 4 octobre, un œil est visible au centre de la spirale, témoignant de l'intensité cyclonique. Irma traverse l'archipel açoréen entre les îles de Flores et Faial, le 5 octobre, déjà

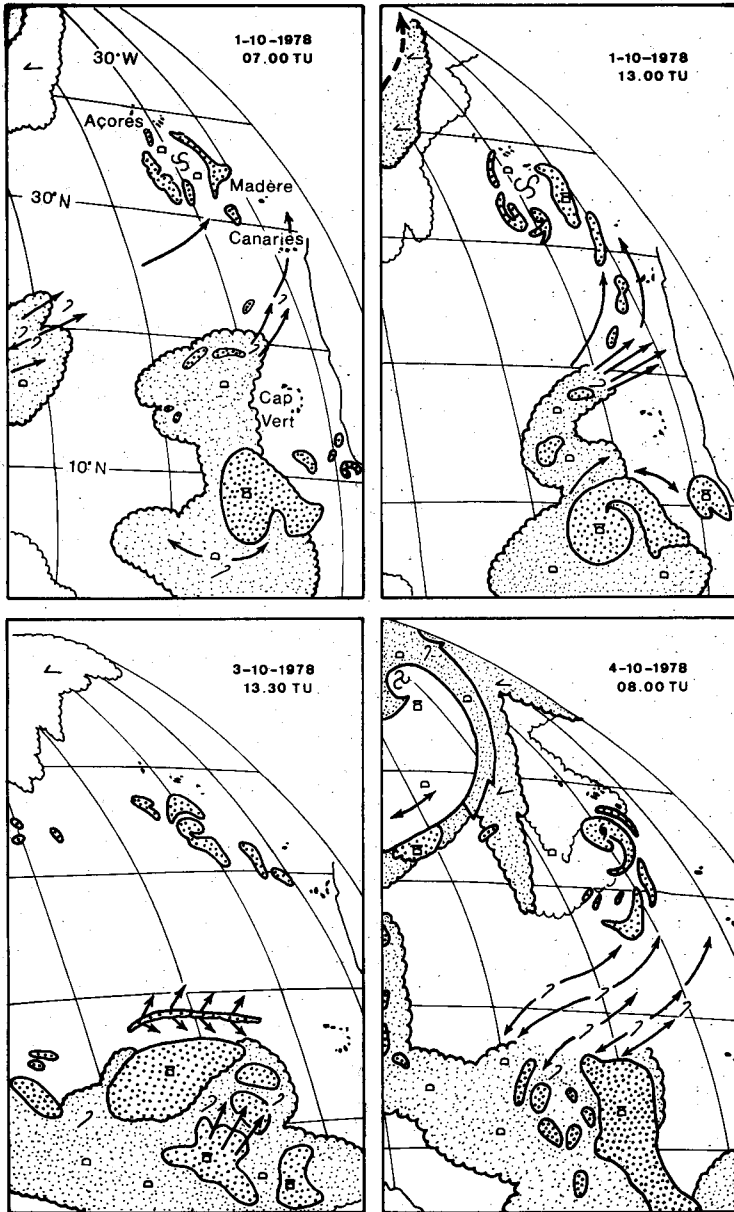


Fig. 6 — Néphanalyses simplifiées effectuées sur images infrarouges GOES-E du 1 au 4 octobre 1978 montrant les transformations du système nuageux convectif à l'origine d'Irma. Les amas de cumulo-nimbus ont été indiqués en gros pointillé (mêmes conventions que dans la figure 4).

intégrée dans un système frontal vigoureux. Le 6 octobre, elle perd son identité en donnant naissance à une dépression mixte très creusée au nord des Açores.

IVAN (planche II) est le résultat de la transformation d'un tourbillon d'origine extratropicale au cours de la période de 27 septembre au 16 octobre 1980. A la suite d'une forte expulsion d'air froid visible jusqu'à Madère, on décèle, le 28 septembre, un centre tourbillonnaire cumuliforme greffé sur la bande nuageuse d'un front froid circulant le long de la côte portugaise. Cette dépression s'isole et évolue sous goutte froide les jours suivants, entraînée vers le SW. Sur sa face orientale, les nuages convectifs deviennent très abondants dans une montée d'air chaud provenant d'Afrique du nord. Ainsi, du 2 au 6 octobre, la convection s'intensifie et s'organise en tourbillon presque circulaire de 300 km de diamètre. Durant toute cette phase, le tourbillon a une trajectoire très accidentée qui semble suivre les zones de fronts thermiques océaniques (fig. 7). Du 6 au 11 octobre, il atteint sa plus grande intensité. Il devient circulaire, essentiellement composé de nuages convectifs disposés en bandes convergentes et un œil est visible en son centre. Ces caractéristiques montrent que le système d'origine polaire a pris l'aspect d'un cyclone tropical. Durant cette période, Ivan a évolué au-dessus d'un océan chaud dont la température variait entre 24.° et 25.°. Dans la soirée du 11, il s'inclut dans le secteur chaud d'une perturbation polaire à l'ouest des Açores. Le 12 octobre s'effectue la fusion des masses nuageuses polaires et tropicales en déclenchant une forte cyclogénèse. La dépression mixte atteint le Golfe de Gascogne le 15 octobre. Ainsi l'amas nuageux d'où est né Ivan achève sa course presque à son point de départ, après avoir parcouru près de 9000 km.

CONCLUSION

D'après le mode de formation, d'évolution et la structure nuageuse, nous aboutissons à la distinction de plusieurs types de systèmes convectifs évoluant en zone subtropicale de l'Atlantique oriental. Tous paraissent naître dans une atmosphère barocline originelle. C'est leur évolution postérieure qui les distingue. Pour les uns, le caractère barocline subsiste durant toute leur évolution. Ce sont les plus fréquents et nous pouvons les rapprocher de ceux décrits par Palmén (1949). L'acti-

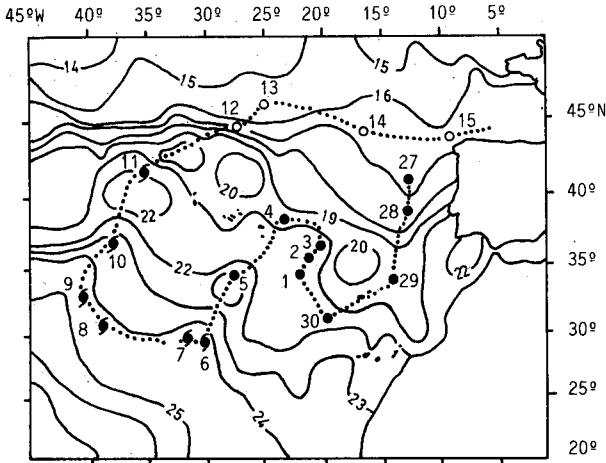


Fig. 7 — La trajectoire d'Ivan du 27 septembre au 15 octobre 1980 et les températures de l'océan en surface durant la première décade d'octobre 1980 (d'après Gosstcomp SST, NOAA). Même légende que la figure 5.

vité convective est maximale à la périphérie de la dépression, du côté oriental. Pour les autres, elle se concentre au coeur du tourbillon. Ils sont davantage du type décrit par Palmer (1951). Quoique l'instabilité barocline semble être pour beaucoup d'entre eux la source d'énergie première, ils acquièrent rapidement la capacité de s'entretenir, probablement par libération de chaleur latente de condensation, au fur et à mesure qu'ils organisent un nombre croissant de cumulo-nimbus dans leur circulation. L'activité convective des dépressions se doit à la combinaison favorable de plusieurs facteurs, dynamiques et géographiques, d'échelles très différentes. Ce sont les forts contrastes de température et d'humidité entre les masses d'air en conflit. La présence d'air chaud et humide dans les basses couches (air marin local ou advection d'air tropical maritime instable) ne peut qu'activer l'instabilité et alimenter des pluies copieuses. La présence de températures fortes de l'océan ou de zones de gradients thermiques horizontaux nets à la surface de l'eau favorise les transferts de chaleur latente et sensible de l'océan dans l'air froid et, par conséquent, la formation de champs de cumulus dans la couche-limite. En altitude, une advection froide, le versant oriental d'une grande vallée planétaire et la confluence des circulations polaire et tropicale sont des facteurs à prendre en compte pour expliquer la recru-

descence de l'instabilité. Les fortes averses qui accompagnent le corps convectif des dépressions sont dues aussi bien aux puissantes ascendances dynamiques qu'à l'aspiration à la base d'air bien alimenté en vapeur d'eau. La preuve en est que lorsque le système nuageux circule sur le continent (Péninsule Ibérique, Maroc), il s'épuise rapidement. Enfin, les archipels montagneux jouent un rôle local important pour fixer les nuages cumuliformes et augmenter les abats pluviométriques.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- AMARAL, I. DO — "As inundações de 25/26 de Novembro de 1967 na região de Lisboa", *Finisterra*, 1968, III-5, p. 79-84.
- BRUM FERREIRA, D. — "Les types de temps de saison chaude aux Açores", *Finisterra*, 1981, XVI-32, p. 231-260.
- — "Étude de la convection au-dessus de l'Atlantique tropical au large de l'Afrique occidentale", *Hommes et Terres du Nord*, 1983, n.º 3, p. 29-33.
- CHARNEY, J.; ELLASSEN, A. — "On the growth of the hurricane depression", *Jour. Atm. Sc.*, 1964, vol. 21, p. 68-75.
- PAGNEY, P. — *Le climat des Antilles*, Travaux et Mémoires des Hautes Études d'Amérique Latine, Paris, 1966.
- PALMÉN, E. H. — "Origine and structure of high level cyclones south of the maximum westerlies", *Jour. of Meteo.*, 1949, vol. 6, p. 22-31.
- PALMER, C. E. — "On high level cyclones originating in the tropics", *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1951, vol. 32, p. 683-696.
- RASMUSSEN, E. — "The polar low as an extratropical CISK disturbance", *Quart. Jour. Royal Meteo. Soc.*, 1979, vol. 105, p. 531-549.
- RIEHL, H. — *Tropical Meteorology*, McGraw Hill, 1954.
- SANDERS, F.; GYAKUM, J. R. — "Synoptic-dynamic climatology of the "bomb", *Month. Wea. Rev.*, 1980, vol. 108, p. 1589-1606.
- THÉPENIER, R. M. — *Étude des perturbations nuageuses de l'hémisphère Nord. Rôle de la convection dans la cyclogenèse*. Thèse de Doctorat d'État, Paris VI, 1983.
- THÉPENIER, R. M.; CRUETTE, D.; QUENEY, P. — "Rôle de la convection orageuse dans l'évolution des tourbillons cycloniques sur l'Europe occidentale", *C. R. Acad. Sc. Paris*, 1976, 282, série B, p. 251-252.
- M. O. — *Preliminary Scientific Results of the GARP*, GATE Report n.º 14, Genève, 1975.

Documents

- Boletim Meteorológico Diário*, S.M.N./I.N.M.G., Lisbonne.
- Boletín Diario del Servicio Meteorológico Nacional*, Madrid

Bulletin Quotidien de Renseignements Météorologiques du Maroc, Casablanca.
Catalog of Meteorological Satellite Data, NOAA, Asheville, U.S.A.
Environmental Satellite Imagery, NOAA, Asheville, U.S.A.
Meteosat Image Bulletin, ESA, Darmstadt
Synoptic Weather Maps, Daily Series, Northern Hemisphere, Sea Level and 500 mb charts, NOAA, Asheville, U.S.A.

RESUMO

As depressões convectivas do Atlântico Norte subtropical oriental. Nesta região do Atlântico, as precipitações caem sobretudo de Outubro a Abril, desde os Açores até às Canárias. As chuvas intensas, superiores a 20 mm por dia, representam apenas um quinto dos dias de chuva, mas desempenham um papel essencial na definição dos regimes pluviométricos. Estes aguaceiros, por vezes diluvianos, associam-se a perturbações de origem diversa, em que intervêm processos convectivos. O início da evolução é sempre marcado por um desenvolvimento rápido e importante de nuvens cumuliformes. O crescimento da intensidade convectiva, nas latitudes subtropicais, é o resultado de diversos processos, que se analisam neste artigo.

Do lado polar do anticiclone subtropical, a principal fonte convectiva é a afluência de ar frio, em talvegues meridianos de altitude, acima da superfície oceânica quente. Três evoluções principais podem ocorrer: isolamento de uma gota de ar frio em altitude, regeneração da porção meridional de uma frente fria ou nascimento de uma nova depressão no sector frio posterior de uma perturbação a partir de uma zona convectiva activa. As interacções de circulações de origem e escala diferentes constituem outra fonte convectiva importante: são, sobretudo, as interferências entre vários sistemas de origem polar (encontro de duas correntes perturbadas, fusão de perturbações frontais com núcleos de nuvens convectivas isolados, interacção de sistemas nebulosos associados a várias fontes de ar frio em altitude...) mas, também, as conexões entre a circulação polar e tropical.

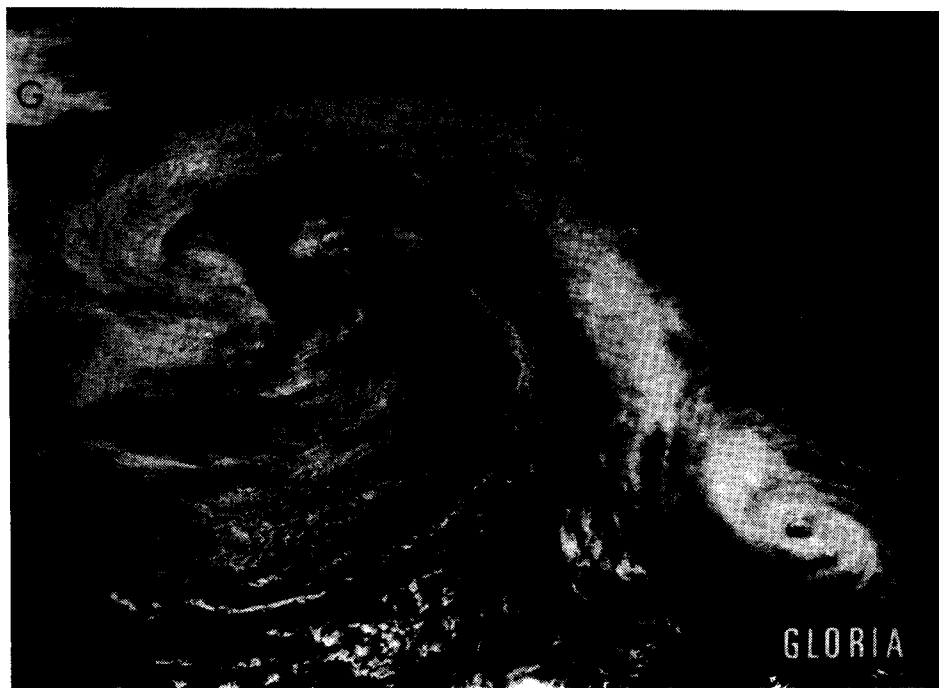
Assim, as depressões convectivas do Atlântico subtropical parecem estreitamente tributárias da circulação meridiana. O ambiente marítimo, o grau de intervenção de uma atmosfera baroclínica e da libertação do calor latente de condensação, modelam, em seguida, as interacções, imprimindo um carácter polar ou tropical à evolução convectiva.

SUMMARY

Convective lows in the North-East subtropical Atlantic Ocean. In this region of the Atlantic Ocean, rains fall mainly from October to April, from the Azores to the Canary Islands. The highest rainfall (> 20 mm/day) represents 20% of the rainy days but they play an essential role in the rainfall distribution. These showers, from time to time torrential, are associated with active frontal depressions or depressions of other origins which are basically made up of essentially convective clouds.

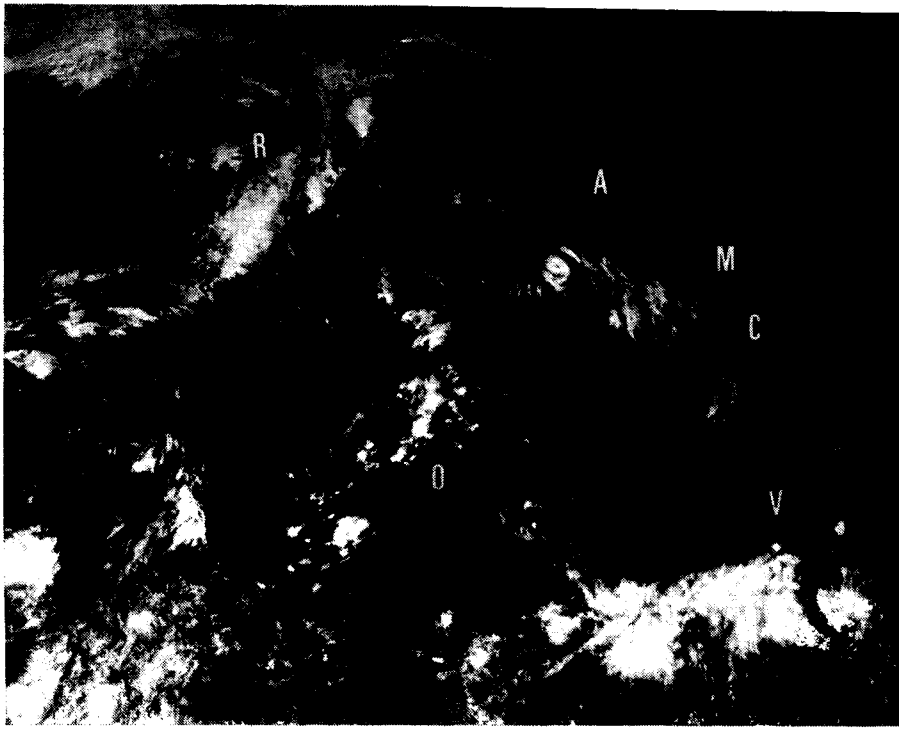
On the polar side of the subtropical anticyclone, the main convective source is the burst of cold air, in meridional upper troughs, above the warm sea. Three evolutions can appear: cut-off lows, regeneration of the southern part of a cold front, birth of a new depression in the post frontal air. The interactions of several circulations of different origins and scales are another importante convective source. First, there is the interaction of polar systems, then, the connection between polar and tropical circulations.

Therefore, convective depressions in the subtropical Atlantic Ocean, south of latitude 40° North, seem to be mainly linked with meridional circulation activity. Warm environment of the ocean, evolution controlled by a baroclinic atmosphere or by the latent heat of condensation released in the formation of convective clouds thus transform the low into a polar type (cold vortex) or into a tropical type (warm vortex).



Pl. I — Le cyclone tropical Gloria vu le 13 septembre 1979, à 15.00 TU, par le satellite GOES-F, spectre visible (C.M.S., Lannion: Cliché Météorologie Nationale, France).

Le cyclone a atteint son intensité maximum (975 mb et vents de surface de 85 kt). Remarque : système nuageux compact, en spirale, attirant dans sa circulation des bandes nuageuses convectives, l'oeil central bien formé. Gloria vient d'être annexé à la circulation polaire en se soudant à l'arrière d'un front méridionale d'un front froid très actif. Sa vigueur est dénoncée par l'épaisseur et la continuité de la bande nuageuse, essentiellement formée par des strato-nimbus très lumineux, partiellement voilée par une nappe de cirrus. L'irruption d'air froid à l'arrière du front est soulignée par des arcs successifs de nuages cumuliformes. (F, île de Flores; G, Groenland).



Pl. II -- Ivan au moment de son intensité maximum, le 8 octobre 1980 à 17.00 TU' (Image GOES-F dans le spectre visible reçue au C.M.S. de Lannion. Cliché Météorologie Nationale France).

Depuis le 6 octobre, l'intensification de la convection a augmenté graduellement à proximité du centre, attestant la transformation en tourbillon tropical. Le 8 octobre, son intensité (970 mb et vents de surface de 90 kt) est dénotée par la présence d'un tourbillon nuageux à faible rayon de courbure et de l'œil central caractéristique des cyclones tropicaux. Il attire dans sa circulation des formations nuageuses de tout l'Atlantique subtropical oriental. Ce n'est que le 11 octobre, avec le déplacement vers l'est de la bande nuageuse de la perturbation septentrionale (PF), qu'Ivan entrera définitivement dans la circulation polaire en perdant ses caractéristiques tropicales. Remarquer, au sud, la convergence intertropicale active, barre l'Atlantique de l'Afrique au Brésil et la présence d'une onde (O) dans le flux d'est tropical. La rencontre ultérieure possible, aux latitudes moyennes, de deux systèmes nuageux d'origine polaire (la portion la plus convective de la bande frontale où une ondulation est en formation) et l'amas nuageux en forme de virgule au nord-ouest). A, Açores; M, Madère; C, Canaries; V, Cap Vert.