

ETUDE PAR TELEDETECTION DE LA LOCALISATION DES FRONTS DE BRISE DE MER DANS LE NORD-EST DU BRESIL

FREDERIC DAMATO, OLIVIER PLANCHON, VINCENT DUBREUIL, PASCAL GOUERY

COSTEL (LETG-UMR 6554 CNRS) - Université Rennes 2
6 Avenue Gaston Berger - 35043 Rennes cedex, France

Abstract. A method of identification of sea breeze fronts by remote sensing (visible data from the GOES-8 satellite) was applied to the North-East of Brazil. The aim of this paper was to estimate the frequency of sea breeze fronts observations and their average distance of penetration inland at 1800 UTC. During the dry season of the year 2000, the highest frequency of sea breeze fronts occurrence was recorded on the northern fringe of the studied area. The sea breeze fronts penetrated further inland between September and November, with a maximum distance from the coast of Ceará.

Keywords: GOES-8, sea breeze fronts, North-East Brazil.

1. Introduction

L'échauffement différentiel des océans et des continents induit des contrastes thermiques plus ou moins importants entre les masses d'air qui les surmontent, ce qui engendre les circulations de brise de terre et de mer. En pénétrant dans les terres, la brise de mer intervient largement sur les éléments du climat (température, humidité, nébulosité, précipitation). A l'avant de la circulation, le front de brise de mer est une discontinuité spatiale et atmosphérique méso-échelle marquant un contraste thermodynamique. L'air marin plus dense, stable et frais soulève l'air continental plus chaud et instable, ce qui active la convection au niveau du front de brise et permet la formation d'une ligne de nuages de type cumuliforme, parallèle à la côte et poussée vers l'intérieur par la brise de mer. Le front de brise de mer est donc souvent détectable sur les images satellites par cette nébulosité caractéristique. Aux latitudes intertropicales, l'intensité de l'échauffement diurne continental et la moindre influence de la force de Coriolis favorisent, quand le relief le permet, la pénétration de la brise dans l'intérieur des terres jusqu'à 100 ou 150 km (Yan et Anthes, 1987 ; Abbs et Physick, 1992). Dans les climats tropicaux à alternance saisonnière saison des pluies/saison sèche, la saison sèche (ou peu pluvieuse) est la plus favorable au développement de circulations de brise de mer puissantes, compte-tenu de la plus forte insolation. L'objectif de cette étude était d'estimer, à l'aide des données du canal visible du satellite GOES-8, la fréquence d'apparition des fronts de brise de mer sur la bordure continentale du Nord-Est du Brésil et l'ampleur de leur pénétration dans l'intérieur des terres. L'évolution des fronts de brise a été suivie dans l'espace et dans le temps, durant la saison la moins arrosée (septembre à décembre 2000), afin de mettre en évidence les variations mensuelles imposées par les états de surface et par les conditions climatiques d'échelle synoptique.

2. Données et méthodes

Les fronts de brise de mer ont été identifiés par l'imagerie satellitaire, en repérant les formations nuageuses caractéristiques qui leur sont associées. R. Pielke (1974) a utilisé les images satellites afin d'appuyer une analyse de la convection nuageuse et des orages associés au front de brise de mer en Floride. En Afrique de l'Ouest (golfe de Guinée), S. Cautenet et R. Rosset (1989) ont utilisé les images visibles du satellite METEOSAT pour illustrer certaines observations de pénétration des fronts de brise de mer pendant la saison sèche. J.E. Simpson (1994) a confirmé l'utilité des images satellites (NOAA 6 et 11) pour identifier la nébulosité

liée au front de brise de mer sur différentes péninsules et bordures continentales (Sud de l'Angleterre, Danemark). La pénétration de la brise de mer dans l'intérieur des terres modifie la distribution spatiale des nuages sur la bordure du continent. A partir de l'imagerie satellitaire, le front de brise de mer apparaît souvent comme une ligne de nuages cumuliformes à l'intérieur du continent, mais toutes les situations de brise ne sont pas accompagnées d'un front nuageux (par exemple lorsque l'humidité de l'air est trop faible), ou celui-ci peut être masqué par d'autres formations nuageuses, d'échelle plus large. L'utilisation de la télédétection est donc restrictive et part d'un *a priori* majeur : seules les situations de brise de mer associées à un front nuageux peuvent être observées. Le suivi par satellite aide cependant à localiser la position de cette discontinuité et sa morphologie, c'est-à-dire indirectement à mesurer l'intensité et le caractère persistant de la brise.

Les données traitées dans le cadre de cette étude ont été enregistrées par le satellite géostationnaire GOES-8, positionné à 75°W et donnant ainsi une vision de l'ensemble de l'Amérique du Sud. La résolution spatiale est de 1 km dans le canal visible et de 4 km dans l'infrarouge. Les images visibles ont été privilégiées (longueurs d'onde comprises entre 0.58 et 0.68 μm), car les enregistrements effectués dans ces longueurs d'onde permettent de discriminer les types de nuages en fonction de leur albedo : celui-ci varie notamment en fonction de l'épaisseur du nuage et de sa densité. Les images ainsi obtenues permettent d'identifier nettement la forme, l'extension et les contours des nuages et des formations nuageuses, et de bien distinguer les nuages bas des surfaces océaniques et continentales. Les données infrarouge ont été utilisées pour estimer le gradient thermique. Les données infrarouge ont été utilisées pour estimer le gradient thermique mensuel moyen entre le continent et l'océan selon deux transects perpendiculaires à la côte (Ceará et Pernambuco : **Figure 1**).

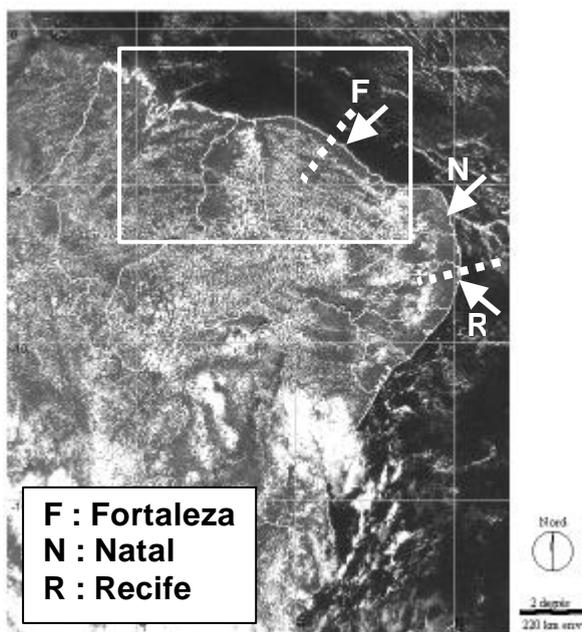


Figure 1 : Image visible GOES-8 du Nord-Est du Brésil (02.09.2000 à 1800 UTC) ; transects thermiques en pointillés

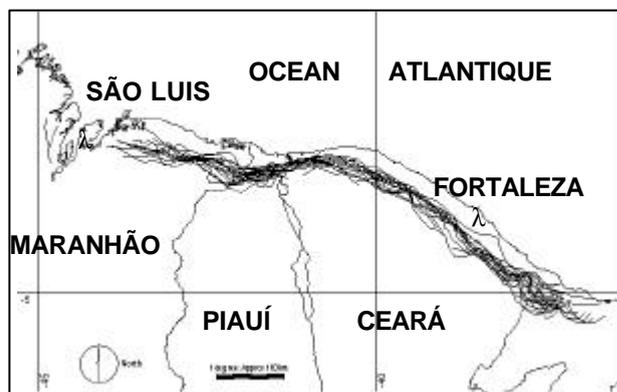


Figure 2 : Tracé des fronts de brise en septembre 2000, par superposition des fichiers-vecteurs

Les données ont été enregistrées tous les jours à 1800 UTC (1500 locales dans le Nord-est du Brésil) pour les mois de septembre à décembre 2000, c'est-à-dire les mois les moins arrosés sur une grande partie de l'espace étudié (Ratisbona, 1976 ; Nimer, 1989). Les fichiers ont été fournis par le SATMOS (CMS, Lannion, France). Chaque image quotidienne a été

projetée selon la méthode de référence «plate carrée» (latitude, longitude). Les fronts de brise de mer ont été identifiés et tracés sur chaque image ; tous les fichiers-vecteur géoréférencés ont alors été superposés sur des cartes du nord-est du Brésil (exemple : **Figure 2**). La cartographie de la fréquence des fronts de brise a été réalisée en effectuant la somme des fichiers-vecteur. Afin d'effectuer l'analyse spatiale fondée sur les pixels, les fichiers-vecteur ont été convertis en fichiers-raster, en attribuant la valeur «1» aux pixels correspondant à une observation de front de brise de mer et «0» aux autres pixels. Un filtre moyen 3x3 a été appliqué pour lisser et homogénéiser les contours de l'image. Cette méthode, testée en Europe de l'Ouest (Damato et al., 2003), a été appliquée ici à un espace intertropical compris en latitude entre l'équateur et 15°S et en longitude entre 35 et 45°W. Seuls les résultats les plus significatifs sont présentés ici (bordure exposée au nord ou au nord-est: **Figure 2**).

3. Résultats et discussion

La localisation des fronts de brise de mer montre un gradient spatial très resserré (**Figure 3**).

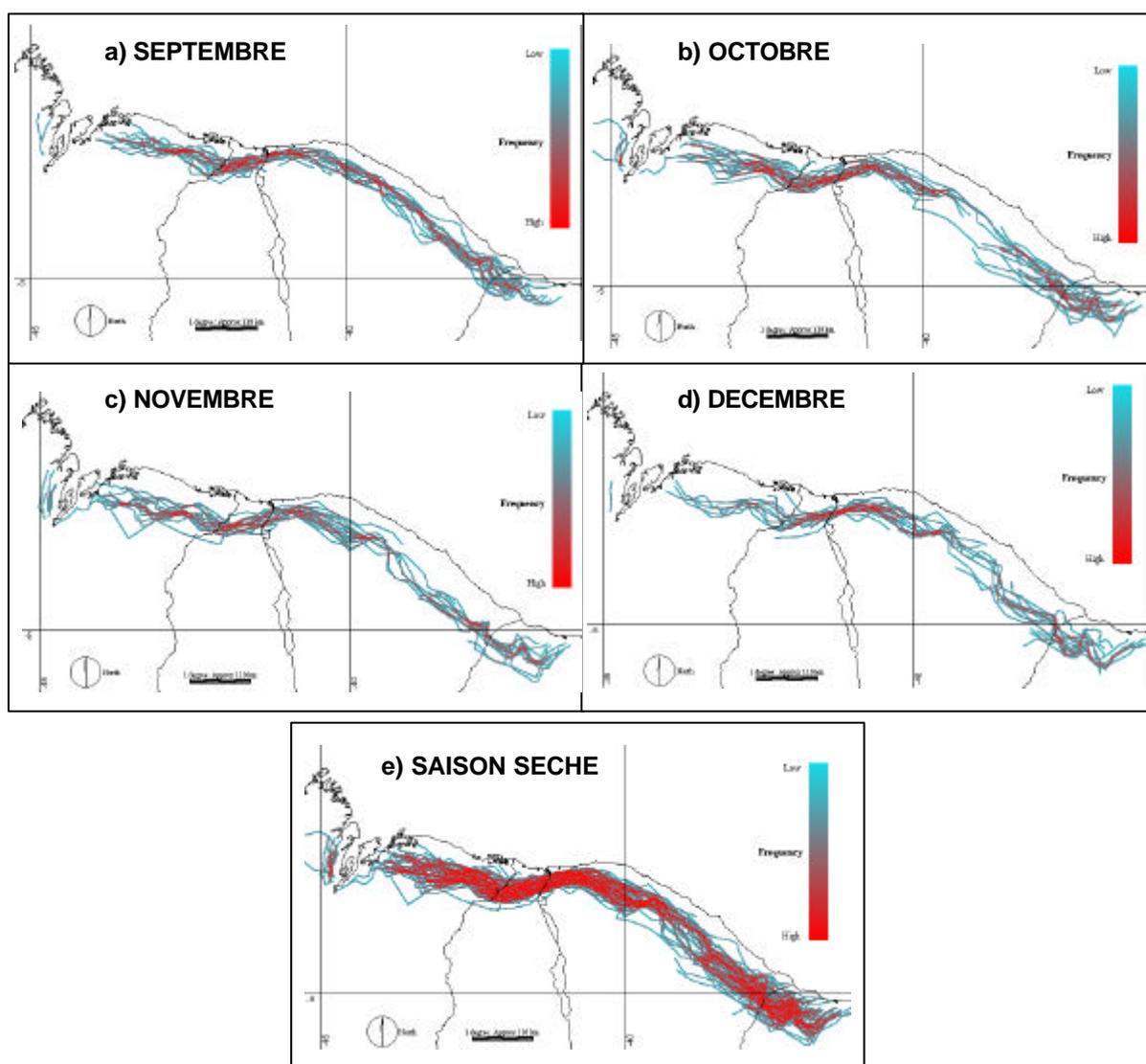


Figure 3 : Fréquence d'observation des fronts de brise de mer par télédétection (1800 UTC) sur la bordure septentrionale du Nord-Est du Brésil, pendant la saison sèche 2000.

Ce seuil est matérialisé par la forte densité des observations pour tous les mois. La topographie accidentée de la bordure exposée à l'est rend difficile l'identification des fronts de brise de mer, car ceux-ci sont souvent masqués par d'autres formations nuageuses liées aux effets orographiques. La bordure peu accidentée des Etats de Ceará, Piauí et Maranhão est plus favorable à la pénétration des fronts de brise de mer dans l'intérieur de terres. A 1800 UTC, la pénétration est d'autant plus importante que l'on s'avance dans la saison sèche : En septembre, les fronts de brise de mer ont été observés dans l'intérieur des terres à des distances de la côte comprises entre 40 et 80 km, avec une fréquence maximale à environ 60 km de la côte (**Figure 3a**). Le maximum de pénétration (60 à 100 km) semblait atteint en novembre (**Figure 3c**), mais seules des observations plus tardives en soirée permettraient de déterminer plus précisément quelle est la distance maximale de pénétration de la brise de mer. Dans les Guyanes et autour des bouches de l'Amazone, la distance de pénétration est probablement d'une centaine de kilomètres au moins, mais en pénétrant à l'intérieur, la nébulosité liée au front de brise se mêle à celle, de plus grande ampleur, liée à l'activité convective au-dessus des espaces forestiers (Snow, 1976 ; Cavalcanti, 1982 ; Molion, 1987).

La synthèse des fréquences pour toute la saison sèche (**Figure 3e**) montre une large bande parallèle à la côte, située vers 40 à 100 km dans les terres et donnant ainsi une idée de l'extension du « climat maritime » sur l'espace étudié. Une étroite bordure de 20 à 40 km en moyenne a alors bénéficié fréquemment d'un ciel dégagé à l'heure de référence. En effet, quand le flux synoptique est de même sens que la brise de mer, le front de brise progresse rapidement vers l'intérieur dans la journée, le littoral bénéficiant alors de l'air maritime relativement stable et plus frais. Le tracé peu indenté de la côte facilite les observations de fronts de brise et permet de déterminer de quelle façon se module la pénétration des fronts en fonction de l'orientation de la côte. Les fronts de brise les mieux marqués et développés sont associés à un vent synoptique faible et de direction opposée à la brise de mer (Estoque, 1962 ; Arritt, 1993), mais un vent synoptique faible (moins de 6 ou 8 m s⁻¹ selon les auteurs : Borne *et al.*, 1998) et de même sens que la brise de mer favorise la pénétration du front dans l'intérieur. Ainsi, les fronts de brise pénètrent plus loin dans les terres sur les bordures les mieux exposées aux alizés océaniques de sud-est (Ceará à l'est de 40°W et est du Maranhão) que sur les bordures exposées au nord ou NNW (Ceará à l'ouest de 40°W), donc plus abritées que les précédentes. Dans cette région, les collines situées à proximité du littoral (serra da Ibiapaba) contribuent vraisemblablement à gêner la pénétration des fronts de brise. Ainsi, les fronts de brise sont le plus fréquemment observés, durant la saison sèche, à une distance du littoral variant peu d'un mois à l'autre. Les fronts de brise pénètrent moins loin dans l'intérieur (20 à 50 km), leur progression est ralentie par les reliefs, même peu élevés, d'où un gradient spatial plus resserré qu'en arrière des côtes « au vent ». Les effets « au vent » et « sous le vent » se remarquent aussi de part et d'autre des baies de la région de São Luis (Maranhão) : les fronts de brise sont plus fréquemment observés en arrière de la rive occidentale, exposée aux alizés.

Le réchauffement différentiel entre la surface de l'océan et la bordure continentale crée un gradient thermique plus ou moins favorable à la pénétration des fronts de brise de mer dans l'intérieur des terres. La différence entre la moyenne des températures maximales de surface sur la bordure du continent et la moyenne des températures maximales sur l'océan, déterminée à partir des données infrarouge GOES-8, est une bonne référence pour estimer le gradient thermique terre-mer (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Evolution mensuelle du gradient thermique de surface terre-mer (données infrarouge – GOES-8).

	Sep	Oct	Nov	Déc	SP	SS
CTM	5,3	6,7	6,2	7,1	4,5	6,3
F%>4°C	94,1	89,3	90,9	100	64,1	93,5
CTMCS	5,3	6,7	6,4	7,4	5,0	6,4
CTMCO	-	6,2	3,9	5,8	4,1	5,3

CTM : contraste thermique terre-mer. **F%>4°C** : fréquence mensuelle et saisonnière (en %) des contrastes thermiques supérieures au seuil de 4°C. **CS** : côte septentrionale. **CO** : côte orientale. **SP** : saison pluvieuse. **SS** : saison sèche.

Un gradient thermique d'au moins 4°C, entre la surface du continent et celle de la mer, est nécessaire au développement des circulations de brise de mer aux latitudes intertropicales (Okoola, 1978 ; Cautenet et Rosset, 1989). En 2000, au pas de temps mensuel, les contrastes thermiques terre-mer étaient le plus souvent supérieurs à 4°C. Cependant, l'ampleur de ce contraste thermique présentait des variations saisonnières imposées par l'alternance saison pluvieuse/saison sèche. 93,5% des observations étaient associées à des gradients thermiques supérieurs à 4°C en saison sèche, contre 64,1% en saison pluvieuse. La brise de mer a pu théoriquement se produire quasiment tous les jours durant la saison sèche, ce qui confirme les observations réalisées dans le visible. Les contrastes thermiques étaient compris entre 6 et 7°C en moyenne, mais ils s'amplifiaient de septembre (5-6°C) à décembre (7-8°C). Cette évolution est liée à l'augmentation de la température de surface sur le continent en relation avec l'efficacité de la radiation solaire en cette saison, associée à une nébulosité faible. L'accentuation du gradient thermique de surface terre-mer au cours de la saison sèche permet donc la mise en place de conditions thermiques favorables au développement de circulations de brises de mer puissantes capables de pénétrer d'autant plus loin dans l'intérieur, les alizés apportant l'humidité atmosphérique nécessaire à la formation de nuages au niveau du front de brise.

Les brises de mer acquièrent donc une grande régularité et une puissance particulière sous les climats intertropicaux à saison sèche. A l'est des continents, la pénétration dans l'intérieur est favorisée par les alizés océaniques, de même direction que la brise. Les circulations de brise s'inscrivent dans la circulation des alizés, dont elles peuvent régulièrement infléchir la direction dans les basses couches mais en renforcent la vitesse dans l'après-midi. La direction du vent est aussi nuancée en fonction de la saison, par exemple en Tanzanie et au Kenya (Sumner, 1984 ; Camberlin et Planchon, 1997). Dans le nord-est du Brésil, le rythme diurne de la direction du vent en surface traduit bien la combinaison de l'alizé océanique et de la brise de mer, la déviation du vent de surface étant fonction également de l'orientation de la côte (**Figure 4**). Ainsi, en septembre 2001, le vent s'orientait de préférence, à Fortaleza (côte exposée au NE) : du SE à 0600 UTC à l'E à 1800 UTC ; à Natal (côte exposée à l'ENE) : du S ou SSW (0600 UTC) à l'ESE (1800 UTC). A Recife (côte exposée à l'ESE), la direction restait essentiellement orientée du SSE à S, avec cependant un renforcement de la fréquence de ces deux directions (15,4% de calmes à 0600 UTC), et un renforcement de la fréquence des directions E et notamment ESE (11,5 %). Ces changements diurnes traduisent l'alternance brise de terre (à 0600 UTC) / brise de mer (à 1800 UTC), dont les directions subissent à la fois l'influence de l'alizé et de l'orientation de la côte.

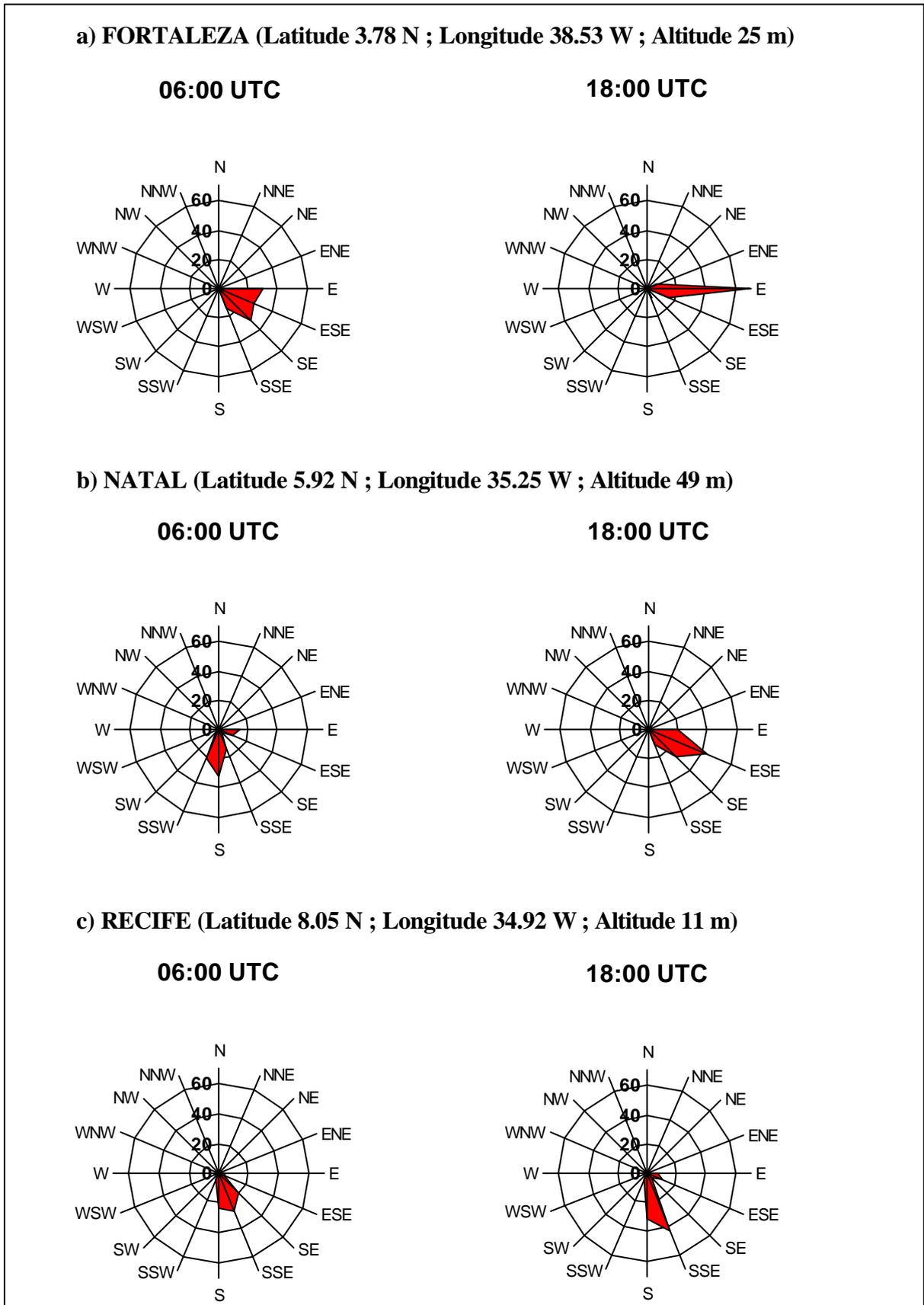


Figure 4 : Fréquence de la direction du vent en septembre 2001 (données Météo-France)

L'effet des circulations de brises sur la direction du vent est aussi bien marqué à Natal qu'à Fortaleza. A Recife, la régularité de l'alternance journalière de brises a déjà été mise en évidence (Vulquin, 1979). En septembre 2001, la vitesse moyenne du vent en surface se renforçait, à Recife, de 3.4 à 5.4 m s⁻¹ entre 0600 et 1800 UTC (à Fortaleza : 4.1 à 6.2 m s⁻¹), ce qui traduisait l'intervention répétée des brises de mer se combinant à l'alizé. Ce n'est donc pas l'absence de circulations de brise de mer qui est en cause dans l'absence d'observations de fronts de brise sur la bordure exposée à l'est, mais essentiellement un problème du au relief. Les massifs montagneux introduisent un niveau de complexité supplémentaire dans l'interprétation des images, par la nébulosité qu'ils favorisent fréquemment sur la bordure du continent. La plaine côtière est assez étroite (50 à 100 km) et la nébulosité éventuelle liée aux fronts de brise se mêle donc rapidement vers l'intérieur à celle liée à la convection et / ou aux ascendances orographiques liées aux massifs montagneux.

4. Conclusion

Une méthode d'identification des fronts de brises par télédétection (données et images visibles du satellite GOES-8) a été appliquée au nord-est du Brésil, afin d'en calculer la fréquence d'apparition et la distance préférentielle de pénétration dans les terres aux heures chaudes de la journée (1800 UTC). La charge hygrométrique élevée de l'air tropical océanique est favorable, même durant les mois les moins arrosés ou saison «sèche» (peu de pluie, mais un air humide sous l'influence des alizés océaniques) au développement de formations nuageuses convectives (de type cumuliforme) associées aux fronts de brise de mer. La structure particulière et nette de ces formations nuageuses a permis d'établir des cartes de fréquences durant la saison sèche au nord-est du Brésil (septembre à décembre), mois par mois et tous mois confondus. Les résultats obtenus confirment d'une part que les fronts de brise pénètrent d'autant plus loin dans les terres que l'on s'avance au cœur de la saison sèche (renforcement du gradient thermique terre-mer), et, d'autre part, que la distance de pénétration des fronts de brise varie en fonction de l'exposition de la côte aux alizés, des nuances existant au nord de l'espace étudié malgré la faible articulation de la côte. Sur les bordures les moins bien exposées, les cartes de fréquences font ressortir une permanence dans l'espace et dans le temps (mois par mois) de la localisation des fronts de brise à 1800 UTC. Sur la bordure orientale du nord-est brésilien, les fronts de brise de mer étaient masqués par la nébulosité d'origine orographique. L'activité convective suscitée par l'arrivée du front de brise de mer sur le continent est suffisante, en climat tropical humide, pour provoquer des averses et mettre en place, du fait de la régularité des circulations de brises, des rythmes pluviométriques diurnes spécifiques aux climats tropicaux côtiers et maritimes. Des données pluviométriques horaires permettraient de le vérifier sur le nord-est du Brésil, et d'en étudier les nuances en fonction des expositions et des saisons.

Bibliographie

- Abbs, D.J.; Physick W. Sea-breeze observations and modelling: a review. *Australian Meteorological Magazine*, v. 41, p. 7-19, 1992.
- Arritt, R.W. Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze. *Journal of Applied Meteorology*, v. 32, p. 116-125, 1993.
- Bader, M.J., Forbes; G.S., Grant, J.R., Lilley, R.B.E., Waters, A.J. *Images in weather forecasting. A practical guide for interpreting satellite and radar imagery*. Cambridge University Press, 1995. 499 p.
- Borne, K.; Chen, D.; Nunez, M. A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the swedish west coast. *International Journal of Climatology*, v. 18, n. 8, p. 901-914, 1998.
- Camberlin, P.; Planchon O. Coastal precipitation regimes in the equatorial latitudes, the case of Kenya. *Geografiska Annaler*, v. 79 A, n. 1-2, p. 109-119, 1997.

- Cautenet, S.; Rosset, R. Numerical simulation of sea breezes with vertical wind shear during dry season at Cape of Three Points, West Africa. *Monthly Weather Review*, v. 117, p.329-339, 1989.
- Cavalcanti, I.F.A. *Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais*. MSc thesis, São José dos Campos: INPE-2494-TDL/097, 1982.
- Damato, F.; Planchon, O.; Dubreuil, V. A remote sensing study of the inland penetration of sea breeze fronts from the English Channel, *Weather*, 2003 (sous presse).
- Estoque, M.A. The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *Journal of Atmospheric Science*, v. 19, p. 244-250, 1962.
- Molion, L.C.B. On the dynamic climatology of the Amazon basin and associated rain-producing mechanisms. In : The geophysiology of Amazonia, Ed. Dickinson R.E., Wiley, p. 391-407, 1987.
- Nimer, E. *Climatologia do Brasil*. IBGE, Rio de Janeiro, 1989. 421 p.
- Okoola, R.E.A. Spatial distribution of precipitation in the Mombasa area of Kenya, Kenya Meteorological Department, *IMTR Research Report*, v. 1/78, 1978.
- Pielke, R. A three-dimensional numerical model of sea-breezes over South Florida. *Monthly Weather Review*, v. 102, p.115-139, 1974.
- Ratisbona, L. R. The climate of Brazil. In: *World Survey of Climatology*, Amsterdam: Elsevier, 1976, v. 12, Chap. 5, p. 219-293.
- Simpson, J.E. *Sea breeze and local winds*. Cambridge University Press, 1994. 234 p.
- Snow, J.W., 1976: The climate of Northern South America. In: *World Survey of Climatology*, Amsterdam: Elsevier, 1976, v. 12, Chap. 6, p. 295-403.
- Sumner, G.N. The impact of wind circulation on the incidence and nature of rainstorms over Dar es Salaam, Tanzania. *Journal of Climatology*, v. 4, n. 1, p. 35-52, 1984.
- Vulquin, A. *Comparaison entre le climat de Buenos Aires et les climats de la façade orientale du Brésil*. Thèse de Doctorat d'État - Université de Bourgogne, Dijon, 1979. (v. 2) 552 p.
- Yan, H.; Anthes, R.A. The effect of latitude on the sea breeze. *Monthly Weather Review*, v. 115, n. 5, 936-956, 1987.

Remerciements :

Les auteurs remercient Dominique Dagorne et Hervé Roquet, du CMS (Centre de Météorologie Spatiale, Lannion, France), pour leur aide à l'acquisition des images GOES <<http://www.satmos.meteo.fr/>>.