

## LES TROMBES (en anglais : WATERSPOUTS = trombes marines)

Les trombes les plus violentes donnent les vents les plus forts rencontrés à la surface du globe.

L'Américain Fujita a établi une échelle de six degrés qui permet une classification des trombes\* (souvent baptisées tornades sur les continents) ; un septième échelon a été ajouté (F6) pour tenir compte de certaines super-tornades.

ECHELLE	VITESSE VENT en m/s	EFFETS	DOMMAGES
F 0	17 - 32 (33 - 63 nœuds)	Légers	Antennes TV tordues, Branches cassées, Roulottes déplacées...
F 1	33 - 49 (64 - 96 nœuds)	Modérés	Roulottes renversées Arbres arrachés
F 2	50 - 69 (97 - 134 nœuds)	Importants	Objets légers transformés en projectiles, Toitures soulevées...
F 3	70 - 92 (135 - 179 nœuds)	Sévères	Murs renversés, arbres cassés dans les forêts, projectiles de grande dimension
F 4	93 - 116 (180 - 225 nœuds)	Dévastateurs	Maisons rasées, très gros projectiles...
F 5	117 - 142 (226 - 276 nœuds)	Incroyables	Arbres emportés par le vent, Projectiles à grande vitesse
F 6	143 - 190 (277 - 330 nœuds)	Inouïs	Inouïs

La probabilité de trombes d'intensité égale ou supérieure à F 3 est de l'ordre de une par an sur l'ensemble de la France où ce phénomène a provoqué la mort de 20 personnes de 1960 à 1984 (et plus de 300 blessés). Selon une statistique établie par Dessens à partir de 100 trombes observées en France, le diamètre moyen serait de 330 m; la vitesse de déplacement de 25 nœuds, la longueur moyenne des zones touchées : 9, 3 km. La fréquence maximale se situe de mai à septembre et entre 1600 et 1700 UTC.

\* Cette échelle sert également à la classification des grains : les « macroburst » se répartissent de F0 à F2 ; seuls certains « microburst », parmi les plus violents, peuvent être classés en F3.

Aux effets du vent s'ajoutent les effets de la forte baisse de pression qui accompagne le passage du centre du tourbillon et provoque le soulèvement des toits, la rupture des fenêtres projetées vers l'extérieur (une vitre de 40 sur 70 cm soumise à une différence de pression de 50 hPa subit une poussée équivalente à 140 kg), parfois la rupture des tympans...

## A 3 - LES DÉPRESSIONS A CENTRE CHAUD

Complément au Chapitre IX-4.

Compte tenu de l'importance pratique aussi bien que théorique du sujet, nous allons reprendre et développer ici ce qui a été exposé en IX-4.1.

Normalement, en altitude (dans la troposphère, au-dessus de 5 000 mètres) les dépressions se trouvent au-dessus ou au sein des masses d'air froid, alors que les anticyclones coïncident avec les masses d'air chaud (ou avec des masses d'air froid (en  $\theta_w$ ) très affaîssé et donc réchauffé par compression).

Le champ thermique correspondant à cette répartition spatiale des masses d'air a pour conséquence des gradients de géopotentiels (i.e. des pentes des surfaces isobariques) qui diminuent à mesure que la pression augmente dans l'espace, c'est-à-dire en direction du sol. Par rapport au JET STREAM, l'air froid est à gauche (pour quelqu'un qui se déplacerait dans le sens du vent) et l'air chaud à droite, cela dans l'hémisphère nord (c'est évidemment le contraire dans l'hémisphère sud). Mais, pour peu que de l'air chaud se rencontre à gauche du « jet », le bel équilibre habituel est rompu et l'on trouve au niveau de la mer, au voisinage de ces anomalies thermiques, des pentes de surfaces isobare inhabituelles car semblables à celles rencontrées au niveau du jet.

L'origine de températures relativement élevées du côté normalement froid du « jet stream » résulte de l'un ou l'autre de ces deux phénomènes :

- une forte convection dans une région où l'atmosphère reçoit de la mer une grande quantité de chaleur sensible et latente,
- une advection de masses d'air chaud (en température pseudo-adiabatique potentielle du thermomètre mouillé) en direction d'une région située — ou qui sera bientôt située — à gauche du « jet ».

Certaines cyclogénèses résultent de l'addition de ces deux phénomènes. Mais la CONVECTION est principalement, sinon uniquement, à l'origine de bon nombre des cyclogénèses des régions arctiques, en

bordure de la banquise, que les Anglo-Saxons et le Danois RASMUSSEN appellent « POLAR LOWS », et aussi de certaines dépressions de Méditerranée comme celles des 28 - 30 septembre 1983, 26 janvier 1982, 28 septembre 1969, etc... Ce qui caractérise surtout ces dépressions, c'est qu'à tous niveaux de la troposphère la température est plus élevée au centre qu'à la périphérie, ce qui est également la caractéristique aérologique principale du cyclone tropical. La présence d'un « œil » d'air limpide au centre est une autre caractéristique commune, ainsi que la forte convection observée autour de cet « œil ».

**Quant à l'ADVECTION de masses d'air chaud arrivant en phase avec un thalweg d'altitude correspondant au creux d'une onde de « jet », elle est à l'origine de la plupart des grandes cyclogénèses des régions dites tempérées.** Ce phénomène est, depuis le début des années 80, assez bien pris en compte par les modèles et donc prévisible même plusieurs jours à l'avance. La présence d'air chaud au centre de ces dépressions est une caractéristique essentielle. C'est d'ailleurs la découverte de ce phénomène, en 1964, qui m'a conduit à les baptiser « dépressions à centre chaud » et qui a permis, à maintes reprises, à l'auteur de ce livre de réaliser des prévisions de violentes tempêtes, 24 heures environ avant qu'elles se déchaînent, tempêtes jusqu'alors généralement considérées comme imprévisibles.

Parmi les « dépressions à centre chaud », les plus chaudes, les plus violentes, les plus typiques sont les cyclones tropicaux. Là, nul besoin de la présence d'un « jet stream ». La convection, si elle est assez forte et bien organisée, suffit à déclencher le phénomène. Plus la chaleur afflue dans la zone convective (en majeure partie chaleur latente libérée par condensation), plus la pression baisse au niveau de la mer et donc plus la convergence s'accroît dans les basses couches. Et plus le vent souffle fort, plus l'eau de mer s'évapore et donc plus la chaleur latente augmente. Plus la température de la mer est élevée, plus l'évaporation est importante et plus la dépression se creuse... jusque vers 960 hPa sur une mer à 28° C, 910 hPa sur une mer à 30° C et théoriquement 860 hPa si la mer atteignait 32° C. Compte tenu des conditions thermiques régnant en altitude dans les régions tropicales, il faut que la mer soit au moins à 26,5° C même 27° C pour que le cyclone tropical puisse se développer.

D'autres zones océaniques, bien plus froides, peuvent être le siège de dépressions de même type, en particulier la Méditerranée d'une part, les mers arctiques d'autre part (à proximité de la banquise), ainsi que nous allons l'examiner.

### Les cyclones de Méditerranée.

Rappelons tout d'abord quelques caractéristiques du climat méditerranéen. Par exemple la rareté des précipitations,

en été, s'explique d'une part par le fait que les régions méditerranéennes sont alors, le plus souvent, sous l'influence quasi permanente des hautes pressions tropicales d'altitude qui, dans l'hémisphère nord, atteignent en moyenne leur position la plus septentrionale en été, d'autre part par le fait que la mer est moins chaude que les continents environnants, de sorte que lorsque une situation d'instabilité se présente, les nuages convectifs se développent surtout au-dessus des terres (et principalement des montagnes), tandis qu'une subsidence\* simultanée se produit en mer. Ce phénomène est surtout marqué au début de l'été — juin, juillet — quand la mer est encore relativement fraîche. C'est, en général, à la fin de l'été que la mer atteint sa température maximale ; or, à ce moment, les hautes pressions d'altitude ont déjà régressé quelque peu vers le sud et offrent moins de résistance à la pénétration de thalwegs ou de dépressions.

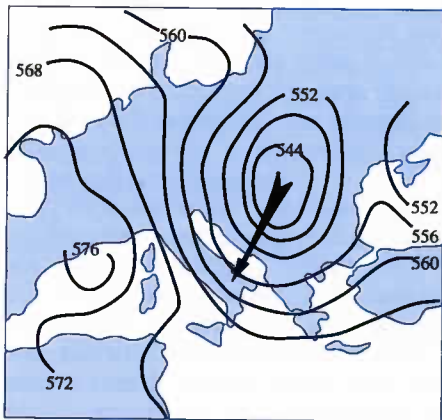
C'est au cours de la dernière décade de septembre et des premiers jours d'octobre que l'on a le plus de chances de rencontrer, en Méditerranée, le développement de cellules convectives organisées conduisant à des « dépressions à centre chaud » de structure identique à celle des cyclones tropicaux, avec un œil central et les vents les plus forts en bordure de l'œil. Seulement, il s'agit là de cyclones d'étendue restreinte et d'intensité relativement modérée, n'ayant pas la possibilité de se développer pleinement car, primo, l'espace maritime est exigü (comparé à l'espace océanique), secundo la température de la mer n'atteint pas les valeurs de 27° à 30° observées sur de très grandes surfaces dans les eaux tropicales.

L'un des plus remarquables de ces phénomènes est celui qui a traversé la Corse d'ouest en est, le 30 septembre 1983. Il s'était développé au cours de la nuit du 27 au 28, au nord de la Tunisie, puis avait évolué lentement entre les Baléares et la Sardaigne après avoir traversé l'extrême sud-ouest de cette île, en donnant, le 28 à 12 heures, un vent moyen de SE 40 nœuds à Cagliari (cf. page suivante). Le 30 à 1040 UTC, à Ajaccio, le vent de SE 41 nœuds atteignait 57 nd (111 km/h) en pointe ; l'anémomètre de Pertusato, au sud de l'œil, a enregistré 84 nd (163 km/h) ! Ce cyclone a empêché l'avion qui transportait la dépouille de Tino Rossi d'atterrir à Ajaccio. La formation de ce cyclone pouvait être prévue : elle a, du reste, été envisagée à Toulon dès le matin du 26 septembre. Le barogramme d'Ajaccio est à rapprocher de celui du 2 octobre 1986 de la station météo de Palma de Majorque où ont été enregistrées des rafales de 100 km/h de 0100 à 0300 UTC ; à un autre endroit de l'île, un anémomètre à lecture directe aurait même indiqué une pointe à 180 km/h (d'après « Le vent en Méditerranée occidentale » par mon collègue de Toulon Robert Delorme).

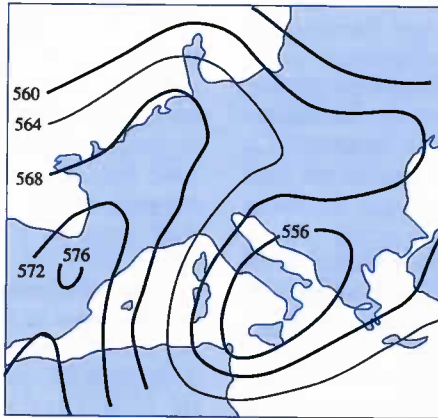
\* Affaissement de l'air sur de grandes étendues.



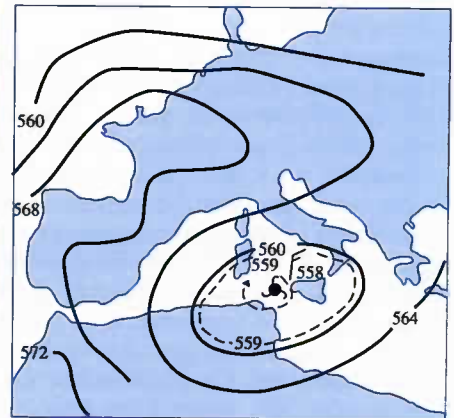
Cartes d'épaisseurs 1000-500 hPa (les épaisseurs sont proportionnelles à la température moyenne de la couche 500-1000 hPa).  
Le vent thermique de nord à Palerme indique de l'air plus chaud à l'ouest donc vers le centre.



26 septembre 1983 0000 UTC

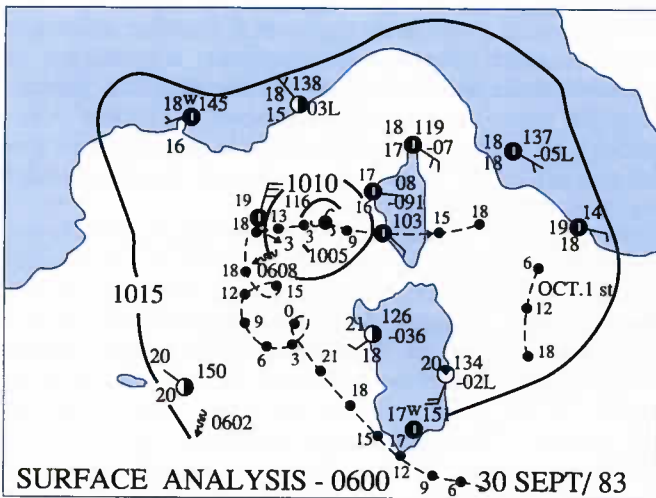


27 septembre 1983 0000 UTC

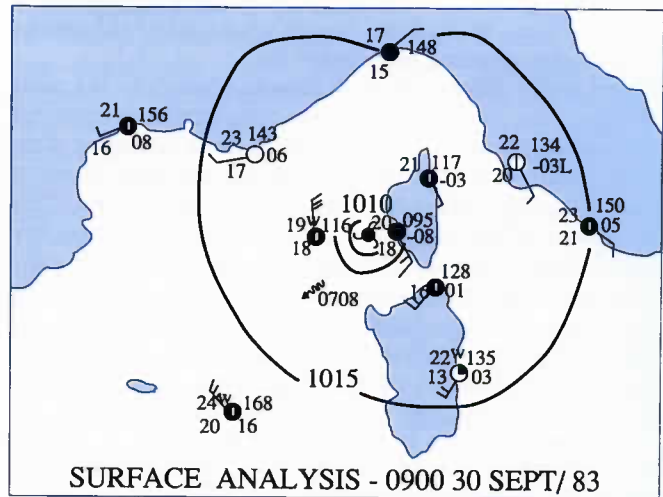


28 septembre 1983 0000 UTC

Remarquez le navire signalant vent NNW 30 nd, et houle ENE 4 mètres  
(provenant de la tempête d'est au nord de l'œil entre les isobares  
1 010 et 1 005)

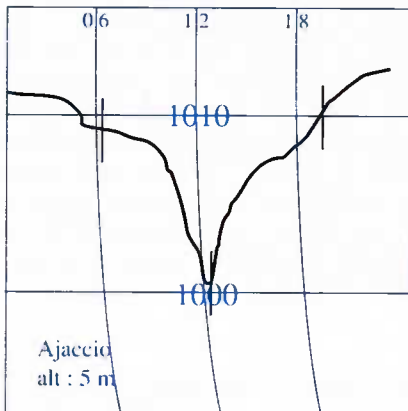


SURFACE ANALYSIS - 0600 30 SEPT/ 83



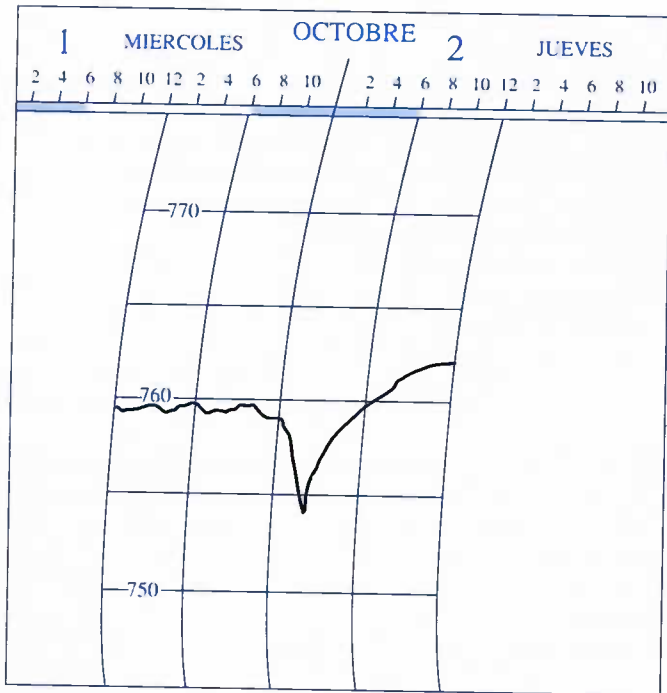
SURFACE ANALYSIS - 0900 30 SEPT/ 83

Figures extraites de « Mariners Weather Log - winter 1984 »  
« Warm core cyclones in the Mediterranean » (par René Mayençon)



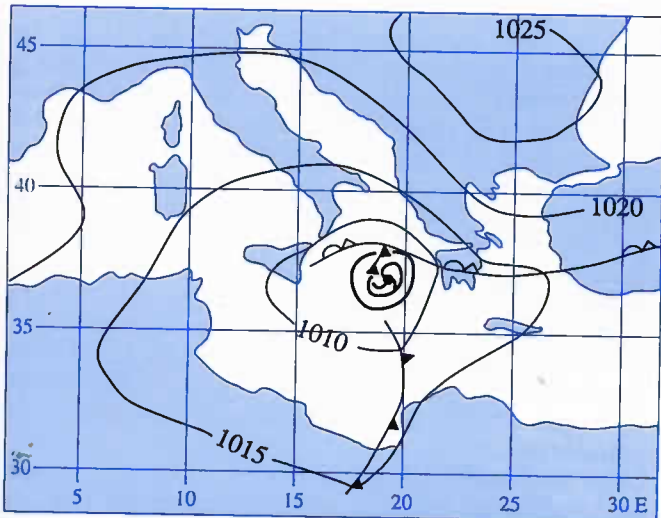
p 324 bas

Évolution de la pression  
à Ajaccio le 30.09.83



Évolution de la pression à Palma de Majorque entre le 1.10.86 à 12 h T.U. et le 2.10.86 à 12 h T.U.

En 1982 (fig. ci-dessous), un cyclone assez semblable s'était formé entre la Sicile et la Grèce. Le navire Ville de Dunkerque signalait vent NNE 48 nœuds, pression 1 000,8 hPa après une baisse de 10,1 hPa en trois heures, température 11,6° C sur une mer à 15,2° C, vagues de quatre mètres ; ce navire était très proche du centre (en bordure de l'œil).



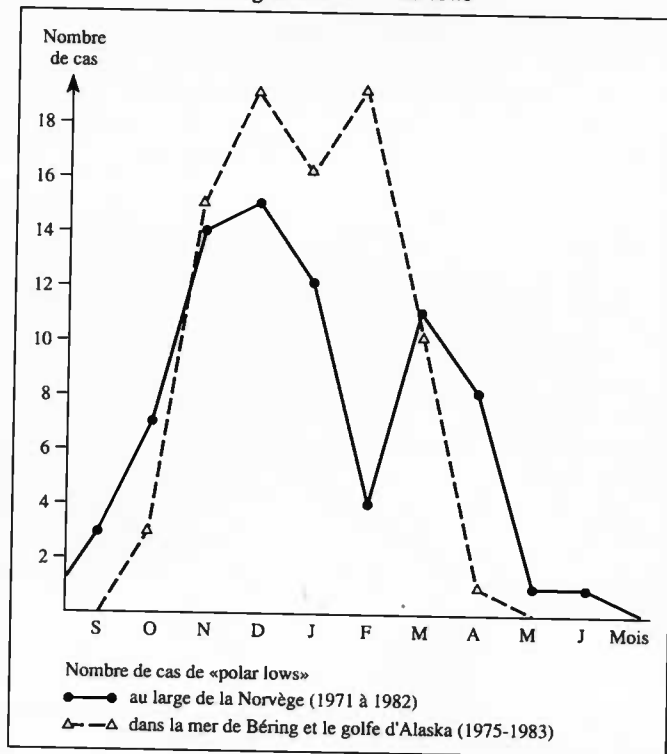
Le 26 janvier 1982 à 0600 UTC

Ce genre de cyclone méditerranéen donne habituellement des vents moyennés de 50 nœuds environ près du centre en mer, et 40 nœuds à terre dans les stations côtières\*. Mais quelquefois ils peuvent atteindre la force 12 Beaufort, comme ce fut le cas sur les côtes du Var le 26 septembre 1947. En 1969, le fameux cyclone des 25 et 26 septembre dans le golfe de Gabès (qui fut suivi d'inondations sans précédent dans le sud tunisien et le sud constantinois) ne semble pas avoir excédé la force 10. Ces cyclones méditerranéens d'origine convective sont assez rares (une dizaine environ par décennie)\*\*

### Les « polar lows »

Des cyclones comparables, d'origine convective également, s'observent parfois dans les régions maritimes polaires, quand des masses d'air arctique extrêmement froid ( $\theta_w$  de -10° sur une grande épaisseur et température de -45° à -50° C au niveau 500 hPa) arrivent au-dessus d'une mer à température positive (jusqu'à 6 ou 7° au large de la Norvège (vers le Spitzberg) : à mesure que des cumulonimbus se développent, la dépression se creuse de 5 à 10, voire 15 à 20 hectopascals, et les vents en mer augmentent jusqu'à 50 ou 60 nœuds, exceptionnellement plus de 60 nœuds, près de l'œil central. C'est ce que les Anglo-Saxons ont dénommé « POLAR LOWS »\*\*\*. Dans ces régions arctiques, leur saison de prédilection est l'hiver et la fin de l'automne, donc plus tardive, en général, qu'en Méditerranée. Voici la représentation graphique de leur fréquence d'apparition, mois par mois.

Histogramme de « Polar lows »

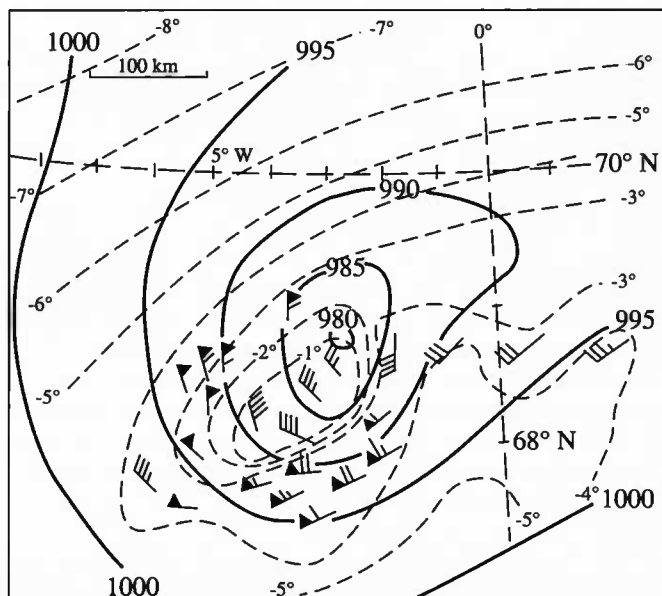


\* Avec des rafales de 60 nœuds ou plus.

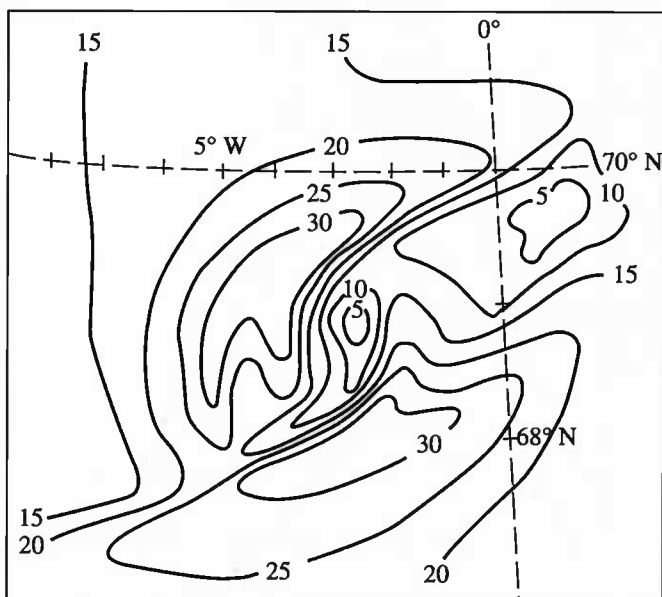
\*\* Les trombes y sont beaucoup plus fréquentes mais présentent des dimensions horizontales cent à trois cents fois moindres (cf. figure IX-2).

\*\*\* Un certain nombre de « polar lows » ne sont pas seulement d'origine convective mais sont associés aux perturbations du front polaire (dont l'activité est maximale en hiver) ; dans ce cas, les vents près du centre atteignent couramment 60 à 70 nœuds.

La « dépression polaire » du 27 février 1984 a pu être étudiée par exploration aérienne d'un avion spécialement équipé. Les multiples données mesurées à 300 mètres d'altitude ont permis de dresser notamment les cartes ci-dessous.



Le 27 février 1984 à 13 h 40 UTC  
 Dépression à centre chaud (« polar low ») en mer de Norvège.  
 ——— Isobare au niveau de la mer.  
 - - - - - Isotherme à 300 m d'altitude.  
 —▲— Vent de 65 nd mesuré à 300 mètres d'altitude.



Isotaches (lignes d'égale vitesse du vent) cotées en mètres par seconde à 300 mètres d'altitude, le 27 février 1984 à 13 h 40 UTC.

On remarquera la dissymétrie importante qui est, du reste, fréquente dans ce genre de phénomène et que le centre thermique à 300 m (0 à -1°) ne coïncide pas avec le centre dépressionnaire (980 hPa)\*. Une faiblesse relative du vent existe dans le centre chaud\*\*. Autre remarque : une rapide rotation ainsi qu'un fort gradient de vitesse du vent coïncident avec les isothermes les plus rapprochées.

Après avoir parcouru des centaines de kilomètres sur la banquise glacée l'air qui parvenait sur la mer trouvait là une source de chaleur et d'humidité qui, compte tenu du froid extrême qui régnait en altitude, engendrait des nuages convectifs capables de créer un centre de chaleur relative et donc une « dépression à centre chaud ».

Le seuil de température de la mer autorisant le développement de cyclones dépend, pour une bonne part des conditions en altitude. La température de mer limite de 27°, parfois présentée comme un dogme, correspond en fait aux conditions régnant en général au-dessus des zones de basses latitudes (10 à 20°) ; en Méditerranée, elle n'est plus que de 22 à 24° environ à la fin de l'été et seulement de 14 ou 15° en plein hiver — et de 2 à 5° dans les mers arctiques. Mais, hors des tropiques, il s'agit de cyclones qui ne sauraient atteindre les dimensions verticales et l'intensité de ceux qui évoluent au-dessus des mers chaudes à 29, 30 ou 31°.

#### A4 - Le modèle à mailles fines PERIDOT Complément au Chapitre X

Au cours de la décennie 80, le modèle PERIDOT (Prévision à Échéance Rapprochée Intégrant des Données Observées et Télédélectées), à 15 niveaux, a été progressivement développé d'abord sur la puissante CYBER 175 (en 1982), puis, grâce au CRAY 1 il est devenu opérationnel (janvier 1985) en réalisant des prévisions jusqu'à l'échéance + 36 heures, en couplage avec le nouveau modèle spectral de grande échelle ÉMERAUDE. En avril 87, PERIDOT devient opérationnel sur CRAY 2, ce qui permet d'une part d'accroître l'échéance de prévision jusqu'à 48 heures, puis jusqu'à 60 heures, d'autre part d'élargir le domaine de travail (95 x 95 au lieu de 51 x 51 mailles de 35 km de côté) jusqu'à l'ensemble de l'Afrique du Nord et jusqu'à la moitié sud de la Scandinavie.

Cette maille de 35 km, si elle est « fine » par rapport aux mailles des modèles hémisphériques ou globaux usuels, est encore bien trop grande pour permettre

\* Mais l'isotherme de la température moyenne la plus élevée de la couche comprise entre le sol et la surface 500 hPa coïncide bien avec le centre dépressionnaire.  
 \*\* Faiblesse qui s'explique par une forte courbure des lignes de courants du vent.