

DENISE DE BRUM FERREIRA

LINHA DE ACÇÃO DE GEOGRAFIA FÍSICA

LISBOA
1981

CENTRO DE ESTUDOS GEOGRÁFICOS
INIC

Denise de Brum Ferreira

CONTRIBUTION DES IMAGES INFRAROUGES DU SATELLITE METEOSAT
À LA CONNAISSANCE DES CONDITIONS THERMIQUES DU PROCHE ATLANTIQUE AU
LARGE DE L'AFRIQUE DU NORD

CONTRIBUTION DES IMAGES INFRAROUGES DU SATELLITE METEOSAT
À LA CONNAISSANCE DES CONDITIONS THERMIQUES DU PROCHE ATLANTIQUE AU
LARGE DE L'AFRIQUE DU NORD

Dès mai 1978, une première exploitation des données de METEOSAT entreprise par le Centre Océanologique de Bretagne avait abouti à une étude des températures de la mer et du déplacement des fronts thermiques au voisinage des côtes de la Mauritanie et du Sénégal⁽¹⁾. Grâce aux logiciels conçus par J. Noël au Bureau de Télédétection de L'ORSTOM, il est possible de traiter les informations numériques transmises par le satellite en comparant les données de plusieurs fichiers. Les résultats du traitement sont visualisés sur une imprimante noir et blanc. On obtient ainsi les images analysées ici et qui constituent les figures 1 à 4⁽²⁾.

1) Le traitement des données et la construction des images

Le logiciel VUMET a été utilisé pour suivre l'évolution des températures de la mer du 8 au 10 juillet 1978 entre le Golfe de Cadix

(1) F. DOMAIN, Le satellite METEOSAT et l'océanographie, Télédétection n° 3, ORSTOM, 1979, 43 p.

(2) Le traitement des images présentées ici a été réalisé au cours d'un stage au Bureau de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy (France), en octobre 1980.

et l'archipel canarien. Il a mis en oeuvre trois fichiers de base correspondant aux données numériques, reçues sur bande magnétique, des observations en infrarouge thermique des trois journées consécutives à 13 h. On a effectué tout d'abord la construction et l'analyse séparées des images de ces trois observations puis celles d'une image de "permanence" au 2/3 obtenue à partir de la fusion des images des 8, 9 et 10 juillet 1978 à 13 h.

L'espace traité est une image de 500 lignes et, sur chaque ligne, de 500 points élémentaires ou pixels. À chaque point correspond un nombre variant de 0 à 255. Cette valeur est proportionnelle à l'énergie reçue par le radiomètre à bord du satellite. Les images (fig. 1 à 4) ont été construites sur un écran PERICOLOR en adoptant un pas de deux comptes numériques et fixées ensuite sur l'imprimante. Cet intervalle correspond à peu près à 1° C. Une marge d'erreur est due à l'emploi des données numériques sans prétraitement, telles qu'elles sont reçues par le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion. En réalité, cette connaissance de la température absolue n'est pas indispensable comme on le verra dans la suite du commentaire. Les trois images obtenues présentent les caractéristiques thermiques de la surface de l'océan. L'image du 8 juillet, surtout, pratiquement dépourvue de nuages, fait apparaître correctement les températures de la mer. Le 9 et encore plus le 10 juillet, la présence d'importants secteurs nuageux vient perturber les mesures effectuées dans l'infrarouge. La présence de nuages empêche les ondes infrarouges de parvenir jusqu'au sol et d'importants secteurs des images sont ainsi inutilisables (traînes blanches). Sur leurs marges, les nuages laissent passer les ondes infrarouges mais dans ce cas, les mesures subissent des modifications gênantes. La vapeur d'eau des nuages est plus froide que l'océan. L'image thermique obtenue dans les secteurs de marges nuageuses traduit donc en quelque sorte un bilan entre la température de la vapeur d'eau contenue dans le nuage et celle de l'océan proprement dite. Ces perturbations qui sont des sources d'erreur d'interprétation dans des images isolées ne sont pas permanentes. Les systèmes nuageux se déplacent et il est donc rare que plusieurs images successives présentent des perturbations d'origine atmosphériques aux mêmes endroits.

Le logiciel CREE tire parti de cette constatation. En comparant plusieurs fichiers mais suffisamment rapprochés dans le temps, il élimine tous les points élémentaires caractérisés par des nombres différents. On annule ainsi tous les points qui ne traduisent pas un phénomène thermique à la surface de l'océan. On part du principe, en effet, que l'inertie thermique de l'océan joue en faveur d'une constance des valeurs des nombres caractérisant les températures de surface de l'eau. La figure 4 est une image de permanence au 2/3. Ce qui revient à dire qu'elle a été construite à l'aide des points qui avaient la même valeur deux fois sur trois lors de la comparaison des trois fichiers. L'information contenue dans cette image peut donc être considérée comme stable et ainsi elle a une très forte probabilité de caractériser un phénomène thermique à la surface de l'océan. Tous les autres points représentant des phénomènes thermiquement hétérogènes ont été éliminés. La densité primitive des points dans l'espace traité (500 lignes de 500 points) est de nouveau restituée par un processus de "cristallisation" autour de chaque valeur numérique dont la qualité de permanence a été reconnue. On obtient alors un document où le traçage des isolignes est déjà possible. Une amélioration de leur contour est apportée par une ou deux opérations de lissage qui élimine les points aberrants. La figure 4 est l'image obtenue après un unique lissage.

2) Les résultats

a - Les phénomènes thermiques à l'échelle régionale

La situation météorologique du 8 au 10 juillet 1978 est assez représentative des conditions moyennes estivales de la région. C'est l'époque de l'année où l'anticyclone subtropical, en cellule forte déporté au nord des Açores, dirige au long de son flanc oriental un flux à composante nord sur le Maroc et le proche Atlantique: l'alizé. L'alizé, de par son origine anticyclonique, a une structure stable, est malgré son humidité dans les basses couches, il n'engendre aucune nébulosité au-dessus de l'océan. Par contre, dès qu'il est soulevé contre les reliefs, il conden-

se son humidité et donne naissance à des nappes de stratus qui s'accrochent aux pentes. C'est un phénomène bien connu dans les archipels madérois et anarien et qui donne naissance à une dissymétrie climatique très nette entre les versants au vent et les versants sous le vent. En été, l'alizé n'est que rarement interrompu par le passage de l'extrémité d'un front froid associé à une activité polaire lointaine ou par des fronts d'alizé liés à la coupure de l'anticyclone subtropical en deux cellules juxtaposées.

La comparaison des figures 1, 2 et 3 avec la situation météorologique au sol du 8 au 10 juillet 1968 (fig. 5) montre que l'image du 8 juillet (fig. 1) est l'illustration d'une situation d'alizé; celle du 9 ou du 10 juillet (fig. 2 et 3) donne l'exemple d'une de ces perturbations peu actives qui n'est soulignée que par un accroissement momentané de la nébulosité.

Depuis le début du mois de juillet, l'alizé soufflait en permanence sur le proche Atlantique au large du Maroc. Le 8 juillet, les vents sur l'Afrique du Nord circulent autour de la dépression thermique saharienne bien installée à cette époque de l'année. Sur l'Atlantique, l'alizé issu du flanc oriental de l'anticyclone des Açores est à composante nord-est. Léger au long de la côte africaine (5 noeuds), il souffle plus violemment aux abords des îles (10-15 noeuds) à cause de la présence de reliefs escarpés et de détroits qui le canalise.

La disposition des isothermes de la surface de la mer traduit ces conditions. Les eaux de surface adoptent une dérive de direction perpendiculaire à celle du vent et vers la droite (loi d'Ekman). Le vent étant de nord-est, il en résulte un reflux des eaux chaudes de surface vers le large et des remontées compensatoires d'eaux froides au long de la côte africaine. Cet upwelling est d'autant mieux marqué que le vent est fort et souffle parallèlement à la côte. C'est pourquoi il est le plus net, le 8 juillet, au sud du Cap Cantin où il est souligné par des traces nuageuses au long du littoral (taches blanches collées à la ligne de côte). Au nord du Cap Cantin, au contraire, les remontées d'eaux

froides disparaissent. On peut expliquer le phénomène par la position d'abri de cette partie de la côte. Les vents de nord-est sont faibles ou nuls. La masse de la Péninsule Ibérique en décalant le trait de côte en direction de l'ouest modifie la circulation générale des vents. La côte marocaine au nord de Casablanca est ventilée par un flux de nord et même de nord-ouest, mais faible. La dérive des eaux chaudes de surface vers le large ne se vérifie donc plus. Dans ce profond golfe entre le Portugal et le Cap Cantin, si l'on suit la loi d'Ekman, les eaux chaudes sont refoulées contre la côte marocaine. On peut supposer également un plus faible brassage des eaux de surface par des vents dont la vitesse dépasse rarement 10 noeuds. Au sud du Cap Cantin, avec un changement d'orientation de la côte et la disparition de l'influence du golfe, les eaux chaudes décollent du rivage et dérivent vers le large en laissant place à des remontées froides.

b - Les phénomènes thermiques locaux sous le vent des îles

Les archipels madérois et canarien sont composés d'îles volcaniques en général montagneuses. Madère a une puissante échine de hauts reliefs qui culminent vers 1 850 m au Pic Ruivo . Porto Santo n'est qu'une petite île basse au nord-est de Madère dont le point le plus haut (Pic do Castelo) dépasse tout juste 400 m. Les îles Canaries ont des reliefs souvent plus imposants. Sur les différentes images, on reconnaît d'ouest en est Gomera, Ténérife, Grande Canarie et au plus près de la côte africaine Fuerteventura et Lanzarote. L'île de Ténérife est la plus élevée, formée par un puissant cône volcanique, le Pic de Teide, culminant à 2 718 m. Gomera et Grande Canarie ont des reliefs supérieurs à 1 000 m. Fuerteventura et Lanzarote, par contre, sont des îles basses, d'altitude moyenne inférieure à 500 m. Ce sont ces caractéristiques physiques qui expliquent le renforcement des vents aux abords des archipels et entre les îles.

Sur les différentes images, les archipels sont soulignés par

une disposition originale des pixels. On observe très distinctement (fig. 1) une dissymétrie thermique entre le côté au vent et le côté sous le vent des îles montagneuses. Ce phénomène se traduit par une traînée de points sombres en "queue de comète" dans le sillage de Ma dère, Ténérife, Grande Canarie et des plages plus claires contre les rivages au vent.

À première vue, on peut émettre deux hypothèses pour interprêter cette originalité:

1) Des nuages bas (donc chauds) encombrant le versant sous le vent des îles et sont entraînés vers le large par l'alizé.

2) Le sillage des points sombres dévoile un phénomène thermique de la surface de l'océan. Il existerait une lentille d'eau chaude sous le vent des îles montagneuses et des eaux plus fraîches viendraient battre les rivages au vent.

La première hypothèse paraît la moins soutenable. Les sondages des 7, 8 et 9 juillet 1976 (12 TMG) à Funchal montrent combien la formation de masses nuageuses denses au point de laisser une trace sur les images est improbable (fig. 6). L'air est très sec sous le vent de l'île même dans les couches inférieures et l'inversion thermique forte et particulièrement basse interdit tout développement nuageux. Les données météorologiques de la station indiquent d'ailleurs un ensoleillement maximum les jours où le sillage est le plus net. Les traînées sombres n'existent que lorsque l'air est le plus stable. Huetz de Lempz dans son étude sur le climat des Canaries⁽³⁾ en accord avec celle de Font Tullot⁽⁴⁾, explique la sécheresse voire l'aridité des versants

(3) HUETZ DE LEMPS, A., 1969 - Le climat des îles Canaries, Paris.

(4) FONT TULLOT, J., 1956 - El tiempo atmosférico en las Islas Canarias, Servicio Meteorológico Nacional, memoria A, nº26, Madrid.

sud des îles montagneuses par leur position d'abri et la disparition de l'instabilité des basses couches de l'air. Le bonnet nuageux qui coiffe les sommets des îles d'altitude moyenne (Gomera, Grande Canarie) comme la couronne de cumulus plaquée à mi-pente contre le versant nord de Ténérife disparaissent rapidement sous le vent lorsque l'air est stable. Depuis longtemps, les météorologues⁽⁵⁾ ont remarqué que lorsque les cumulus humili qui soulignent le niveau de condensation dans le flux de l'alizé heurtent un relief, ils s'alignent de part et d'autre de l'obstacle pour former des "rues" qui se rejoignent d'autant plus loin sous le vent que le courant est fort. À ce sujet, l'atlas Mission to Earth: Landsat Views, the World (NOAA, 1976) offre une bonne illustration du phénomène dans le sillage de l'île de Bawean en mer de Java (p.432, plate 397d).

Pour ces raisons, il est donc fort improbable que les 7, 8 et 9 juillet 1978 un amas nuageux chaud ait existé dans la portion de versant la plus abritée sous le vent des îles montagneuses.

La seconde hypothèse paraît plus vraisemblable car elle s'accorde assez bien avec ce que l'on sait de la circulation locale des vents autour des reliefs et en particulier des alizés autour des îles.

En heurtant une île montagneuse, les alizés ont un écoulement très perturbé. Au vent de l'île se produit une ascendance forcée de l'air marin humide. La plus grande nébulosité des versants nord des îles macaronésiennes est bien connue. En été, des stratus ou des stratocumulus générateurs d'averses encombrant le versant au vent. Ce qui ex

(5) LEGPOLD, L.B. - "The interaction of trade winds and sea breeze", J. Met., 1949, V.6, p. 316-320.

MALKUS, J.S. - "The effects of a large island upon trade-wind air stream", Q.J.R.M.Soc., 1955, V. 81, p. 538-550.

plique la plus faible insolation de cette partie de la côte d'autant plus qu'à partir du milieu du jour les brises de mer viennent renforcer l'ascendance de l'alizé au long des pentes. La plus grande turbulence de l'air au vent des îles provoquant une agitation marquée de la mer et la faible insolation doivent contribuer à maintenir des eaux plus fraîches au long des façades nord.

L'air soulevé par-dessus les sommets, même en air stable, ne revient à son niveau initial qu'après avoir effectué une série d'oscillations sinusoïdales qui se traduit par un train d'ondes stationnaires sous le vent du relief et se propage loin vers le large en aval de l'obstacle. C'est un phénomène classique qui a été décrit par de nombreux chercheurs⁽⁶⁾ et qui, pour Madère et les Canaries, a été récemment mis en évidence par les images de satellite dans le spectre visible⁽⁷⁾. L'air ne descend pas immédiatement en aval de l'obstacle. L'alizé ne se fait donc pas sentir tout de suite sous le vent des îles où une zone de calme existe. À l'heure de la réception des images traitées ici (13 h), une brise de mer légère souffle sur le versant sud des îles. À 12 TMG, le 8 juillet, Funchal enregistrerait des vents de sud à SW qui soufflaient donc en sens inverse de l'alizé. Les plus faibles valeurs des réflectances dans le sillage des îles s'explique donc par le manque d'agitation de l'eau et donnent la mesure directe de l'abri provoqué par la masse du relief. Ce sont ces phénomènes qu'il faut certainement évoquer pour expliquer la présence d'une zone océanique abritée au plus près du rivage sous le vent des îles où l'eau de surface peut s'échauffer davantage d'autant plus que l'insolation est toujours forte au sud des îles.

(6) Voir en particulier la synthèse de M.A. ALAKA, "The airflow over mountains", W.M.O., T.N. n° 34, 1960 et celle de P. QUENEY, "Synthèse des travaux théoriques sur les perturbations de reliefs", La Météo., 1977, n° 8, p. 113-143 et n° 9, p. 111-171.

(7) Voir par exemple J. DARCHEN, "Influence du relief sur les formations nuageuses", Met-Mar, 1978, n° 100, p. 18-20.

Comme il s'agit toujours d'îles de faible dimension, une partie non négligeable des vents de NE est défectée de part et d'autre des reliefs. Latéralement, l'alizé est donc divisé en deux branches divergentes qui contournant la masse des îles. Sous le vent, ces deux branches convergent par une série de tourbillons d'autant plus loin que le vent est fort. C'est ce processus qui explique l'entraînement des eaux chaudes en direction du large et la déformation de la lentille dans la direction de l'alizé. Il n'est pas à exclure non plus que, à un moment donné, le mouvement de l'air descendant des sommets avec ses ondulations sinusoïdales vienne renforcer la dérive des eaux chaudes vers le large.

c - L'évolution des phénomènes du 8 au 10 juillet 1978

Tout ce qui vient d'être dit trouve une bonne illustration dans l'évolution des situations du 8 au 10 juillet. Le 8 juillet, l'échauffement de l'eau sous le vent de Madère et de la Grande Canarie est net ainsi que la déformation de la lentille en direction du sud-ouest en accord avec la direction des vents généraux. Fuerteventura et Lanzarote, îles basses, allongées nord-est/sud-ouest, incapables de perturber sérieusement l'écoulement de l'air et sans brises de mer bien marquées ne provoquent aucune dissymétrie des températures de l'eau de la mer. Pour Ténérife et La Gomera, proches de la troncature de l'image, on ne distingue bien que la racine au plus près du rivage sous le vent. L'échauffement paraît cependant moins fort que pour Madère ou la Grande Canarie. Le 9 juillet, avec l'approche d'un front froid au nord de Madère, le vent vire au nord et faiblit d'intensité. La dérive des eaux chaudes sous le vent de Madère prend alors une direction méridienne et l'entraînement vers le large est moins accentué. Sur les Canaries, encore éloignées de la perturbation, le vent continue à souffler avec une composante nord-est, mais la vitesse s'est accrue. De 10 noeuds la veille, elle passe à 25 noeuds sur les îles montagneuses. C'est ce jour qu'on observe l'étirement maximum de la lentille d'eau chaude sous le vent de la Grande Canarie sur plus de 150 km. On pourra remarquer également que l'upwelling, entre le Cap Ghir et Tarfaia, est très bien marqué en rap-

port avec un renforcement des vents de nord-est qui coulent ici parfaitement parallèles à la côte. Le 10 juillet, l'accroissement des bancs de nuages accompagnant le front froid provoque un ensoleillement moindre. Madère connaît au cours de la journée des passages nuageux et les vents virent à l'ouest en avant du front froid. Les eaux chaudes du lit total sud sont dispersées. Il est probable d'ailleurs que le côté sous le vent de l'île soit nuageux. Sur les Canaries, également, où le vent est maintenant à composante nord-ouest, les lentilles ont disparu. On note cependant une dérive de traînées d'eaux chaudes en direction de la côte africaine sous le vent de l'archipel. On doit donc supposer que les lentilles d'eaux chaudes ont le pouvoir de conserver leur identité pendant quelques temps et en particulier de résister au rafraîchissement nocturne. L'upwelling au long de la côte africaine à la latitude des Canaries semble avoir disparu. Les traces blanches entre Lanzarote et la côte sont des secteurs nuageux accompagnant la perturbation frontale. Au nord de Casablanca, le bassin d'eaux chaudes est en voie de disparition avec la rotation des vents au nord-ouest et une insolation plus faible.

L'image de permanence lissée (fig. 4) constitue en quelque sorte un bilan des conditions thermiques des trois auscultations à 13 h. Seuls les points les plus stables (deux fois sur trois) ont servi à tracer les isolignes. L'image traduit bien les principaux phénomènes thermiques mis en relief par chacune des figures 1, 2 et 3. Le bassin d'eaux chaudes collé au long du rivage au nord de Casablanca fait place à un upwelling au sud du Cap Cantin. Les phénomènes thermiques locaux ne sont bien marqués que sous le vent des îles montagneuses. Les perturbations dans les isolignes au nord de l'archipel canarien sont dues au faible déplacement, au-dessus de l'océan, de nuages isolés qu'on peut repérer sur les figures 1 et 3. Le faible nombre de séquences fondues dans cette image de synthèse explique leur persistance.

Ainsi, grâce aux traitements d'images prises par satellite, on peut maintenant visualiser des phénomènes jusqu'alors inconnus ou faibles

ment documentés. Dans le domaine océanique surtout, où la densité des informations dans l'espace et dans le temps est encore très faible, on entrevoit la puissance de ce nouveau moyen. L'évolution du phénomène d'upwelling qui a été évoqué ici commence à être mieux connu depuis l'exploitation des images NOAA, TIROS-N et METEOSAT. On savait déjà que l'effet d'un relief insulaire provoquait des modifications dans l'écoulement de l'air dont résultaient des dissymétries climatiques locales importantes. On n'avait jamais pu visualiser les perturbations correspondantes à la surface de l'océan au plus près des îles et qui subissent, elles aussi, la même évolution que les phénomènes aérologique. Seule une coupe thermique à la surface de l'eau sous le vent des îles serait capable de vérifier la véracité de cette interprétation. Si elle se confirme, c'est une acquisition importante pour la climatologie locale et qui ne fait que souligner l'intérêt de l'exploitation systématique de la télédétection en océanographie.

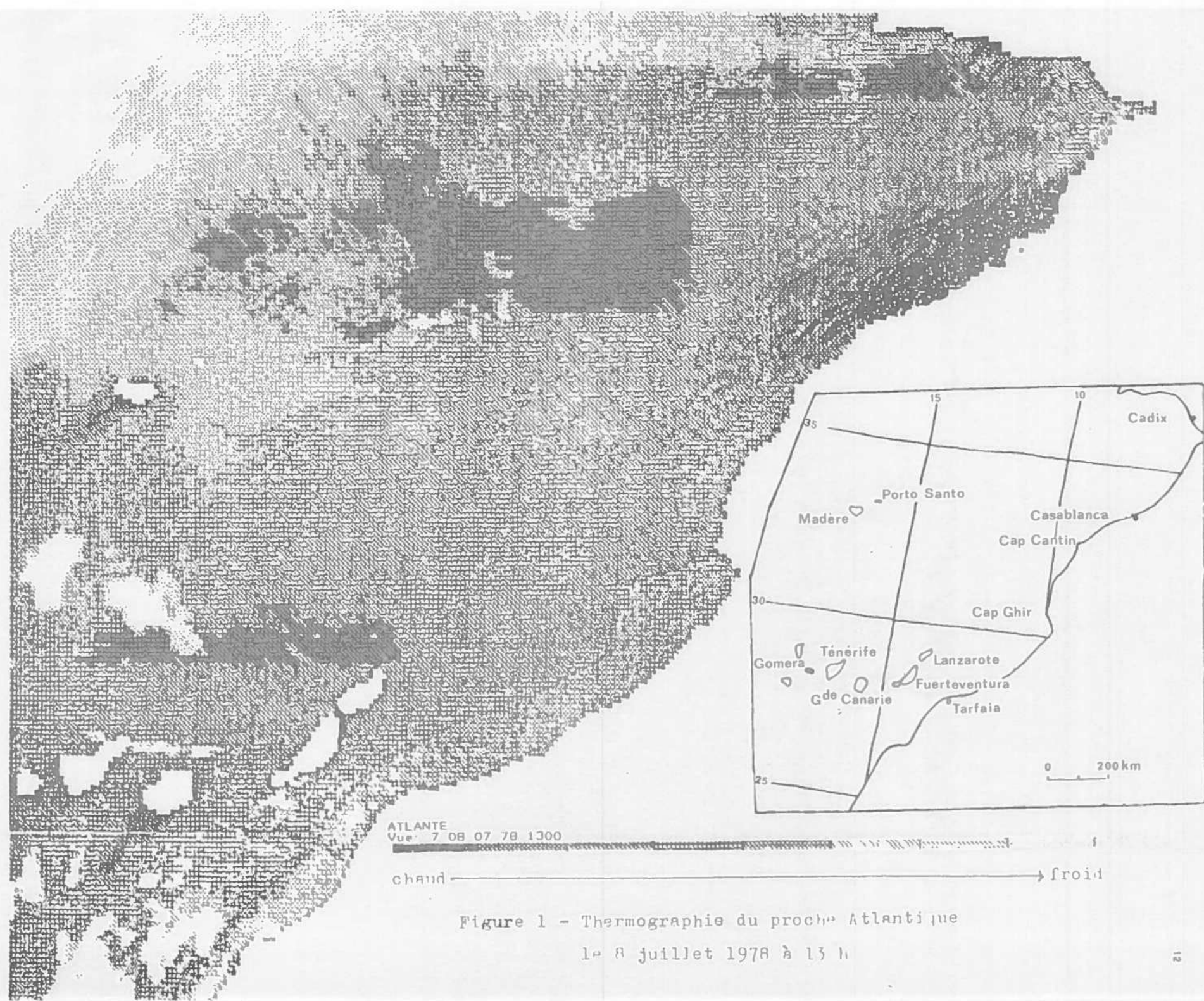


Figure 1 - Thermographie du proche Atlantique
le 8 juillet 1978 à 13 h

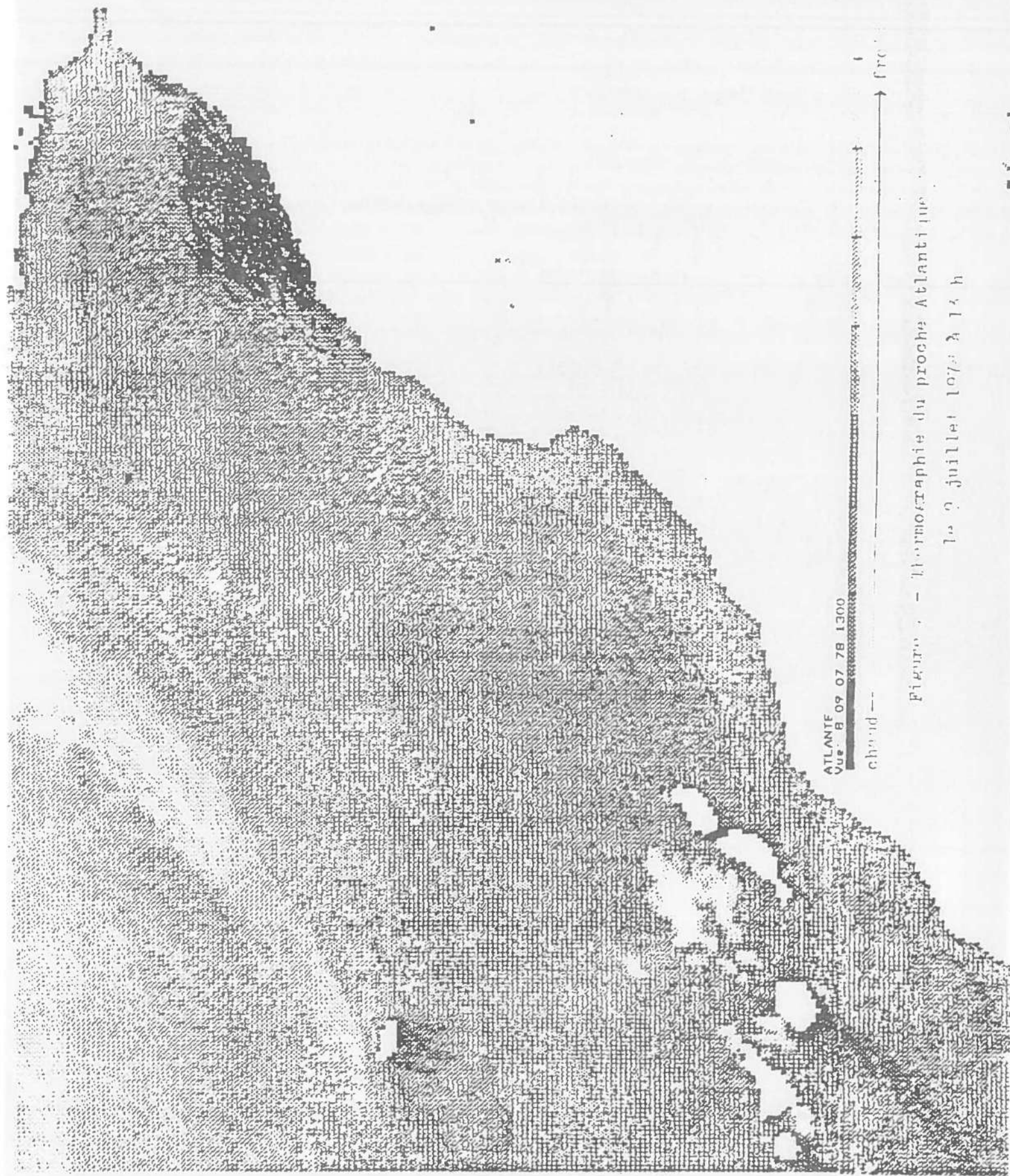


Figure 1 - Thermographie du proche Atlantique

Le 2 juillet 1978 à 13 h

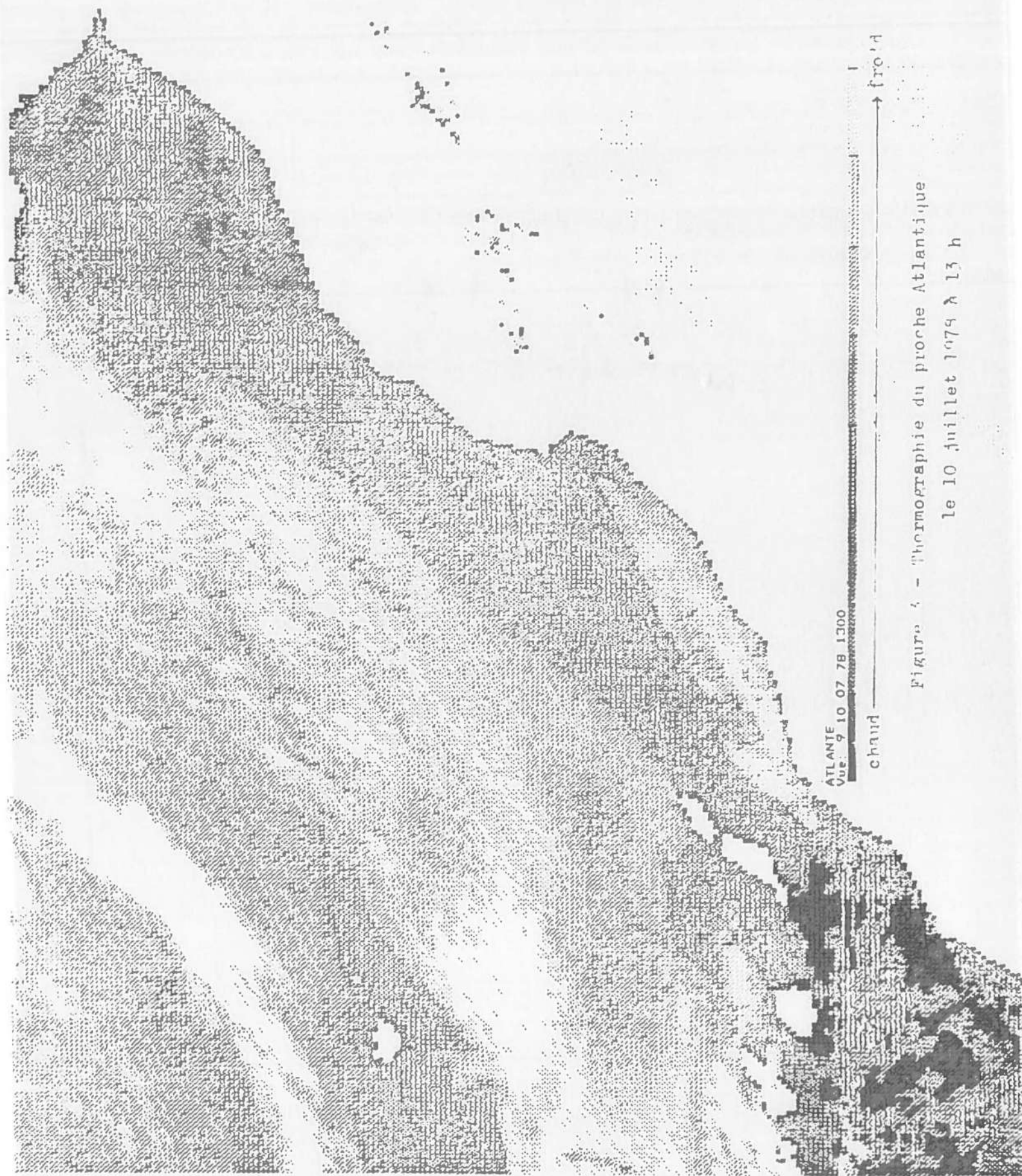
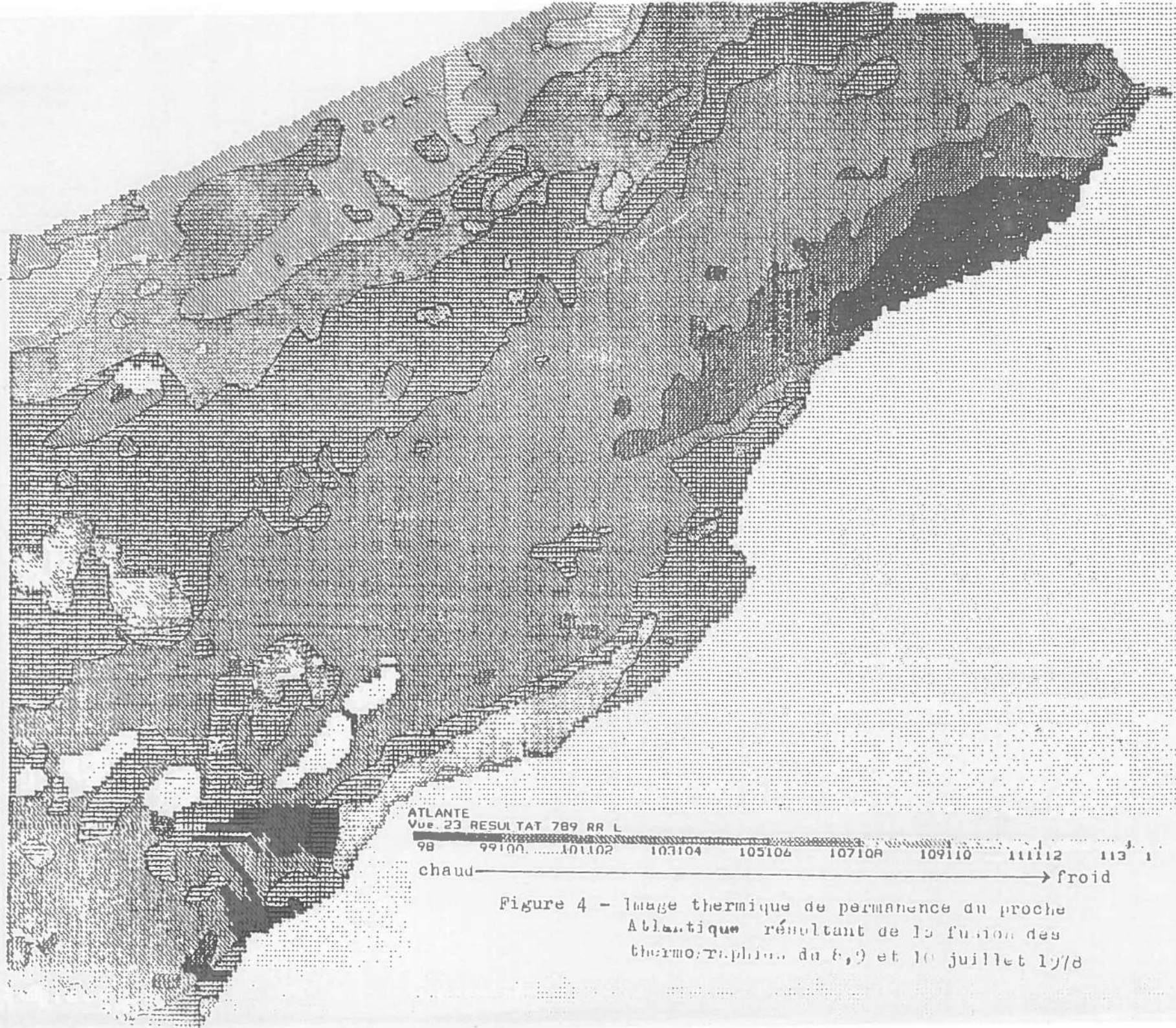


Figure 4 - Thermographie du proche Atlantique

Le 10 juillet 1979 à 13 h



ATLANTE
Vue 23 RESULTAT 789 RR L

98 99100 101102 103104 105106 107108 109110 111112 113

chaud → froid

Figure 4 - Image thermique de permanence du proche Atlantique résultant de la fusion des thermographies du 8, 9 et 10 juillet 1978

Figure 5 - Evolution de la situation synoptique au sol du 8 au 10 juillet 1978

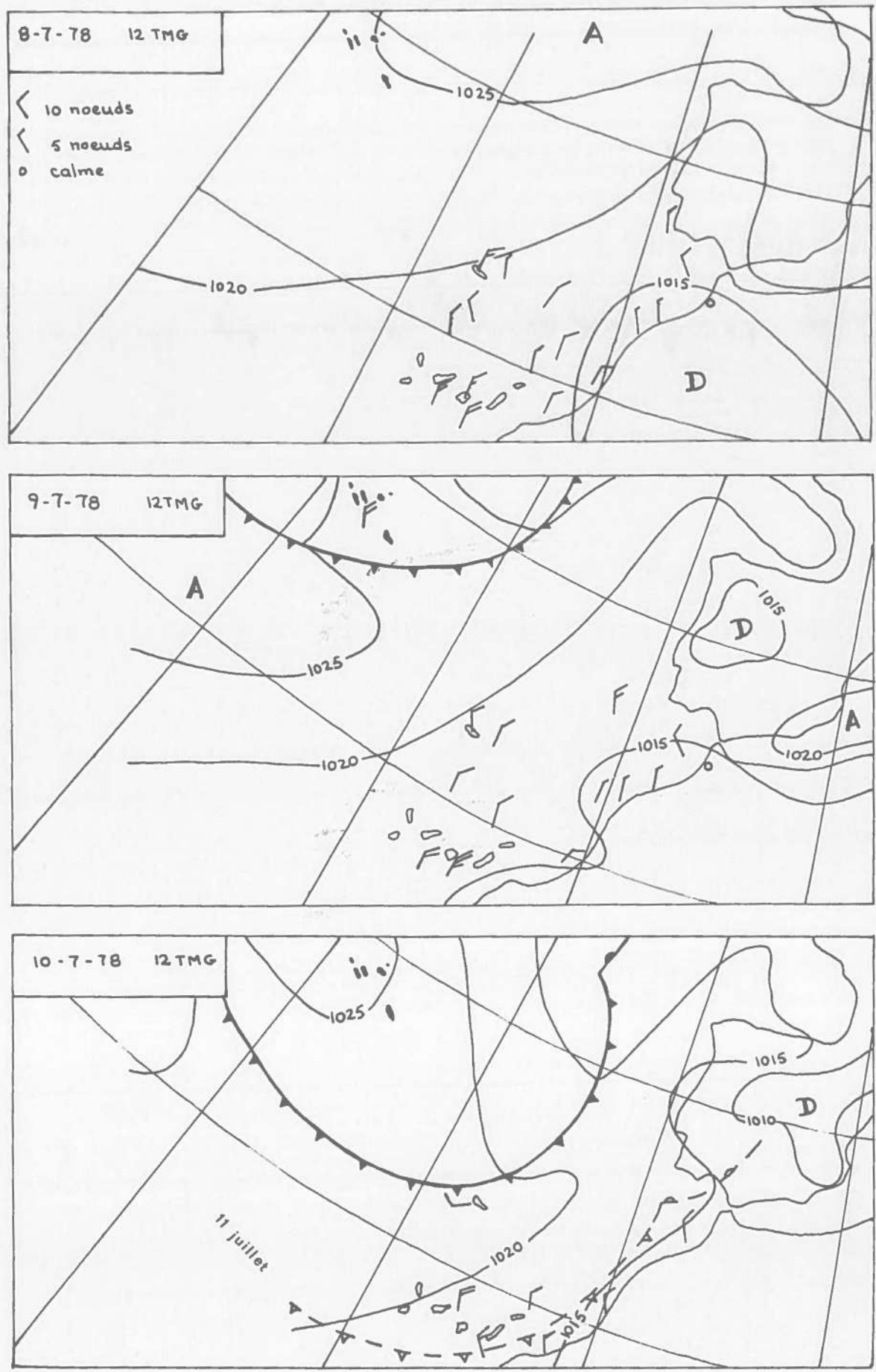


Figure 6 - Structure verticale de l'air au-dessus de Funchal
du 8 au 10 juillet 1978 à 12 TMG

Te - courbe d'état
 T - isotherme en ° C
 α - adiabatique
 α' - pseudoadiabatique

vent - 1 barbule vaut 10 noeuds
 1/2 barbule vaut 5 noeuds
 21 - humidité relative en %

