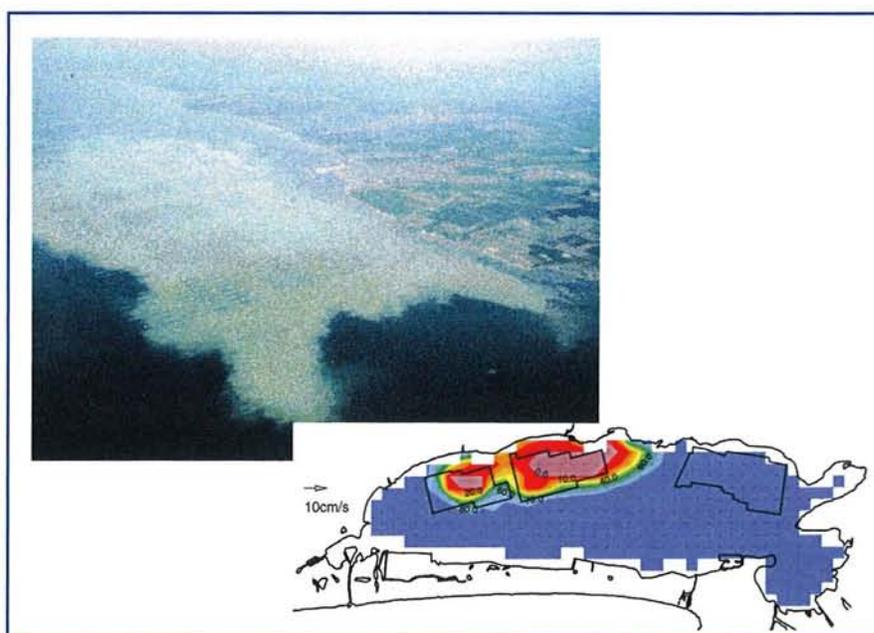


Les malaïgues de l'étang de Thau.

Tome 2. Relations entre les conditions physico-chimiques, la météorologie et les conditions d'apparition des crises dystrophiques



Station de Sète

BP 171 - Boulevard Jean Monnet – 34203 Sète Cédex

Résumé

Le tome 1 décrivait les malaïgues observées dans l'étang de Thau depuis 1969.

Dans le tome 2 sont analysés différents paramètres météorologiques (températures, vents, pressions atmosphériques) au moment de l'apparition des malaïgues dans le but de mettre en évidence un ou plusieurs paramètres susceptibles d'expliquer l'apparition de ces crises dystrophiques.

Les méthodes employées ne permettent de faire ressortir aucun facteur particulier. Seul un modèle mathématique pourrait apporter des éclaircissements.

Abstract

In the first volume dystrophic crisis in the Thau lagoon since 1969 are described.

In the second volume, meteorological parameters (temperature, wind, atmospheric pressure) are compared during the dystrophic crisis to show if either one or several parameters could explain the emergence of these phenomena .

It seems that only a mathematical model could be able to give explanation.

Mots-clés : Anoxie, malaïgue, météorologie, Lagune de Thau

Keywords : Anoxy, malaïgue, meteorological parameters, Thau lagoon

Commentaire :

Sommaire

1 : Introduction.....	5
2 : Malaïgue 1969.....	6
3 : Malaïgue 1971.....	12
4 : Malaïgue 1975.....	18
5 : Malaïgue 1982	25
6 : Malaïgue 1983.....	32
7 : Malaïgue 1987.....	39
8 : Malaïgue 1990.....	46
9 : Malaïgue 1994.....	52
10 : Malaïgue 1997.....	58
11 : Comparaison entre les malaïgues.....	64
12 : Discussion.....	65
12.1 Pluies.....	65
12.2 Températures.....	69
12.3 Vents.....	71
12.4 Pressions.....	72
13 : Paramètres non étudiés.....	73
13.1 Macrophytes.....	73
13.2 Phytoplancton.....	73

14 : Comparaison avec une année sans malaïgue.....	74
15 : Modèle de simulation.....	80
16 : Conclusion.....	81

1 : Introduction

Le tome 1 (Hamon 2003) présente la description de toutes les malaïgues connues. Dans le tome 2 nous décrivons l'évolution des températures, du vent (force et direction), et de la pression au cours de ces crises anoxiques.

En effet d'après Souchu *et al* (1998 b) les températures élevées et l'absence de vent ne peuvent pas à eux seuls expliquer l'apparition de ces phénomènes. A. Chapelle *et al* (2000) préconisent d'essayer de mettre en évidence des situations météorologiques particulières qui favoriseraient le développement de telles crises.

Les paramètres météorologiques des différentes malaïgues observées sont donc comparés pour essayer de mettre en évidence une succession de phénomènes qui seraient communs à toutes ces crises.

Il faut cependant garder en mémoire que toutes les malaïgues n'ont pas été recensées. Seules ont réellement été suivies celles pour lesquelles une tache blanche apparaissait en surface.

Sources des données météorologiques : Météo France

Pour chaque malaïgue, les paramètres mesurés sont présentés sous forme d'un tableau et/ou d'un graphique, suivis d'un commentaire.

2 : Malaïgue 1969

Tableau 1 : températures et pluies 1969

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	2,5	12,2	49,0
2	-1,9	11,6	17,8
3	5,6	13,9	272,3
4	9	17,5	136,6
5	13,4	20,3	21,5
6	13,2	23,8	48,6
7	17,8	28,3	11,4
8	18,1	26,5	17,1
9	16,6	21,9	79
10	14,2	19,9	227,8
11	1,9	16,8	101,9
12	0,4	9,9	73,9
TOTAL			1105,8

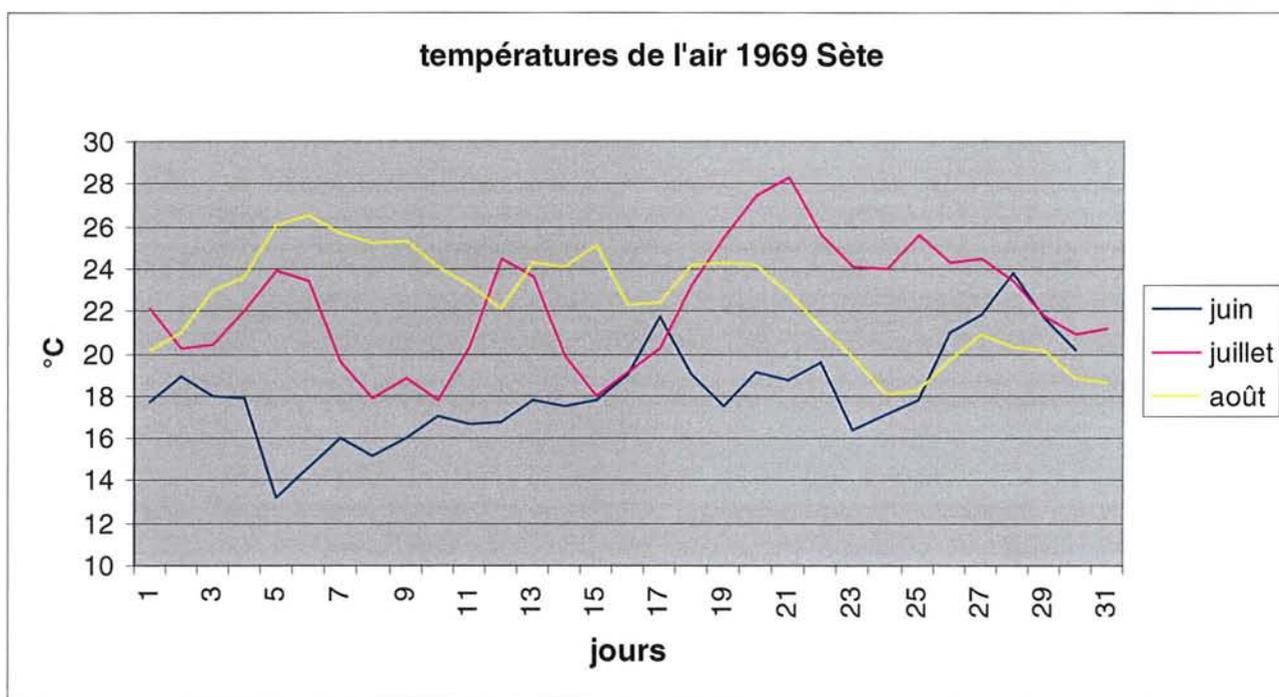


Fig. 1 : températures air en juin, juillet et août 1969

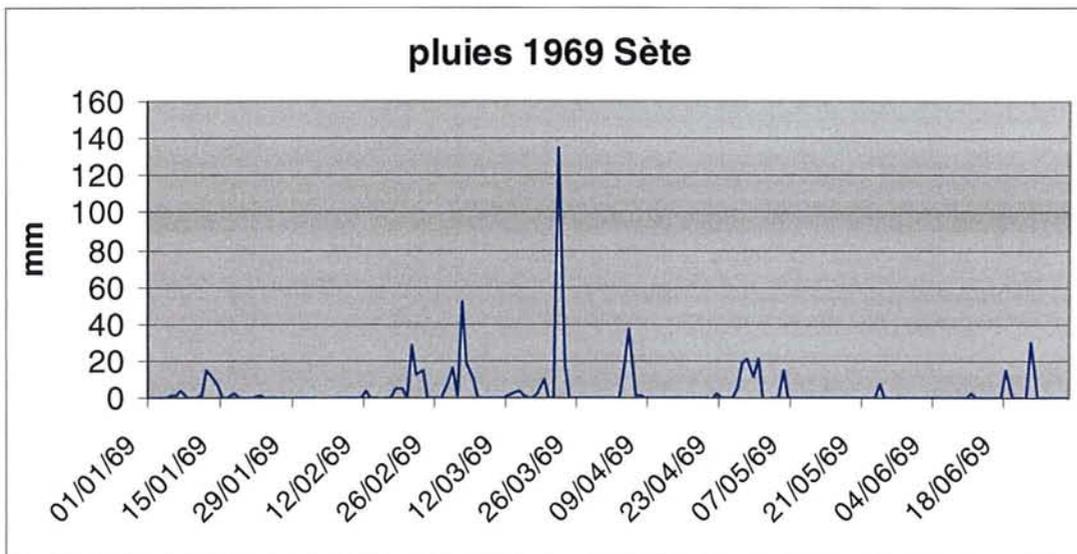


Fig. 2 : Pluies six mois avant la malaïgue

Un épisode orageux très important a eu lieu fin Mars avec 132 mm de précipitation journalière. Les données de salinité ne débutent qu'en mai 1969 ; à cette époque les valeurs n'étaient que de 28 ‰. Il faudra attendre le mois de juillet pour que les salinités atteignent 34 ‰. L'étang a donc reçu une quantité importante d'eau douce très chargée en matière nutritive.

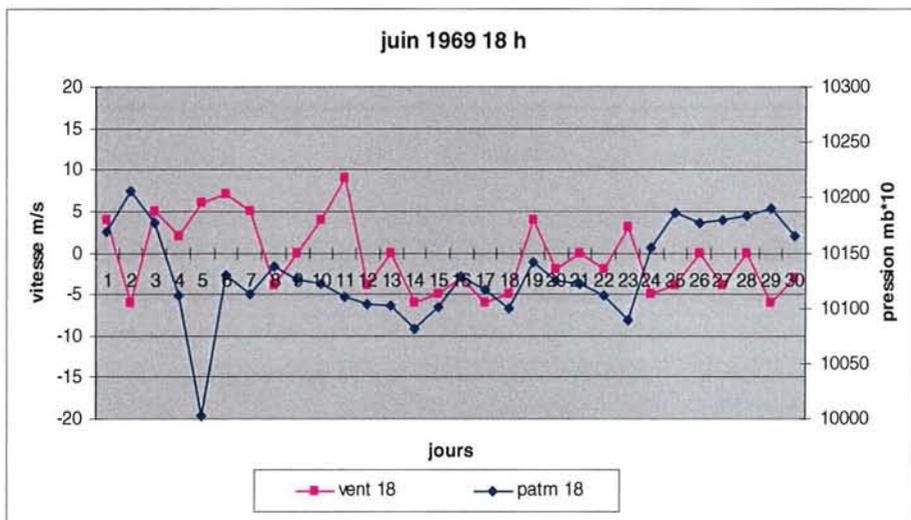
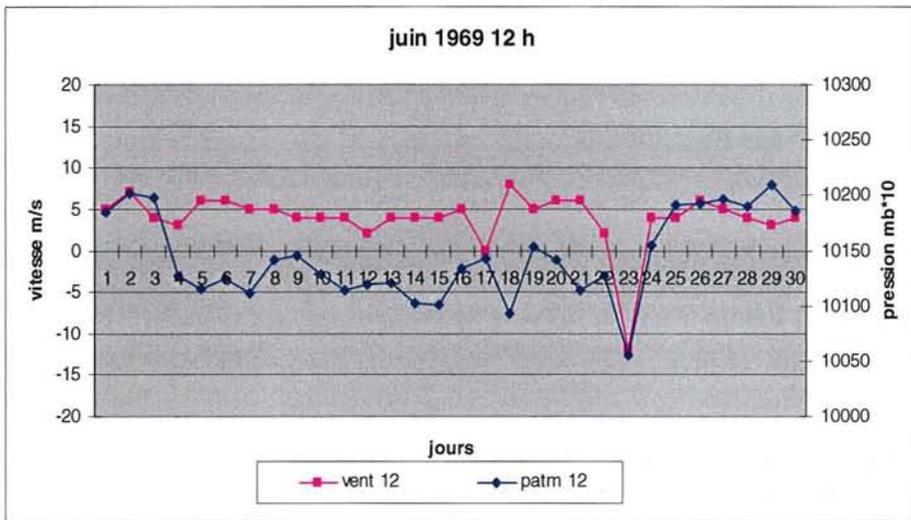
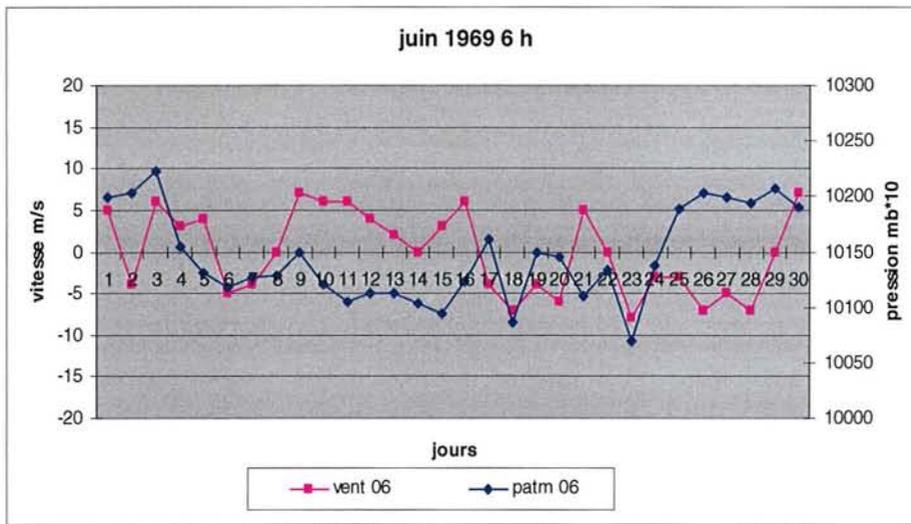


Fig. 3: relation pression (atm) vent (vitesse) en juin 1969

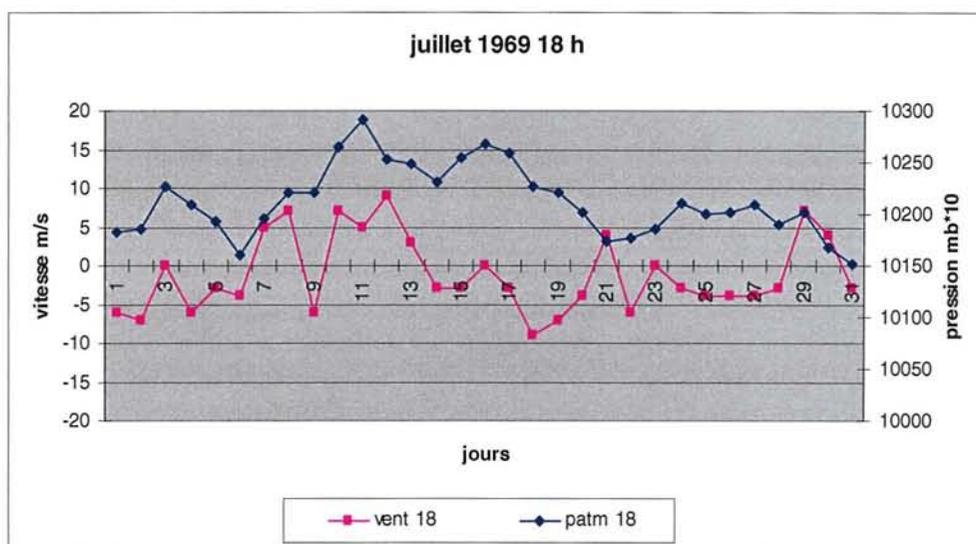
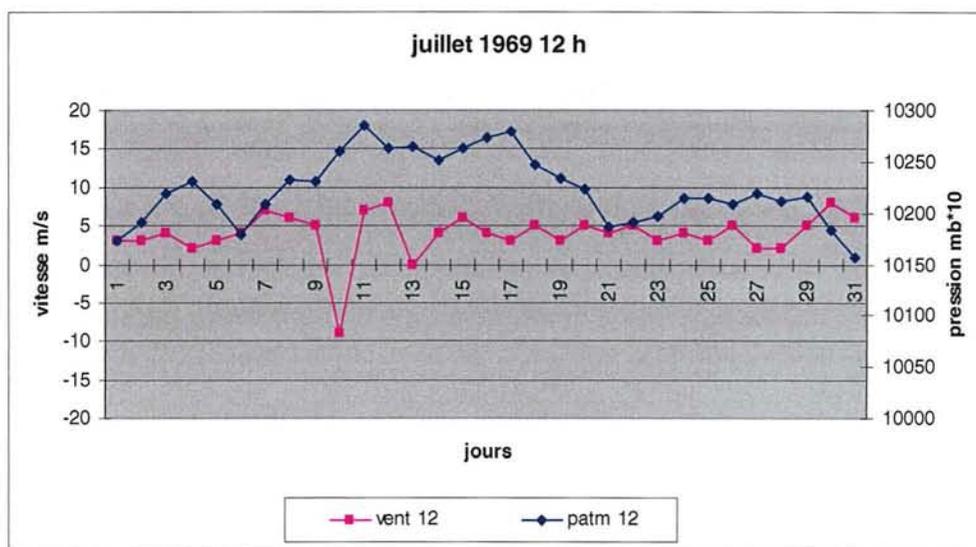
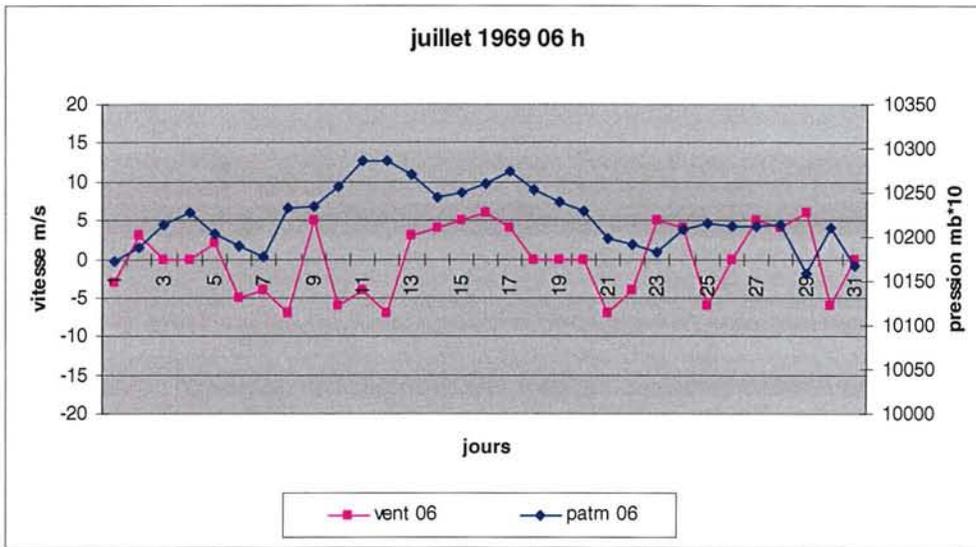


Fig. 4: relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1969

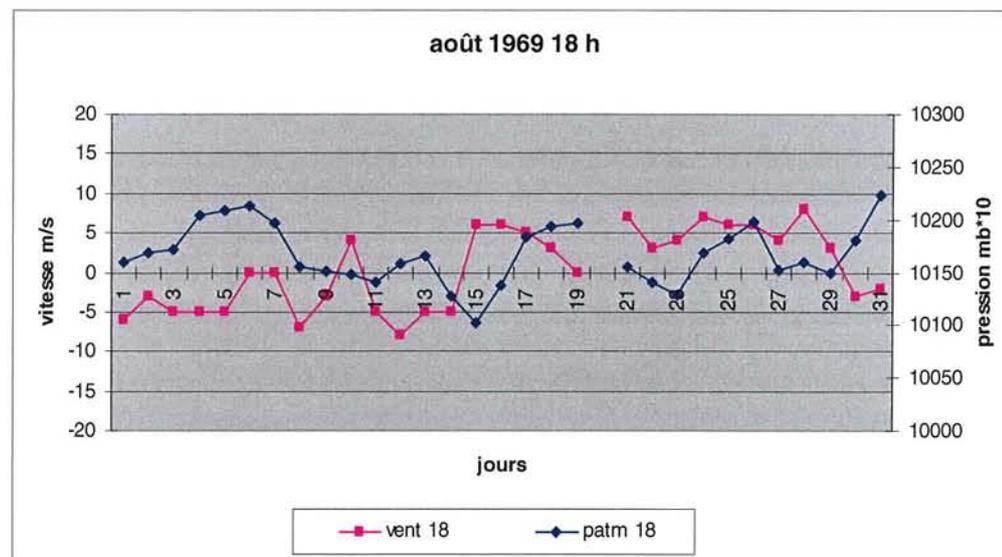
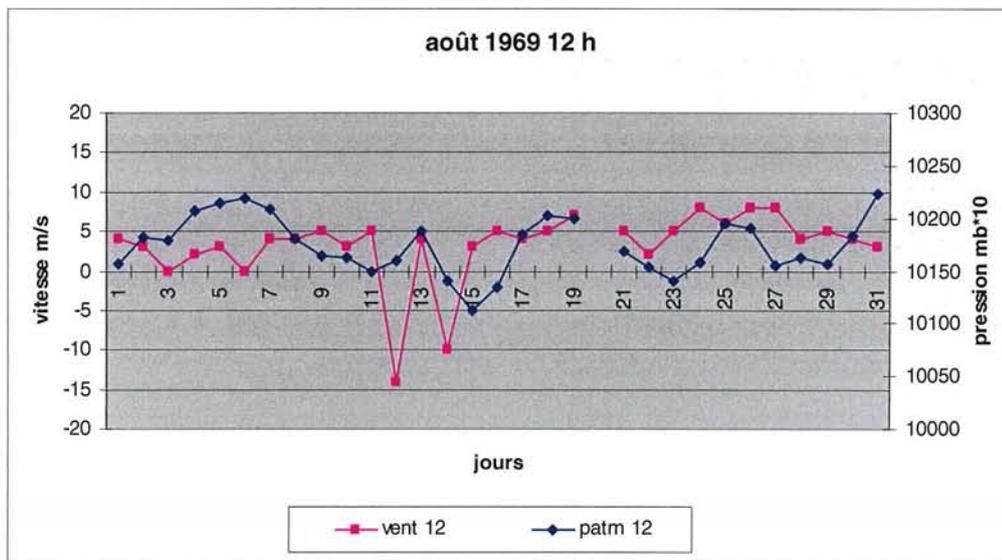
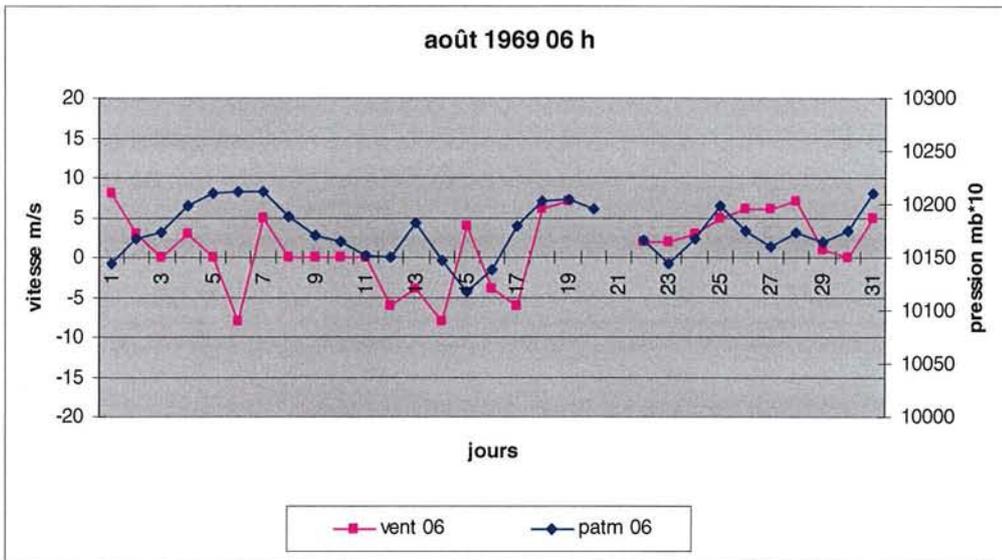


Fig. 5: relation pression (atm) vent (vitesse) août 1969

Juin :

Les pluies au mois de juin sont assez faibles :46,8 mm (Tab.1).

Les températures sont comprises entre 13 et 24°C, avec une période relativement fraîche (13-16°C) en début du mois et en nette augmentation dans la dernière semaine (Fig. 1). Les pluies sont faibles (48,6 mm). La lagune avait reçu en mars et Avril des précipitations importantes (272 mm et 136 mm respectivement).

Les vents n'ont jamais dépassé 10 m/s de secteur Nord, par contre ils ont atteint 12 m/s de secteur Sud le 23 après-midi (coup de vent de courte durée Fig. 3).

Les pressions sont comprises entre 1007 et 1021 mb mais restent au dessous de 1015 pratiquement tout le mois.

Il existe un antagonisme très marqué entre les vents et les pressions dans la première semaine et la dernière semaine du mois. Les échanges mer-étang sont donc perturbés durant ces périodes.

Juillet :

Les pluies sont faibles : 11,4 mm (Tab. 1).

Les températures sont comprises entre 18 et 28°C (Fig. 1). La tendance générale est à la hausse avec cependant deux périodes de refroidissement (du 8 au 11 et du 17 au 15).

Les pressions sont assez hautes, généralement supérieures à 1020 mb (situation anticyclonique Fig. 4).

Les vents sont faibles à modérés ne dépassant que très rarement les 5 m/s qu'ils soient de secteur Nord ou de secteur Sud (Fig. 4).

Les périodes présentant un antagonisme vents-pressions sont rares (10,11,12).

août :

Les pluies sont faibles : 17,1 mm (Tab. 1).

Les températures sont comprises entre 27 et 18°C. elles sont pratiquement tout le mois supérieures à 20°C (Fig. 1).

Les pressions au cours du mois fluctuent énormément entre 1012 et 1021 mb. Les basses pressions sont observées entre le 8 et le 16 (Fig. 5)

Il y a alternance de vents de Nord et de vents de sud (première quinzaine du mois), soit de forces rarement supérieures à 5 m/s.

Aucune tache blanche révélatrice de malaïgue n'est apparue en surface. Mais le fond a été anoxique en juillet août et même en décembre (cf. Tome 1 Fig. 2). Or, toutes les conditions étaient réunies pour qu'une malaïgue généralisée se produise : températures supérieures à 22°C pendant plus d'un mois, vent faibles, peu ou pas d'antagonisme entre vents et pressions. Les échanges entre mer et étang étaient donc très faibles.

3 : Malaïgue 1971

Tableau 2 : températures et pluies 1971

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	-2,2	11,7	314,5
2	3,3	11,4	5
3	-2	12,5	136,2
4	11,3	17,6	83,4
5	14	22,6	37,7
6	15,5	24,2	25,5
7	19	27,4	29,7
8	21,7	27,1	5,1
9	16,2	23,8	83,7
10	12,6	20,5	40,2
11	4,1	15,3	43,8
12	5,8	15,5	130,3
TOTAL			935,1

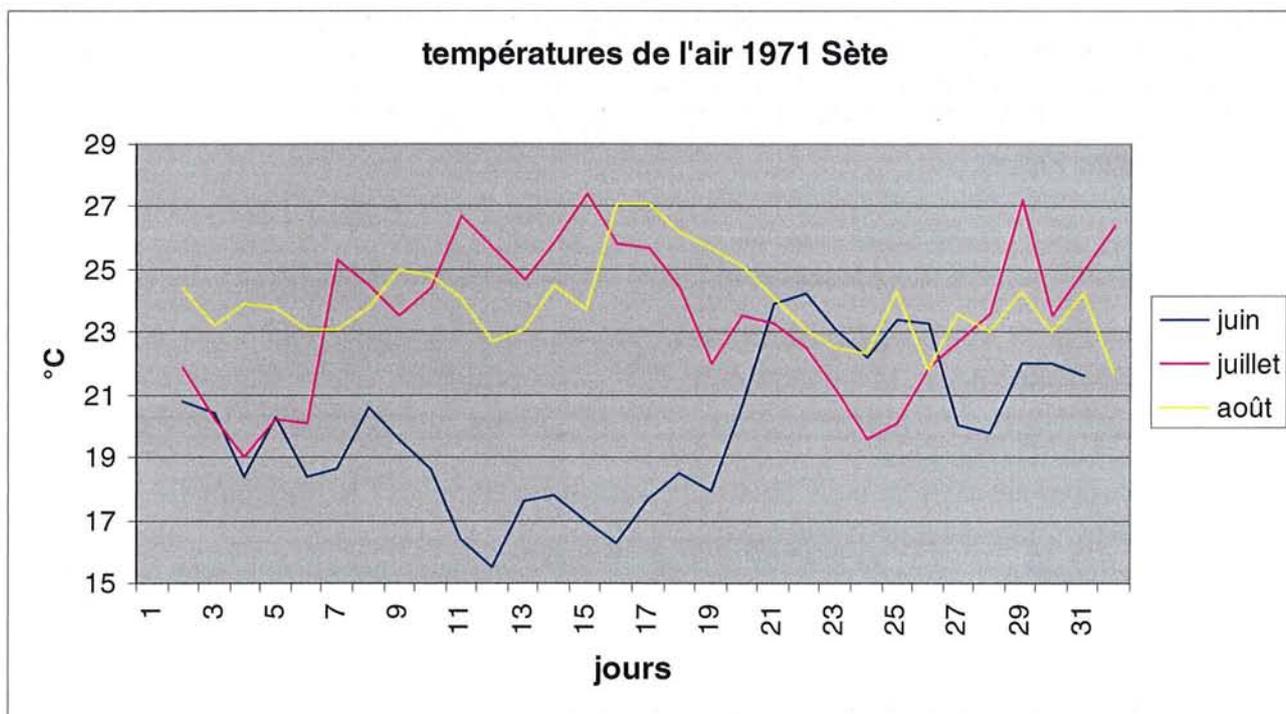


Fig. 6 : températures de l'air pendant la malaïgue

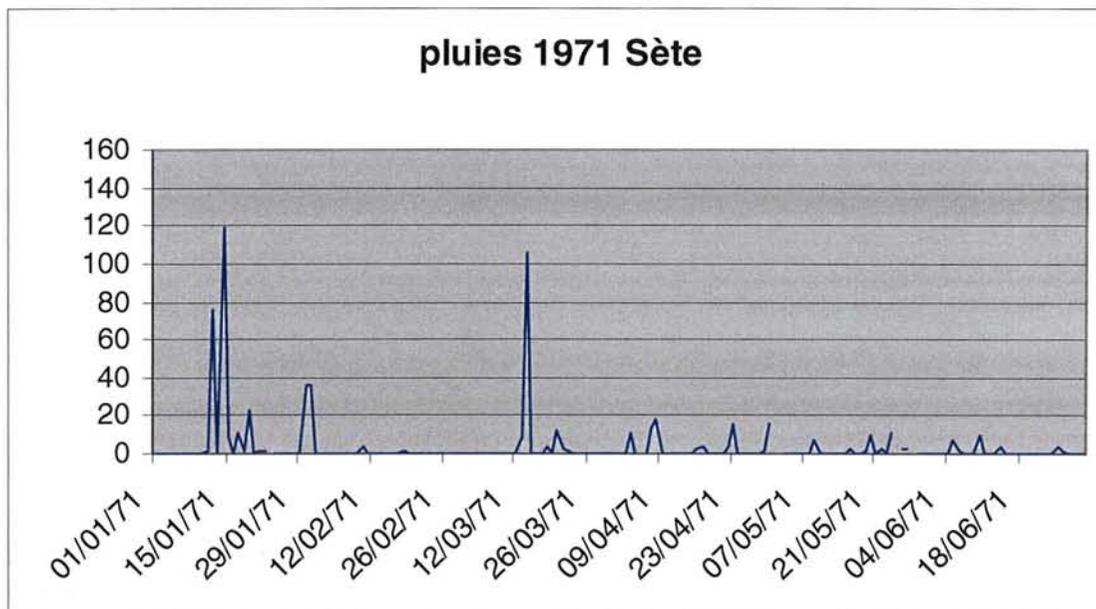


Fig. 7 : Pluies six mois avant la malaïgue

Deux épisodes pluvieux importants ont eu lieu ; l'un au mois de janvier avec 193 mm en 2 jours, l'autre en mars : 105 mm en un jour.

Les salinités de surface qui au début du mois de janvier étaient de 37 ‰ chutent brutalement et s'établissent aux alentours de 28 ‰. Il faudra attendre le mois d'août pour retrouver des valeurs de 38 ‰.

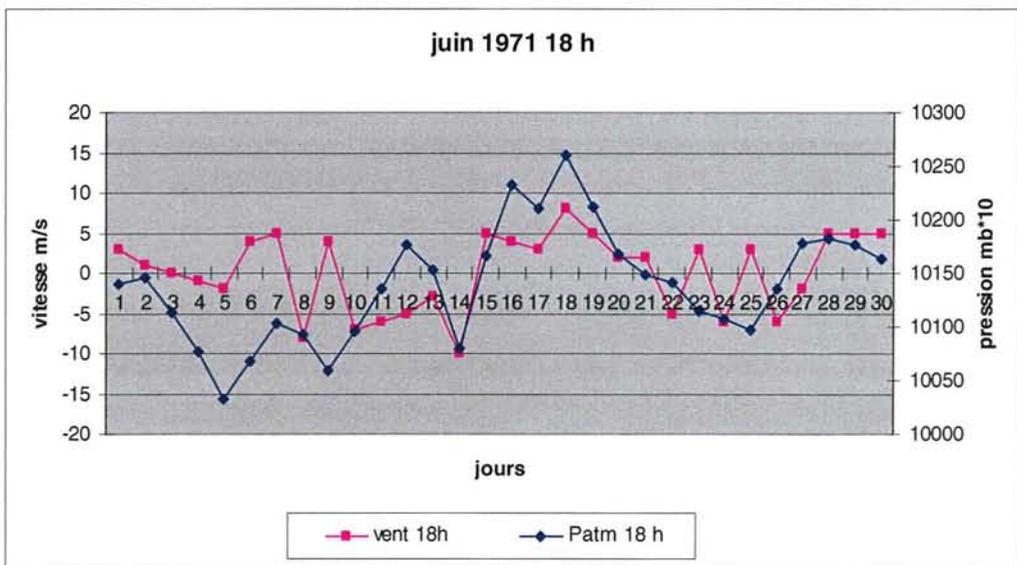
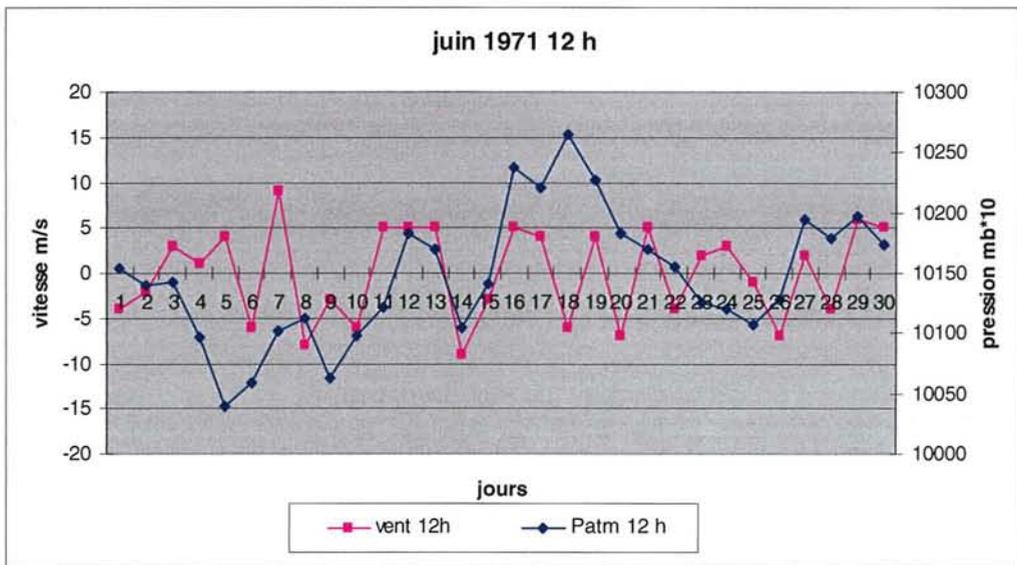
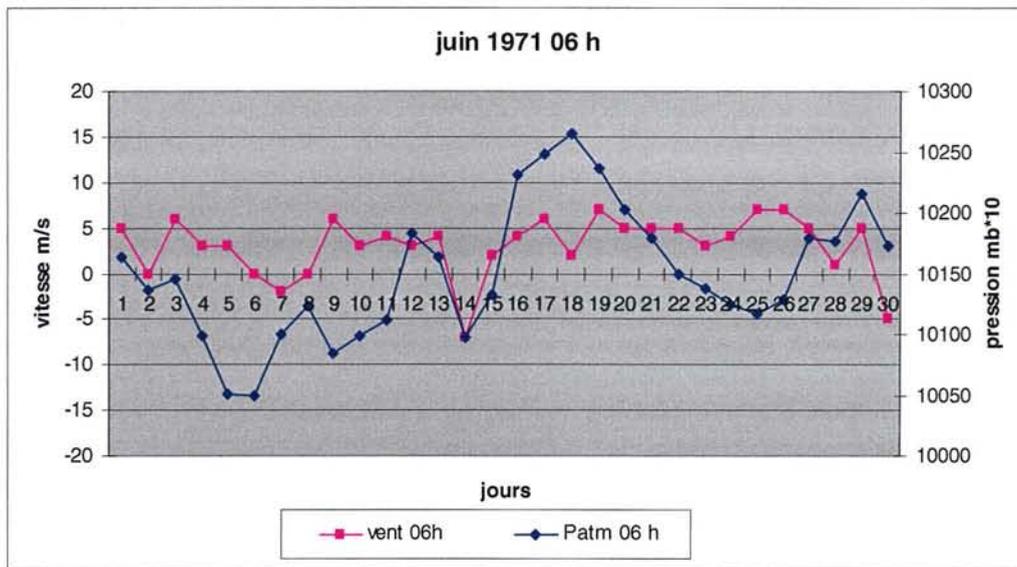


Fig. 8: relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1971

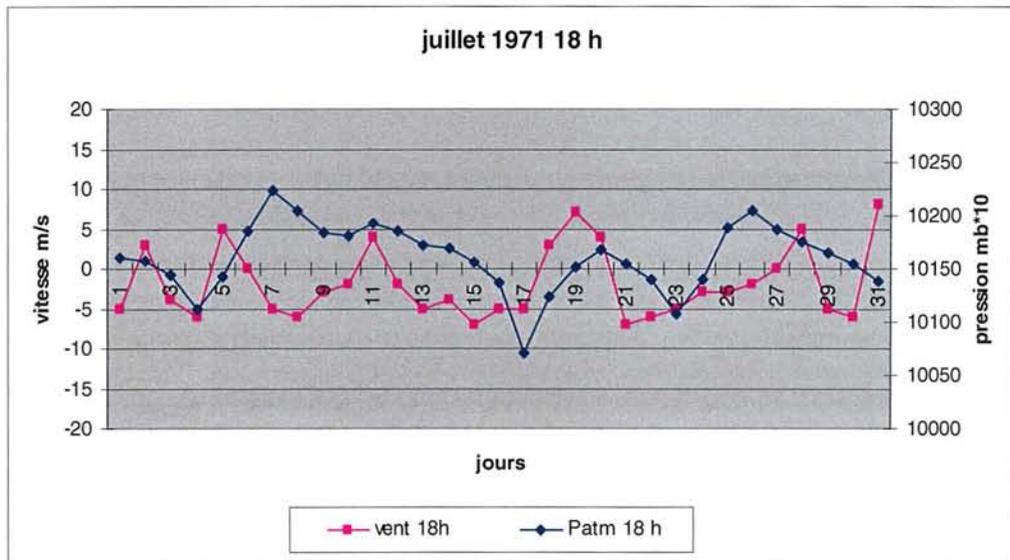
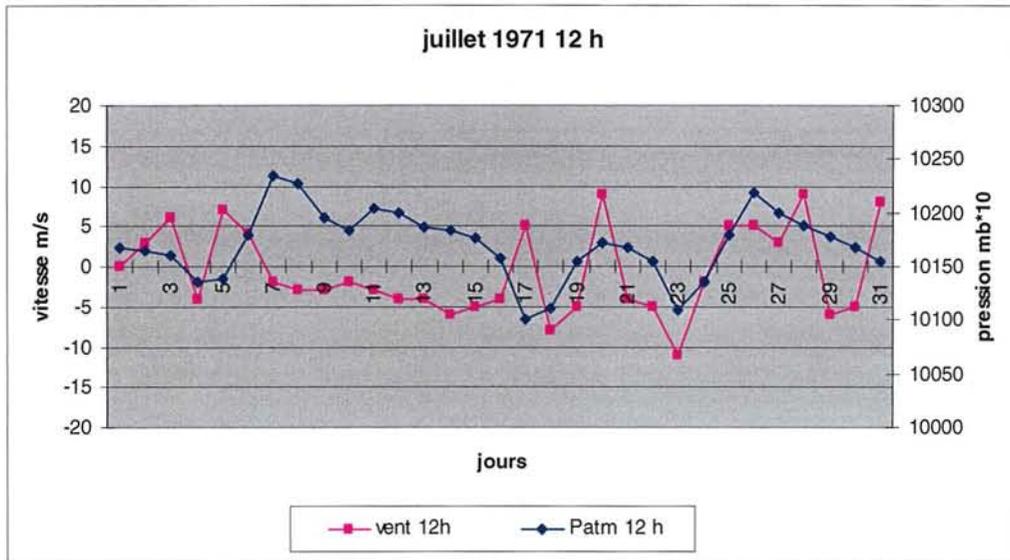
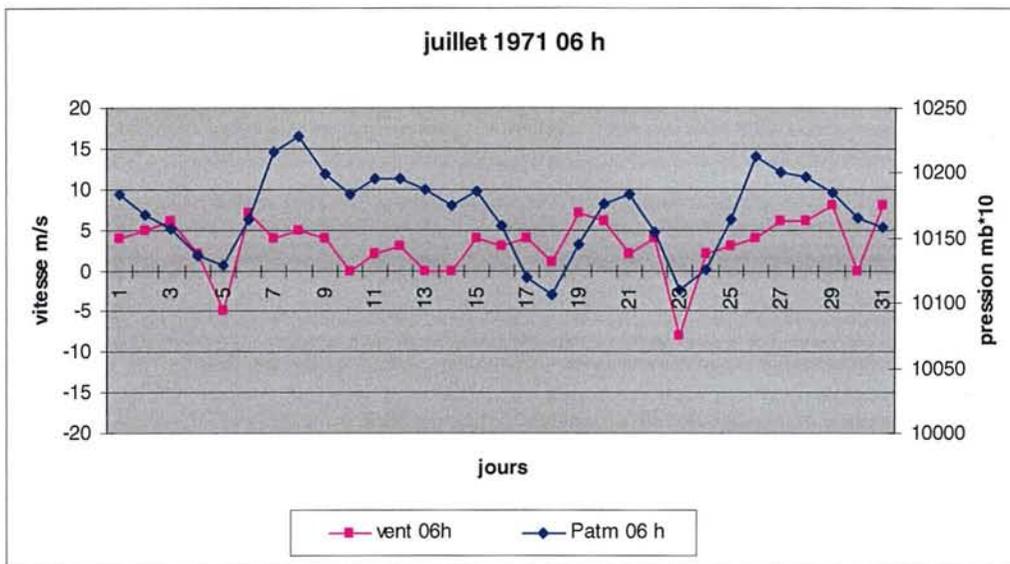


Fig. 9: relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1971

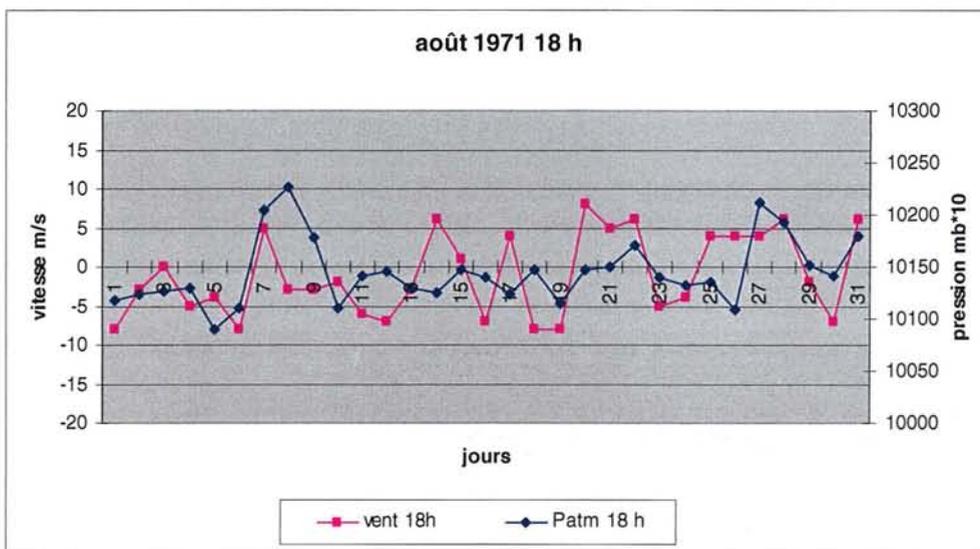
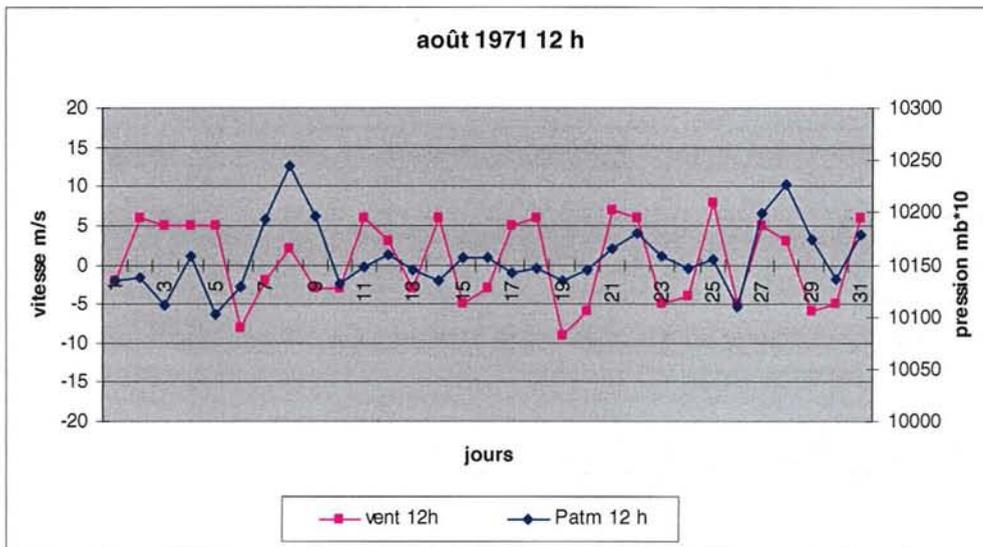
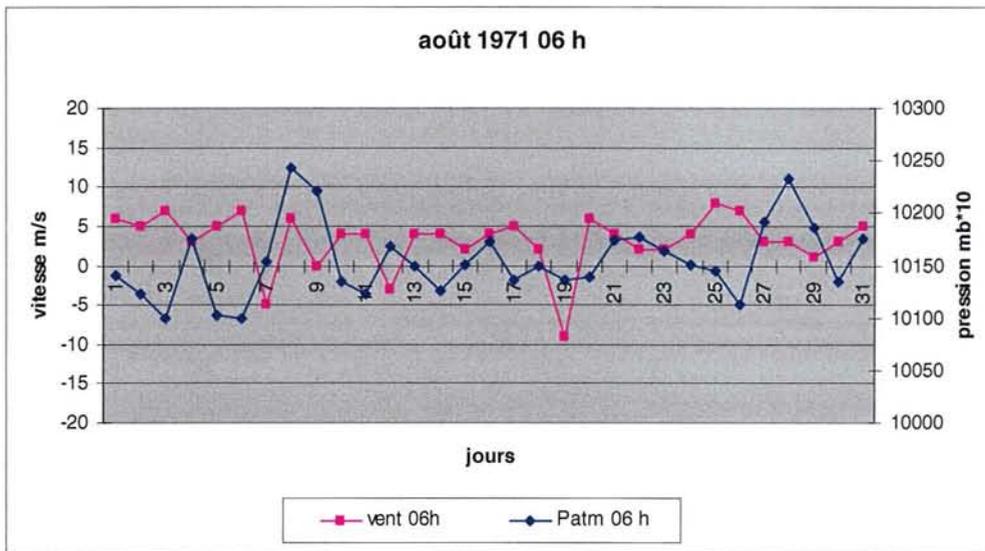


Fig. 10: relation pression (atm) vent (vitesse) août 1971

Juin :

Les pluies sont faibles : 25,5 mm (Tab. 2).

Les températures varient de 16 à 24°C, dépassant 21 °C à partir du 21 (Fig. 6).

Les vents sont rarement supérieurs à 5 m/s de secteur Nord et compris entre 5 et 10 m/s de secteur Sud dans l'après midi (Fig. 7).

Les pressions sont comprises entre 1003 et 1025 mb (Fig.7).

Il n'existe pratiquement pas d'antagonisme entre les pressions et le vent sauf pendant l'après midi des 18, 20 et 22 (Fig.7).

Juillet :

Les pluies sont comparables à celles du mois de juin 29,7 mm (Tab. 2)

Les températures sont comprises entre 19 et 27°C mais dépassent les 22°C pendant pratiquement tout le mois (Fig. 6).

Les pressions dépassent généralement 1015 mb (Fig. 9).

Les vents sont rarement supérieurs à 5 m/s de secteur Nord sauf en fin de mois, ceux de secteur Sud peuvent atteindre 10 m/s (23) (Fig. 9).

Il existe un antagonisme vent pression dès la mi-journée entre le 7 et le 16 (Fig. 9).

Août :

Les pluies sont très faibles : 5,1 mm (Tab. 2)

Les températures sont pratiquement toujours supérieures à 23°C, avec un minimum de 21°C et un maximum de 27°C (Fig. 6).

Les pressions sont comprises entre 1015 et 1025 mb sauf aux alentours du 8 où elles sont de 1023 mb (Fig. 10).

Les vents qu'ils soient de Nord ou de Sud sont toujours inférieurs à 5 m/s à deux exceptions près (Fig. 10).

Il n'y a aucun antagonisme marqué entre les vents et les pressions.

Aucune tache blanche de surface n'est apparue, pourtant les températures sont supérieures à celles de 1969, les vents sont plus faibles et les couches profondes ont été anoxiques ou en déficit net d'oxygène pendant toute l'année (Tome 1, Fig.3)

4: Malaïgue 1975

Tableau 3 : températures et pluies 1975

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	4,3,	15,0	5,3
2	7,4	11,8	32,6
3	3,8	12,1	16,1
4	5,1	19,7	9,5
5	11,0	20,5	73,4
6	14,7	24,9	29,4
7	18,6	26,6	13,6
8	18,7	27,4	31,4
9	15,5	22,0	76,5
10	9,0	23,6	34,4
11	7,4	15,7	67,3
12	2,6	10,1	131,7
TOTAL			521,5mm

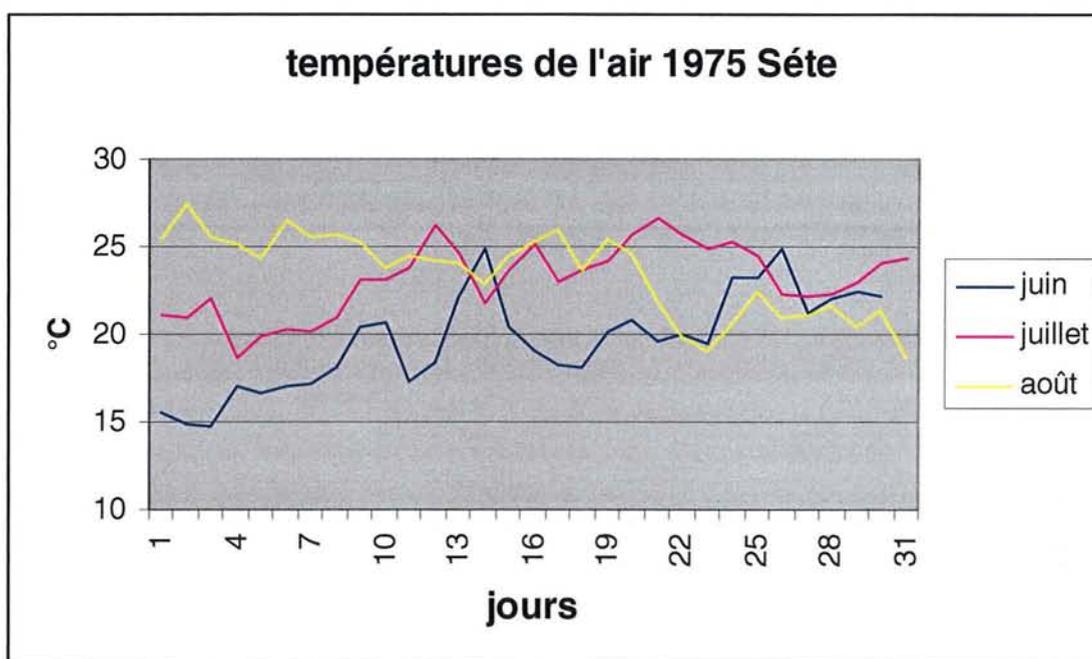


Fig. 11 : températures de l'air en juin, juillet et août 1975

pluies 1975 Sète

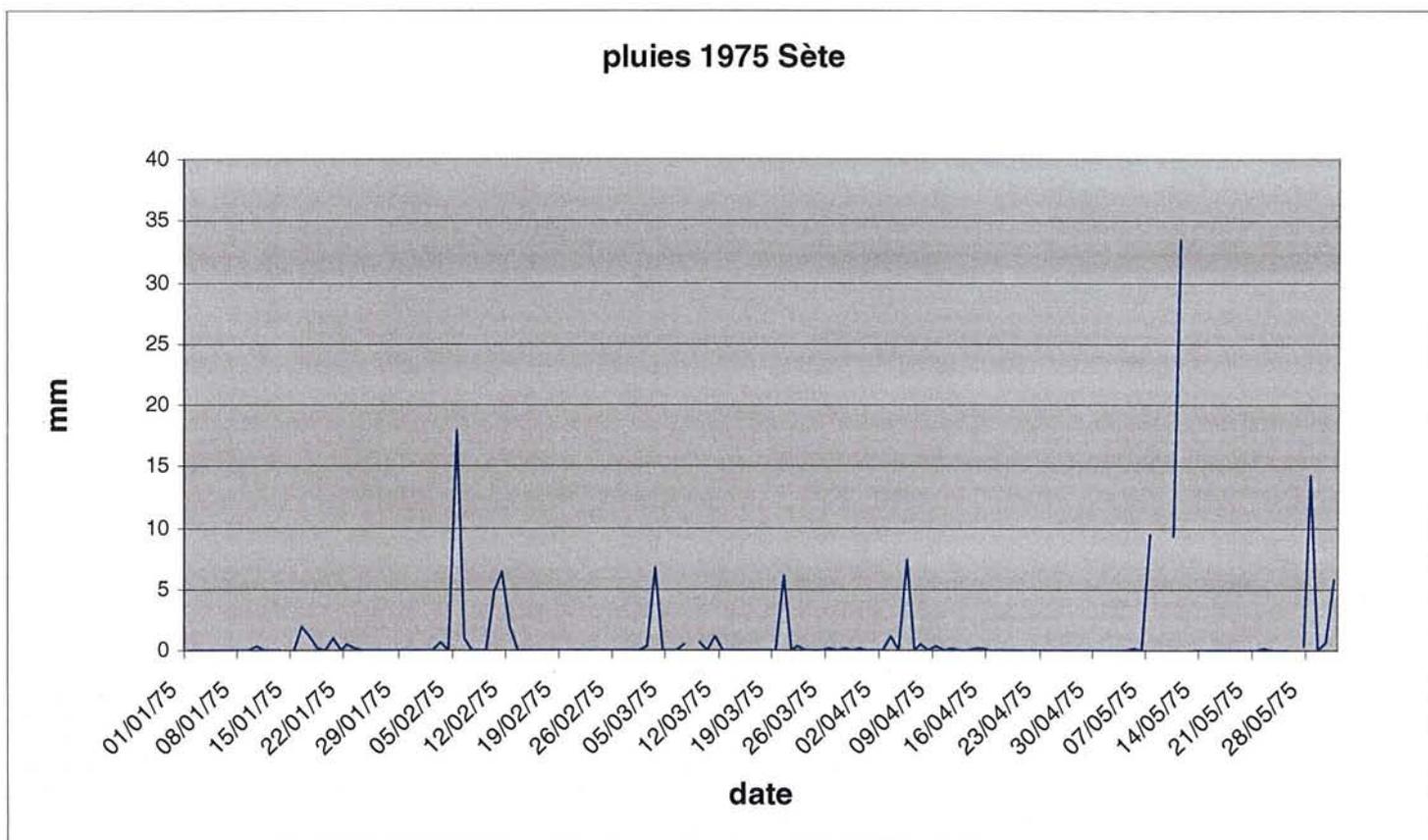


Fig. 12 : Pluies six mois avant la malaïgue

Durant le premier semestre avant l'apparition de la malaïgue un épisode pluvieux assez important a eu lieu à la mi-mai (33 mm journalier). Il est loin cependant d'avoir la même importance qu'en 1969 et 1971. Ces pluies ont apporté des sels nutritifs en lessivant le bassin versant.

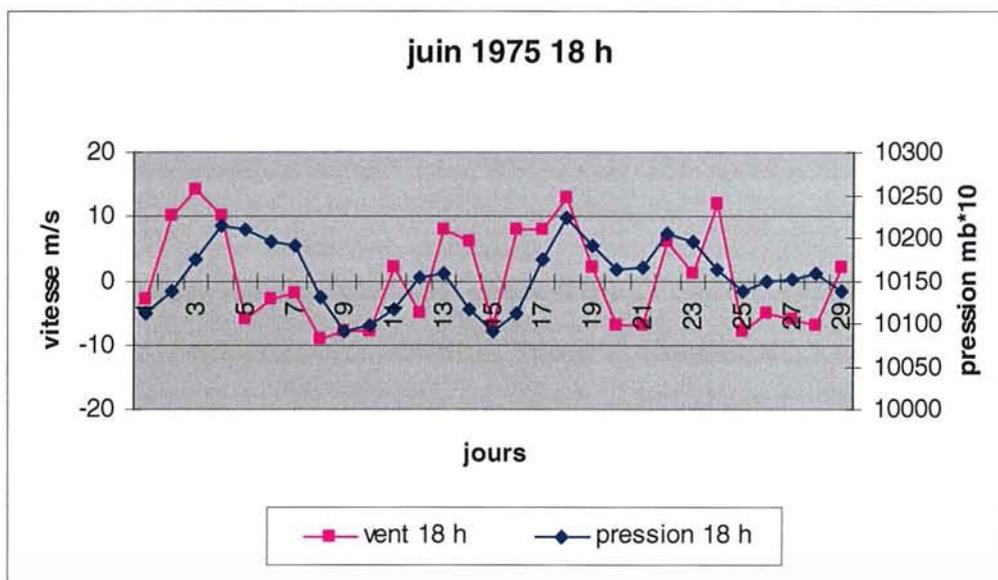
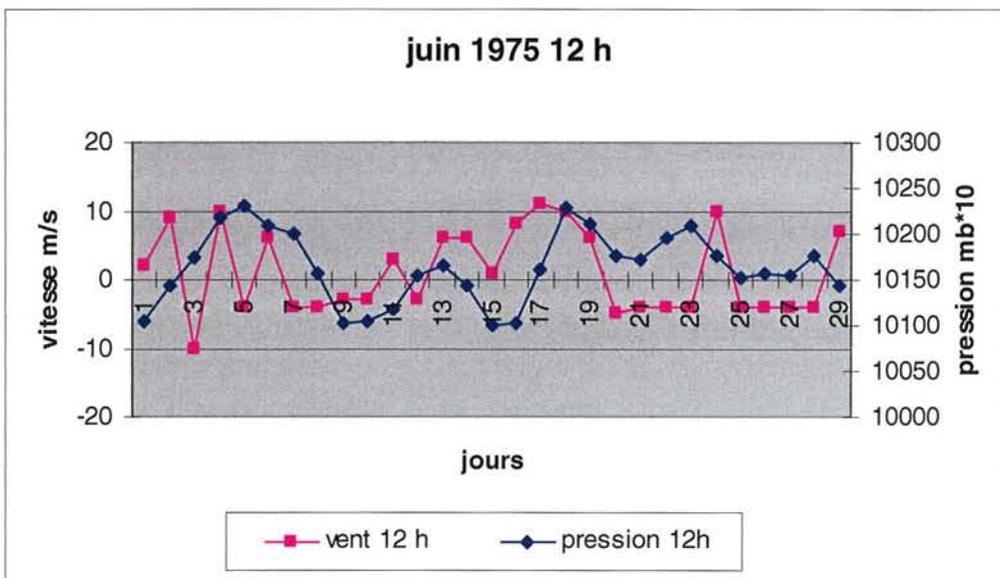
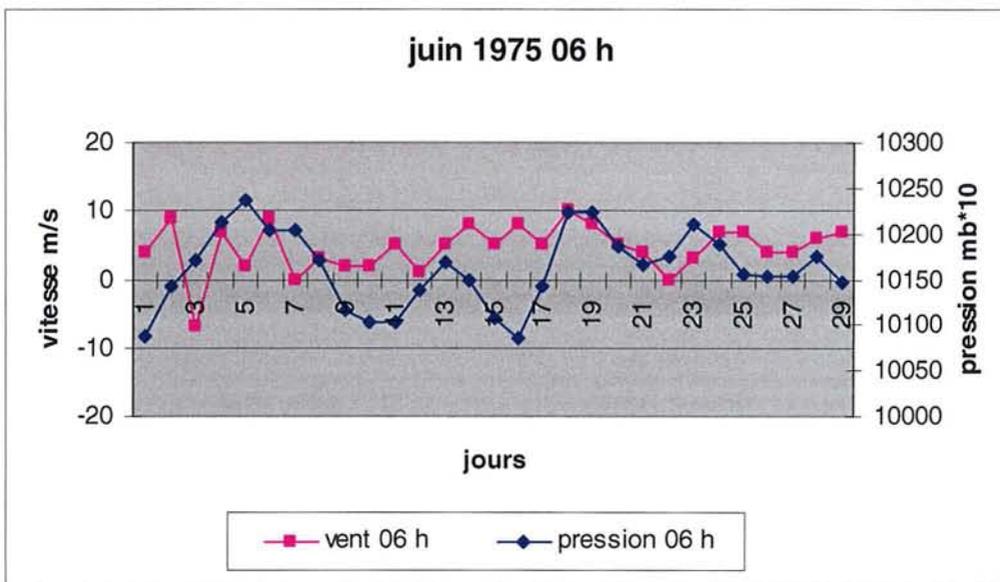


Fig. 13: relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1975

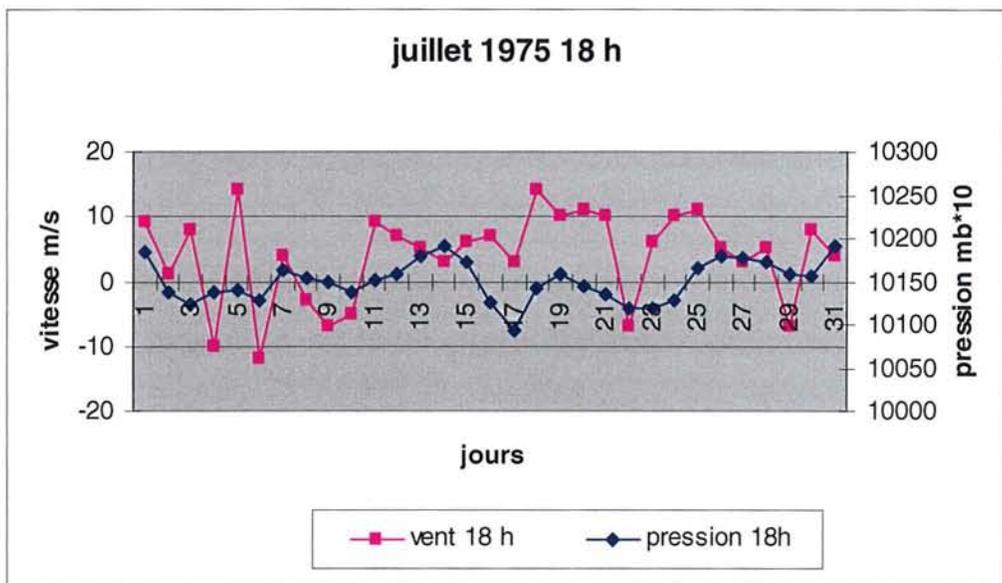
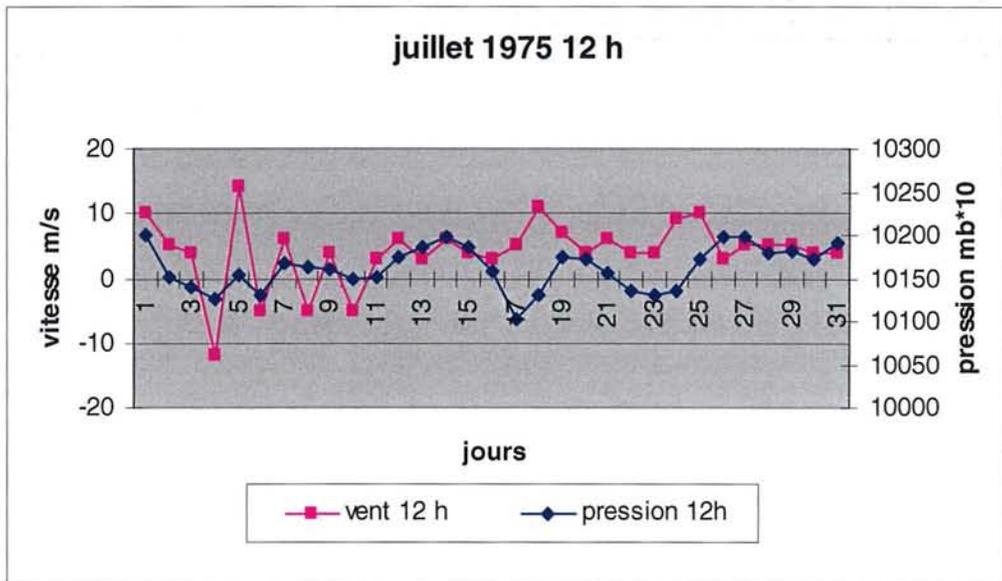
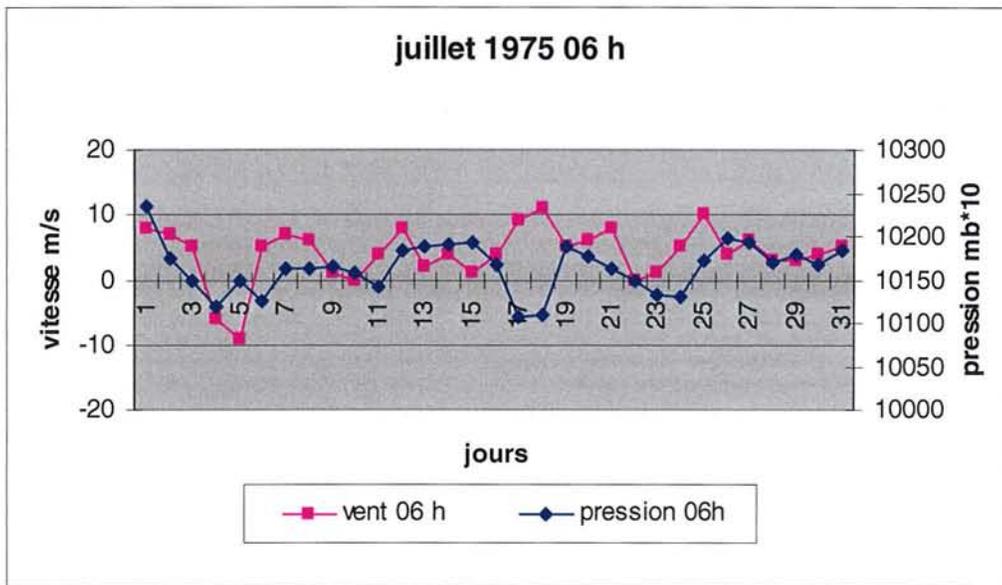


Fig. 14: relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1975

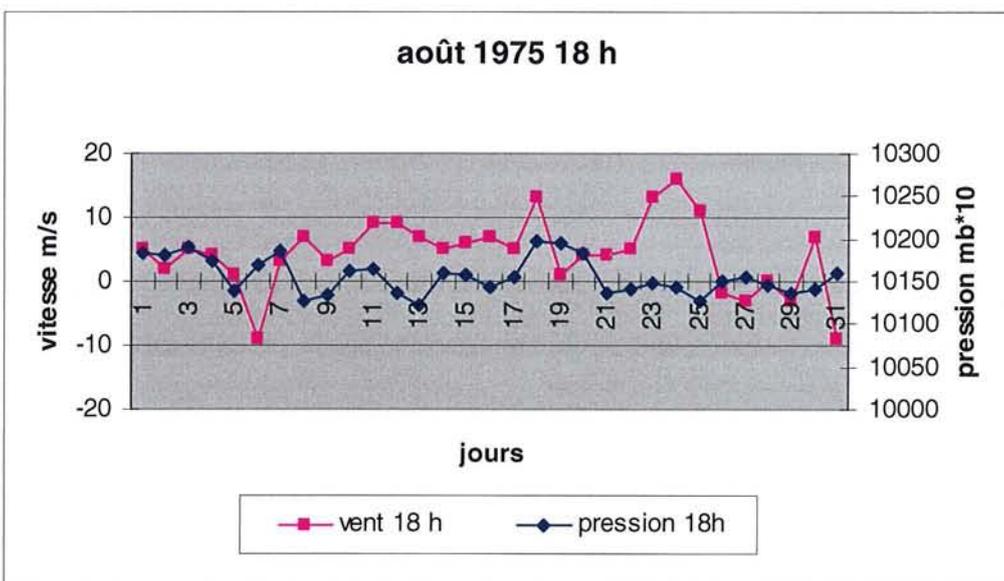
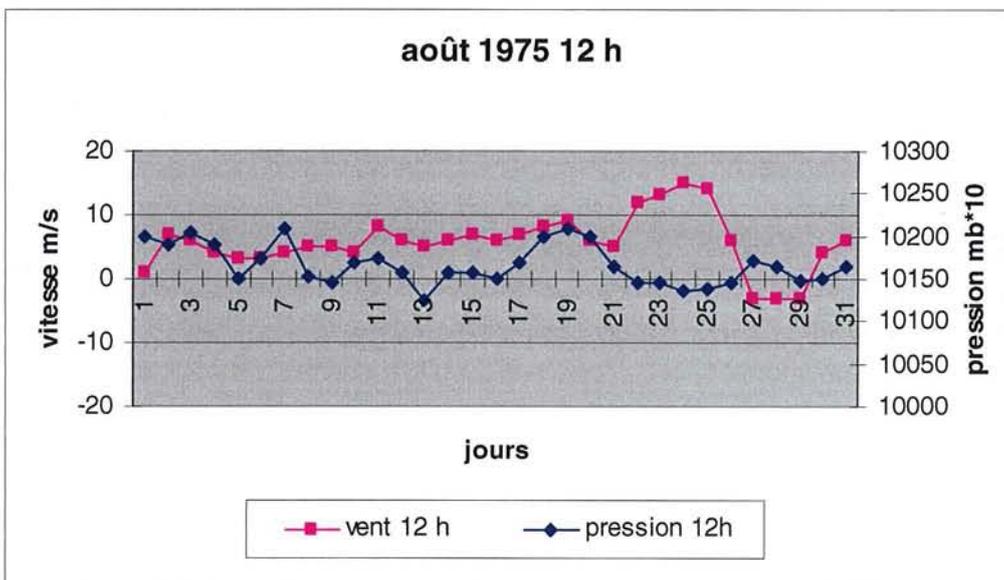
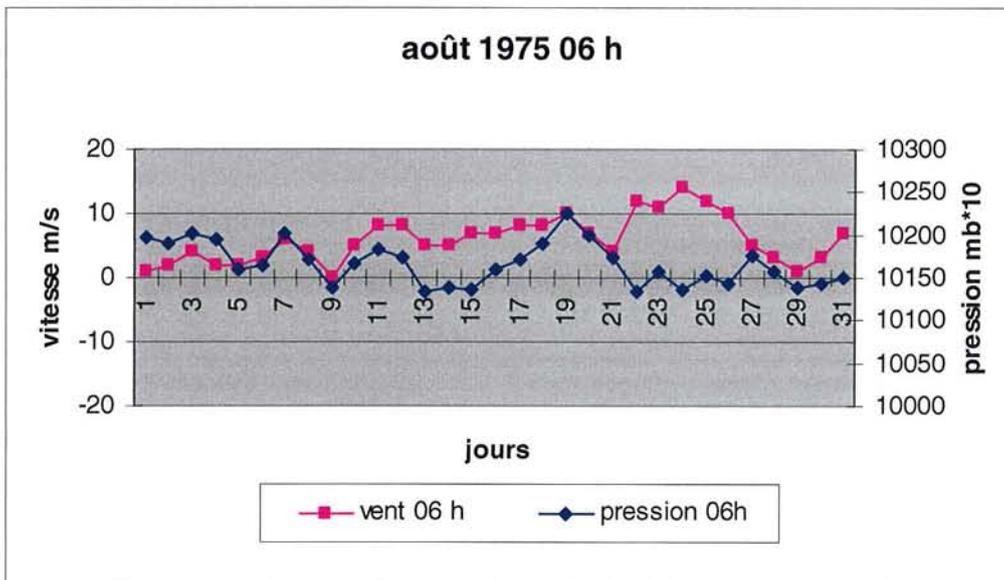


Fig. 15: relation pression (atm) vent (vitesse) août 1975

Juin

Les pluies sont assez faibles : 29,4 mm (tabl. 3)

Les températures de l'air ont oscillé entre 15 et 25°C dépassant les 20°C après le 20 (Fig. 11).

La pression atmosphérique a varié entre 1010 et 1023 mb, restant à peu près stable (1020 mb) dans les 10 derniers jours du mois (Fig. 13).

Les vents de Nord sont de l'ordre de 14 m/s au maximum, ceux de secteur Sud sont rarement supérieurs à 10 m/s (Fig. 13) .

Pendant tout le mois on observe une alternance des vents ; pendant la matinée ce sont surtout des vents de secteur Nord et durant l'après-midi les vents soufflent de secteur Sud (Fig. 13). Cette alternance de vents a assuré des échanges corrects entre la mer et l'étang favorisé par les marées barométriques.

Juillet

Les pluies sont faibles : 13,6 mm (Tabl. 3)

Pendant tout le mois les températures ont été supérieures à 20°C, dépassant 22°C dès le 11 (Fig. 11).

La pression atmosphérique est restée comprise entre 1012 et 1018 mb. Les variations les plus importantes se situent durant la seconde quinzaine du mois, mais elles ne sont pas brutales (Fig. 14).

Jusqu'au 7 juillet, l'alternance journalière des vents se poursuit et à partir de cette date et jusqu'au 11, les vents sont de secteur Nord faibles à modérés (0 à 6 m/s), ils sont ensuite presque tout le temps supérieurs à 5m/s. A noter entre le 22 et le 23 de ce mois un coup de vent de secteur Sud de 15 m/s. La persistance des vents de secteur Nord modérés ne permet pas d'échanges mer-étang (Fig. 14).

Les marées barométriques quant à elles ne sont pas assez importantes pour assurer des échanges conséquents. Il y a très souvent antagonisme entre les vents et les pressions surtout en fin de soirée (phénomène thermique)

Août

Les pluies sont plus importantes que le mois précédent : 31,4mm (Tab.4)

Jusqu'à la fin août les températures sont supérieures à 20°C dépassant même parfois les 25°C (début et mi-août) (Fig. 11).

La pression atmosphérique est comprise entre 1015 et 1020 mb ; les fluctuations ne sont pas brutales. Du 22 août à la fin du mois les pressions se stabilisent entre 1015 et 1018 mb (situation anticyclonique, Fig. 15).

Comme au mois de juillet, les vents sont essentiellement de secteur Nord, de force modérée (entre 0 et 10 m/s). A partir du 9, les vents sont légèrement plus forts (supérieurs à 5 m/s et ce jusqu'au 18). Il faudra attendre le 23 août pour qu'un coup de vent de secteur Nord supérieur à 15 m/s apparaisse suivi par un vent de secteur Sud de 10 m /s. Ce vent de secteur Sud modéré va souffler pendant 4 jours (Fig . 15).

On observe parfois un antagonisme vents pressions.

Ces deux mois d'été sont donc caractérisés par des températures stables, relativement élevées, une pression atmosphérique assez faible et peu fluctuante, et des vents de secteurs Nord modérés. Dans ces conditions, les échanges mer-étang sont pratiquement insignifiants. Les eaux marines plus froides et oxygénées ne pénètrent plus dans l'étang et des phénomènes

de malaïgues peuvent apparaître, ce qui a été le cas en 1975. Cette malaïgue a été généralisée alors que les températures ont été plus faibles qu'en 1969 et 1971 et que les vents ont très souvent dépassé les 5 m/s.

Evolution des phosphates:

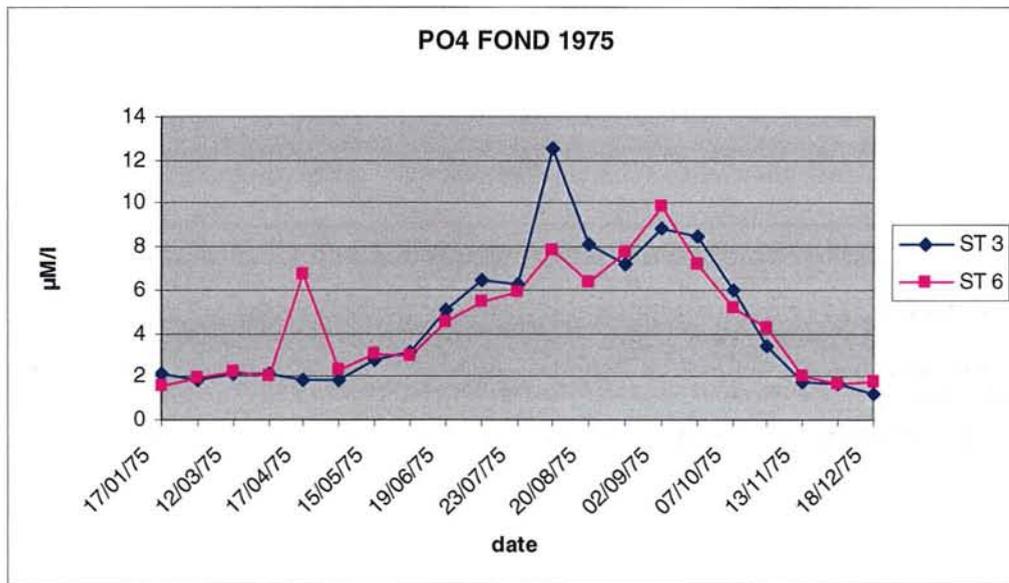


Fig. 16: évolution des phosphates pendant et après la malaïgue

Dès la mi-juin on peut observer une augmentation de la quantité de phosphates dans les couches profondes de tout l'étang (seules deux stations ont été représentées pour une meilleure lisibilité). Ces concentrations vont augmenter jusqu'en octobre, ce qui montre que le milieu est très lent à réagir. Il faudra attendre le mois de novembre pour obtenir des valeurs comparables à celles du début de l'année. Il aura donc fallu plus de quatre mois pour que la lagune retrouve des conditions normales.

5: Malaïgue 1982

Tableau 4: températures et pluies 1982

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	-2,8	20	26,8
2	-1,2	19,8	57,3
3	-2,2	21,3	48,0
4	32,9	24,6	23,8
5	3,1	29,0	4,9
6	13,5	30,7	23,0
7	15,0	37,0	42,5
8	12,9	31,2	27,4
9	8,9	30,7	5,6
10	5,1	26,0	72,7
11	2,8	19,9	80,9
12	-3,2	18,0	25,7
TOTAL			438,6mm

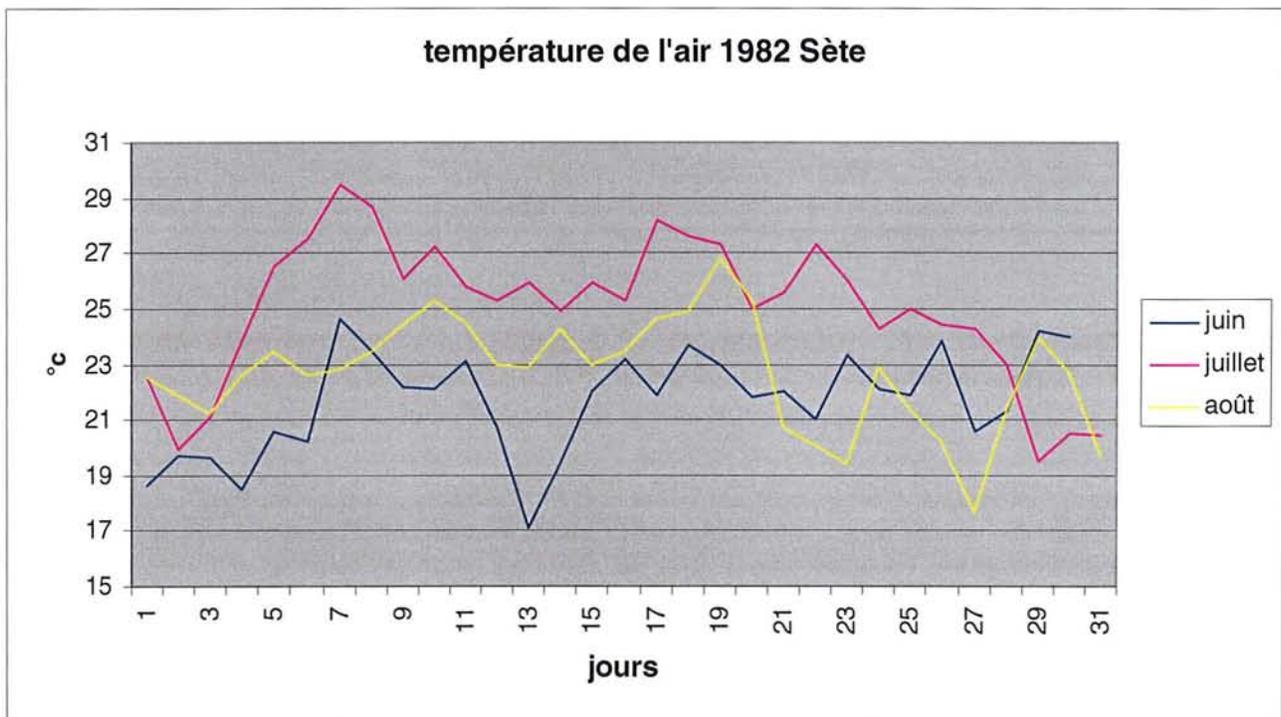


Fig. 17 : températures de l'air en juin, juillet et août 1982

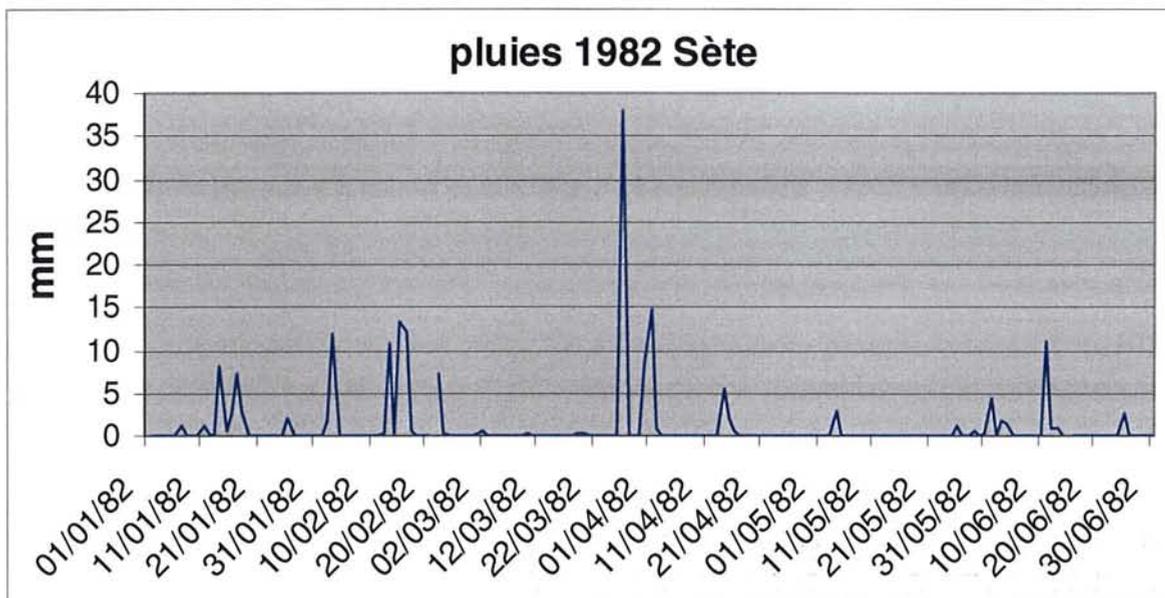


Fig. 18 : Pluies six mois avant la malaïgue

On observe un épisode assez pluvieux dans la première quinzaine du mois d'avril , fig.18, avec un maximum journalier de 37 mm.

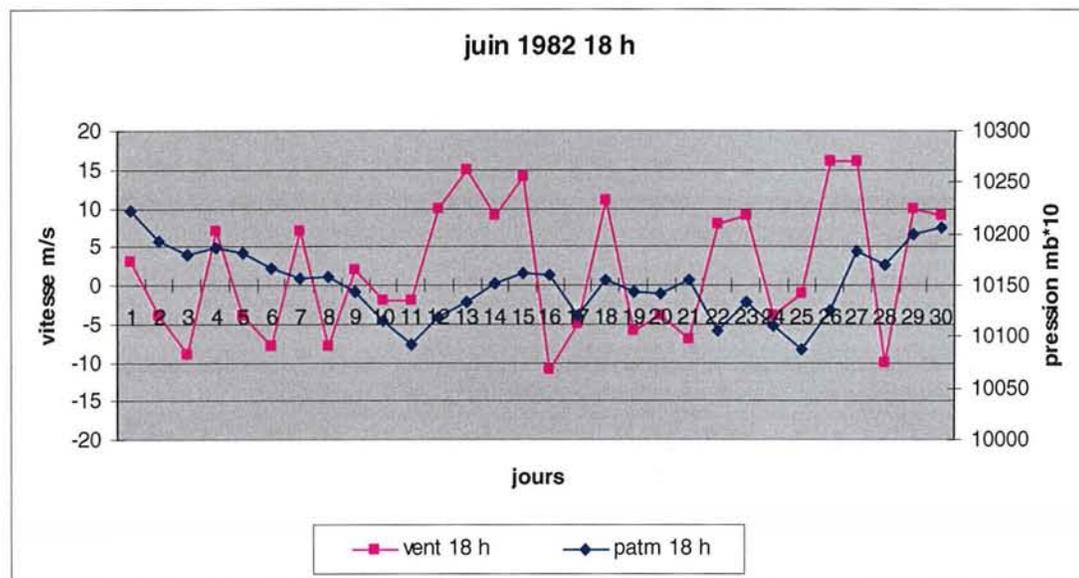
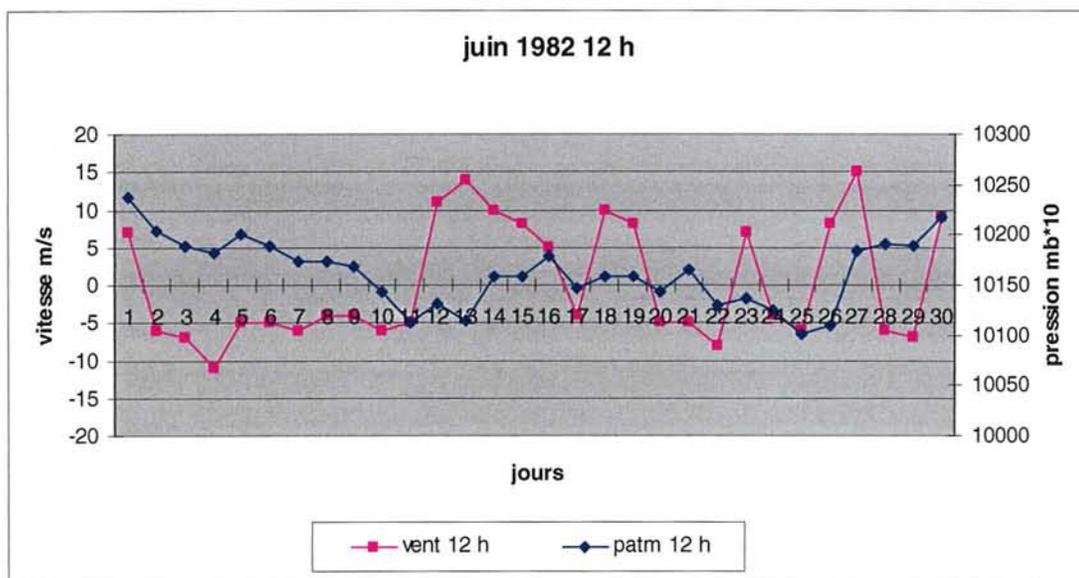
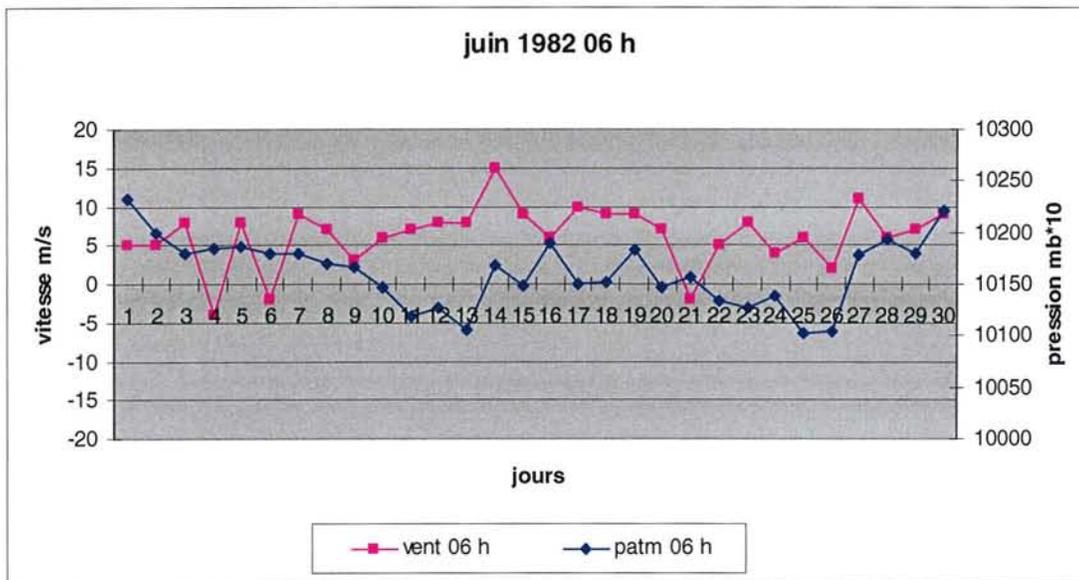


Fig. 19: relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1982

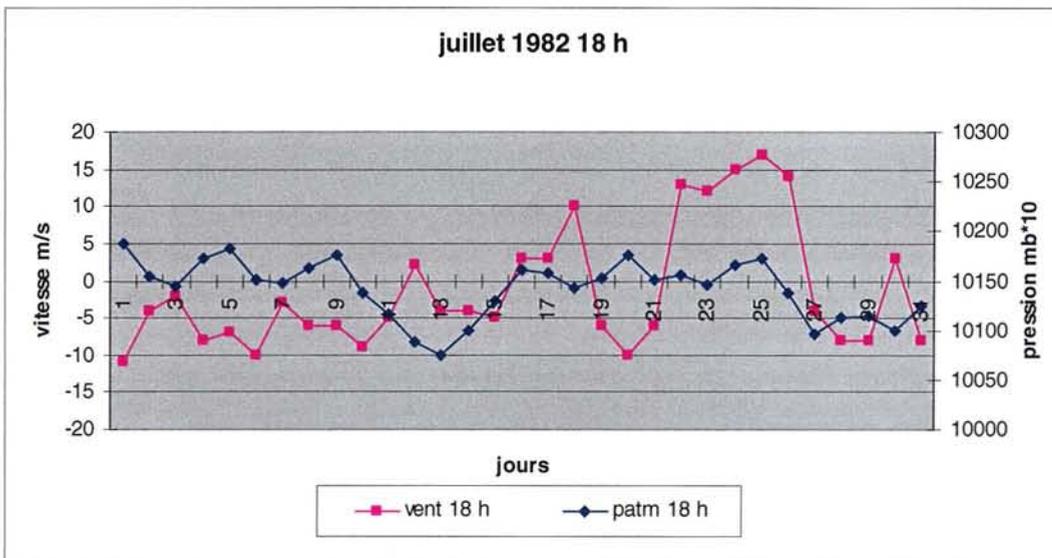
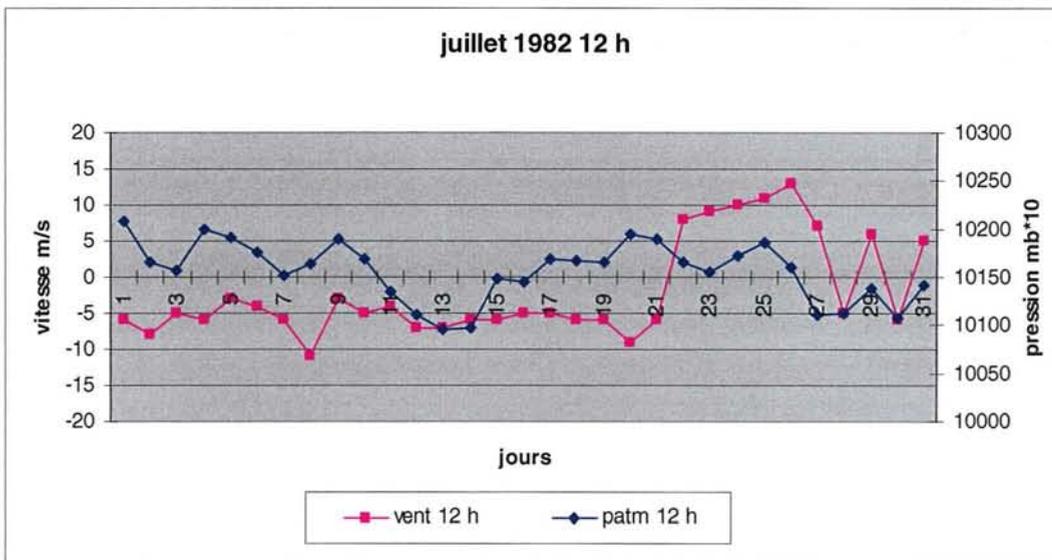
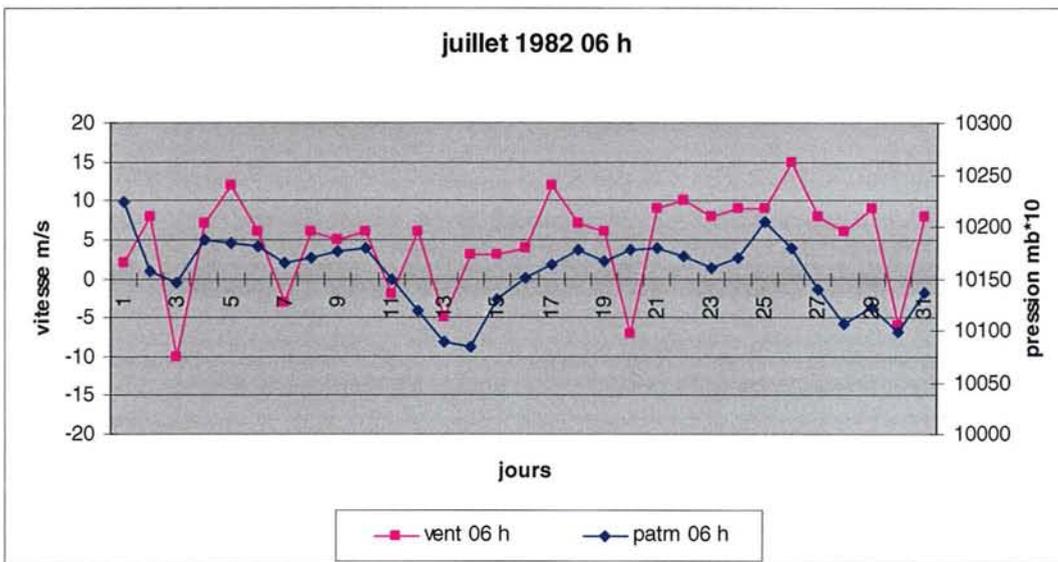


Fig. 20: relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1982

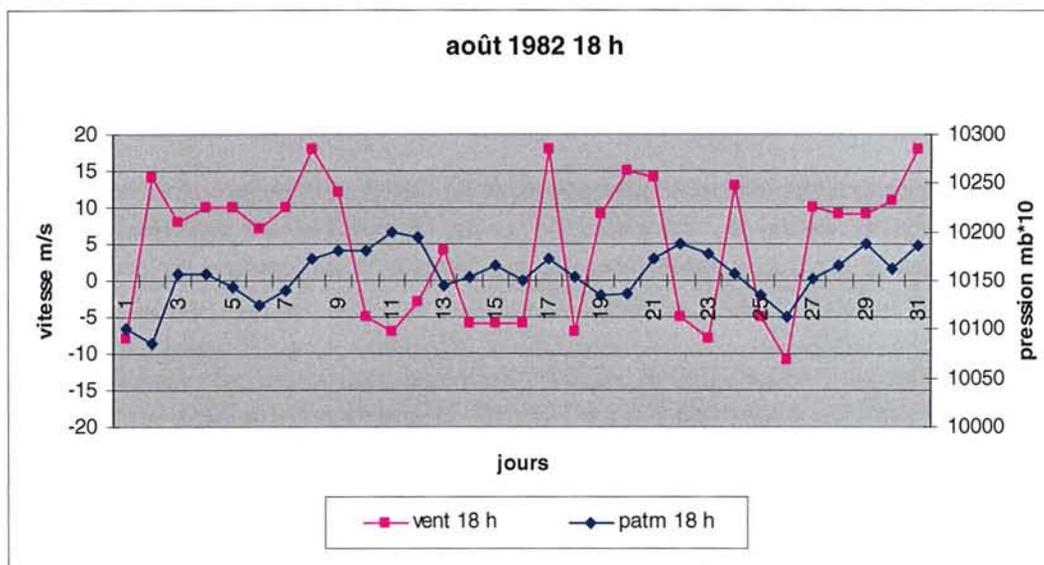
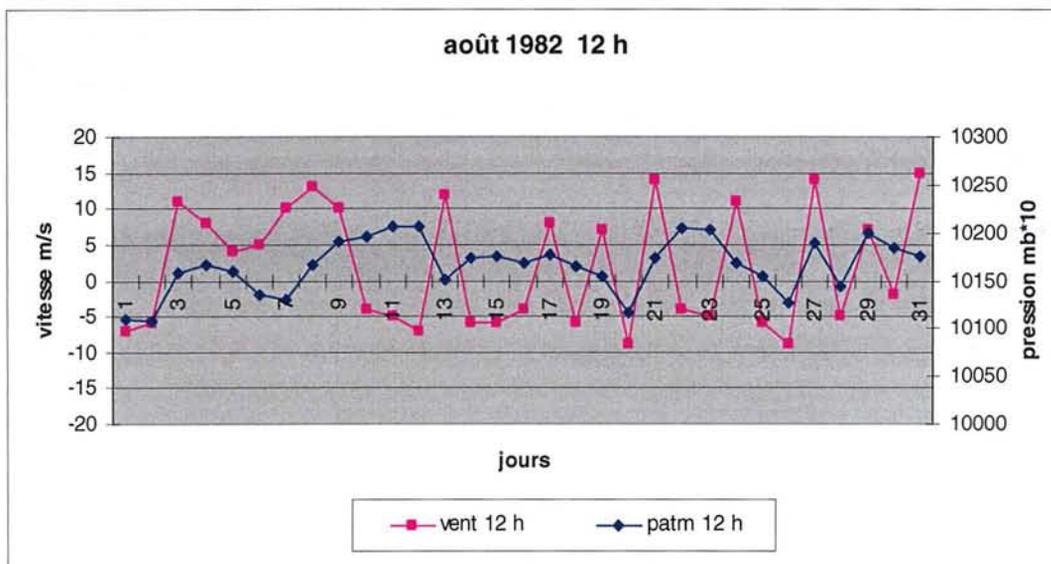
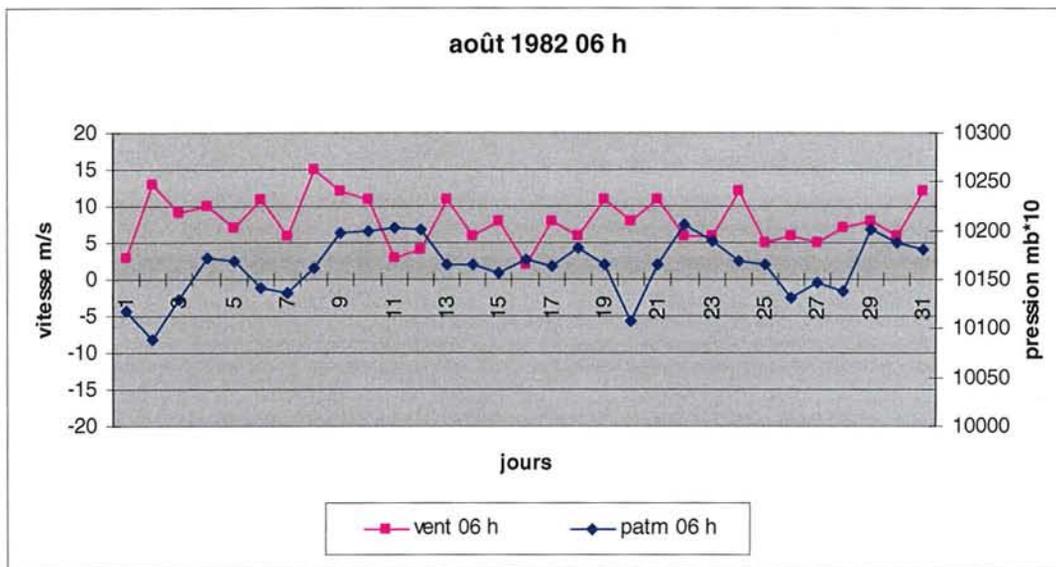


Fig. 21: relation pression (atm) vent (vitesse) août 1982

Juin

Les pluies sont faibles: 23,0 mm (Tab. 4)

Les températures sont comprises entre 20 et 25°C (Fig. 17).

Les pressions atmosphériques varient de 1010 à 1020 mb. Du 12 au 21 les fluctuations sont très faibles (entre 1015 et 1018 mb) (Fig. 19).

Pendant les 10 premiers jours du mois les vents faibles à modérés (maximum 10 m/s) alternent dans la journée : ils soufflent de secteur Nord le matin, passant au secteur Sud dans l'après- midi. Après le 10 l'alternance est moins nette. Du 12 au 16 le vent assez fort (15 m/s) souffle de secteur Nord, passant du 19 au 23 au secteur Sud faible (entre 5 et 7 m/s) (Fig. 19).

Juillet

Les pluies sont plus importantes que le mois précédent : 42,5 mm. Les précipitations maximum journalières ne dépassent pas 12 mm.

Du 5 au 27 les températures sont comprises entre 25 et 30°C. Le maximum relevé est de 29,5°C le 7 (Fig. 20).

Les pressions atmosphériques varient peu. Durant presque tout le mois elles oscillent entre 1015 et 1020 mb. Deux périodes sont cependant remarquables : du 10 au 14 juillet les pressions diminuent jusqu'à 1008 mb ; on retrouve les mêmes valeurs entre le 26 et la fin du mois (Fig. 21).

Les vents quant à eux sont faibles à modérés (de 5 à 10 m/s) et alternent durant la journée soufflant de terre le matin (5 à 10 m/s) passant au marin l'après-midi (3 et 7 m/s). Deux périodes font exception, la première du 16 au 19 juillet où les vent soufflent essentiellement du Nord avec une force comprise entre 5 et 12 m/s et du 22 au 26 juillet de secteur Nord plus violents de 10 à 15 m/s. Entre le 19 et le 22 les vents soufflent de secteur Sud bien que les pressions soient élevées (Fig. 20).

Il existe pendant presque tout le mois un antagonisme assez fort durant l'après-midi entre le vent et les pressions, sauf en fin de mois.

Août

Les pluies sont du même ordre que celles du mois de juillet : 27,4mm.

Le vent assez fort de la fin du mois de juillet a fait baisser les températures qui s'échelonnent entre 20 et 25°C pendant presque tout le mois, à l'exception de la période du 19 au 21 où elles sont supérieures à 25°C (Fig. 17).

Les pressions fluctuent entre 1010 et 1020 mb, excepté pour la période du 12 au 20 où les variations sont très faibles, variant de 1012 à 1017 mb en moyenne (Fig. 21).

Les vents en début de mois (du 2 au 10) sont de direction Nord entre 5 et 15 m/s et passent rarement au Sud dans l'après-midi. Après cette date, ils fluctuent dans la journée de secteur Nord le matin et Sud l'après- midi. Ils sont assez forts (10-15 m/s) (Fig. 21)

Durant les mois de juin, juillet et août les vents ont très souvent soufflé à plus de 10 ms ; cette période n'est donc pas caractérisée par un manque de vent. Par contre, il y a très souvent un antagonisme entre les vents et les pressions atmosphériques ; l'action des vents de secteur Nord est contrariée par une chute de pression, qui entrave les mouvements d'eau entre la mer

et l'étang. Ce manque d'échange entre la mer et l'étang peut expliquer l'apparition et le développement de la malaïgue. Ces phénomènes antagonistes apparaissent bien sur les photos aériennes.

Evolution des phosphates

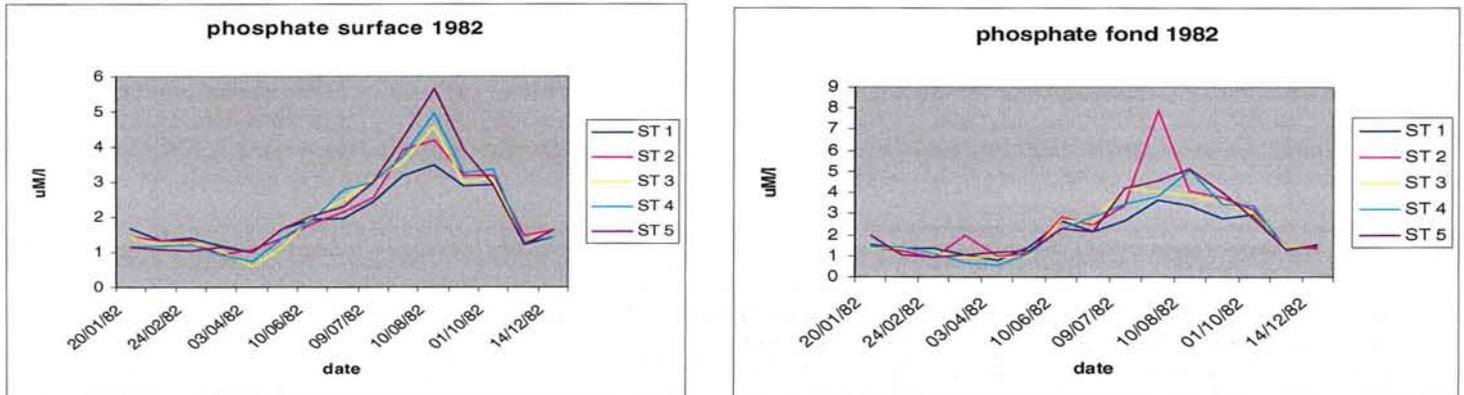


Fig.22 : phosphates de surface et de fond avant et pendant la malaïgue

Dès le mois de Juin on assiste à une augmentation des phosphates dans la colonne d'eau. C'est fin août et début septembre que les concentrations sont les plus importantes. Il faut attendre le mois de décembre pour retrouver des concentrations normales.

6: Malaïgue 1983

Tableau 5 : températures et pluies 1983

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	-5,0	18,7	0,0
2	-6,0	17,1	142,1
3	1,0	22,2	26,7
4	3,2	21,0	36,0
5	6,9	24,0	13,1
6	12,0	30,1	23,8
7	15,0	36,5	1,0
8	12,8	34,0	59,0
9	9,0	36,3	5,1
10	2,8	29,8	18,1
11	-0,2	20,0	34,6
12	-3,9	21,0	10,5
TOTAL			370 mm

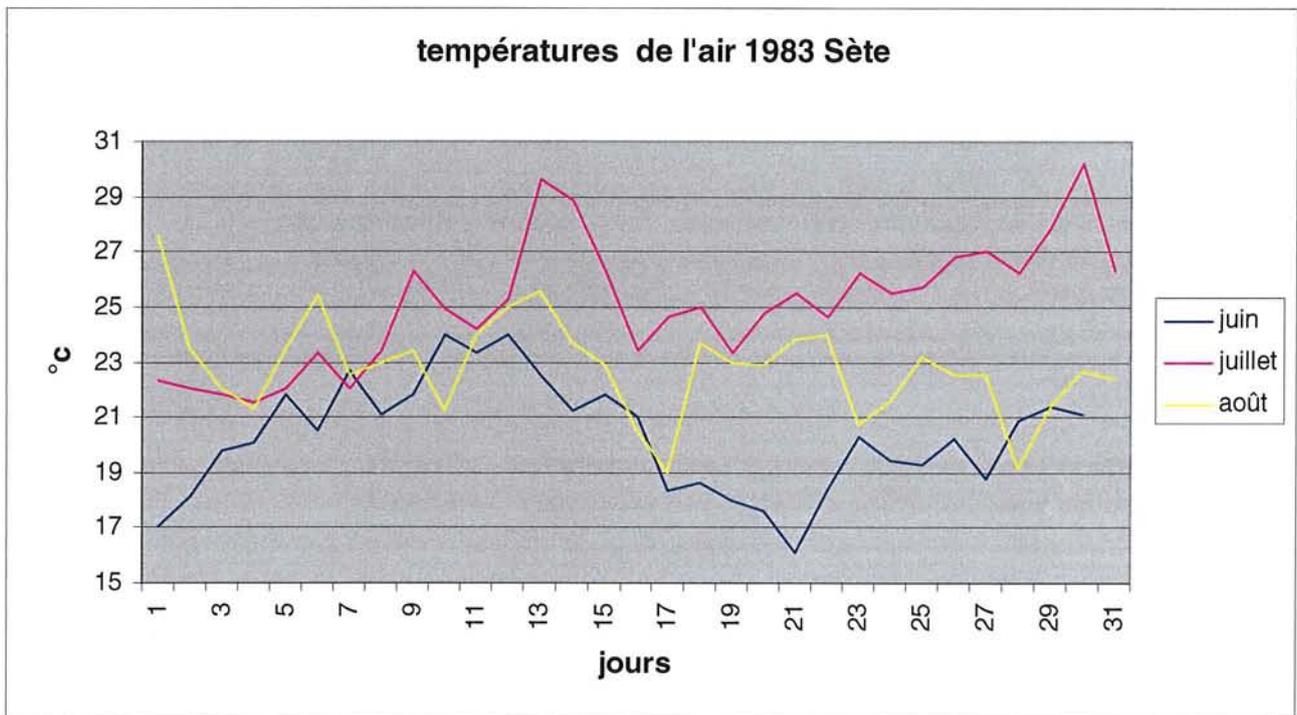


Fig. 23 : températures de l'air en juin, juillet et août 1983

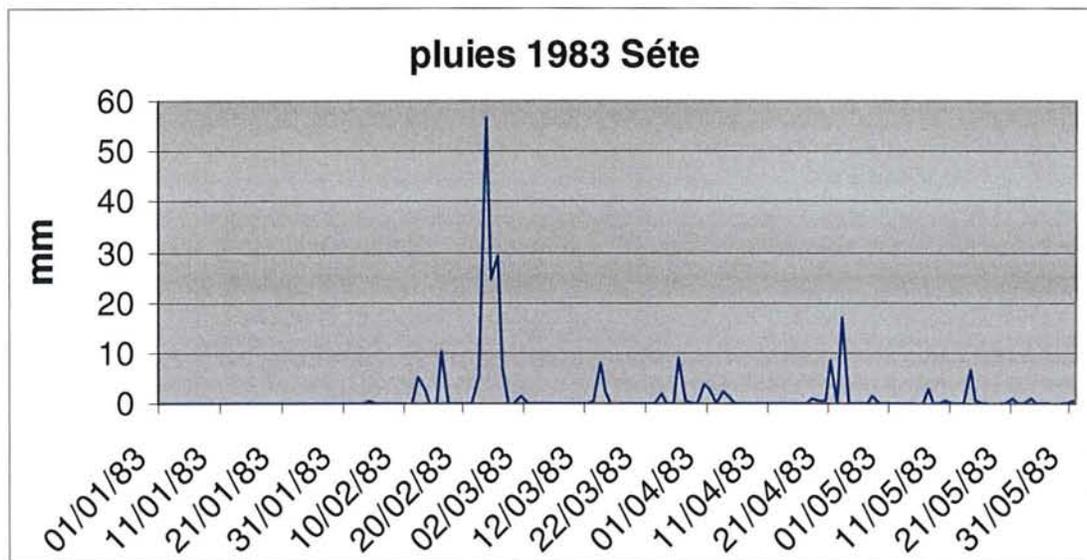


Fig. 24 : Pluies six mois avant la malaïgue

Les précipitation sont assez abondantes au mois de mars (55mm en une journée) et faibles pour les autres périodes.

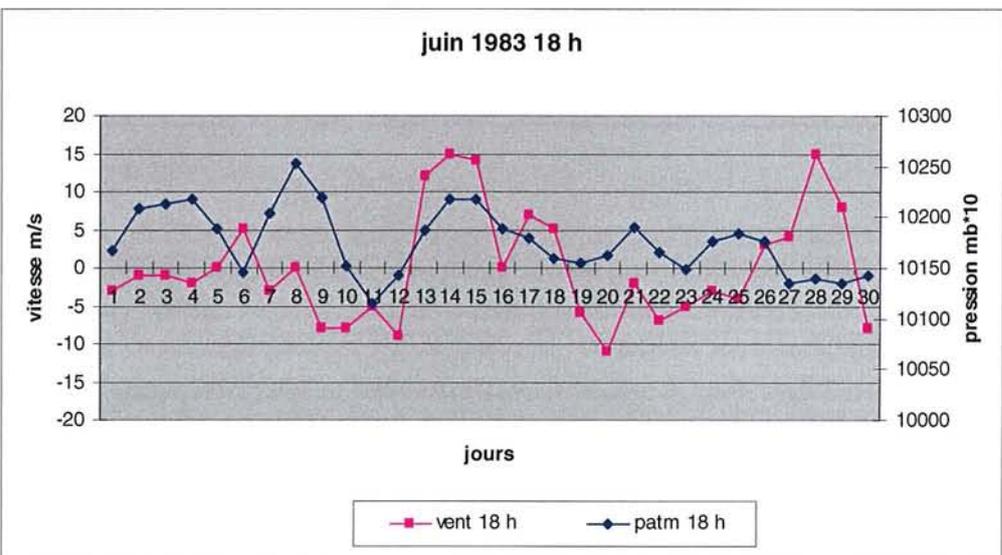
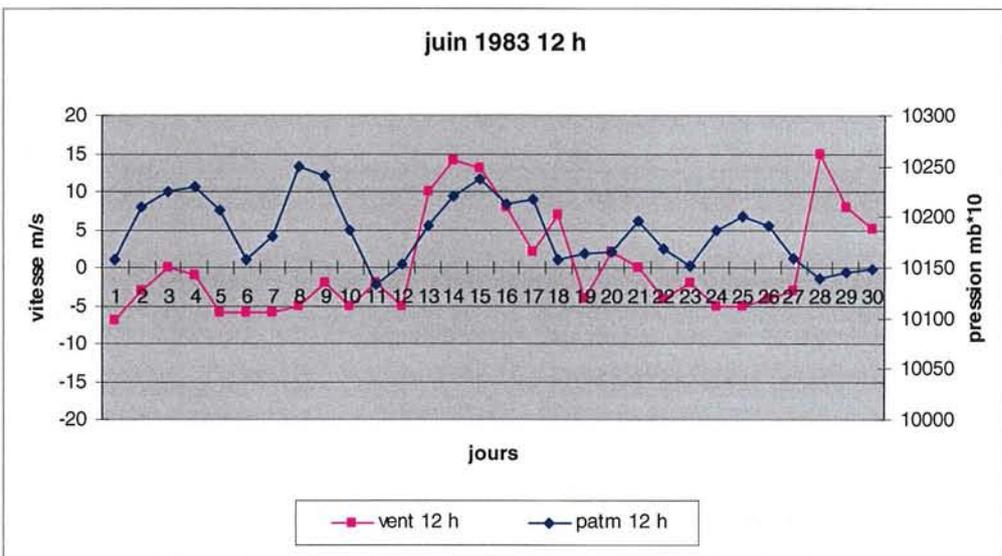
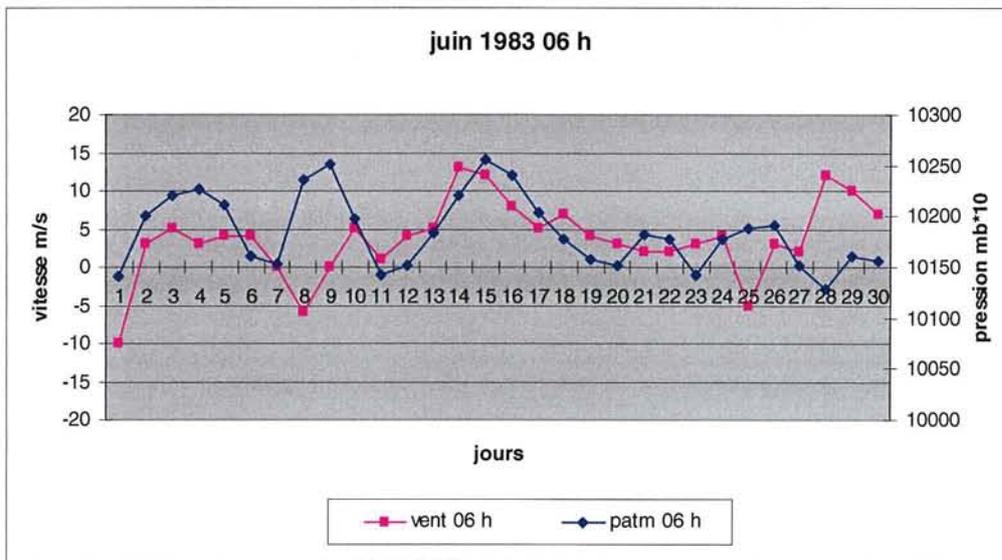


Fig. 25 : relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1983

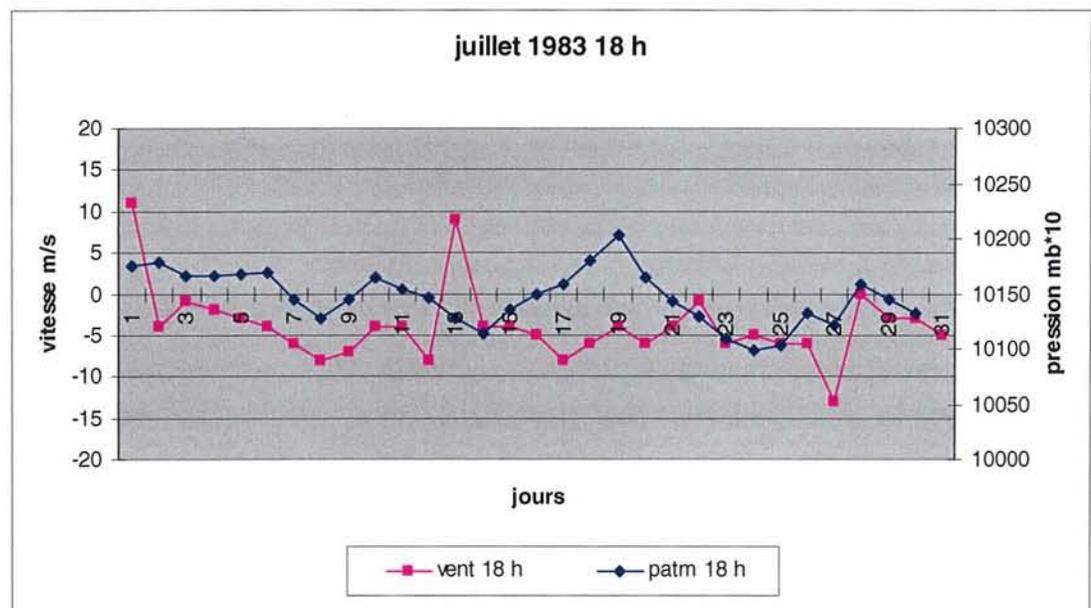
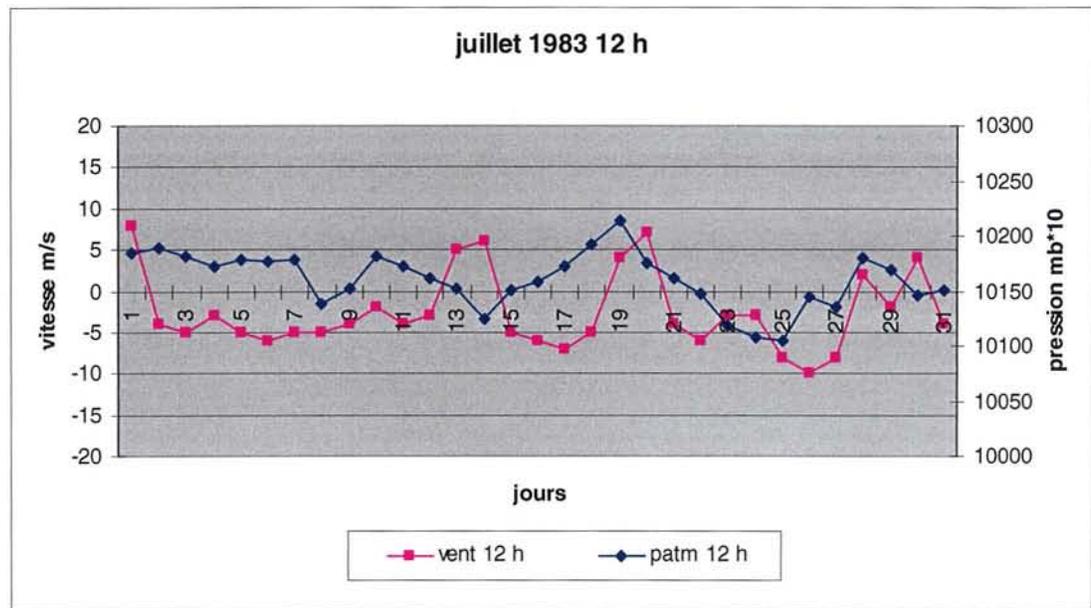
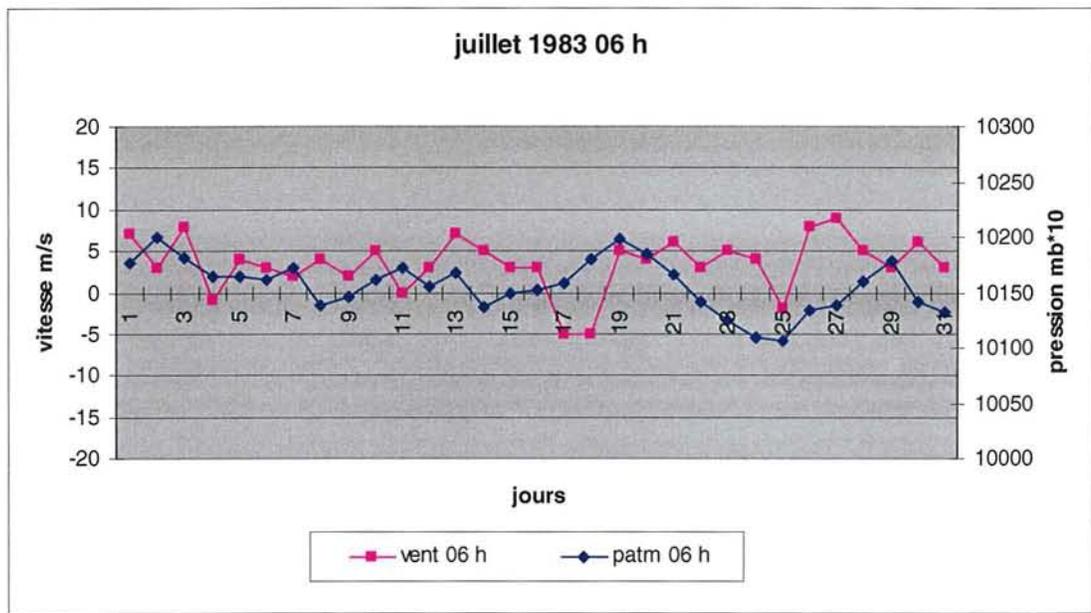


Fig. 26 : relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1983

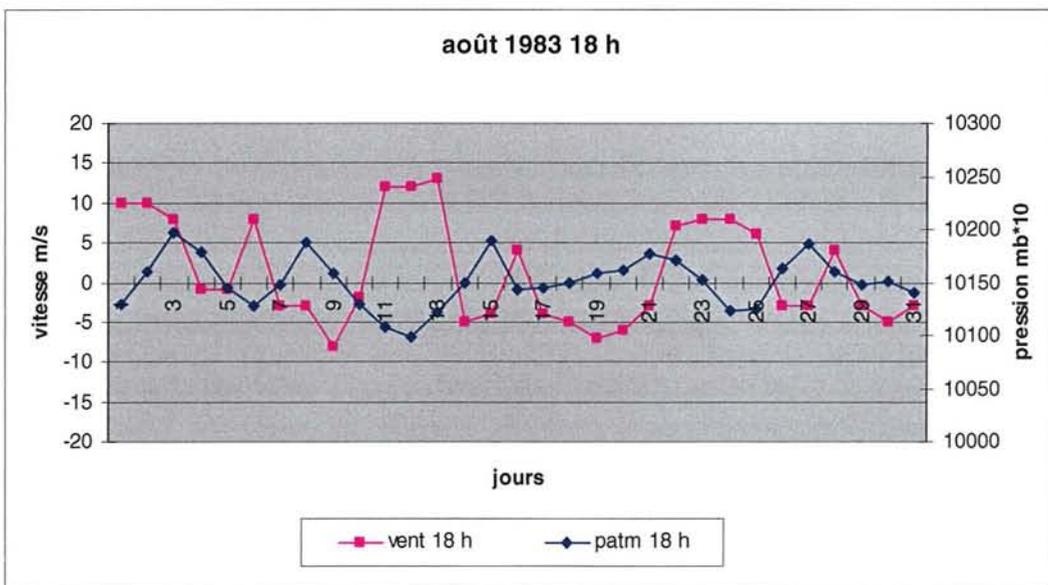
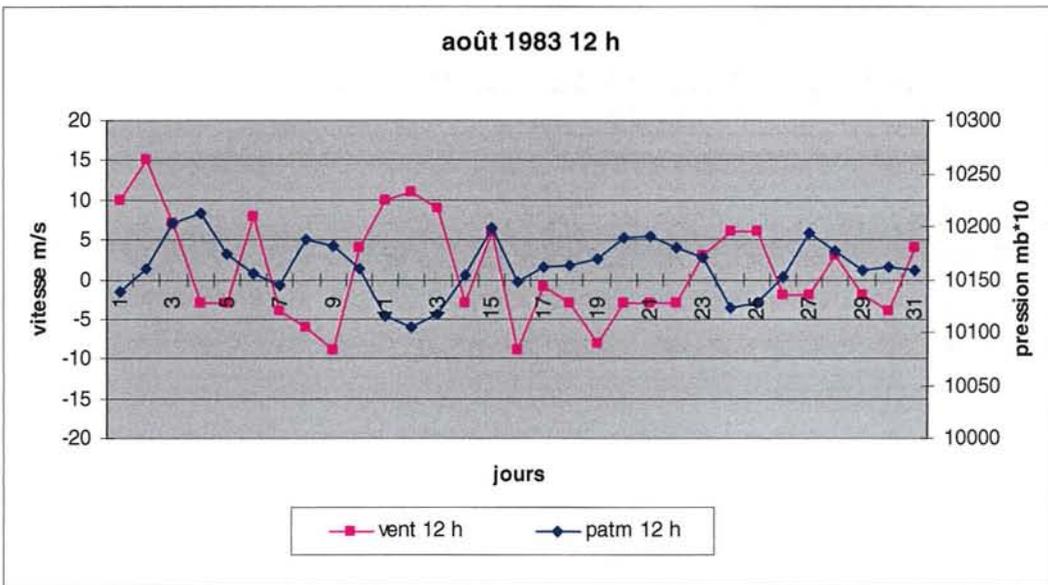
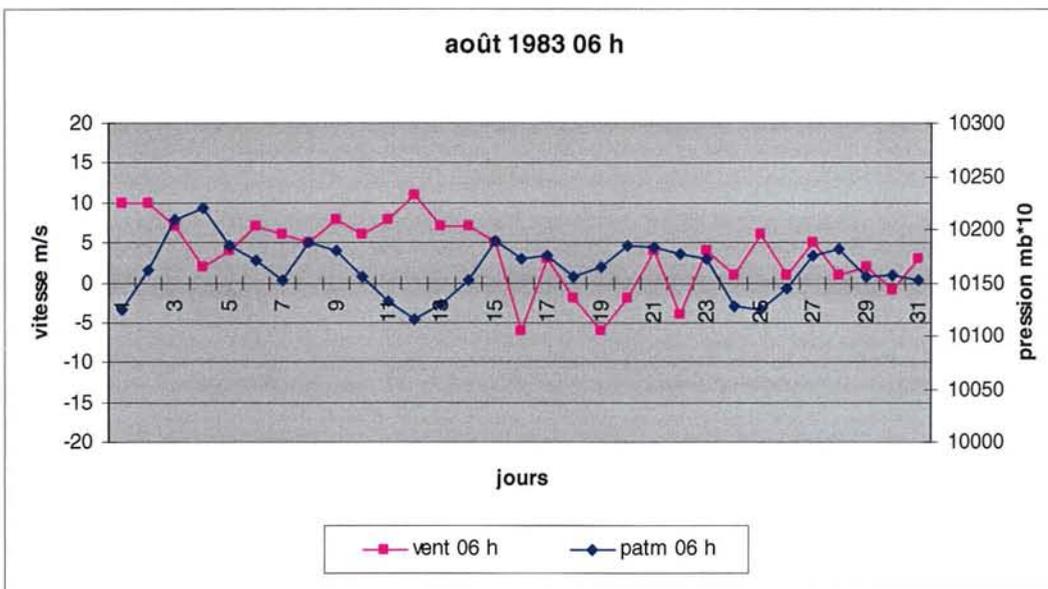


Fig. 27 : relation pression (atm) vent (vitesse) août 1983

Juin

Les pluies sont assez faibles : 213,8 mm (tab. 5).

Les températures sont comprises entre 20 et 24°C sauf entre le 17 et le 23 où elles sont inférieures à 20°C (Fig.23).

Les pressions atmosphériques oscillent entre 1013 et 1025 mb avec alternance cyclique de hautes et basses pressions. Jusqu'au 18 du mois les basses pressions apparaissent tous les 6 jours. Durant la dernière quinzaine les pressions se stabilisent entre 1016 et 1020 mb (Fig. 25).

Les vents sont faibles du 1 au 12 du mois avec des vitesses rarement supérieures à 5 m/s. Les vents du Nord et ceux du Sud alternent pendant la journée. Du 13 au 15 un vent du Nord assez violent (15 m/s) s'établit. Entre le 15 et le 27 le temps redevient calme avec alternance de vents de secteur Nord et Sud durant la journée avec des vitesses de 5 m/s au maximum sauf entre le 28 et le 29 où les vitesses atteignent 15 m/s (Fig. 25) .

Juillet

Pluies extrêmement faibles : 1 mm (Tab. 6).

Les températures sont comprises entre 21 et 23°C, sauf entre le 13 et le 15 où elles atteignent 25°C (Fig. 23).

Les pressions oscillent entre 1011 et 1021 mb. Les variations sont peu importantes entre le 1 et le 14. La tendance générale est à la baisse. Les extremums ont lieu entre le 19 et le 24 du mois (1010 et 1021 mb) (Fig. 26).

Pendant tout le mois les vents sont faibles (5 m/s) sauf le 13 où le vent du Nord atteint pendant la nuit 13 m/s. Pendant tout le reste du mois les vents de secteur Nord et Sud alternent dans la journée sauf pour le 13 juillet (vent de secteur Nord et baisse de pression) et pour le 17 et 18 où les vents sont de secteur Sud avec une force de 7 m/s et la pression est en hausse (Fig. 26).

Août

Les pluies sont de 59 mm. Le maximum journalier relevé est de 23 mm.

Les températures varient entre 20 et 25°C pendant tout le mois (Fig. 23).

Les pressions sont moins stables que durant le mois précédent, variant de 1010 à 1022 mb. Les minima sont atteints les 12 et 26 (Fig. 27).

Les vents du nord sont un peu plus forts qu'au mois de juillet avec des pointes entre 10 et 15 m/s du 2 au 3 et du 11 au 13. A cette époque les pressions sont les plus basses (Fig. 27).

Cette malaïgue a intéressé toute la tranche d'eau. Ce sont certainement les coups de vent importants du début d'Août qui ont fait remonter les eaux anoxiques du fond. L'antagonisme entre les pressions et les vents entrave les échanges mer- étang

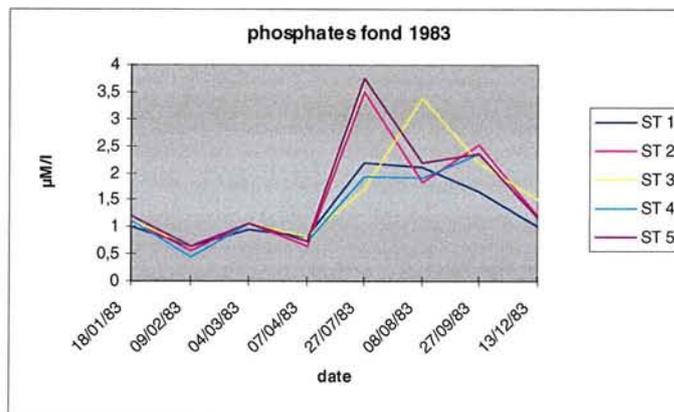
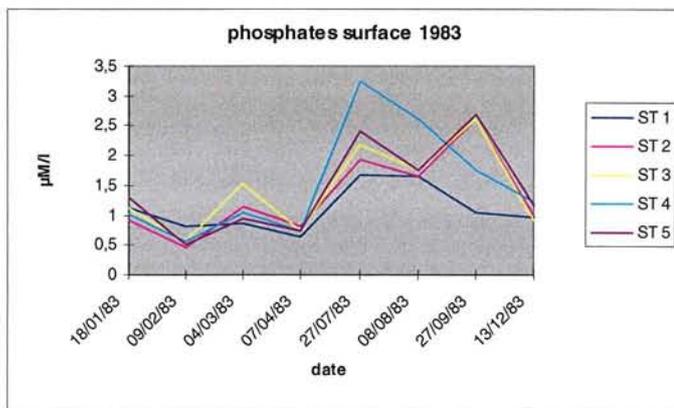


Fig.28 : phosphates de surface et de fond avant et pendant la malaïgue

Les phosphates augmentent dès le mois de mars. Une baisse dans les concentrations en oxygène est d'ailleurs constatée des cette époque (Tome 1 Fig. 12). Ces concentrations ne font ensuite que croître au cours de la malaïgue pour atteindre un maximum fin juillet début d'août.

A la fin de l'année les concentrations sont encore élevées.

7 : Malaïgue 1987

Tableau 6 : températures et pluies 1987

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	-11,2	19,5	41,1
2	-2,0	21,8	146,8
3	-1,5	21,7	76,7
4	4,0	27,0	10,8
5	5,4	27,6	35,9
6	10,1	31,1	21,8
7	14,2	34,0	18,3
8	13,4	36,8	26,5
9	8,2	31,2	1,9
10	7,5	24,0	258,4
11	-1,0	22,0	131,6
12	-2,6	21,6	107,7
TOTAL			877,5 mm

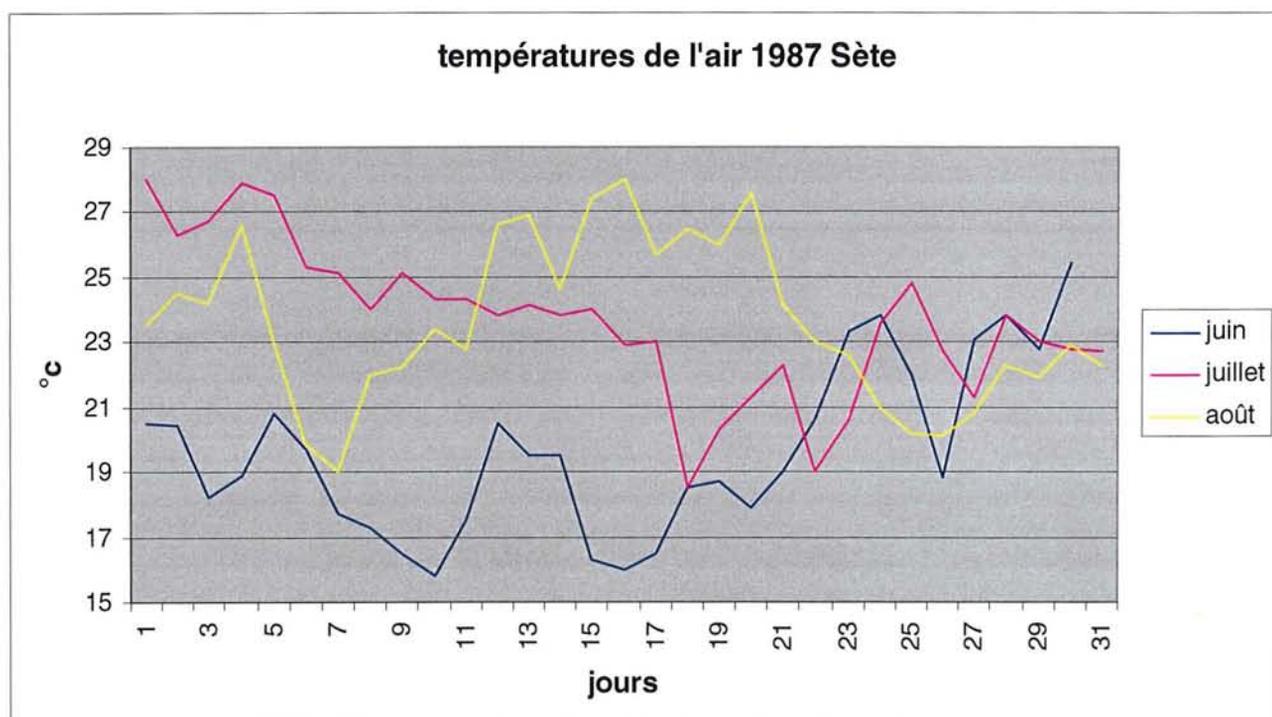


Fig. 29 : températures de l'air en juin, juillet et août 1987

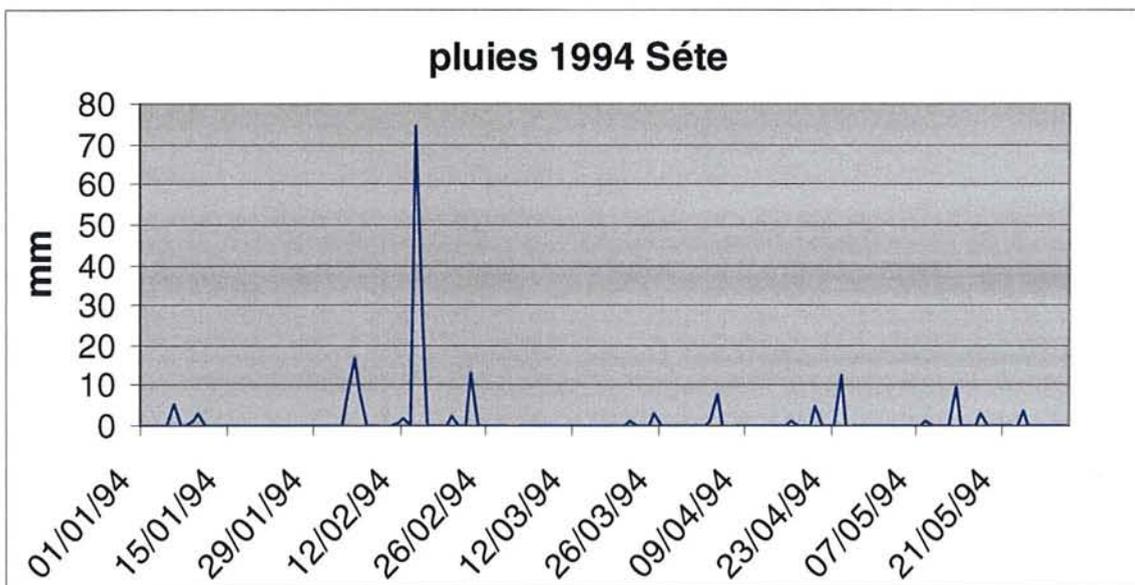


Fig. 30 :Pluies six mois avant la malaïgue

Les pluies sont assez fréquentes pendant les trois premiers mois de l'année, avec 60 mm journalier le 12 février. Elles ne sont cependant pas exceptionnelles.

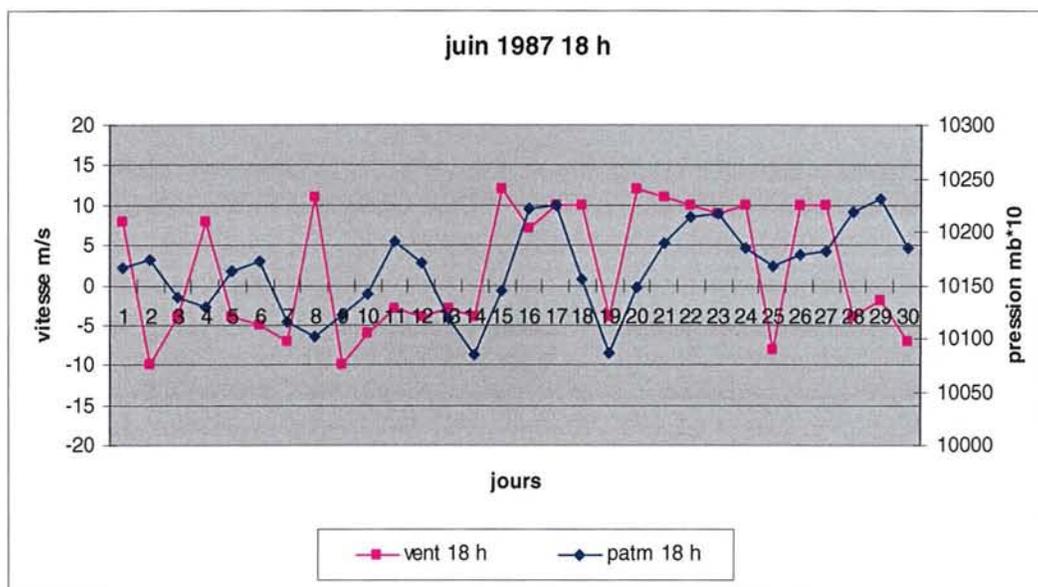
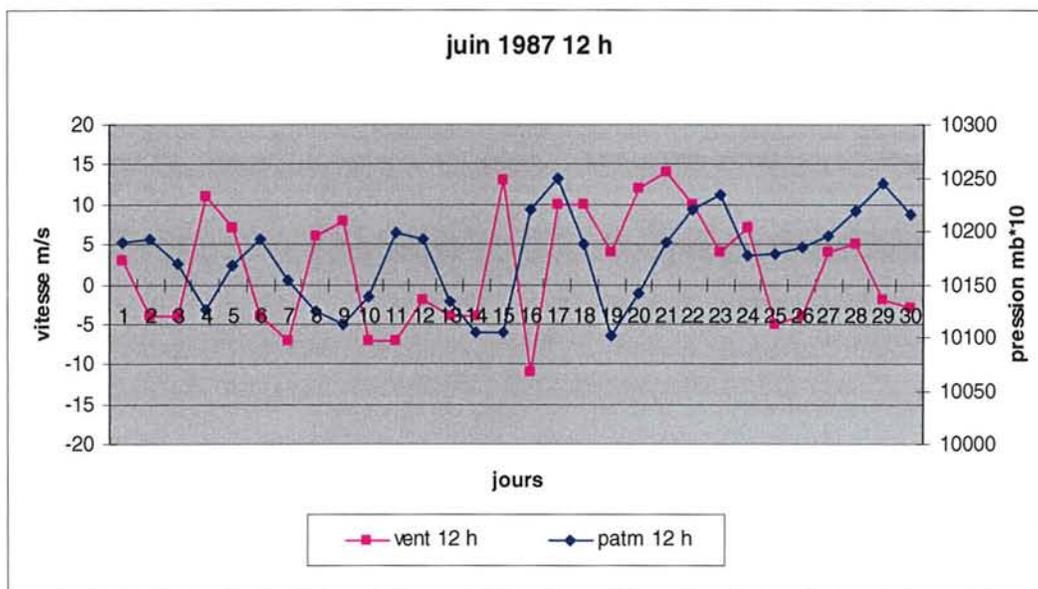
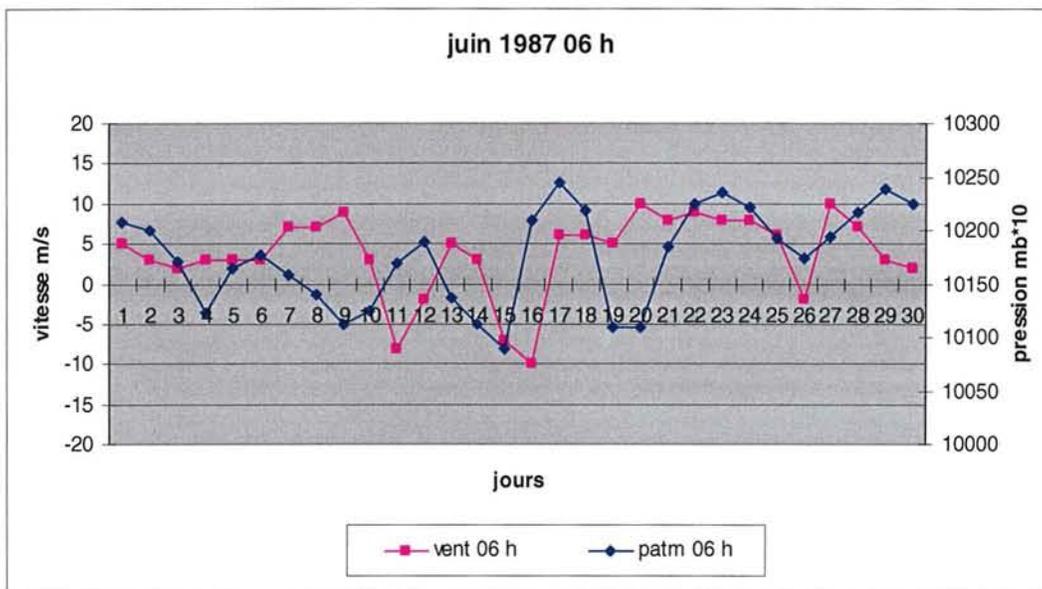


Fig. 31 : relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1987

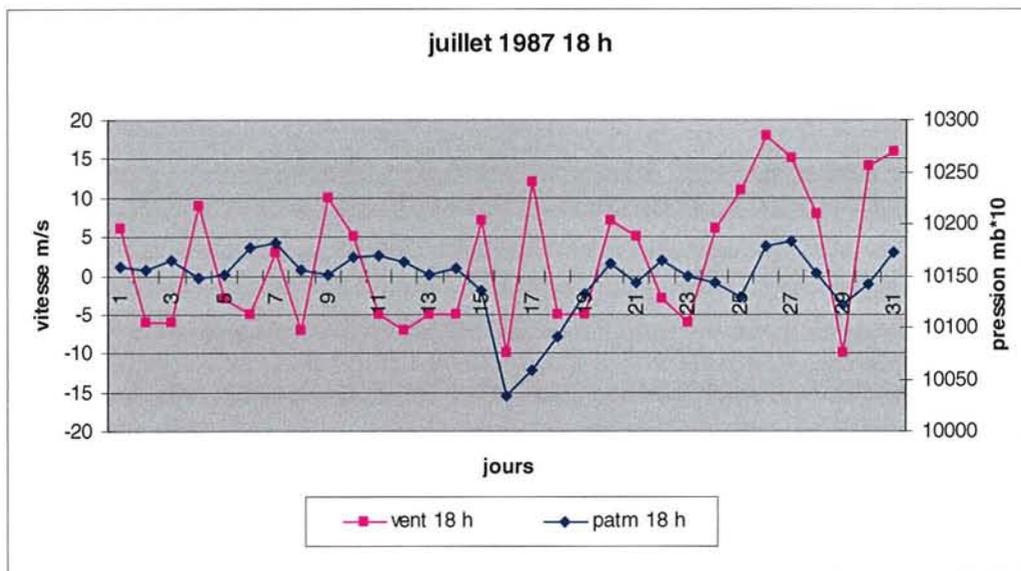
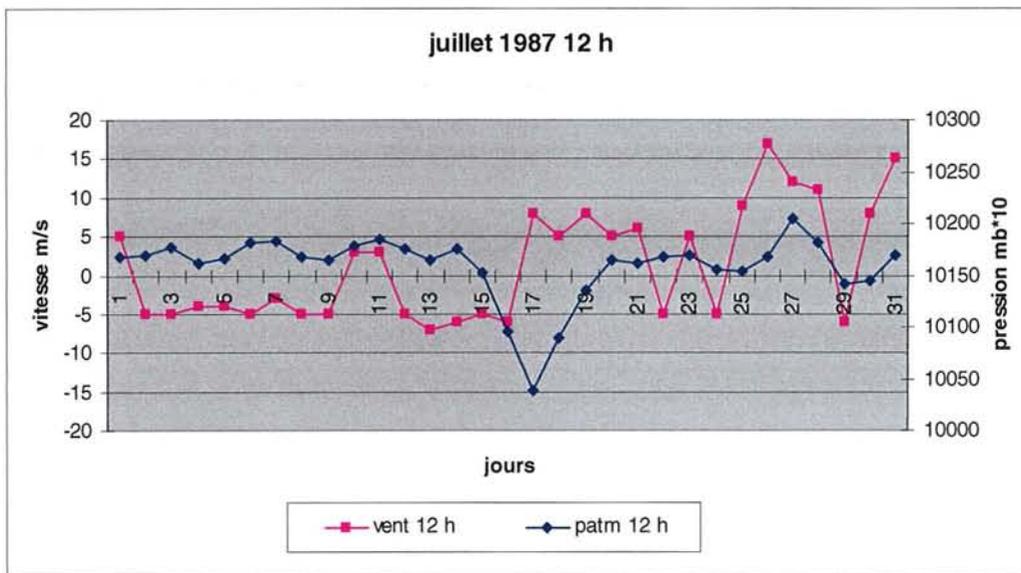
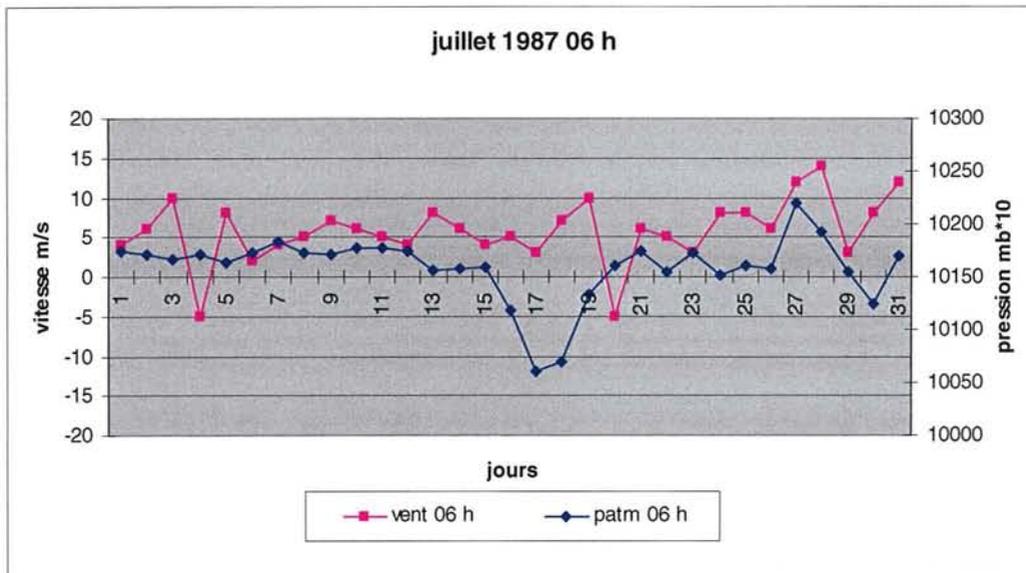


Fig. 32 : relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1987

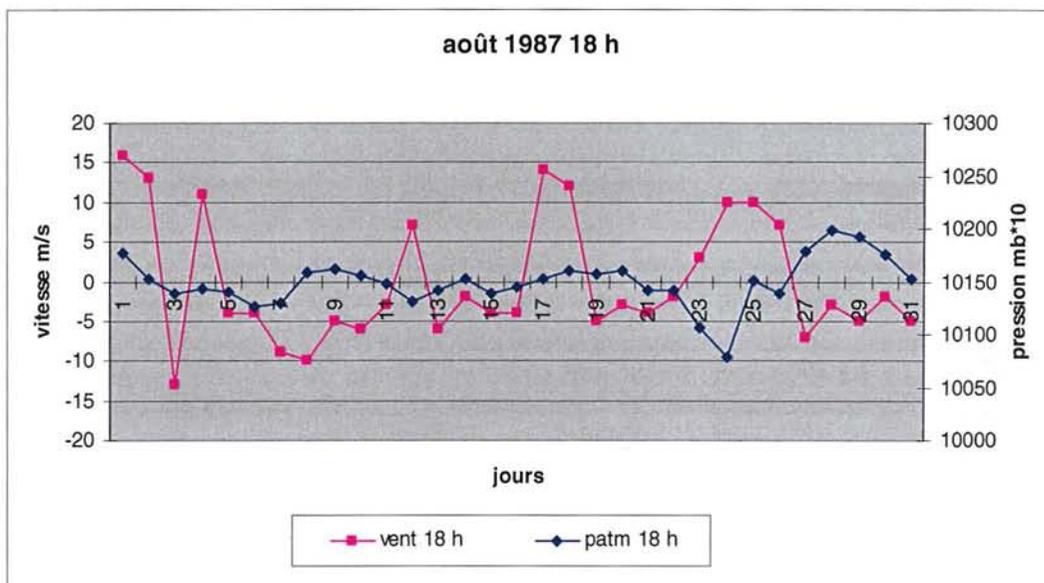
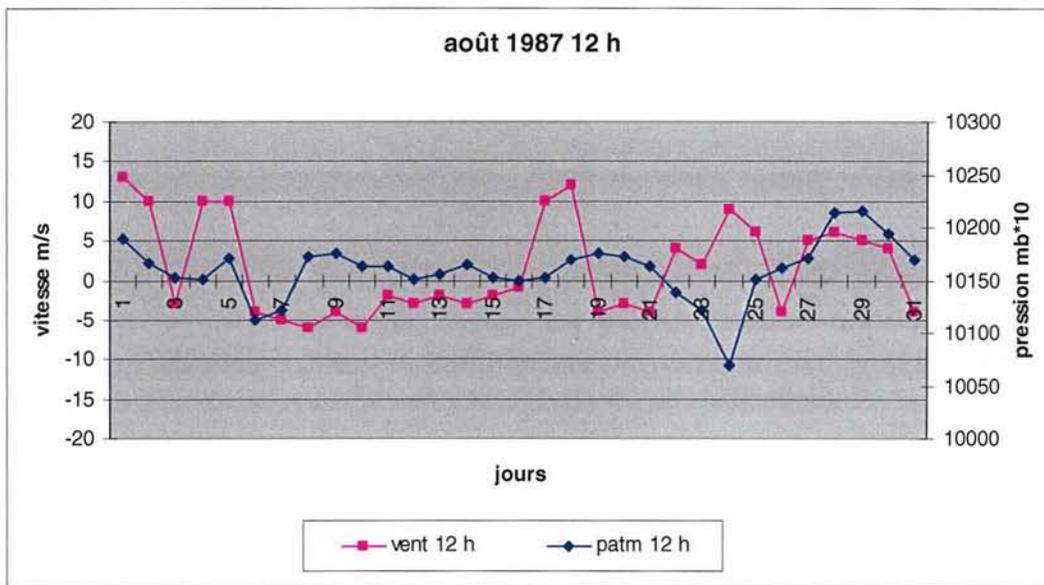
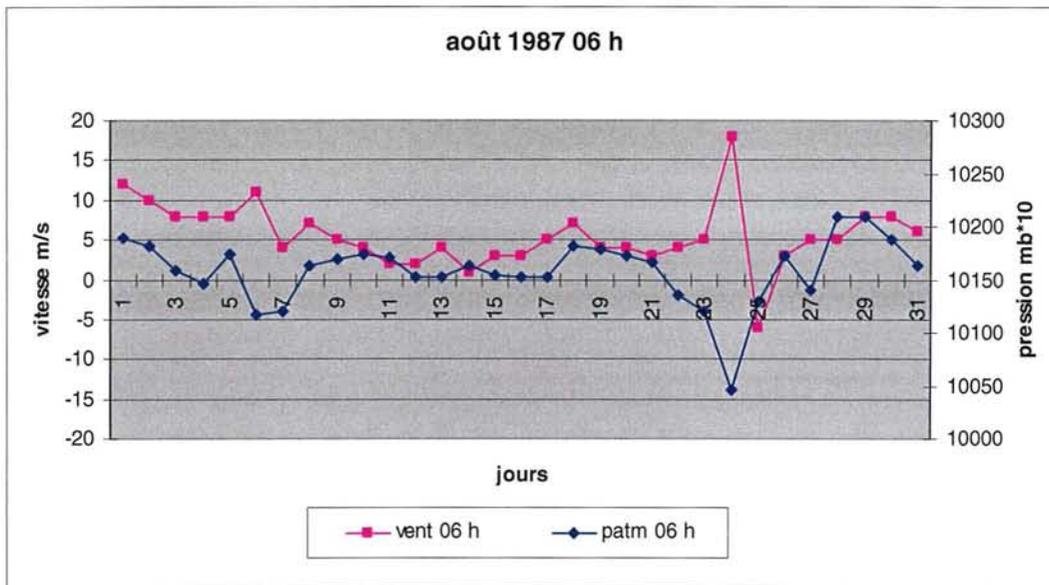


Fig. 33 : relation pression (atm) vent (vitesse) août 1987

Juin

Les pluies ne sont pas très abondantes : 21,8 mm (Tab. 6).

Jusqu'au 21 les températures sont inférieures à 20°C. Elles augmentent progressivement jusqu'à 25°C en fin de mois (Fig. 29).

Les pressions atmosphériques fluctuent entre 1010 et 1025 mb. C'est entre le 12 et le 21 que l'on observe les plus grandes amplitudes. Après cette date, les pressions sont relativement stables. Cette phase va se poursuivre plusieurs semaines (Fig. 31).

Les vents de Nord sont dominants avec des pointes pouvant atteindre les 20 m/s. Il y a peu de renverse des vents durant la journée. A partir du 27, ils faiblissent nettement. Les vitesses sont au maximum de 7 m/s (Fig. 31).

Juillet

Précipitation faibles : 18,3 mm (Tab. 6).

Pendant tout le mois les températures sont comprises entre 20 et 25°C, sauf pendant la première semaine où elles sont comprises entre 25 et 30°C (Fig. 29).

Les pressions atmosphériques sont extrêmement stables pendant tout le mois (entre 1015 et 1018 mb), sauf pendant une courte période du 14 au 18 pendant laquelle les pressions sont très basses (1005 mb) (Fig.32).

Les vents sont faibles à modérés avec des pointes maximum de 10 m/s. On observe une alternance durant la journée, les vents du Nord soufflant le matin, et ceux du Sud dans l'après-midi. Une période s'individualise du 25 au 28 avec des vents relativement forts (>15 m/s) (Fig. 32).

Août

Pluies modérées : 26,5 mm (Tab.6).

Du 11 au 20 les températures sont supérieures à 25°C. Le reste du mois elles oscillent entre 20 et 25°C (Fig. 27).

Les pressions atmosphériques sont stables une grande partie du mois (comprises entre 1010 et 1017 mb), on ne remarque pas de variations brusques. A partir du 21, les fluctuations sont beaucoup plus importantes et brusques (1003 et 1023 mb) (Fig.33).

Pendant toute cette période les vents de secteur Nord et Sud alternent pendant la journée. Les épisodes de vent fort sont rares. Au début du mois les vents dépassent 15 m/s ils dépassent très souvent les 5m/s et peuvent dépasser 15 m/s (Fig.33).

Cette malaïgue a été de courte durée et très peu suivie. On ne retrouve pas sur les données physico-chimiques (Tome 1 Fig. 19) de relevé d'oxygène extrêmement bas.

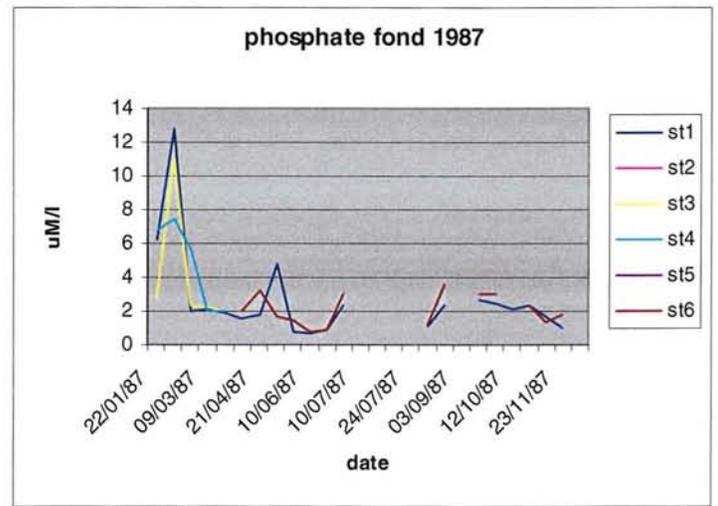
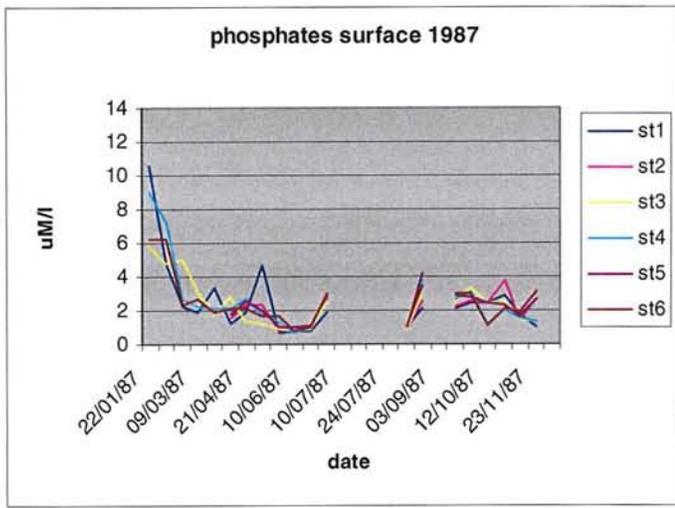


Fig. 34 : phosphates de surface et de fond avant et pendant la malaïgue

Aucun dosage de phosphate n'a été effectué durant la malaïgue. Les fortes teneurs observées en début d'année sont peut être dues aux pluies importantes des mois de février et mars.

8: Malaïgue 1990

Tableau 7: Températures et pluies 1990

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	5,9	12,0	4,8
2	7,5	15,2	33,4
3	6,6	19,1	12,5
4	7,3	17,7	80,6
5	16,8	21,1	108,6
6	17,3	26,7	6,2
7	20,3	28,8	12,5
8	18,9	28,8	32,1
9	15,4	23,3	49,8
10	12,6	21,3	133,7
11	6,8	16,4	51,1
12	2,4	11,6	34,2
TOTAL			559,5 mm

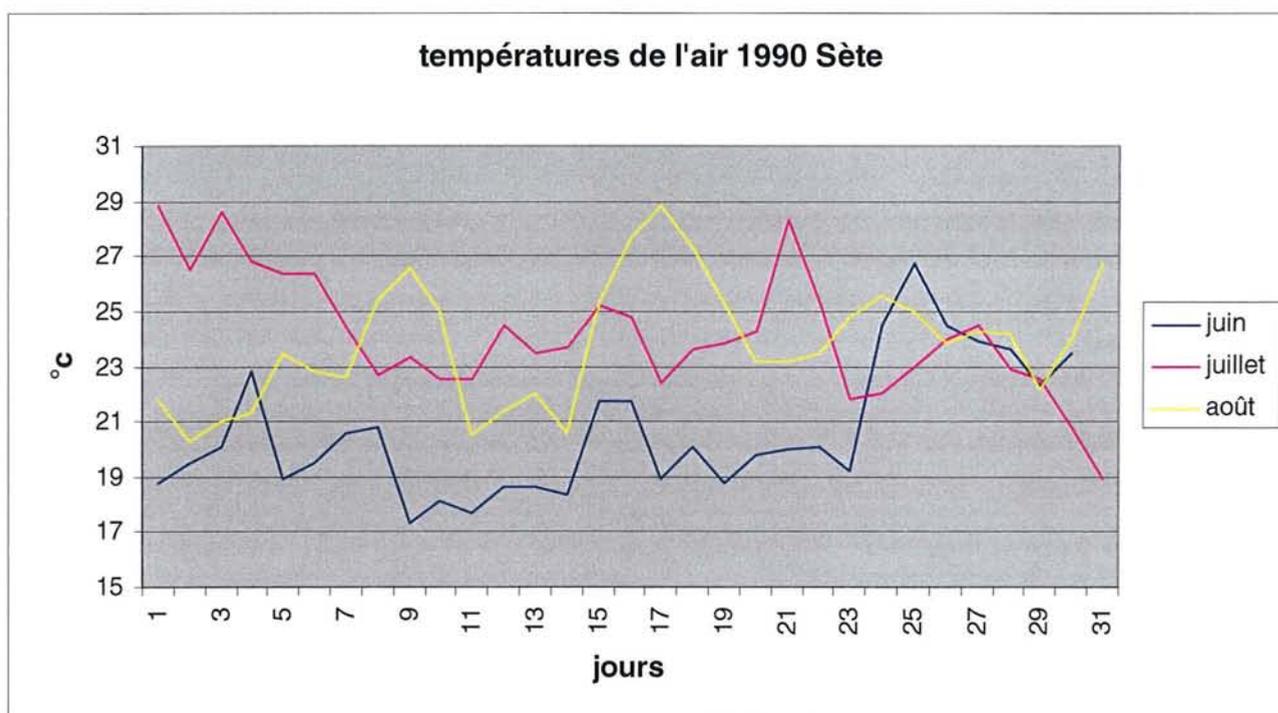


Fig. 35 : températures de l'air en juin, juillet et août 1990

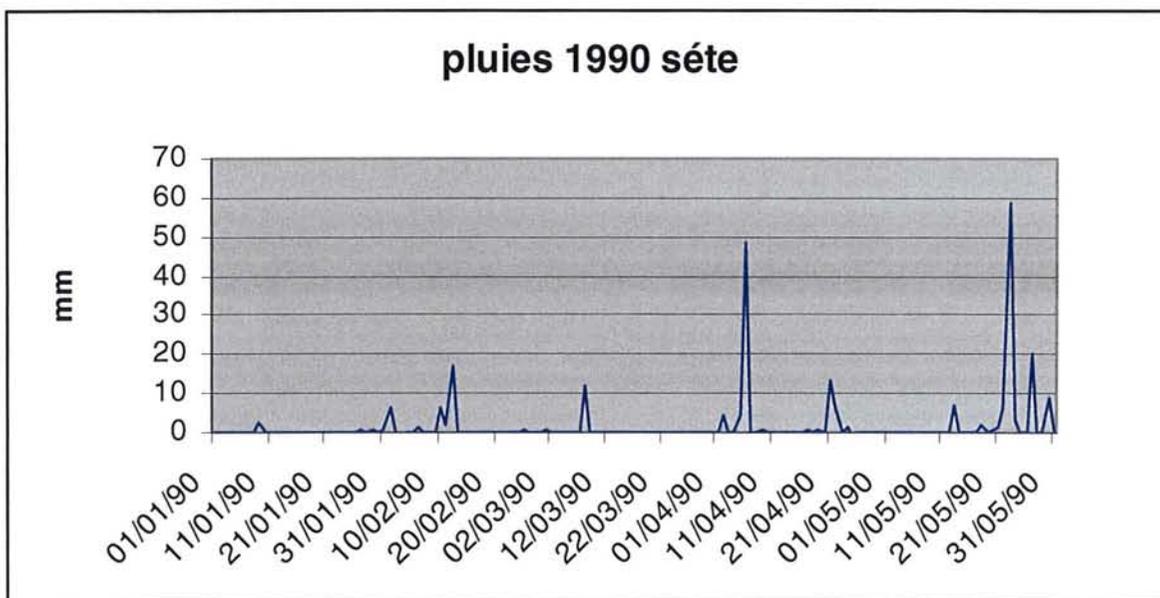


Fig. 24 : Pluies six mois avant la malaïgue

Des précipitations assez importantes ont eu lieu au mois d'avril (avec un maximum de 60 mm le 22 mai 1990).

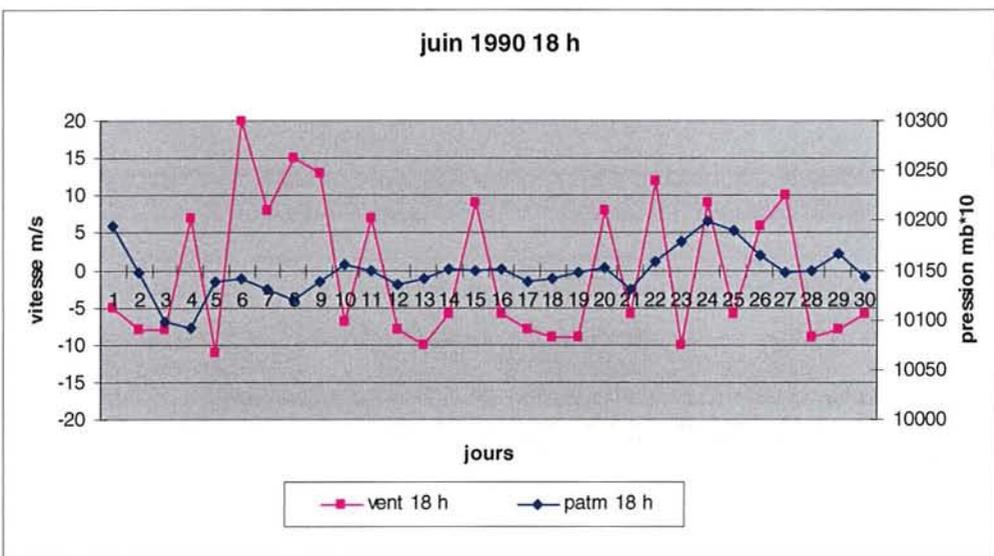
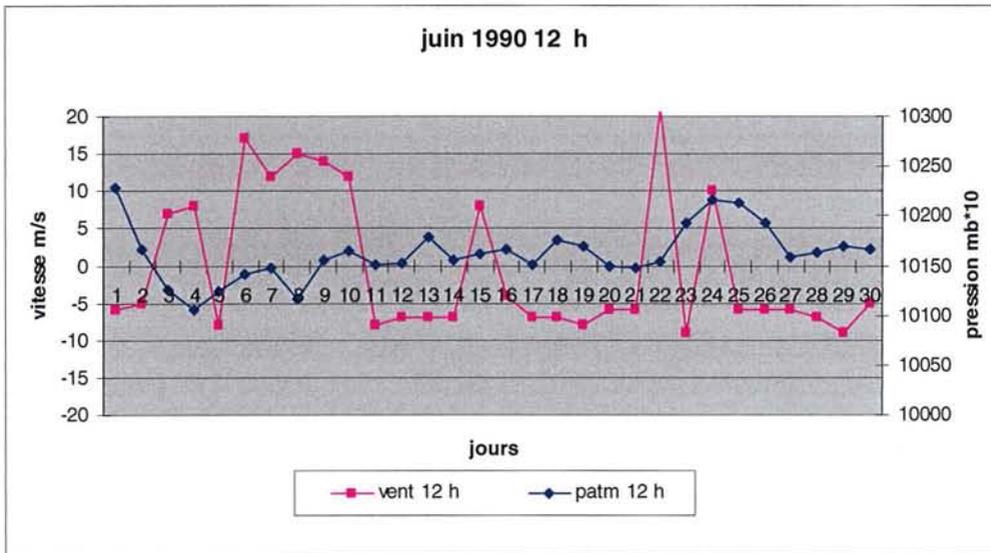
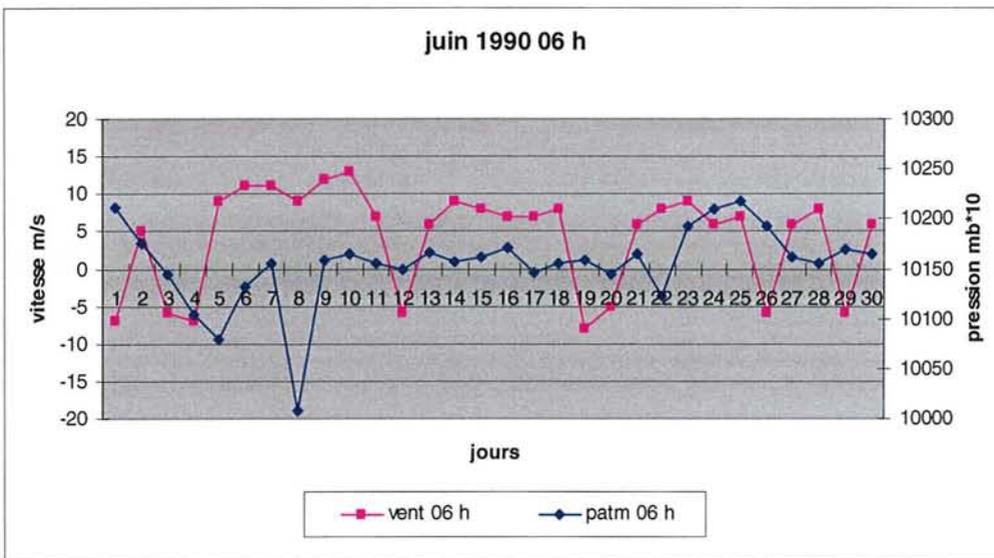


Fig. 37 : relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1990

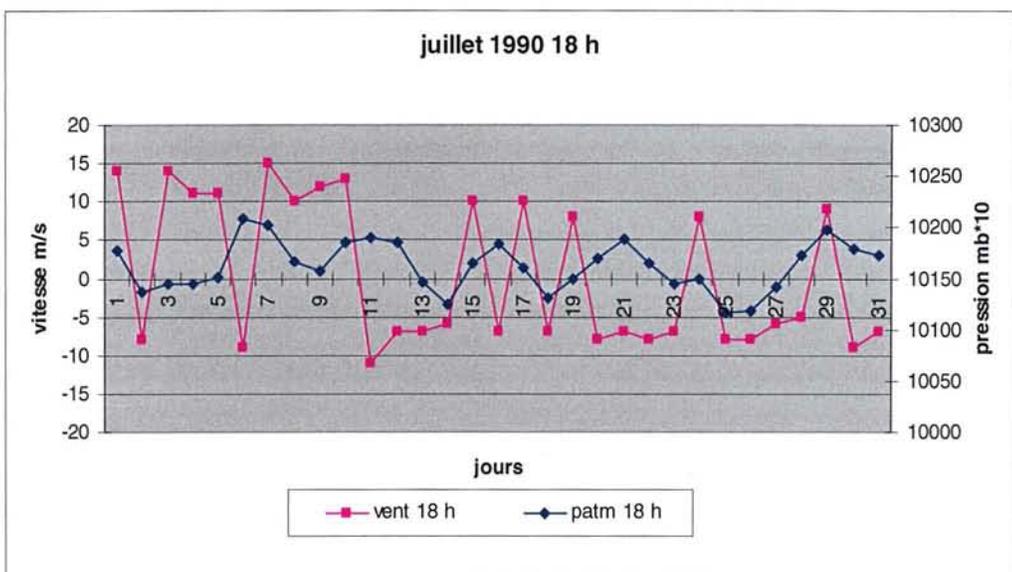
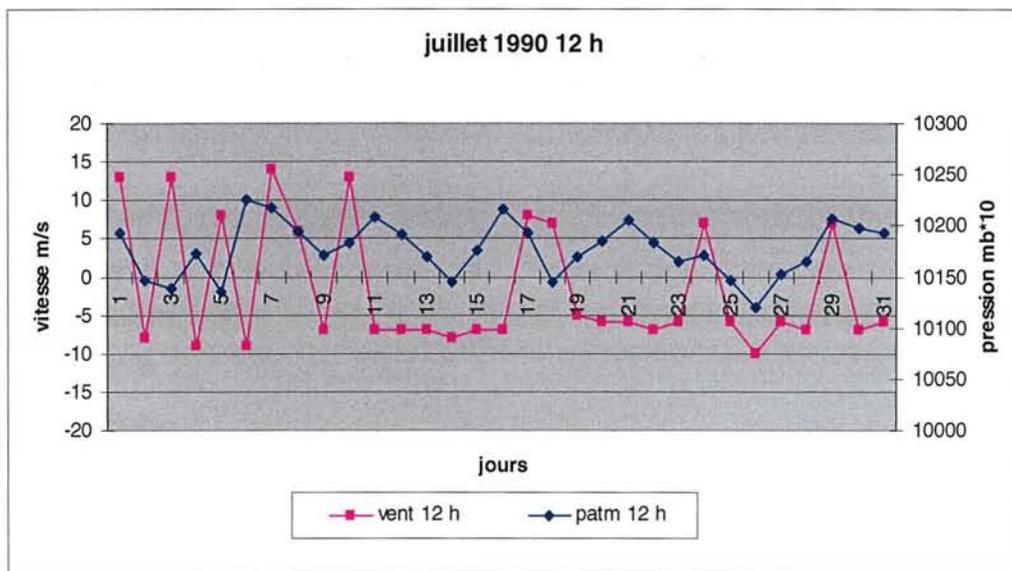
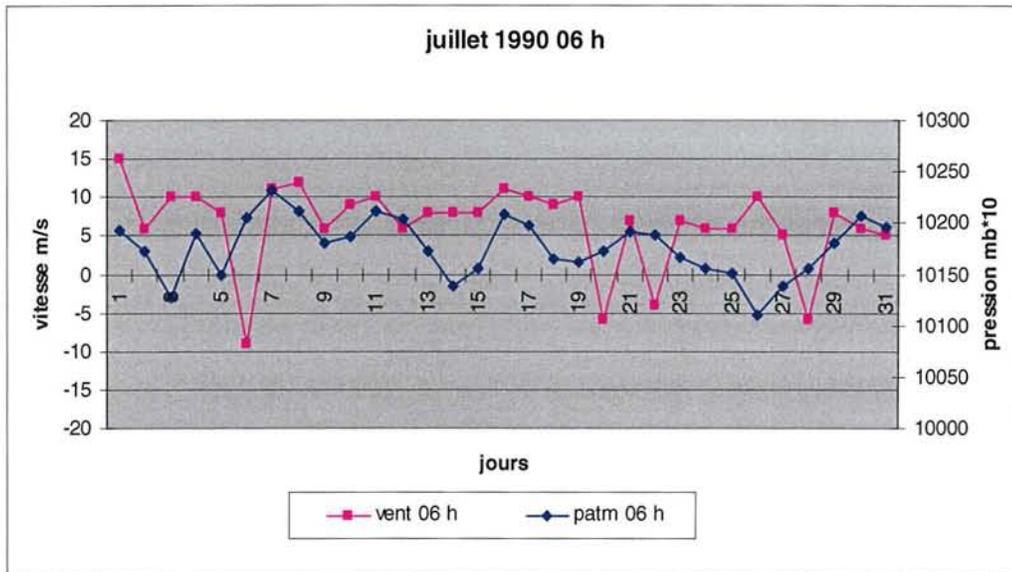


Fig. 38 : relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1990

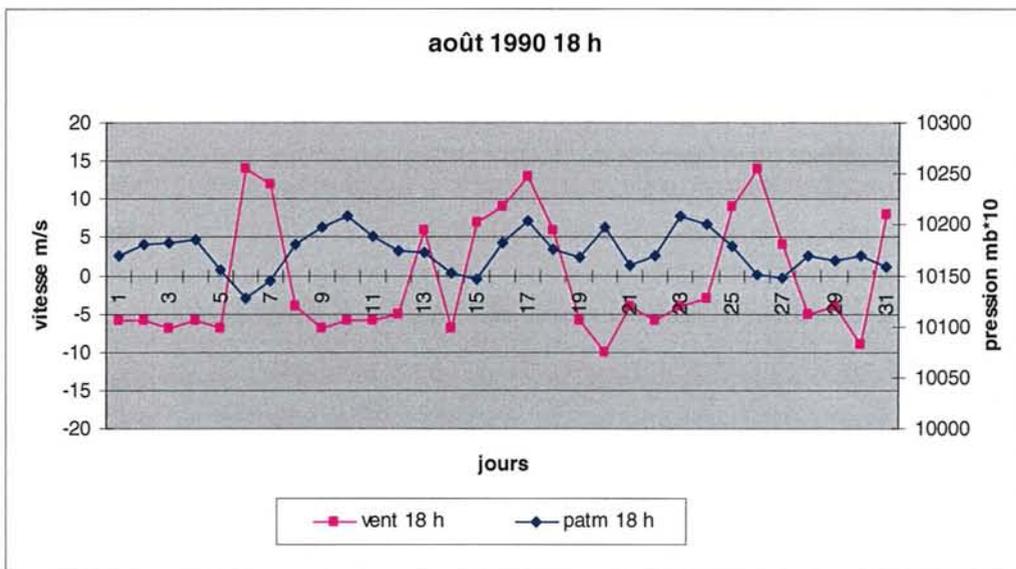
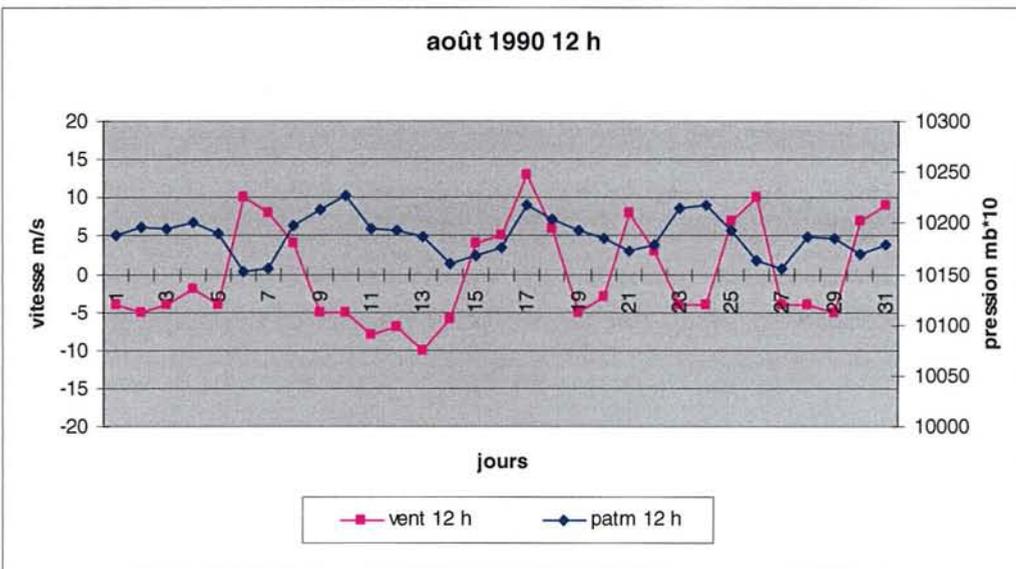
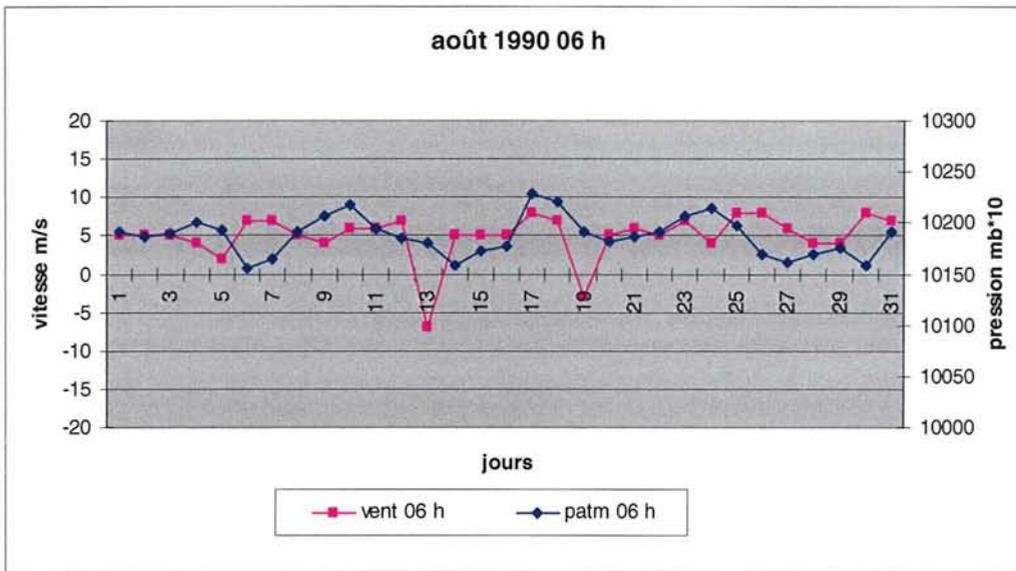


Fig. 39 : relation pression (atm) vent (vitesse) août 1990

Juin

Les précipitations sont faibles : 6,2 mm (Tab. 7).

Les températures sont comprises entre 19 et 26°C (Fig. 35).

Les vents de Nord peuvent être forts (>20 m/s), ceux de Sud ne dépassent pas 10 m/s. En dehors de la période comprise entre le 5 et le 9 les vents de Nord et du Sud se succèdent dans la journée (Fig. 37).

Les pressions oscillent entre 1010 et 1020 mb, sauf pour la journée du 8 où elles descendent à 1000 mb. Il est possible parfois de noter un antagonisme vents-pression surtout entre le 16 et le 19 (Fig. 37).

Juillet

Les précipitations sont faibles : 12,5 mm (Tab. 7)

Juillet a été chaud, avec des températures supérieures aux moyennes saisonnières (Fig. 35). Du 15 au 19 juillet, les moyennes journalières sont comprises entre 25 et 29°C. Une nouvelle période de chaleur se produit du 29 juillet au 7 août.

Les vents sont faibles entre le 18 juillet et le 5 août (Fig. 35). Les vents de Nord sont la plupart du temps compris entre 10 et 15 m/s, ceux de Sud varient de 5 à 10 m/s avec alternance fréquente pendant la journée (Fig.38).

Les pressions fluctuent entre 1010 et 1025 mb. Il ne semble pas y avoir d'antagonisme réel entre le vent et les pressions (Fig. 38).

On peut noter deux orages assez importants le 24 et le 28 juillet.

Août

Les précipitations atteignent 32,1mm (Tab. 7).

Jusqu'au 5 août, les températures sont supérieures à 25°C, elles diminuent légèrement après cette date. Les vents Nord et Sud sont modérés entre 5 et 15 m/s avec très souvent alternance pendant la journée (Fig. 39).

Des épisodes venteux de secteur Nord-Est ou Nord-Ouest se produisent du 5 au 8 août, puis du 13 au 17 et enfin du 24 au 27 de ce même mois (Fig.39).

Un antagonisme pression-vent apparaît en début du mois (Fig. 39).

9: Malaïgue 1994

Tableau 8: températures et pluies 1994

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	3,4	13,8	4,8
2	3,4	12,5	33,4
3	11,4	21,3	12,5
4	8,4	19,0	80,6
5	13,8	21,4	108,6
6	17,5	26,2	6,2
7	22,5	27,8	12,5
8	20,6	27,9	32,1
9	13,7	23,8	49,8
10	12,9	19,2	133,7
11	10,4	18,2	51,1
12	3,4	16,5	34,2
TOTAL			630,7 mm

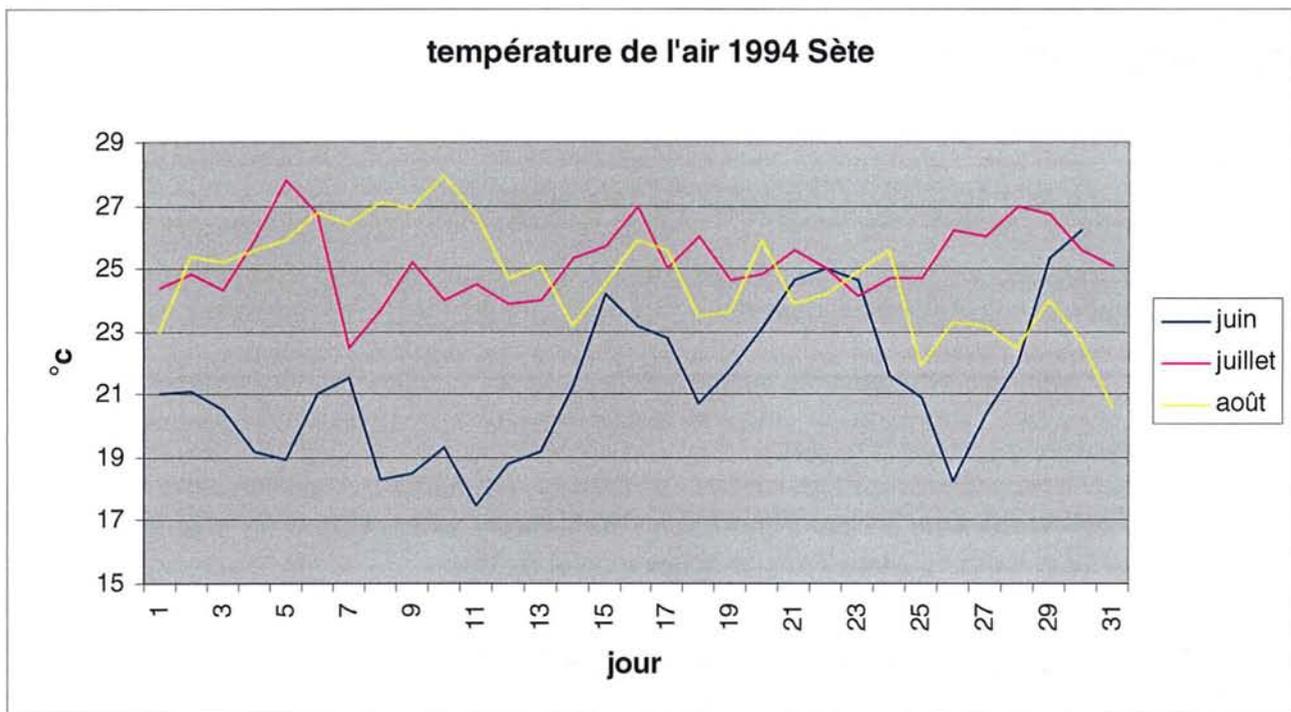


Fig. 40 : températures de l'air en juin, juillet et août 1994

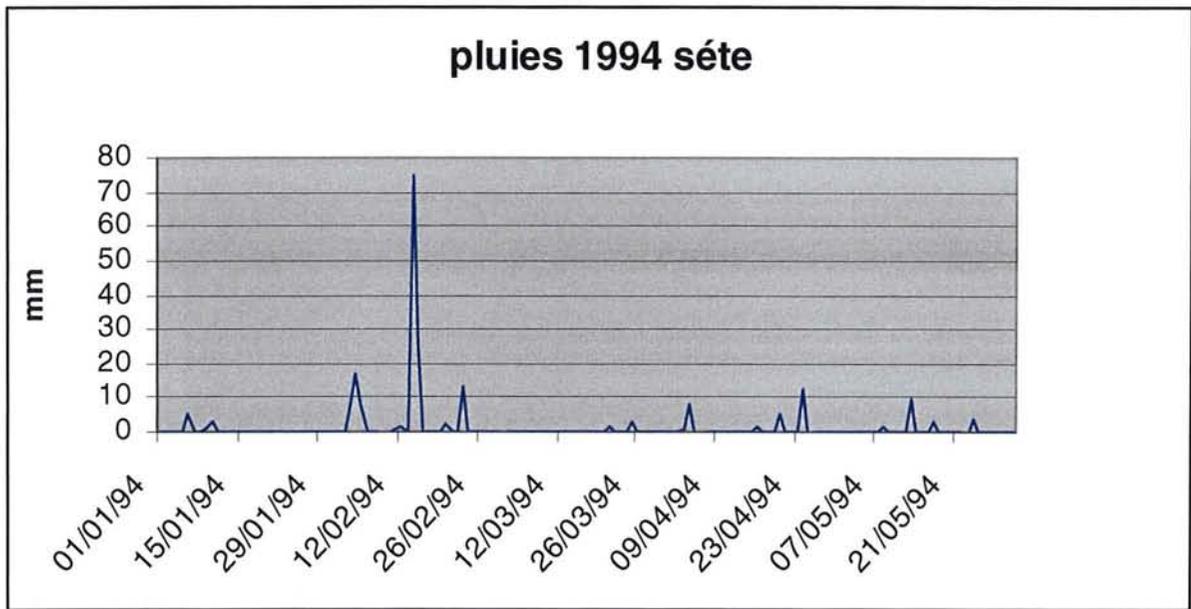


Fig. 41 : Pluies six mois avant la malaïgue

Une averse importante a eu lieu en début du mois de février (75 mm en une journée).

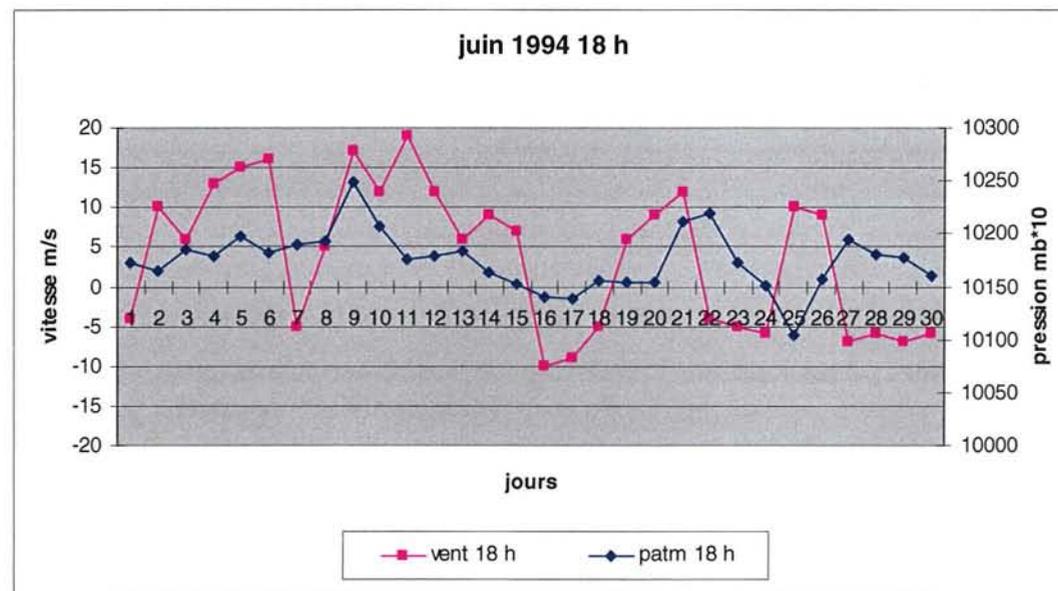
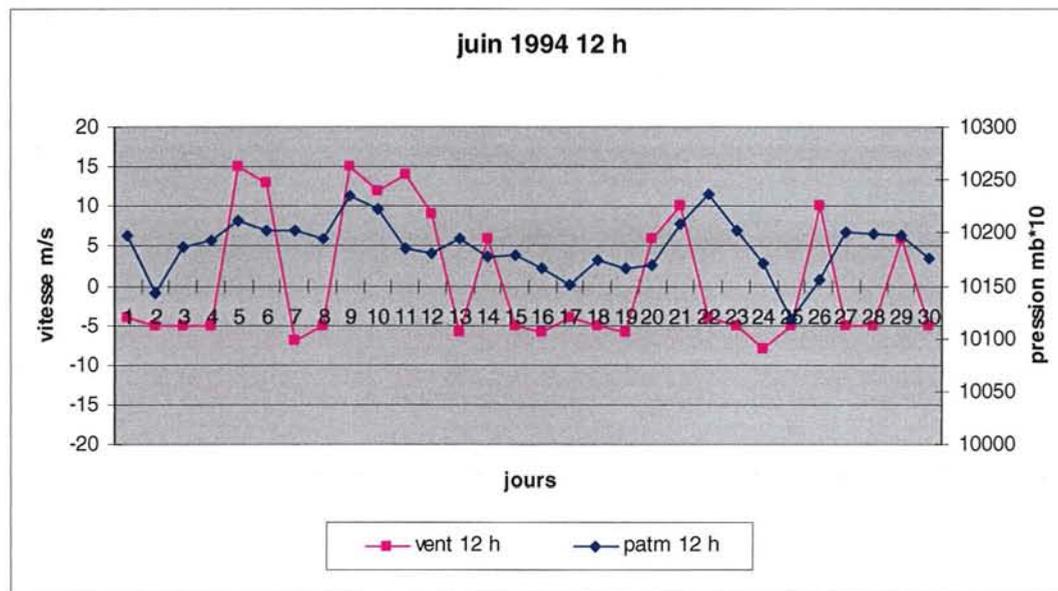
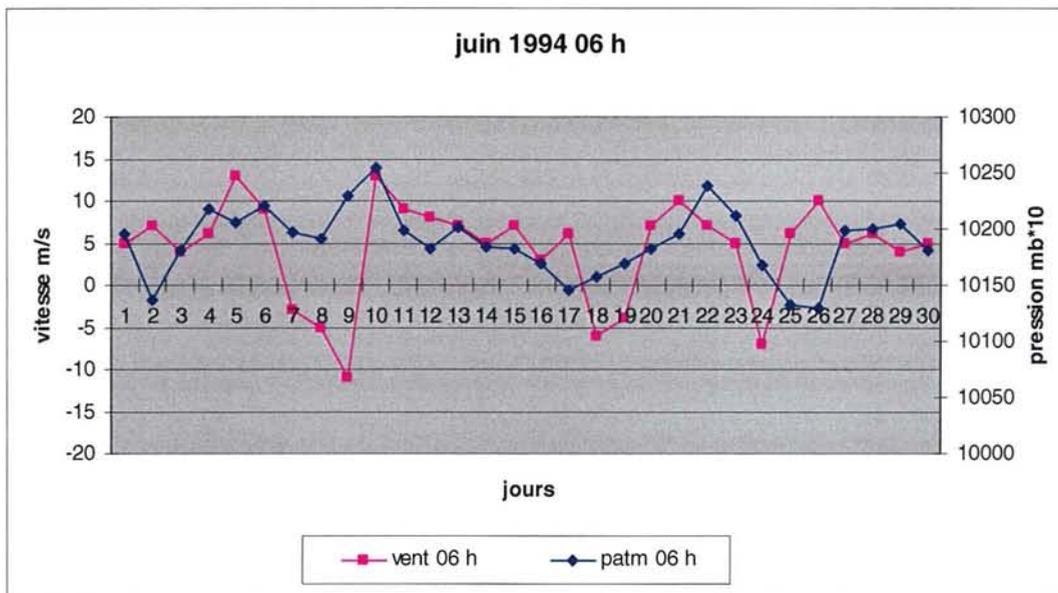


Fig. 42 : relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1994

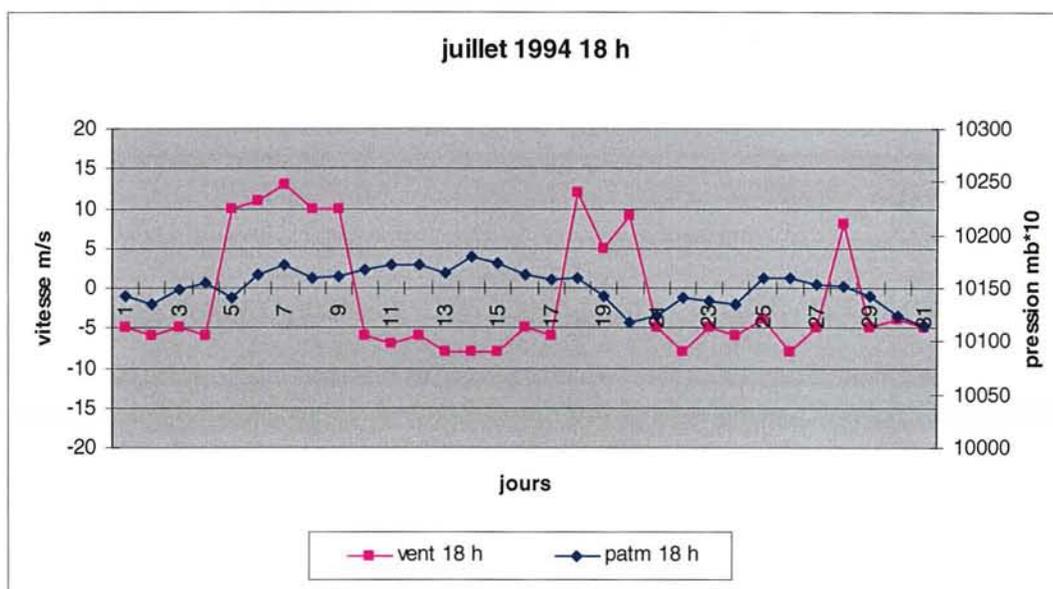
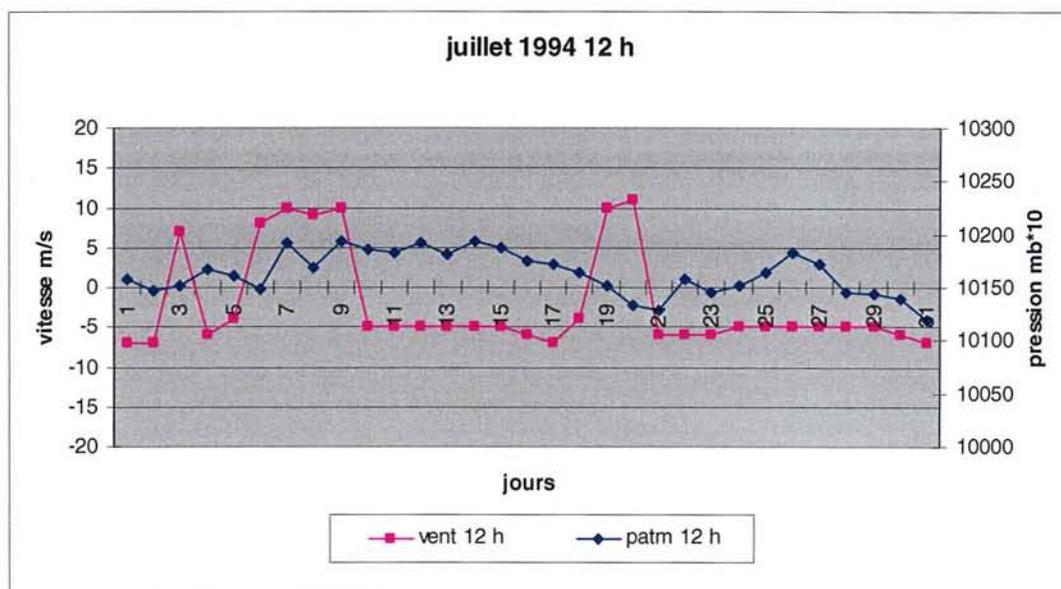
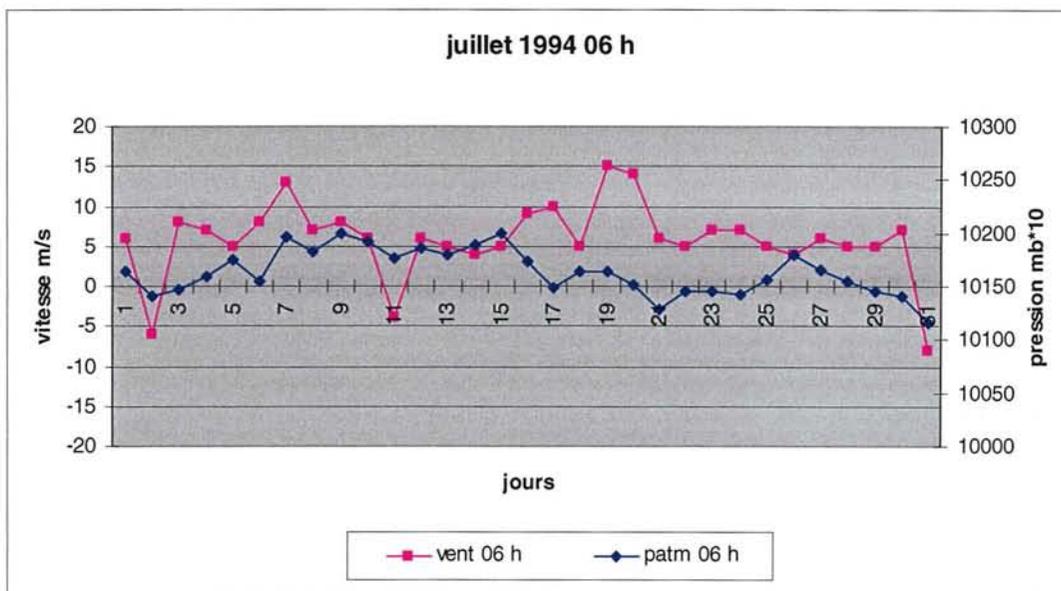


Fig. 43 : relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1994

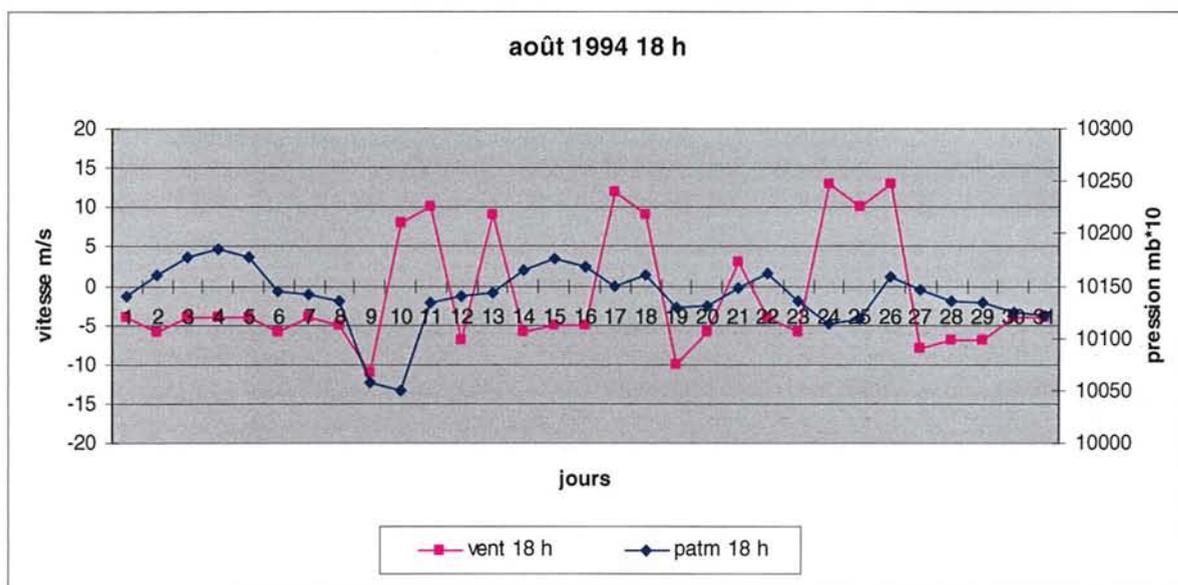
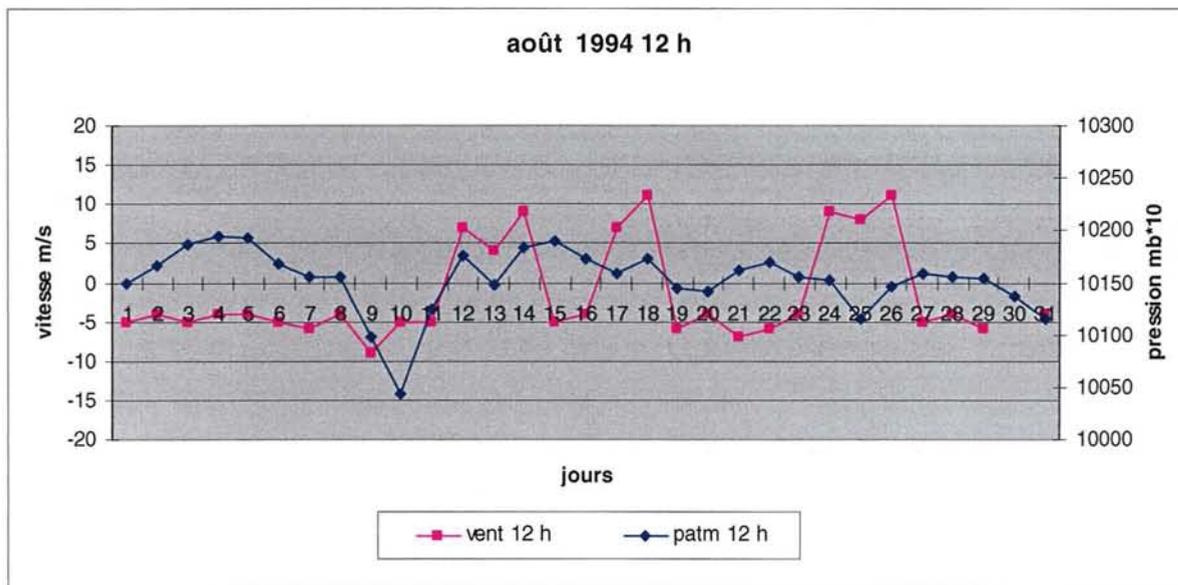
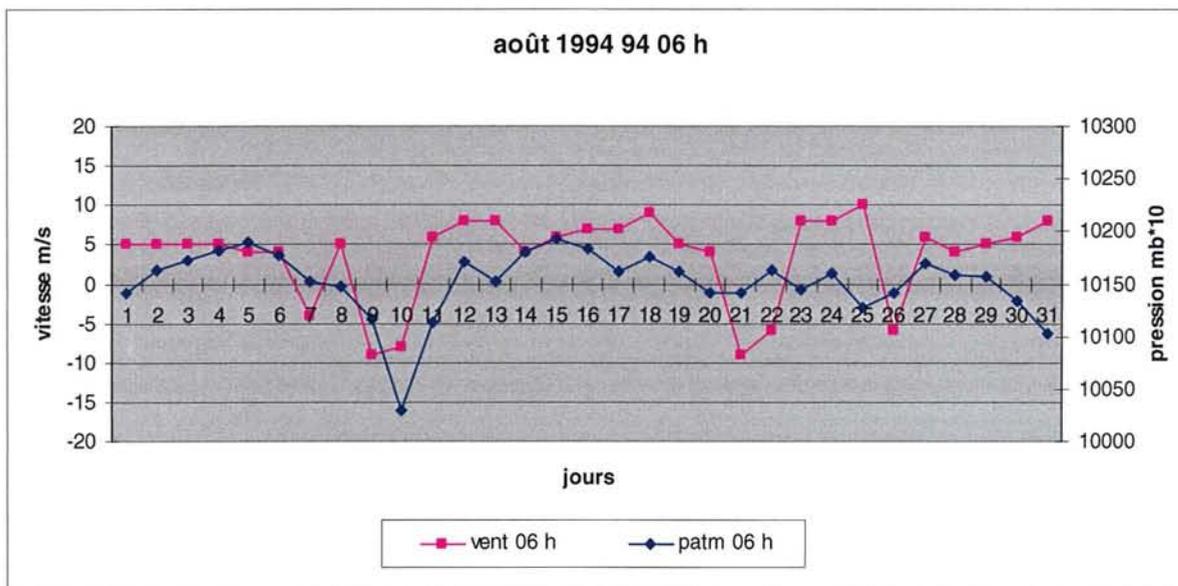


Fig. 44 : relation pression (atm) vent (vitesse) août 1994

Juin

Les précipitations sont faibles: 6,2 mm(Tab. 8).

La température oscille entre 19°C et 25°C et dépasse les 25°C en fin de mois (Fig.40).

Les pressions ont varié entre 1014 et 1027 mb Elles sont rarement descendues au dessous de 1015 mb (Fig. 42).

Les vents de secteur Nord ont été dominants avec des vitesses pouvant atteindre 17 m/s. Il n'y a pratiquement pas de renverse au cours de la journée sauf entre le 13 et le 15. Les pressions et les vents varient dans le même sens (Fig.42).

Juillet

Les précipitations sont légèrement plus importantes qu'en juin: 12,5 (Tab.8).

Les températures sont comprises entre 25 et 27°C (Fig. 40).

Les pressions ont varié entre 1012 et 1020 mb. Les plus basses pressions sont observées entre le 19 et le 22 (Fig. 43)

Les vents de Nord sont modérés compris entre 5 et 14 m/s, ceux de Sud entre 3 et 10 m/s. Pendant tout le mois on observe des renverses journalières sauf du 6 au 9 et du 18 au 21. La période du 18 au 21 est caractérisée par un antagonisme vent-pressions (Fig.43).

Août

Les précipitations atteignent : 32,1 mm (Tab. 8).

A partir du 23 août les températures passent en dessous des 25°C (Fig.40).

Les pressions varient entre 1004 et 1019 mb. Les pressions minima s'observent entre le 9 et le 12 (Fig.44).

Les vents du Nord sont compris entre 5 et 16 m/s, ceux de Sud entre 5 et 11 m/s. Les renverses pendant la journée s'observent pendant pratiquement tout le mois. Il ne semble pas y avoir d'antagonisme entre la pression et le vent (Fig.44).

10: Malaïgue 1997

Tableau 9 : températures et pluies 1997

MOIS	TEMP MINI °C	TEMP MAXI °C	PLUIES HAUT mm
1	2,4	12,7	135,9
2	5,8	14,7	5,8
3	9,5	20,4	0,0
4	9,9	18,2	12,2
5	11,4	25,0	24,0
6	16,4	22,9	92,0
7	18,2	28,8	4,2
8	19,6	27,2	42,8
9	19,3	25,3	21,4
10	8,9	26,0	56,0
11	10,0	18,8	94,0
12	4,7	13,6	85,2
TOTAL			573,5 mm

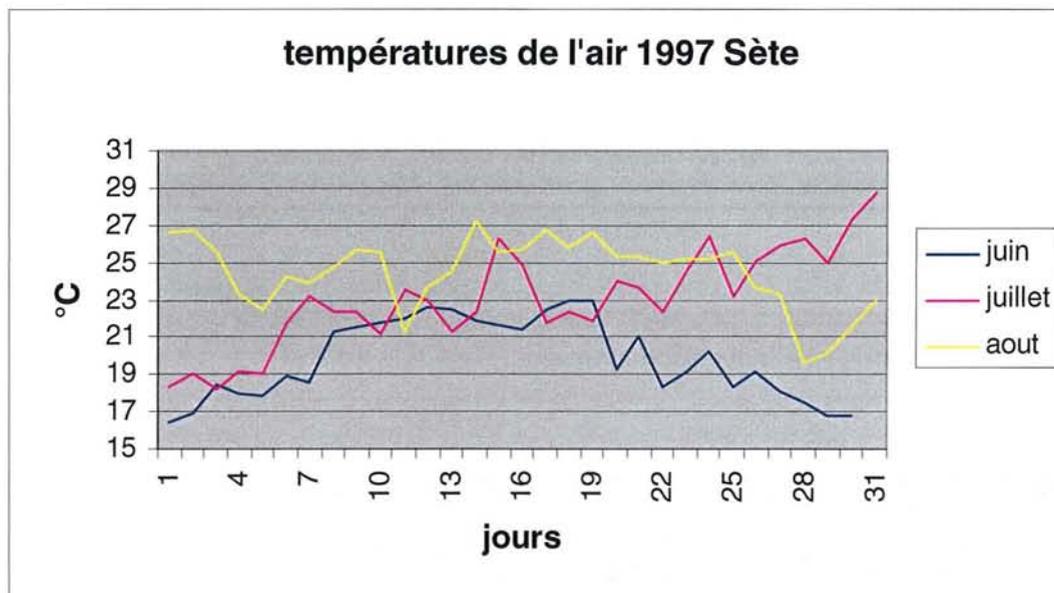


Fig. 45 : températures de l'air en juin, juillet et août 1997

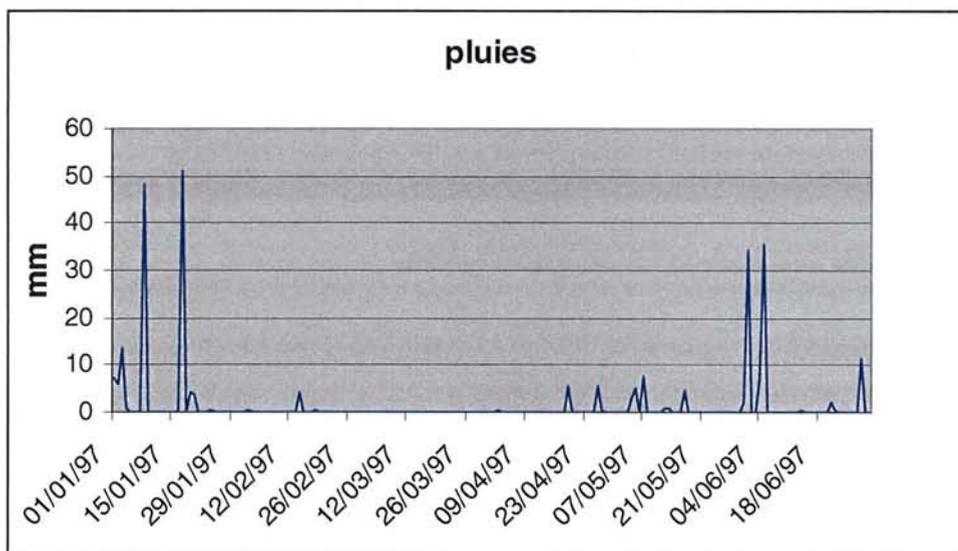


Fig. 46 : Pluies six mois avant la malaïgue

C'est en début d'année qu'ont eu lieu les pluies les plus importantes (49 et 50 mm journalier le 10 et le 17 janvier)

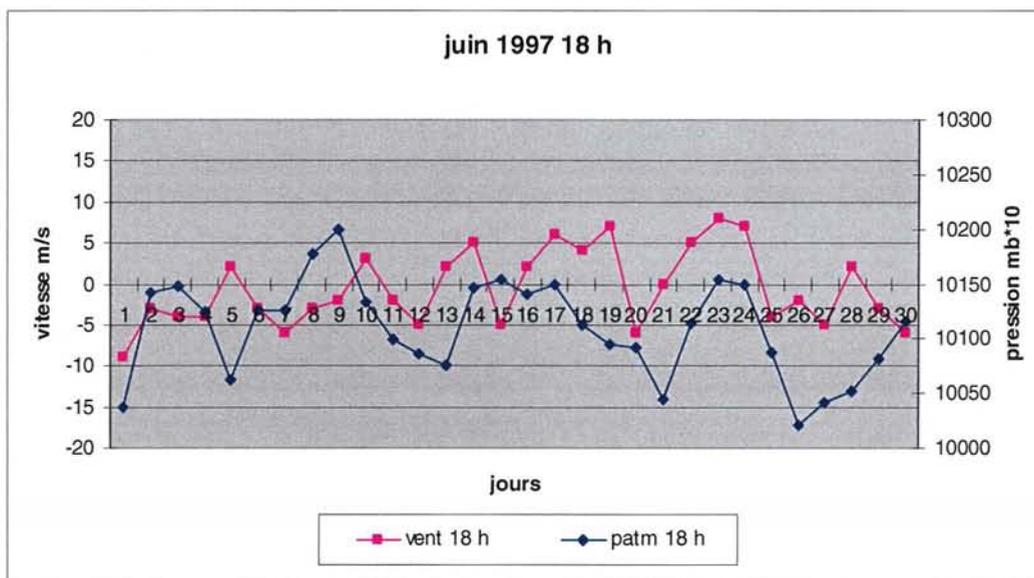
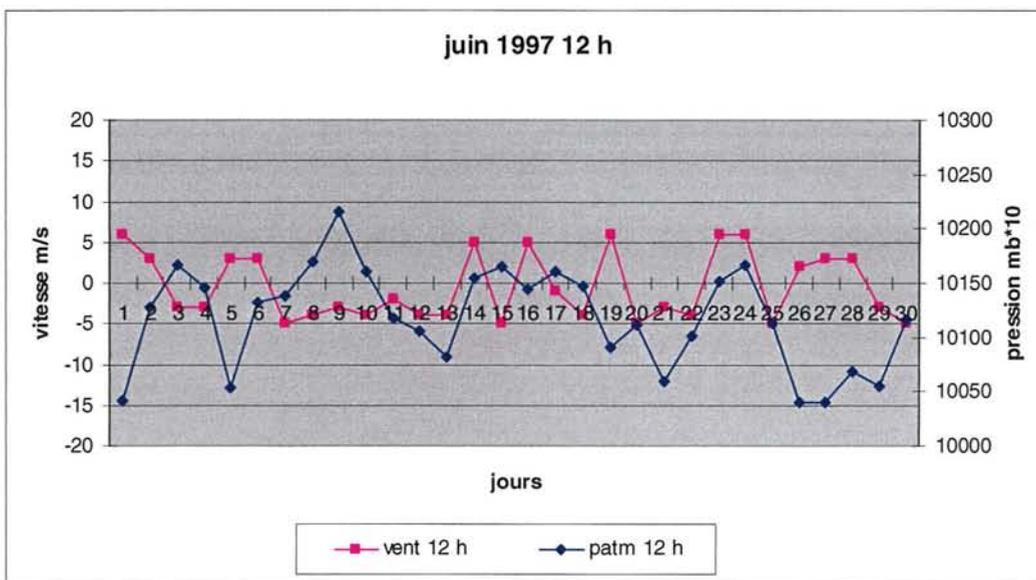
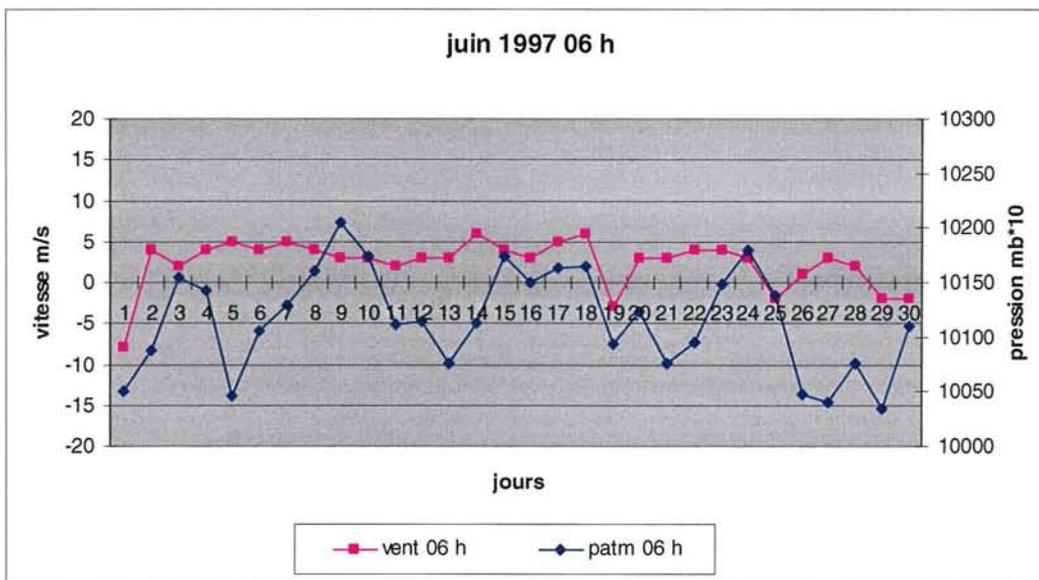


Fig. 47 : relation pression (atm) vent (vitesse) juin 1997

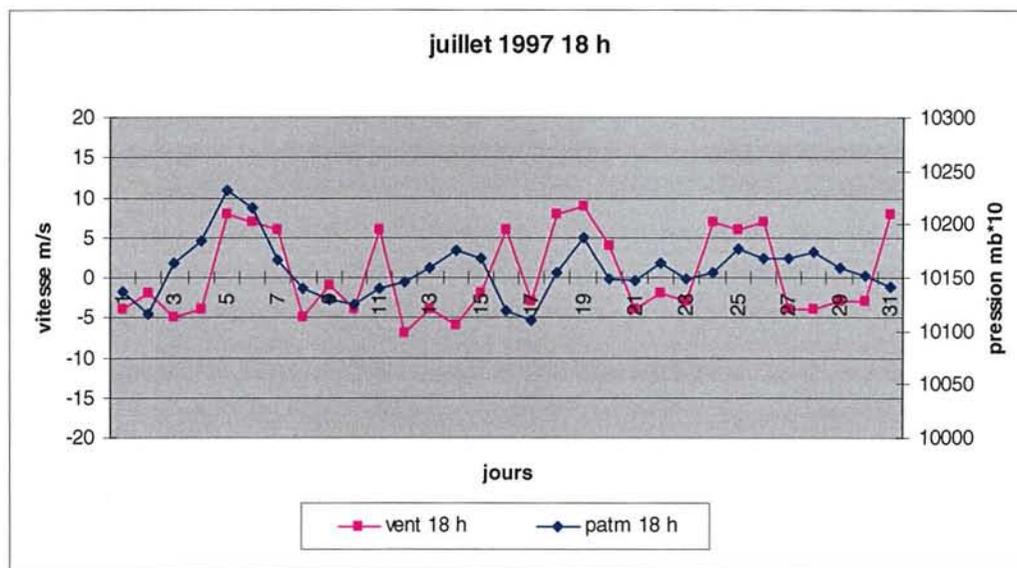
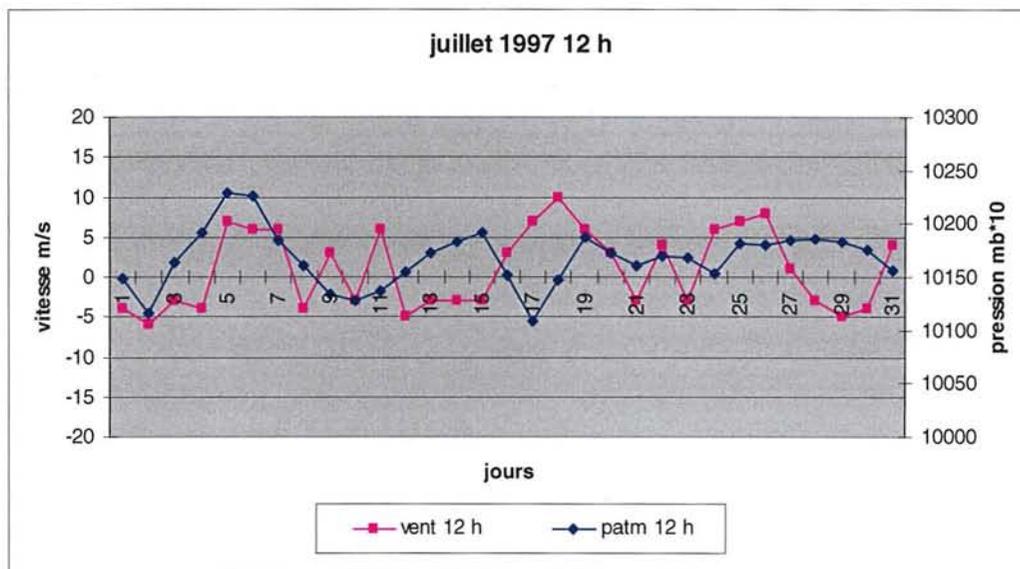
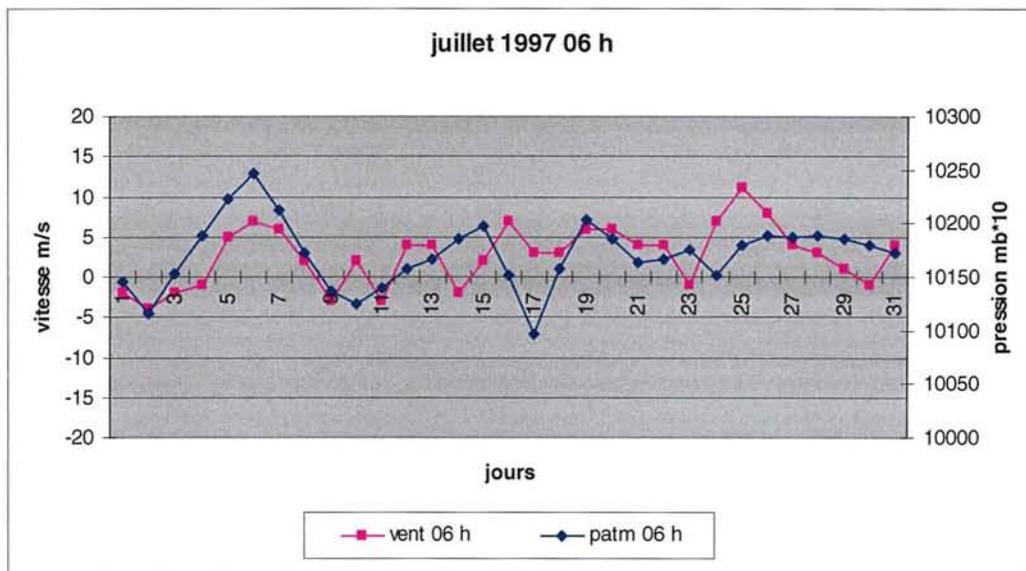


Fig. 48: relation pression (atm) vent (vitesse) juillet 1997

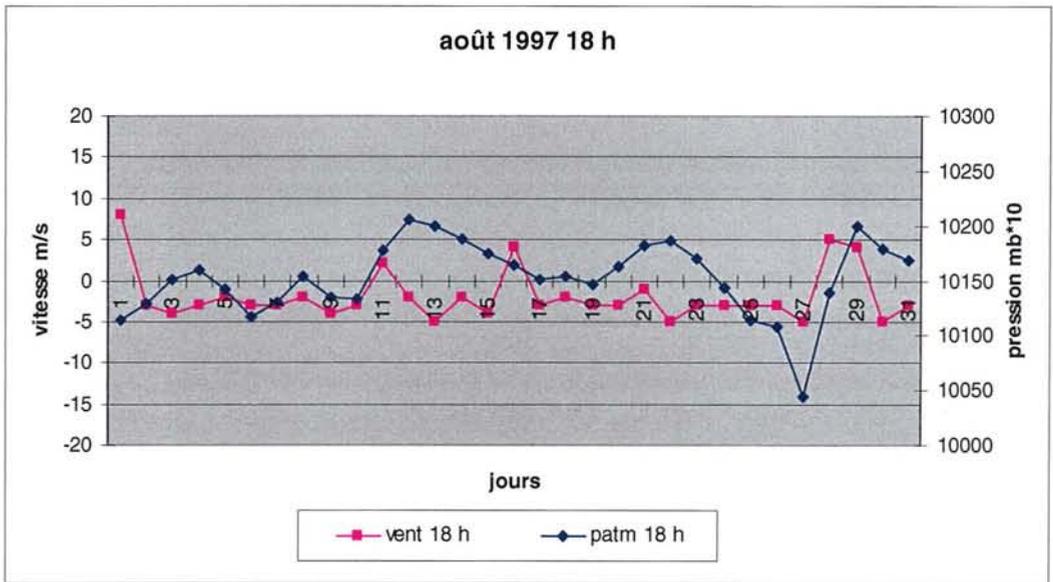
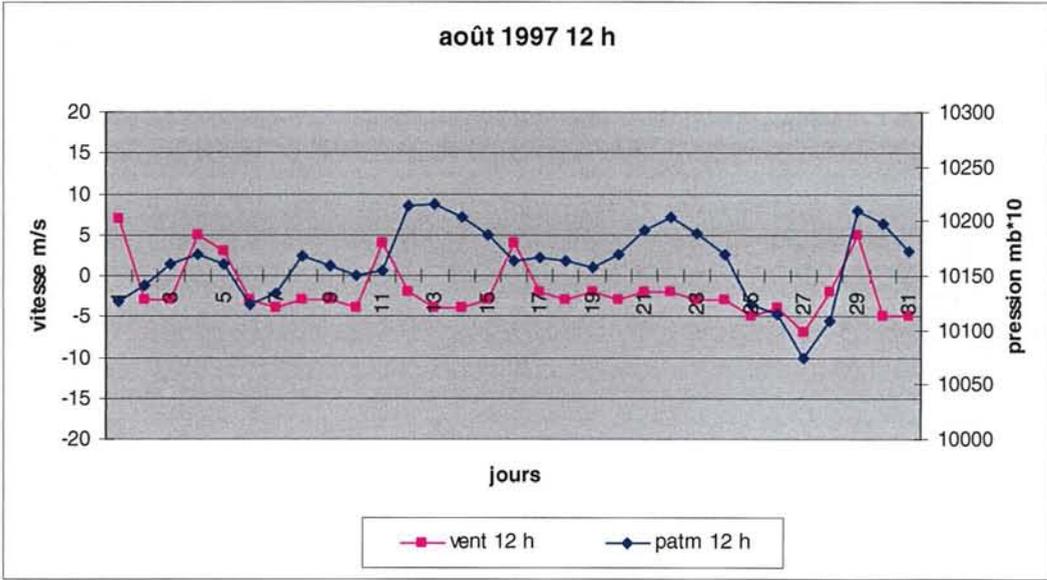
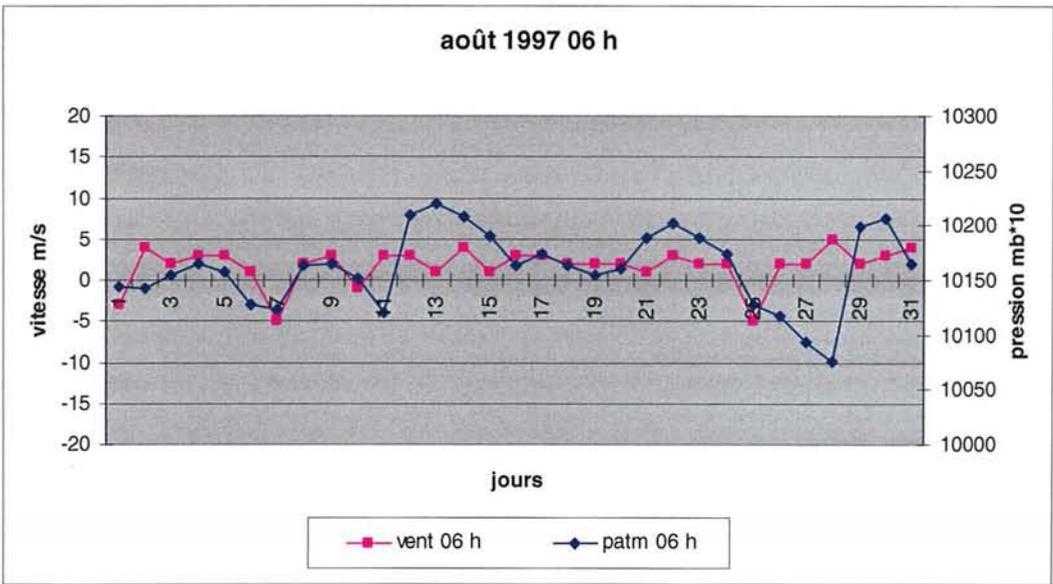


Fig. 49 : relation pression (atm) vent (vitesse) août 1994

Juin

Les précipitations sont importantes : 92 mm (Tab.9).

Les températures sont comprises entre 16 et 22°C ; à partir du 22 elles chutent en dessous des 20 °C. Ceci doit être mis en relation avec les pluies importantes qui ont eu lieu à la fin du mois (Fig. 45).

Les pressions varient de 1005 à 1020 mb (Fig. 47).

Les vents sont faibles à modérés de secteur Nord le matin et Sud en fin de matinée et dans l'après-midi (3 à 6 ms) (Fig. 47)

Juillet

Les précipitations sont faibles: 4,2 mm (Tab. 9)

Les températures augmentent régulièrement pendant tout le mois pour atteindre 29°C (Fig. 45). Les pressions varient de 1010 à 10325 mb en début de mois et sont ensuite beaucoup plus stables (Fig. 48).

Les vents sont faibles à modérés, avec toujours une tendance à une renverse au cours de la journée. Ils sont légèrement plus forts que le mois précédent, mais ne dépassent jamais les 10 m/s (Fig. 48)

Août

Les précipitations sont importantes pour un mois d'août: 42,8mm (Tab. 9).

Pendant tout le mois les températures restent très élevées (22-27°C) (Fig.45).

Pendant la même période les pressions restent très stables (Fig. 49).

Pendant les 25 premiers jours du mois les vents sont faibles ne dépassant pas les 6 m/s et très faibles de secteur Sud l'après-midi (Fig. 49).

11 : Comparaison entre les malaïgues

Certains épisodes d'anoxie dans l'étang n'ont jamais été décrits du fait que les mortalités qu'ils ont entraînées ont été minimales et n'ont pas donné lieu à des indemnités.

Tab. 10 : Paramètres disponibles

Année	Plan station	Temp.	Sal.	Oxygène	Po ₄	No ₃	No ₂	Vent	Patm	Photo	Interp. photo
1969		X	X	X				X	X		
1971		X	X	X				X	X		
1975	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
1982	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1983	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1987	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
1990		X	X	X				X	X		
1994	X	X	X	X				X	X		
1997	X	X	X	X				X	X	X	

Tab. 11 : Situation un mois avant la malaïgue . Observations positives

Année	Température eau	Oxygène %	Vent Nord m/s	Vent Sud m/s	Renverse	Pressions	Antagonisme Vent-pression
1969	15.1-20	86-105	0-9	1-14	?	1002-1020	?
1971	14.5-20.5	20-100	1-9	1-10		1003-1026	
1975	18-20	saturation	2-15	5-12		1010-1023	
1982	15-22	80-120	2-15	2-11		1010-1024	
1983	22-27	70-90	3-12	2-11		1010-1020	
1987	20-25	90-100	1-20	1-10		1010-1025	
1990	?	?	7-15	8-15		1013-1025	
1994	?	?	5-15	4-13		1012-1020	
1997	?	?	3-11	2-7		1010-1026	

Tab. 12 : Situation au moment de la malaïgue. Observations positives

Année	Date	Zone	Surface	Fond	Vent Nord m/s	Vent Sud m/s	Renverse	Pressions mb	Antagonisme vent pression
1969	?	A			0-8	4-15		1010-1022	
1971	?	A-B			0-8	1-8		1010-1025	
1975	15/07-23/08	A-B-C			0-15	5-15		1010-1025	
1982	9/07-30/07	A-B-C			5-15	2-10		1009-1020	
1983	26/07-14/08	A-B-C			5-15	1-15		1008-1220	
1987	15/07-24/07	B-C			3-15	15-10		1004-1018	
1990	1/08-10/08	A-B-C			3-15	3-14		1013-1022	
1994	30/07-20/08	A			3-15	4-11		1004-1019	
1997	18/08-12/09	B			3-9	2-6		1006-1021	

12 : Discussion

Parmi les 9 crises dystrophiques recensées dans l'étang, 7 d'entre elles sont décrites en détail, **ce qui ne signifie nullement que tous les épisodes de malaïgue ont été étudiés**. Des phénomènes de désoxygénation ont pu avoir lieu sans qu'aucune observation n'ait été faite.

Toutes les malaïgues n'ont pas été suivies de la même façon. Dans certains cas n'existent que les observations effectuées après le déclenchement du phénomène, il est possible parfois de retrouver les données encadrant la malaïgue, mais rien durant la période critique. En certaines occasions un suivi aérien permet de visualiser le déplacement des masses d'eau. Il est donc très difficile de décrire toutes les crises observées avec la même précision, d'autant que certaines données existantes n'ont pas été retrouvées. Enfin, les stations suivies ont changé au cours du temps. Les observations régulières s'arrêtent en 1990.

Cependant les malaïgues décrites permettent de préciser certains points :

- celle de 1975 montre que le phénomène visible d'eaux blanches n'est que la phase ultime d'un processus de désoxygénation qui a débuté plusieurs semaines avant en dehors des zones conchylicoles ;
- en 1982 et 1983, les observations aériennes permettent de suivre l'évolution des taches blanchâtres en fonction des vents et des changements de pressions en cours de journée. La physico-chimie par contre n'est pas assez précise pour dire avec certitude à quel moment a débuté la désoxygénation des zones profondes ;
- la désoxygénation de fond de juillet 1994, décrite par P. Souchu, aurait dû si l'on se réfère aux critères classiques évoluer en malaïgue généralisée. En effet, les températures de l'air de fin juillet et du début d'août ont été assez élevées ($>25^{\circ}\text{C}$) et les vents faibles à modérés ($<6\text{m/s}$) ;
- les autres malaïgues ne sont décrites qu'à partir du moment où elles ont été visibles.

Il faut noter que peu d'observations ont été faites hors des zones conchylicoles.

Aux paramètres physico-chimiques de base ont été ajoutés des paramètres météorologiques (pluies, température, pression et vent).

12.1 : Les pluies

Les pluies méditerranéennes ont généralement un caractère orageux très prononcé parfois même torrentiel et sont très souvent localisées. Elles apportent par ruissellement de la matière organique dissoute et particulaire. Un apport massif de cette matière pourrait expliquer le déclenchement des malaïgues.

Il est très difficile de savoir à partir de quelle quantité ces pluies peuvent présenter un aspect torrentiel. La météorologie nationale estime que, dans notre région, des précipitations de l'ordre de 5 mm par heure peuvent être considérées comme très importantes ; à partir de là tout dépend de l'état du sol (humide ou sec) au moment des pluies. Le lessivage, donc l'apport de matière organique pour une même quantité de pluie, pourra être complètement différent suivant l'état d'humidité des sols.

Si l'on regarde les précipitations annuelles relevées à Sète (Fig. 50) les années de malaïgue ne coïncident pas avec pas celles où les pluies sont les plus importantes. Cependant, comme on l'a fait remarquer les quantités en elles mêmes ne reflètent en rien le caractère orageux des précipitations. On pourrait penser que les pluies de l'année précédente peuvent avoir une influence sur l'apparition des malaïgues. Or, si l'on excepte l'année 1997, les années précédant les crises dystrophiques ne se singularisent aucunement par l'abondance des pluies.

Une autre remarque doit être formulée : l'étang de Thau est l'exutoire naturel des pluies du bassin versant . une étude comparative des pluies de Sète, d'Agde-Marseillan et de Florensac, montre que les précipitations sont beaucoup plus abondantes à Florensac (à l'intérieur des terres) que dans les deux autres régions. Pour avoir une idée assez précise des apports potentiels de matière nutritive dans l'étang par les pluies, il serait nécessaire de connaître avec précision les précipitations de tout le bassin versant en temps réel.

La figure 51a montre bien que pendant les premiers mois de l'année les précipitations sont bien différentes d'une année sur l'autre. La malaïgue 1997 pourrait peut-être avoir été favorisée par l'abondance des précipitations du mois de juin (92 mm), celle de 90 par les pluies du mois de mai (108,6 mm). Pour les années 1983, 1987 et 1994 c'est dans les deux premiers mois de l'année qu'ont eu lieu de fortes pluies (>130 mm).

Les moyennes journalières des précipitations (Fig. 51b) ne permettent pas de se rendre compte du caractère torrentiel des pluies. Il faudrait pouvoir représenter les précipitations horaires pour avoir une idée du lessivage produit par les pluies or, nous ne disposons que des données bi-journalières.

Les apports de matières organiques par le bassin versant sont actuellement à l'étude .Des estimations de 1994 (Pichot *et al*) donnent 198 tonnes d'azote et 31 tonnes de phosphore, avec une surestimation probable. Les apports directs par les pluies étaient estimés pour la même époque à 37,5 tonnes d'azote et 1,1 tonne de phosphore par an. Il n'existe pas de travaux prenant en compte les volumes échangés entre la mer et l'étang.

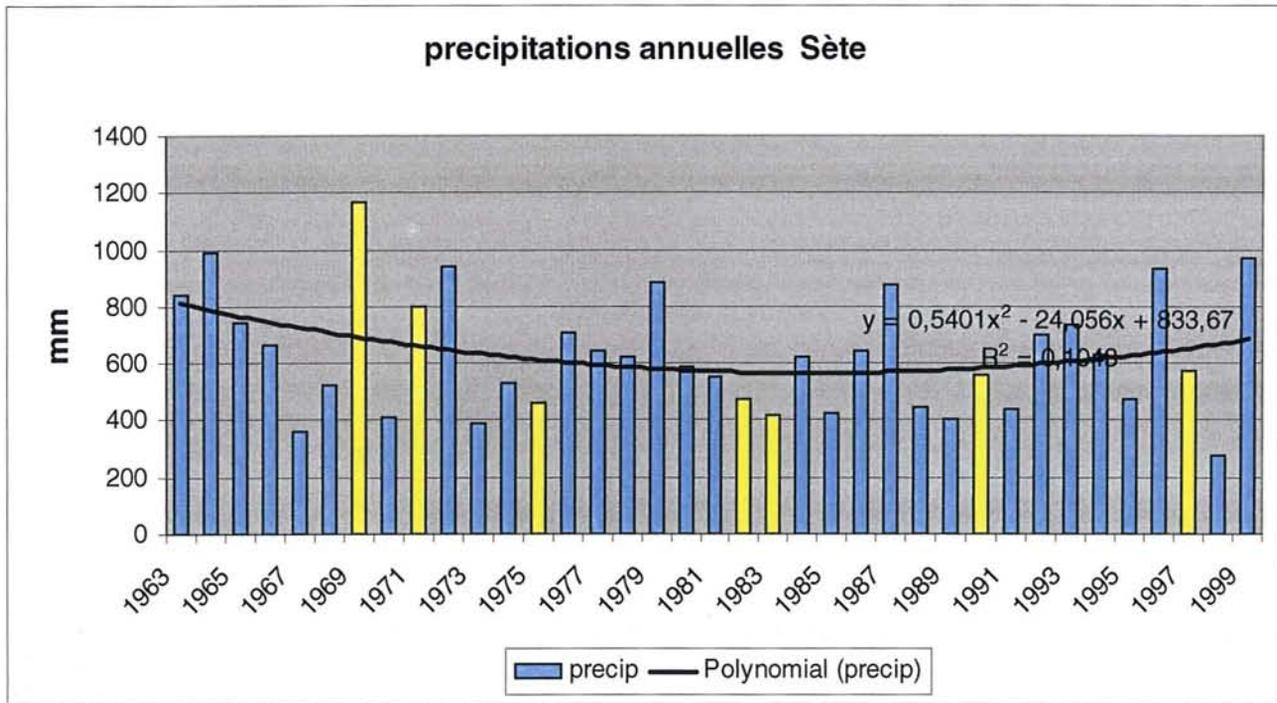
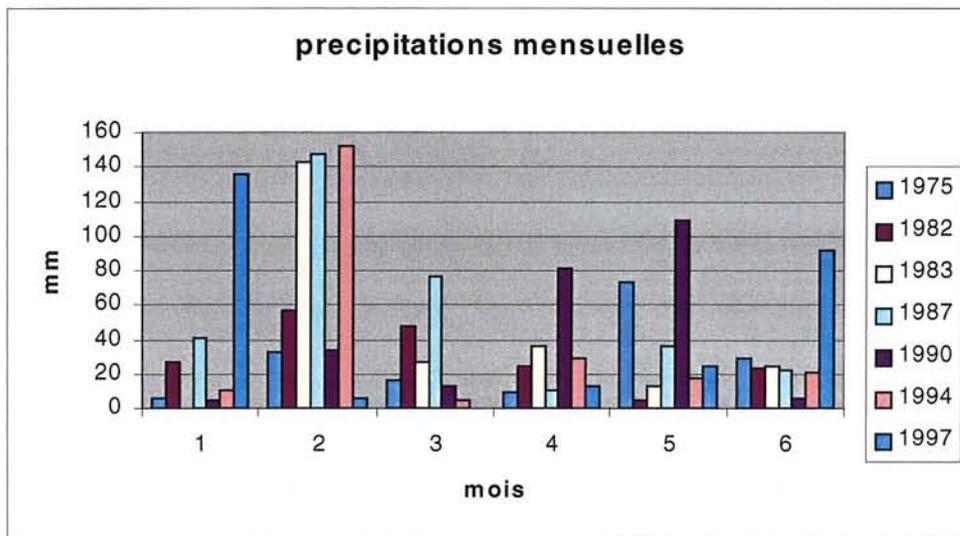
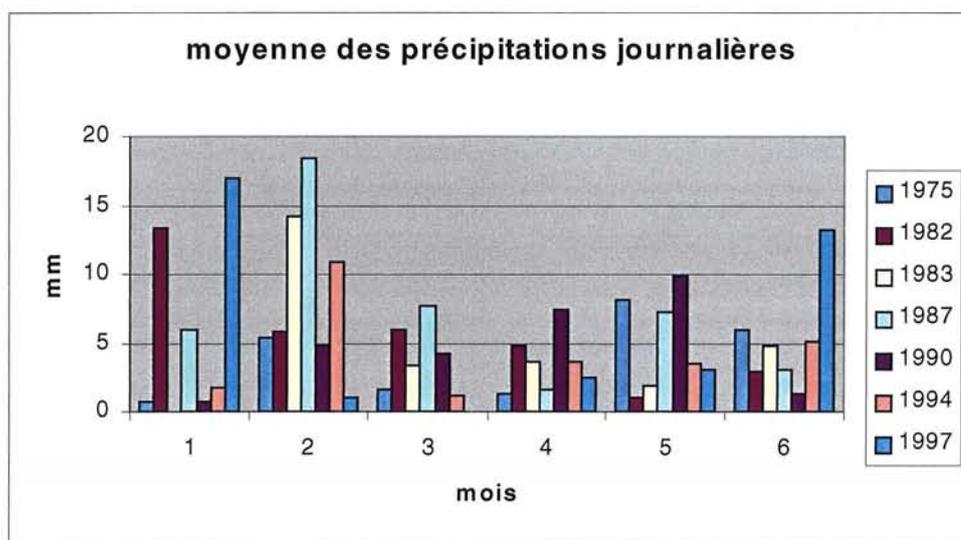


Fig. 50 : précipitations annuelles à Sète.

■ Année avec malaique



a



b

Fig. 51: précipitations à Sète 6 mois avant la malaïgue

12.2: Températures

Il est généralement admis qu'il existe une étroite corrélation entre les températures de l'air et celles de l'eau. Ceci est exact lorsque l'on s'intéresse à des variations de longue durée de l'ordre du mois au minimum, mais la relation n'est plus du tout aussi étroite à l'échelle de la semaine ou du jour. Les études statistiques montrent que, sur un laps de temps assez court, le coefficient de corrélation varie en fonction des années, au moment des malaïgues entre 0,3 et 0,5. Ce qui est loin d'être significatif.

En prenant comme exemple l'année 1997, on remarque qu'il peut exister entre l'air et l'eau des différences de température pouvant aller jusqu'à 4°C. L'inertie de la masse d'eau fait que les variations de température sont moins accentuées que dans l'air et décalées dans le temps (Fig. 52).

Si l'on considère les minima et maxima observés (Fig. 53) il est impossible là encore de trouver un facteur commun aux déclenchements des anoxies ; on voit par exemple que des malaïgues se sont déclenchées avec des températures maxima variant de 27°C à 36°C et des minima de 13 à 20°C. On ne peut donc pas fixer un seuil de température critique. Il ne faut pas oublier que dans certains étangs (étangs Palavasiens entre autres) des crises dystrophiques peuvent apparaître en plein hiver. Certaines années il est également possible d'observer en hiver dans l'étang de Thau des malaïgues de bord très localisées.

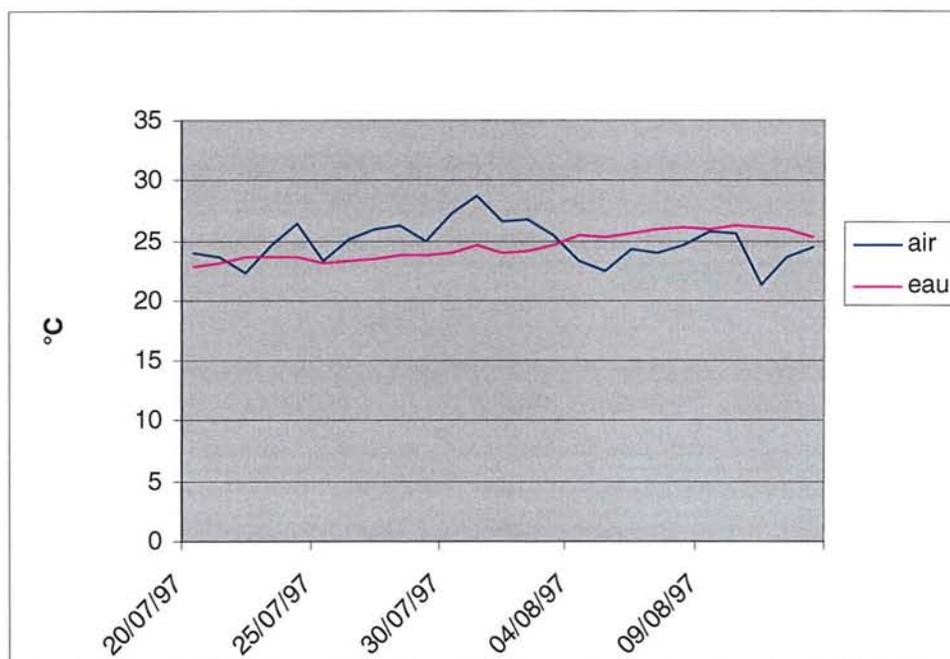
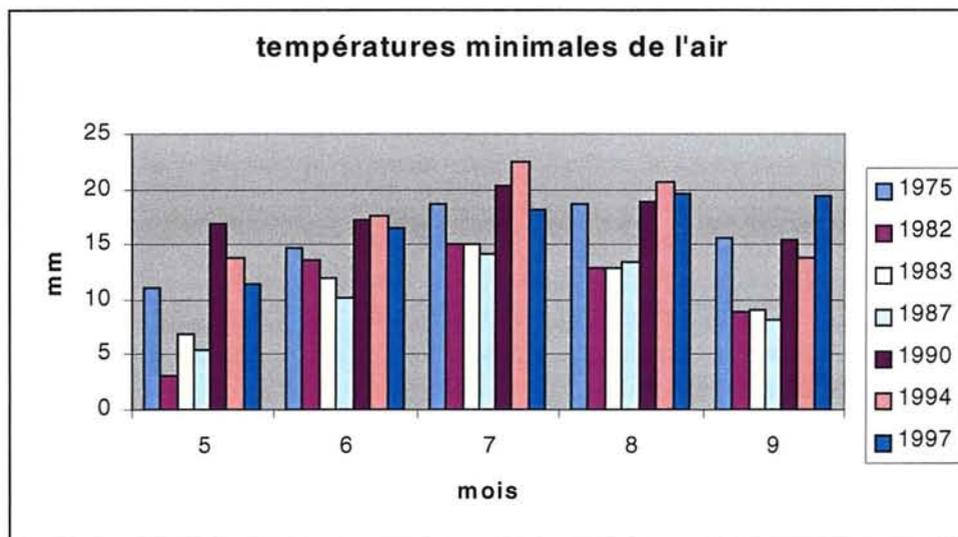
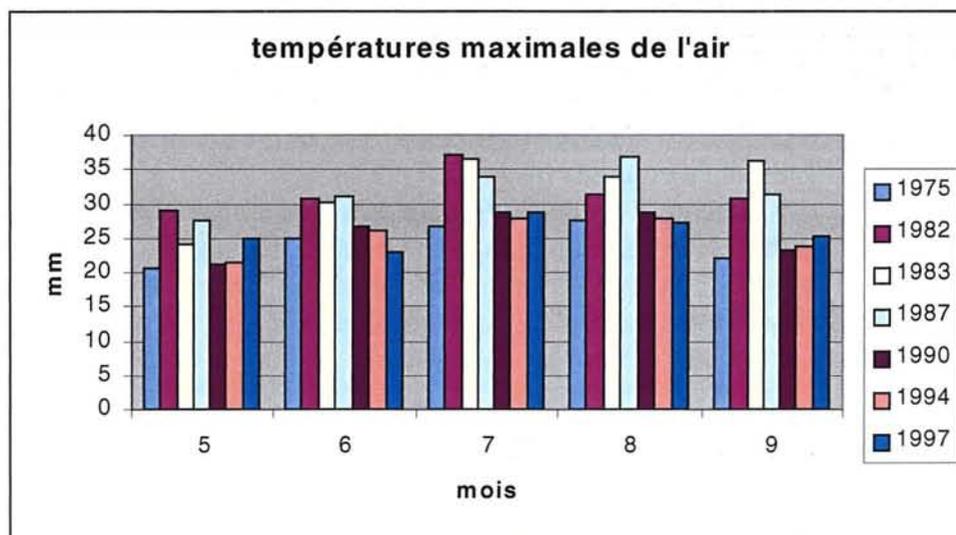


Fig. 52 : différence de températures air –eau en 1997



a



b

**Fig. 53 : températures minimales et maximales de l'air 3mois avant les malaïgues (a)
Et pendant les malaïgues (b) .**

12.3 : Vents

Ce facteur a été considéré par tous les auteurs comme primordial dans le déclenchement des malaïgues. Certains (Tournier *et al.* 1990) prennent en considération la vitesse moyenne des vents sans tenir compte des directions, d'autres (Lemoale *et al.* 1987) utilisent comme paramètre le nombre de km/ jour mais sans tenir compte de la direction.

Lorsque les vitesses sont inférieures à 4 m/s il existe des risques de malaïgue (Tournier *et al.* 1990). Souchu *et al.* (1998) estiment quant à eux que le vent seul ne peut expliquer l'apparition et le développement des crises dystrophiques.

Il existe deux sources de données pour étudier l'influence des vents sur l'apparition des malaïgues, soit le sémaphore de Sète, soit utiliser la station de Montpellier Fréjorgues. Dans cette étude, ce sont les vents du sémaphore de Sète qui ont été pris en considération. **En dehors la crise de 1997, aucune malaïgue ne peut être expliquée par la faiblesse des vents.** Par contre, la crise de 1983 pourrait être expliquée en utilisant les données de la station de Fréjorgues.

Il existe donc une incertitude sur la vitesse réelle des vents au niveau même de l'étang, la force et la direction de ces vents étant d'ailleurs variables entre les différents secteurs du plan d'eau. La zone A (région de Bouzigues) est relativement à l'abri du mistral et de la tramontane, les collines de La Mourre faisant écran à ces vents, alors que les zones de Mèze et de Marseillan ne bénéficient d'aucune protection. Les différences entre les zones peuvent atteindre jusqu'à 3 m/s, les directions peuvent aussi être assez différentes entre les zones de Bouzigues, Mèze et Marseillan. Il serait donc nécessaire pour valider un modèle malaïgue de pouvoir utiliser les données d'une ou mieux de deux stations météorologiques situées sur l'étang lui même, dans des zones extrêmes.

D'après M. Trousselier et B. Bibent (*communication personnelle*), il existerait une corrélation linéaire entre les vitesses relevées au niveau du plan d'eau et au sémaphore de Sète de la forme :

$$Y = 0,4933 x + 1,1811 \quad \text{avec } R^2 = 0,6051.$$

Mais la variabilité est très grande. Pour une vitesse des vents de 5m/s relevée au niveau de l'étang (entre Mèze et Marseillan), les vitesses relevées au sémaphore de Sète peuvent varier de 0 à 18m/s. Il est donc impossible d'utiliser cette relation pour recalculer les valeurs probables des vents au niveau de l'étang.

C'est généralement après un coup de vent fort que les eaux de surface prennent la coloration blanche typique de la malaïgue. Le vent favorise la formation de courants et permet aux eaux anoxiques de fond d'atteindre la bordure Nord de l'étang ; ces eaux très chargées en matière organique (résidus de détroquage et algues) amplifient un phénomène qui n'affectait jusque là que les eaux de fond. Toute la tranche d'eau devient alors anoxique.

12.4 : Pressions atmosphériques

Certaines photos aériennes montrent qu'il existe assez souvent des antagonismes entre les vents et les pressions atmosphériques et que les entrées et sorties d'eau ne sont pas uniquement dues à l'action des vents. Il est vrai cependant que les plus grandes dénivellations observées (1m environ) sont relevées au moment des tempêtes d'équinoxe. Mais l'antagonisme vent-pression peut, probablement, expliquer le développement ou l'arrêt d'une malaïgue.

Les échanges mer-étang se font essentiellement par les canaux de Sète et par le grau de Pisse Saume. Les volumes entrant et sortant par ces deux communications n'ont pas du tout la même importance.

En ce qui concerne les canaux de Sète, en moyenne sur deux ans, le volume d'eau journalier entrant est de 5,05 Millions de m³, le volume journalier sortant est de 5,30 Millions de m³. L'étang est donc globalement exportateur. Au cours d'une année, l'étang exporte vers la mer un volume moyen de 90,5 Mm³.

Pour le grau de Pisse Saume, le volume le plus important ayant transité par ce canal en période de sortant a été de 1,06 Millions de m³ et le volume maximum en période de rentrant a été de 0,60 Millions de m³.

On voit donc que ces deux communications n'ont pas la même importance. Les variations sont d'autant plus importantes que les vents sont violents et que les pressions barométriques favorisent ou contrarient l'action du vent.

13 : Paramètres non étudiés

Aucune donnée n'étant disponible, deux paramètres importants n'ont pas été étudiés pendant les malaïgues :

- l'action de la biomasse algale sur la production et la consommation d'oxygène,
- le rôle de la biomasse phytoplanctonique au cours d'épisodes d'anoxie.

13.1 : Macrophytes

M. Plus (2002) a modélisé l'action des macrophytes sur l'oxygénation de la lagune (fig. 54). Sans algues l'oxygénation de fond est uniforme (6 mmg par litre). Dès que l'on introduit des macrophytes dans la simulation les caractéristiques des eaux de fond se modifient :

apparition de trois zones de sous saturation

- une à l'ouest de la lagune
- une autre dans l'étang des Eaux Blanches
- une troisième dans la crique de l'Angle

Les concentrations en oxygène peuvent alors chuter jusqu'à 15% de la saturation.

13.2 : Phytoplancton

D'après M. Plus (2002) si l'on compare des simulations de production phytoplanctoniques avec et sans macrophytes (Fig. 54), l'ajout de macrophytes dans la simulation entraîne un développement plus important de phyto plancton (environ 15%)

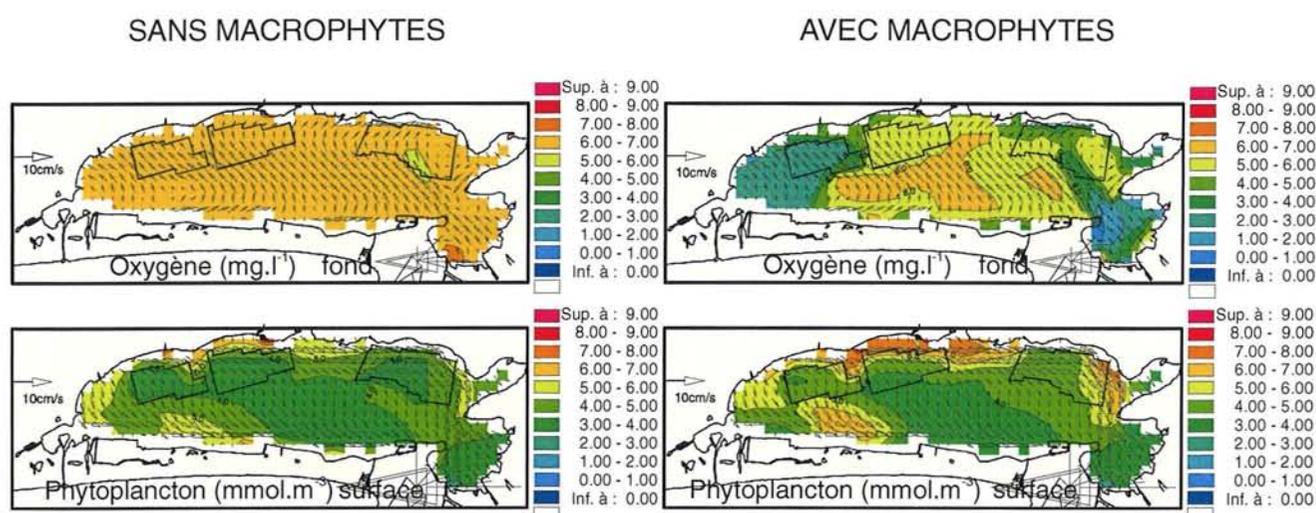


Fig. 54 : simulation de juin (d'après M. Plus)

14 : Comparaison avec une année sans malaïgue

Il existe de nombreuses années où aucune malaïgue n'a été signalée, et où pourtant les couches profondes étaient anoxiques. Nous avons donc choisi l'année 1980 relativement chaude, pendant laquelle le pourcentage de saturation en oxygène a cependant toujours été satisfaisant.

Juin (fig. 55) :

Les températures de l'air sont comprises entre 17 et 23°C.

Les pressions sont comprises entre 1005 et 1025 mb. On peut observer un antagonisme vent et pression entre le 11 et le 17 du mois.

Les vents sont en majorité de secteur Nord avec des vitesses comprises entre 4 et 15 m/s. Il n'y a pas de renverse de vent au cours de la journée.

Juillet (fig. 56) :

Les températures varient entre 19 et 23°C avec un épisode de refroidissement bien marqué entre le 24 et le 26.

Les pressions fluctuent de 1005 à 1025 mb. Il n'existe pratiquement pas d'antagonisme vent pression, excepté le 26.

Les vents le matin sont de secteur Nord, mais on assiste à des renverses importantes en début de mois et du 22 au 31. Les vitesses de secteur Nord varient de 5 à 16 m/s et varient de 1 à 10 m/s de secteur sud.

Août (fig. 57) :

Les températures fluctuent entre 19 et 28°C, avec deux périodes bien marquées de refroidissement aux environs du 15 et du 25.

Les pressions varient entre 1010 et 1022 mb.

Les vents sont essentiellement de secteur Nord et peuvent parfois être très violents (supérieurs à 20 m/s le 16 et très souvent supérieurs à 5 m/s). Ceux de secteur Sud peuvent parfois atteindre des vitesses assez élevées (entre 5 et 10 m/s).

On peut noter deux épisodes d'antagonisme vent pressions (entre le 9 et le 11 et entre le 18 et le 21).

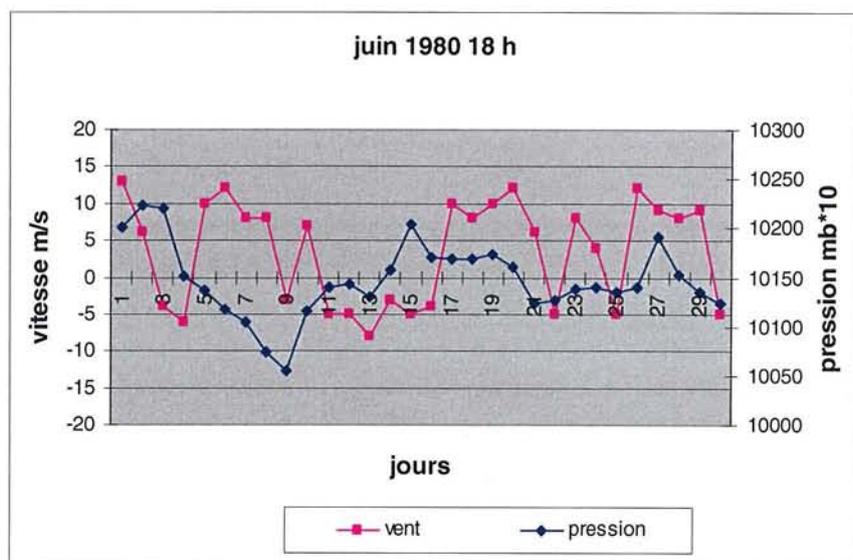
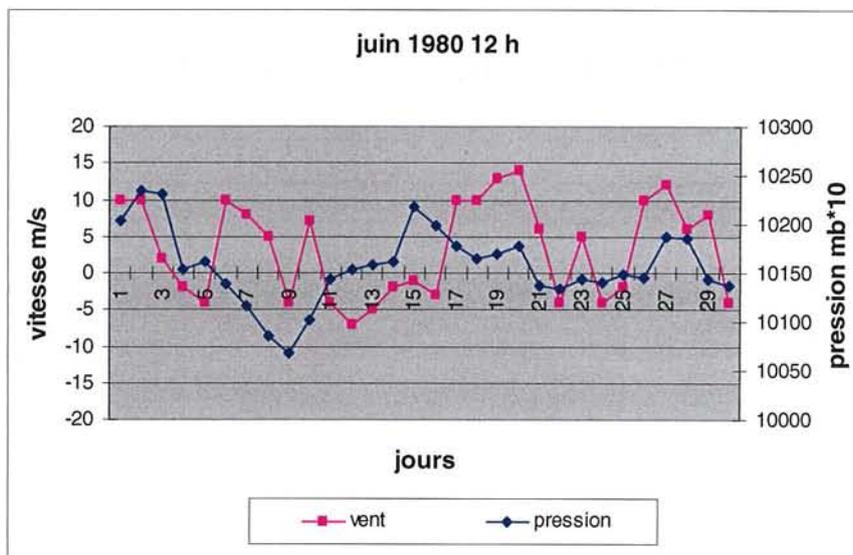
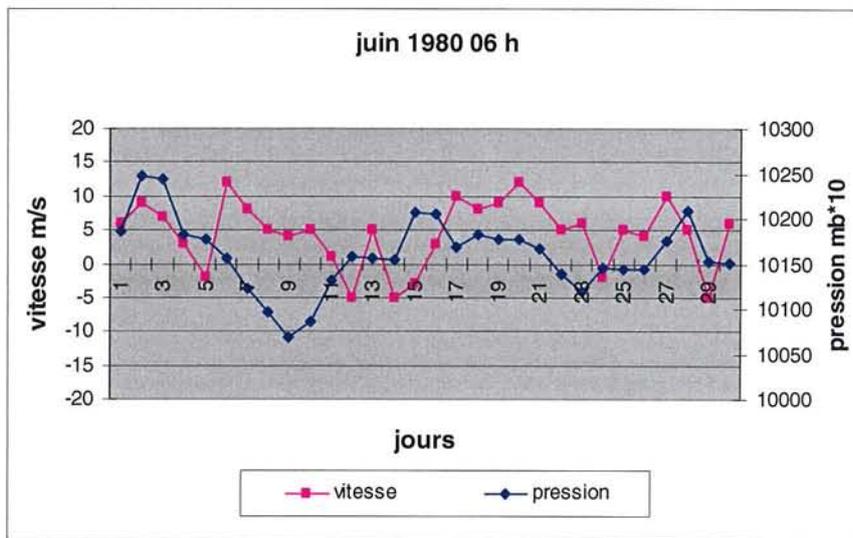


Fig. 55 : relation vent pression en juin 1980

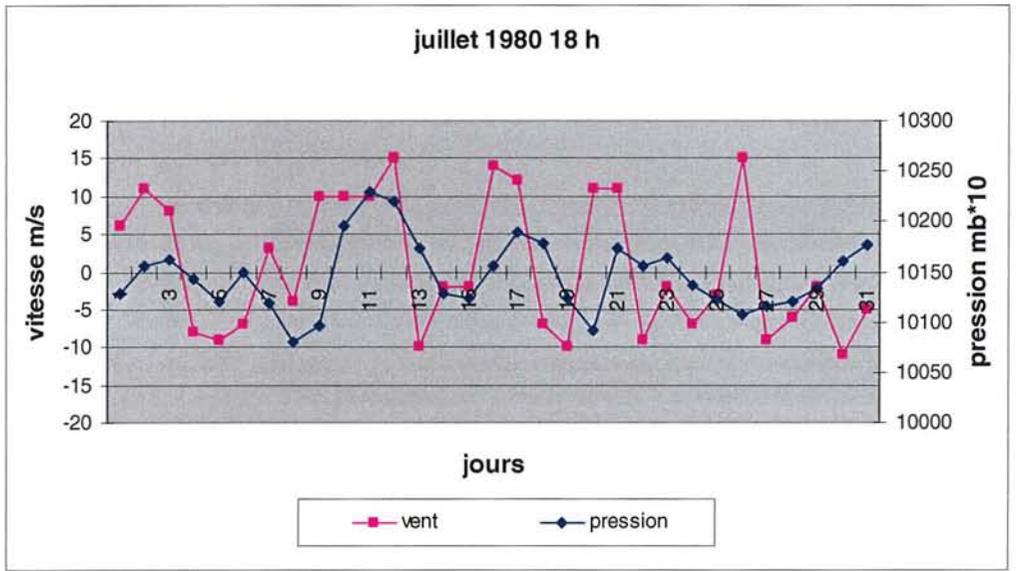
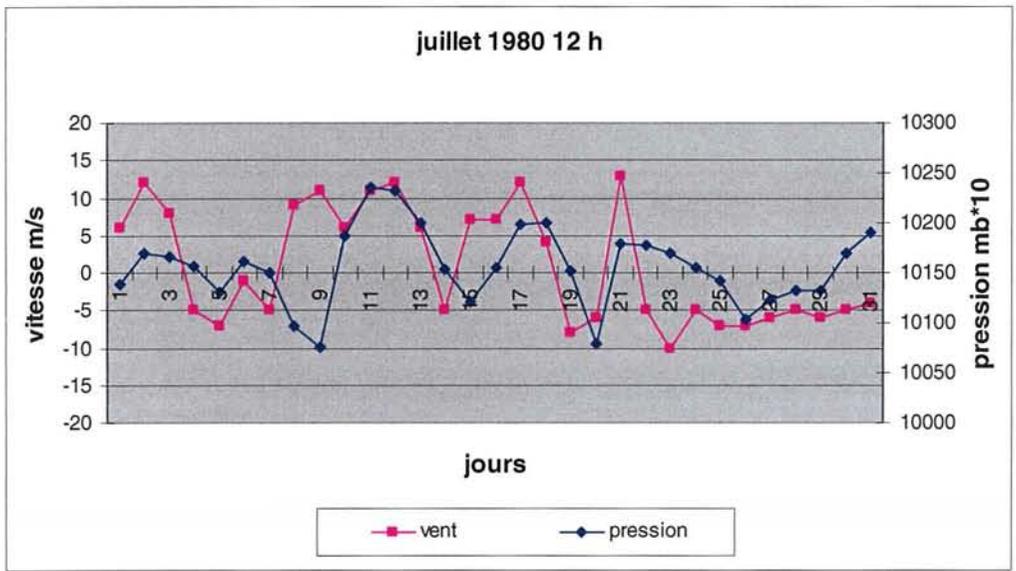
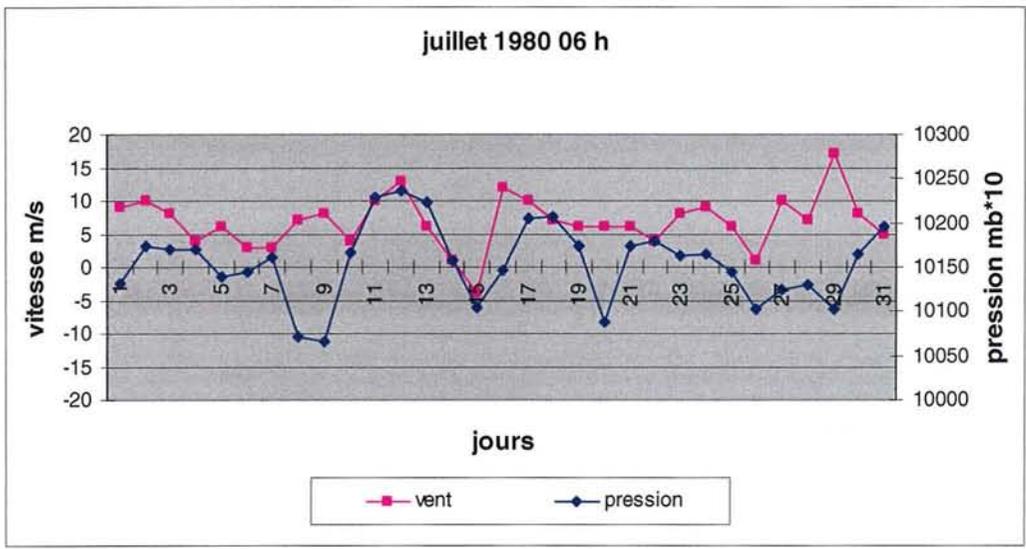


Fig. 56 : relation vent pression en juillet 1980

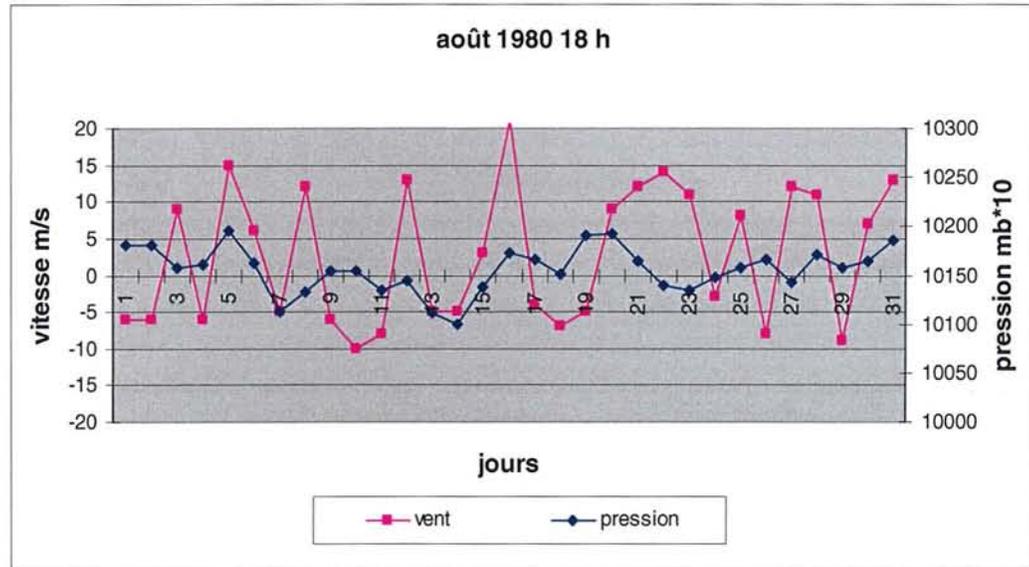
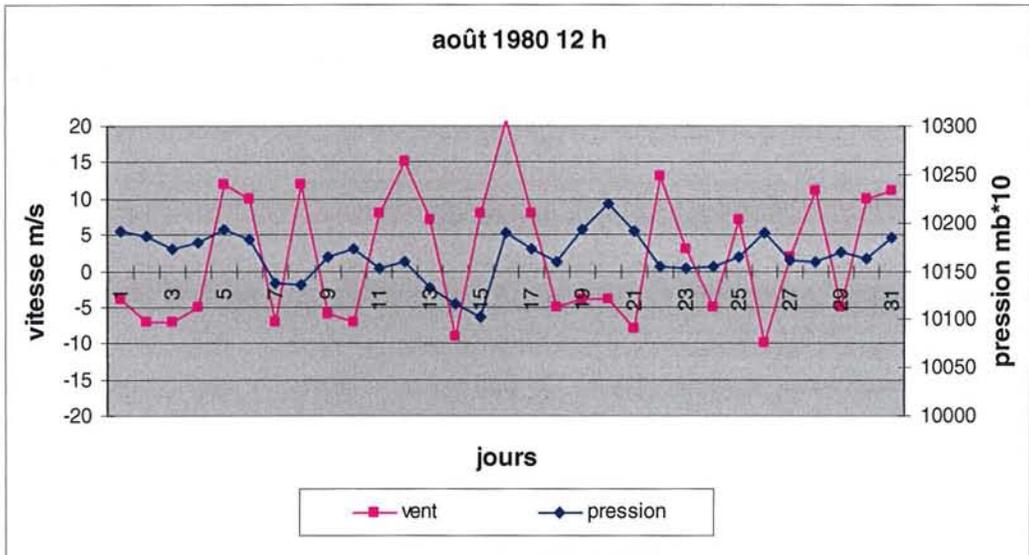
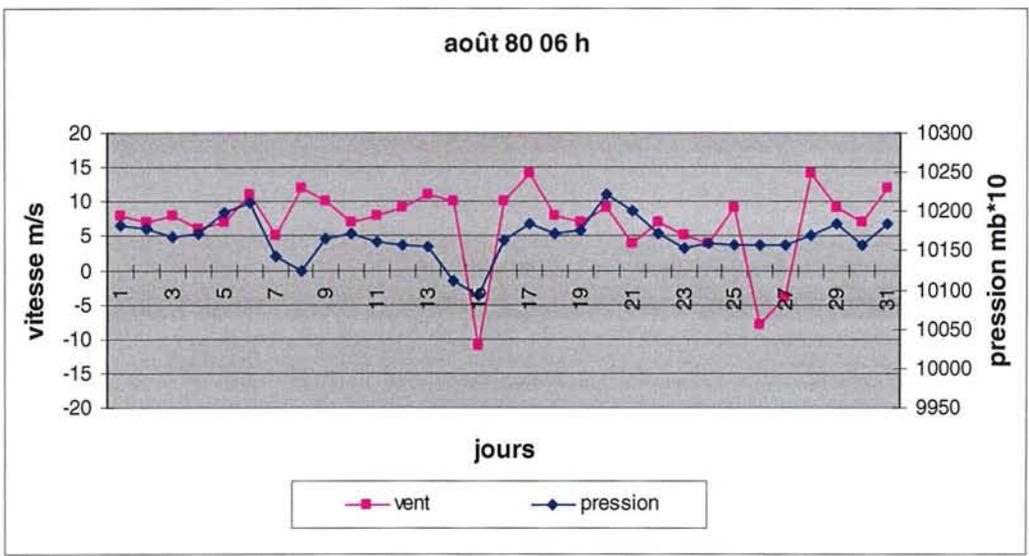


Fig. 57 : relation vent pression en août 1980

Physico-chimie :

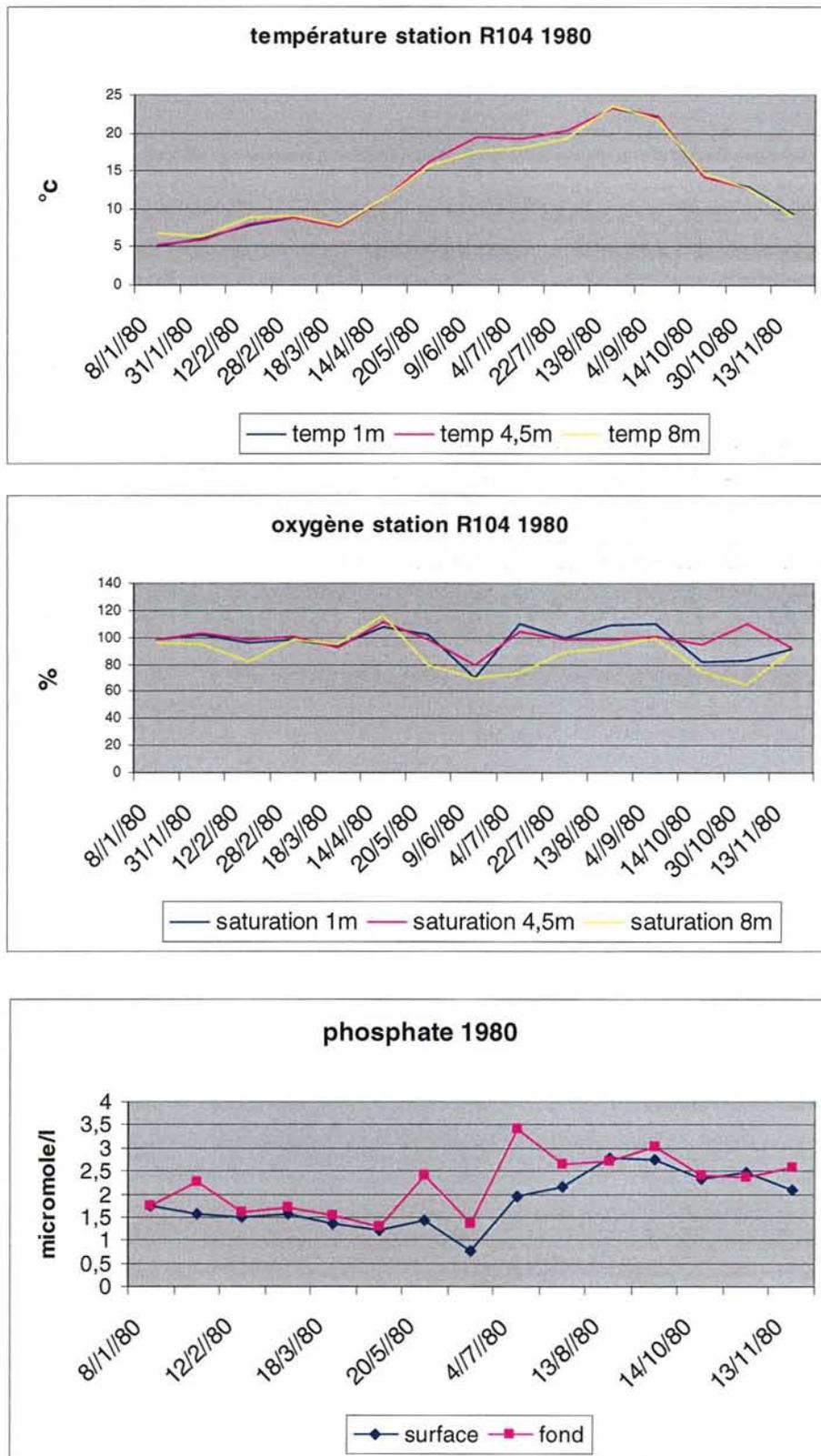


Fig. 58 : physico-chimie 1980 (température de l'eau, oxygène dissous et phosphate)

Les températures de l'eau sont comprises entre 5 et 23°C. Elles augmentent régulièrement du mois d'avril au début septembre et sont supérieures à 20°C de fin juillet à la mi-octobre.

Une thermocline très nette apparaît entre 4,5 m et 8 m de juillet à la fin Août (1 à 2°C de différence).

De la surface à - 4 m les concentrations en oxygène sont pratiquement toujours à 100% sauf pendant le mois de juillet où l'on assiste à une baisse de la saturation (70%).

Sur le fond une légère désoxygénation peut s'observer du mois de juin au mois de septembre le minimum de 70% est observé en juillet.

Les phosphates de surface sont compris entre 0,7 et 2,8 μ moles, avec deux phases distinctes : pendant le premier semestre les valeurs sont inférieures à 1,5 μ moles et le deuxième semestre où elles sont toujours supérieures à 2 μ moles. Les concentration de fond sont toujours supérieures à celles de surface, avec le même cycle observable : valeurs assez faibles pendant les six premiers mois et augmentation très nette pendant le deuxième semestre (valeur maximum de 3,5 μ mole). Ces valeurs élevées du deuxième semestre sont celles que l'on peut relever après les malaïgues.

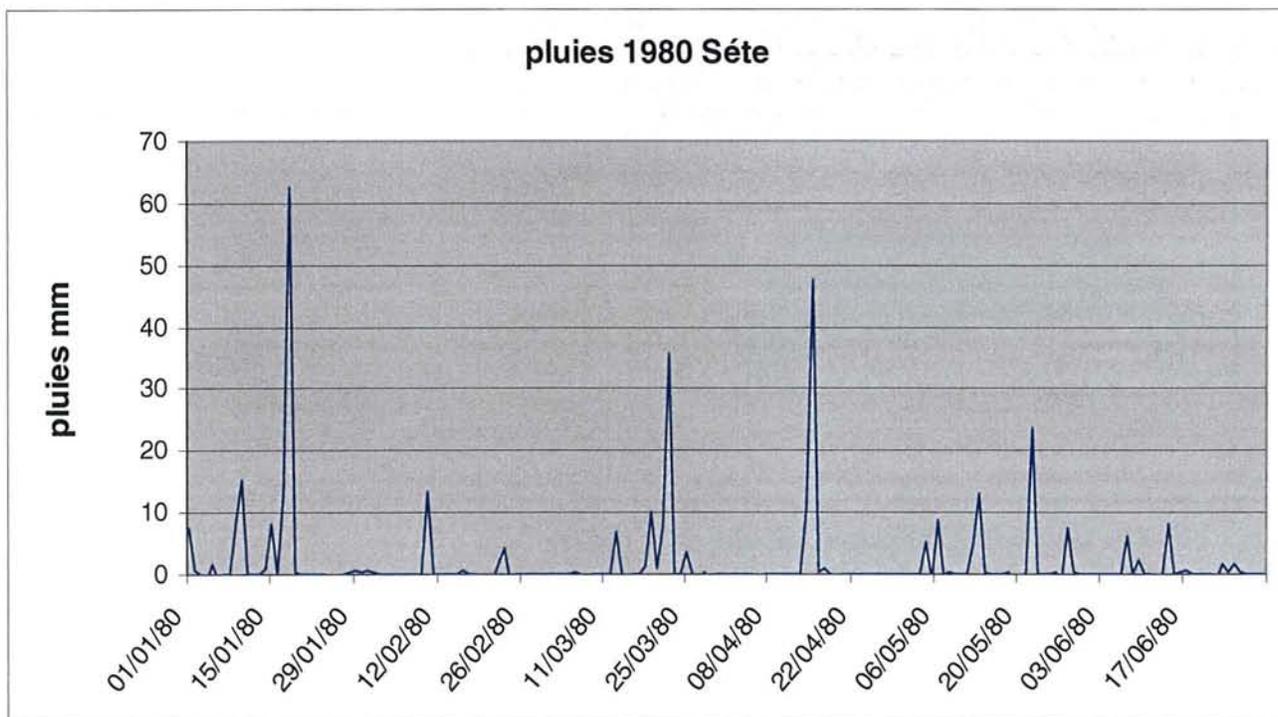


Fig. 59 : pluies 6 mois avant la période estivale 1980.

15 : Modèle de simulation (fig. 60)

Chapelle *et al.* (2000) ont utilisé un modèle de simulation pour étudier l'évolution des malaïgues et pour proposer des améliorations à apporter dans la lagune afin de diminuer l'importance de ces phénomènes anoxiques. Ce modèle a été partiellement décrit par P. Lazure en 1992.

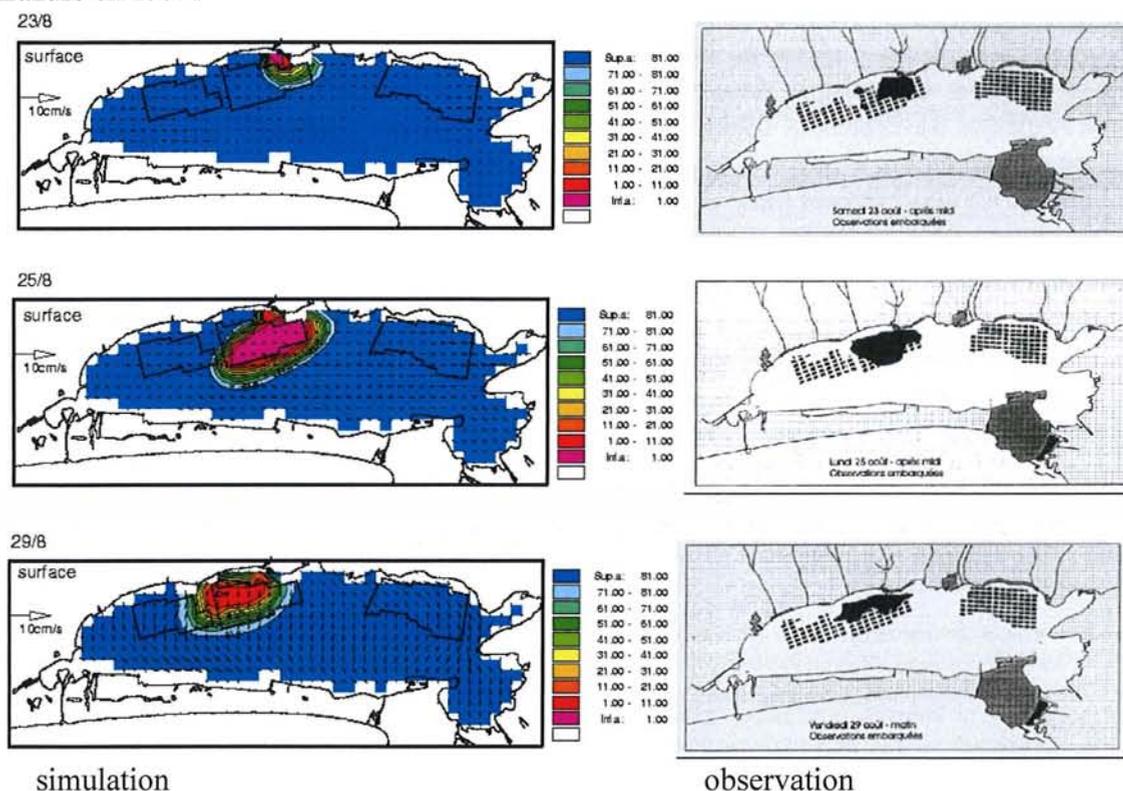


Fig. 60 : simulation d'après Chapelle *et al.* (2000)

En fonction des résultats obtenus, grâce au modèle de simulation, un travail beaucoup plus approfondi doit être mené sur l'origine des malaïgues, tel que la recherche de situations météorologiques particulières (vent pressions températures) pour dresser un tableau des risques en fonctions de la situation météorologique des jours précédents (Chapelle *et al.* 2000).

Ces auteurs préconisent aussi de mieux connaître l'état trophique des zones foyers.

16 : Conclusions

L'étang de Thau est constitué d'une mosaïque de biotopes allant du faciès sableux peu chargé en matières organiques (lido) à des vases anoxiques dans les secteurs profonds ou sous les tables conchylicoles. Il existe donc dans le milieu des zones qui tous les ans pourraient présenter des désoxygénations importantes .

Les malaïgues dépendent d'une part, de la teneur en matière organique des sédiments et de la colonne d'eau et d'autre part des conditions météorologiques .

-Matière organique

Toutes les études concernant la composition et les interactions entre les divers compartiments ne sont pas encore terminées et il faudra attendre environ un an avant d'avoir un bilan très précis. On ne peut pour l'instant que donner des indications assez grossières.

En ce qui concerne l'azote la différence entre les entrées (apports du bassin versant, pluies etc.) et les sorties (productions conchylicoles et halieutique, déchets divers) serait approximativement de 115 tonnes par an, soit environ 50 % des apports annuels qui se stockeraient dans la lagune (Pichot *et al*,1994). Il serait nécessaire de pouvoir quantifier précisément les échanges mer-étang

Pour le phosphore le bilan entrées-sorties est évalué a 23 tonnes par an ce qui représenterait 70 % des apports susceptibles d'être stockés. Les apports sont essentiellement d'origine urbaine. « Le stockage sous forme biologique est réduit et les stocks dissous restent très importants (Pichot *et al* 1994) .

Il serait intéressant de savoir à partir de quel tonnage de matières organiques on atteint une masse critique susceptible d'entraîner le développement d'une crise anoxique. Il n'en demeure pas moins qu'il existe encore pour certains compartiments des estimations qui seront assez difficiles à évaluer, apports par les résurgences, enfouissement des apports, importance exacte des activités conchylicoles etc.

Conditions météorologiques

En absence de vent et avec de fortes températures le risque de malaïgue est très important (Tournier *et al*,1990).Il semble cependant que ces deux seuls paramètres ne suffisent pas à expliquer l'apparition d'anoxies.

Le phénomène malaïgue visible n'est que l'aboutissement d'un processus qui a débuté plusieurs jours, voire plusieurs semaines auparavant. Il est possible pour illustrer ce fait de se référer à la crise de 1975 dont les premières manifestations (désoxygénation des couches profondes) ont été relevées vers la mi-juin et dont les manifestations visibles en surface ne sont apparues que dans la première quinzaine d'août. Il en est de même pour la crise de 1982 où les premières baisses d'oxygène sont apparues dès le 22 juin et les manifestations de surface le 22 juillet, donc un mois plus tard. En 1983 une baisse très nette d'oxygène est constatée dès le 8 juillet et il faut attendre le début d'août pour que des eaux blanches apparaissent en surface.

Les autres malaïgues répertoriées n'ont hélas été suivies qu'à partir de leurs manifestations visibles. Comme les tournées physico-chimiques étaient plus espacées dans le temps ou

inexistantes à partir de 1990, à partir de cette date il est donc impossible de savoir quand les désoxygénations ont débuté et dans quelle zone.

Si pour 1975, 1982, 1983 l'anoxie a débuté dans les secteurs profonds, hors des zones conchylicoles, l'origine des autres crises ne peut pas être déterminée.

Cela ne permet pas de savoir si toutes les crises ont débuté hors des zones conchylicoles. Or, une telle information est primordiale pour une bonne approche du phénomène.

Pour réellement étudier ces crises, il faudrait avoir les données physico-chimiques de la lagune au moins quinze jours avant l'apparition en surface des eaux blanches. Ces conditions ont été réunies de 1975 à 1985, par la suite les données sont plus fragmentaires ou inexistantes. Seul un modèle hydrodynamique pourrait peut-être permettre de reconstituer des séries manquantes.

L'observation montre qu'avec des conditions de température et de vent qui « *semblent identiques* », certaines années des désoxygénations apparaissent tandis que d'autres le milieu ne réagit pas.

Il n'a pas été possible, avec des traitements statistiques classiques (régressions linéaires, multilinéaires, ACP), de trouver un ou plusieurs facteurs commun à toutes les crises recensées.

Il est certain que la température joue un rôle, le vent aussi a une influence (ne serait-ce que favoriser l'apparition en surface des malaïgues : c'est en effet toujours après un coup de vent que les eaux blanches apparaissent. Des courants sont induits par les vents qui ramènent les eaux de fond en surface. Par contre il est difficile de généraliser en affirmant que les malaïgues sont dues à l'absence de vent. Il existe d'une part une incertitude sur la vitesse des vents au niveau de l'étang, et d'autre part, excepté l'année 1997, les autres crises se sont déclenchées avec des conditions de vent bien différentes. Il serait donc nécessaire d'obtenir des données météorologiques de stations implantées sur l'étang lui-même et ce en deux sites au moins.

On pourrait penser qu'il existe une association vent-température, mais là encore on ne peut pas mettre en évidence des conditions communes à toutes les crises observées. **Ces deux paramètres ne peuvent donc pas à eux seuls expliquer les crises anoxiques** (il serait nécessaire pour mieux comprendre l'importance des températures de ne pas utiliser la température moyenne journalière mais les températures tri horaires et de mettre en évidence l'importance des écarts nocturnes et diurnes).

D'autres facteurs sont donc à prendre en considération comme les pressions atmosphériques, qui comme le montrent certaines observations aériennes, peuvent contrarier l'action des vents et freiner voire empêcher la sortie des eaux anoxiques vers la mer, ou empêcher l'entrée d'eaux marines oxygénées. Il existe, dans certains cas, un antagonisme ou au contraire une synergie entre les vents et les pressions.

Les marées barométriques jouent certainement un rôle dans la durée et l'importance des crises anoxiques..

L'insolation peut aussi avoir un rôle.

Un ou deux facteurs ne peuvent expliquer l'apparition d'une malaïgue il s'agit plutôt de l'interaction entre plusieurs paramètres.

Si l'on veut comprendre le phénomène malaïgue, et par là même tenter d'agir sur le milieu, il est absolument nécessaire d'utiliser un modèle hydrodynamique. Les descriptions faites dans ce rapport pourraient servir à caler le modèle.

Les premiers essais tentés ont bien montré l'intérêt d'un tel outil aussi bien sur l'apparition des crises anoxiques que sur les actions qui devraient être tentées pour limiter l'impact des anoxies. Cependant le modèle doit être affiné pour proposer des solutions scientifiquement vérifiées et économiquement viables .

Références

- CHAPELLE A., LAZURE P., SOUCHU P. 2001. Modélisation numérique des crises anoxiques (malaïgues dans la lagune de Thau (France). *Oceanologica Acta* 24
- LAZURE P. 1992. Etude de la dynamique de l'étang de Thau par un modèle numérique tridimensionnel. *Vie Milieu* 42, 137-145.
- PICHOT P., XIMENES MC., DESLOUS-PAOLI JM., JUGE C. 1994. Bilan de l'azote et du phosphore dans le système bassin versant-lagune de Thau. *Rapport Int. DEL/94.11/Sète* pp. 84.
- PLUS M. 2001. Etude et modélisation des populations de macrophytes dans la lagune de Thau (Hérault, France). *Thèse Docteur Université Paris 6*.
- SEGALA B. 1985. Contribution à l'étude de la dynamique et de la qualité des eaux en milieu lagunaire et côtier par la télédétection aérienne. *Thèse 3^e cycle, Univ. Montpellier II: 150pp.*
- SOUCHU P., GASC A., CAHET G., VAQUER A., COLLOS Y., DESLOUS-PAOLI J.-M. 1997. Biogeochemical composition of Mediterranean waters outside Thau lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 44:275-284.
- SOUCHU P., GASC A., VAQUER A., COLLOS Y., TOURNIER H., BIBENT B., DESLOUS-PAOLI J.M. 1998. Biogeochemical aspects of bottom anoxia in a Mediterranean lagoon (Thau, France). *Mar. Ecol Prog. Ser.* 164 : 135-146.
- SOUCHU P., ABADIE E., VERCELLI C., BUESTEL D., SAUVAGNARGUES J.C. 1998. La crise anoxique du bassin de Thau de l'été 1997. Bilan du phénomène et perspectives. *R.INT.DEL/98.04/SETE*
- TOURNIER H., HAMON PY., ARNAUD P. 1979. Développement de la malaïgue en 1975 dans l'étang de Thau. *Rapport. Comm. Int. Mer Médit.* 25-26./03 pp. 103-104.
- TOURNIER H., AUDABRAM D., LANDREIN S., DESLOUS-PAOLI JM. 1990. L'oxygène dans l'étang de Thau. Contribution à l'étude du risque de « malaïgue ». *Rapport Int. IFREMER DRO. 90.02.LEM/Sète* pp. 27.