

Camille Brissac

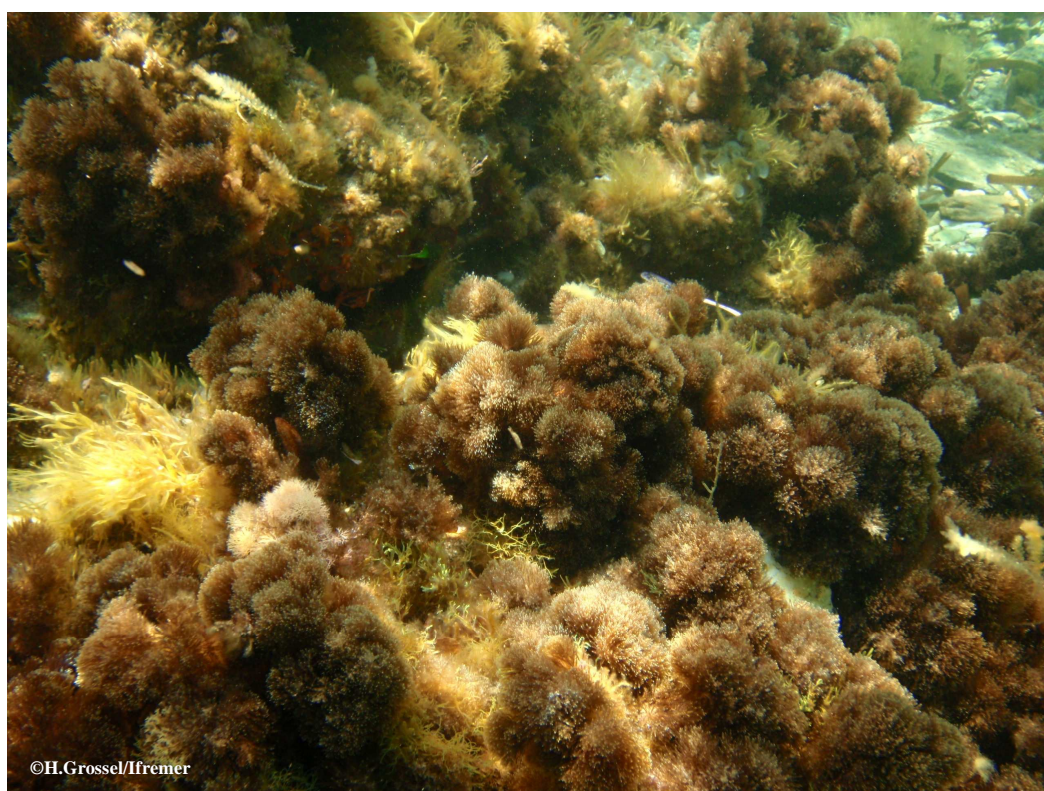
Hubert Grosse

Nicolas Ganzin

Août 2012 - RST.ODE/LER-PAC/12-18

## Projet OSCREEN / Volet 2 : influence des paramètres environnementaux sur le stock d'*Ostreopsis sp.* macroalgal

Campagne été 2011



©H.Grosse/Ifremer

*Couverture macroalgale au Brusuc (Var) : île du Petit Gaou*



Projet OSCREEN / Volet 2 : influence  
des paramètres environnementaux sur  
le stock d'*Ostreopsis sp.* macroalgal

Campagne été 2011



<b>Numéro d'identification du rapport</b> : RST.ODE/LER-PAC/12-18		<b>date de publication</b> : août 2012
<b>Diffusion</b> : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		<b>nombre de pages</b> : 78
<b>Validé par</b> : Bruno Andral Adresse électronique : Bruno.Andral@ifremer.fr		<b>bibliographie</b> :
		<b>illustration(s)</b> :
		<b>langue du rapport</b> : français
Projet OSCREEN / Volet 2 : influence des paramètres environnementaux sur le stock d' <i>Ostreopsis sp.</i> macroalgal – Campagne été 2011		
Convention AERM&C / Ifremer n° 2011-1353    Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
<b>Auteurs principaux</b> :		<b>Organisme / Direction / Service</b> Ifremer
Camille Brissac		LER-PAC
Hubert Grossel (Ifremer, coordonnateur)		
Nicolas Ganzin		
<b>Collaborateurs</b> :		ECOMERS/Université de Nice
Aurélie Blanfuné		Conseil Scientifique des Îles de Lérins
Françoise Loquès		Observatoire marin du littoral des Maures
Valérie Vidal		CEN PACA / Parc Maritime des Îles du Frioul
Matthieu Imbert		Parc Marin de la Côte Bleue
Frédéric Bachet		STARESO / Calvi
Anne Goffart		Ifremer / LER-PAC-Corse
Yoann Baldi		Ifremer / LER-PAC-la Seyne sur Mer
Fabienne Chavanon, Françoise Mirallès,		
Christophe Ravel		
Destinataire :		
<b>Résumé</b>		
Après avoir traité dans son volet 1 de la répartition géographique du stock d' <i>Ostreopsis</i> macroalgal, en région PACA, en Languedoc-Roussillon et en Corse, le projet OSCREEN a pour objectif dans son volet 2 de caractériser à partir de données spatialisées issues de modèles et d'imagerie satellitaire les conditions environnementales d'apparition des blooms de l' <i>Ostreopsis</i> macroalgal, afin de venir en appui à l'optimisation de réseaux d'alerte. La variabilité et les interférences multifactorielles empêchent de décrire des scénarii généralisables entre sites. Mais l'approche spatiale a permis de mettre en évidence le lien potentiel entre l'importance des blooms et les dessalures d'un site. Le travail suggère des pistes de recherches à développer.		
<b>Abstract</b>		
After determining, in its part 1, the geographical distribution of the macroalgal stock of <i>Ostreopsis</i> in the PACA region, Languedoc-Roussillon and Corsica, the OSCREEN project has for objective in its part 2 to characterize from spatial data produced by models and by satellite imagery the environmental conditions of appearance of the blooms of macroalgal <i>Ostreopsis</i> , to abut to the optimization of warning systems. Variability and multifactorial interferences prevent to describe generalized scenarios between sites. But the spatial approach has highlighted the potential link between the size of blooms and declines in salinity for a site. The work suggests paths for research to develop.		
<b>Mots-clés</b> : <i>Ostreopsis sp.</i> , stock macroalgal, couverture géographique, côtes méditerranéennes françaises, température, vent, salinité, modèles hydrodynamiques, imagerie satellitaire, prévision du risque.		
<b>Words keys</b> : <i>Ostreopsis sp.</i> , macroalgal stock, geographic coverage, French Mediterranean coasts, temperature, wind, salinity, hydrodynamic models, satellite imagery, risk forecast.		



# sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Objectifs .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Méthodologie.....</b>	<b>17</b>
3.1. Les partenaires et les sites de prélèvement.....	17
3.1.1. Description des stations.....	19
3.2. Facteurs environnementaux : choix, description et obtention des données .....	25
3.3. Les données spatialisées pour la caractérisation environnementale.....	25
3.3.1. Qu'est-ce qu'une donnée spatialisée ?.....	25
3.3.2. Données spatialisées disponibles pour l'étude .....	27
<b>4. Résultats.....</b>	<b>31</b>
4.1. Validation des données spatialisées disponibles .....	31
4.2. Variabilité spatio-temporelle et dynamique de croissance de l' <i>Ostreopsis</i> macroalgal en relation avec l'environnement.....	34
4.2.1. Carry .....	34
4.2.2. Le Frioul : calanque de Morgeret .....	36
4.2.3. Le Brusco.....	40
4.2.4. Cavalaire.....	42
4.2.5. Les Iles de Lérins.....	44
4.2.6. Nice.....	46
4.2.7. La Corse : Calvi et Grigione .....	48
4.3. Comparaison inter stations et bilan.....	51
4.3.1. Amplitude des stocks d' <i>Ostreopsis</i> macroalgal .....	51
4.3.2. Dynamique de croissance des stocks.....	53
4.3.3. Caractérisation environnementale des stations : la température et le vent.....	54
4.3.4. Caractérisation environnementale des stations : la salinité .....	55
4.3.5. Caractérisation environnementale des stations : les variations quotidiennes des paramètres environnementaux. ....	56
4.3.6. Analyse statistique des paramètres environnementaux .....	58
<b>5. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>61</b>
<b>6. Annexes .....</b>	<b>65</b>
6.1. Rose des vents.....	66
6.2. Cartes des salinités issus du modèle (Prévimer) lors de la dessalure de mi-juin à mi- juillet 2008.....	69
6.3. Equations de Reynolds.....	70
6.4. Description des tests statistiques .....	71
6.5. Feuille de calcul des taux de croissance et des temps de génération pour les 8 sites.....	72
6.6. Données pluviométriques mensuelles .....	73
6.7. Tableau des mesures des prélèvements terrain.....	74





## Remerciements

Nous remercions pour leur participation à ce projet :

- Aurélie Blanfuné, Ingénieur de recherche au laboratoire ECOMERS, Université de Nice.
- Françoise Loquès, Directrice du Conseil Scientifique des Îles de Lérins.
- Valérie Vidal, chargée de mission à l'Observatoire marin du littoral des Maures
- Matthieu Imbert, et Patrick Vidal (Directeur), du CEN PACA / Parc Maritime des Îles du Frioul.
- Frédéric Bachet, Directeur du Parc Marin de la Côte Bleue.
- Anne Goffart, de la STARESO à Calvi.

Nos collègues Ifremer du LER-PAC Ivane Pairaud et Sylvain Coudray ainsi que Francis Gohin (ODE-DYNECO-PELAGOS à Ifremer/Brest) pour leur appui et leurs conseils dans le traitement des données spatialisées (données satellitaires et de modélisation).

La Compagnie Nationale du Rhône pour la fourniture des données de débit du Rhône.

## Hommage

Nous rendons hommage à Nicolas Ganzin, Docteur, cadre de recherche au LER-PAC, spécialiste du traitement des données spatialisées, qui a été à l'origine de ce travail et l'avait mis en place. Il commençait juste à en exploiter les données lors de son décès brutal au début du mois de septembre 2011.



# 1. Introduction

La problématique toxique liée à la présence de l'*Ostreopsis* sp. le long des côtes méditerranéennes françaises, mais aussi sur l'ensemble de la Méditerranée occidentale, pose la question de la compréhension de la genèse de ces phénomènes désormais récurrents en saison estivale aux équipes scientifiques, aux acteurs en charge des surveillances environnementales des milieux côtiers, ainsi que de la gestion sanitaire des usages (activités balnéaires, surveillance des produits de la mer...). Les conditions environnementales initiant l'implantation du stock macroalgal de l'*Ostreopsis* aux prémices du printemps, celles qui favorisent l'émergence des blooms en saison avancée, ont fait l'objet de nombreux travaux par des équipes de recherche des pays riverains.

Le rôle majeur de la température dans sa composante saisonnière sur le développement de la population de l'*Ostreopsis* est unanimement admis. Par contre, les équipes scientifiques impliquées dans le recensement et l'observation d'évènements liés à l'*Ostreopsis* ou les surveillances environnementales dédiées à cette espèce arrivent à des interprétations contrastées. Ces difficultés portent sur l'influence à court terme (évènements climatiques de l'ordre de quelques jours ou de la semaine) des variations de la température ainsi que celles des différents facteurs environnementaux accompagnant l'implantation de l'*Ostreopsis* macroalgal et le développement de ses blooms.

Les principaux paramètres environnementaux examinés sont en général la température, la salinité, plus secondairement les teneurs en nutriments, l'irradiance, mais aussi le degré d'agitation de la mer, souvent caractérisé à partir les conditions météorologiques des vents, ou la présence de la houle.

Dans le volet 1 du projet OSCREEN<sup>1</sup> réalisé en 2011, il a été établi l'ubiquité de répartition de l'*Ostreopsis* le long des côtes méditerranéennes françaises, mais avec différents niveaux de présence de l'*Ostreopsis* macroalgal :

- Présence inégale selon les sites mais potentiellement très forte à l'Est de PACA ;
- Présence moins forte à l'Ouest de PACA (mais avec possibilité localisée de fort développement, comme on a pu le constater antérieurement sur les îles du Frioul) ;
- Présence inégale et ubiquiste en Corse, avec potentialité de fort développement sur la côte occidentale entre Propriano et l'Île Rousse ;
- Présence éparse et toujours faible (selon les observations de l'été 2011) en Languedoc-Roussillon sur les zones rocheuses ou les ouvrages en enrochements, avec une absence constatée sur les premiers sites investigués dans les Pyrénées orientales juste au nord de la frontière espagnole.

<sup>1</sup> Projet OSCREEN : screening sur le littoral français méditerranéen du stock d'*Ostreopsis* sp. macroalgal – volet 1 : approche géographique – rapport scientifique et technique de Ifremer Juin 2012 – RST.ODE/LER-PAC/12-16.

Cet examen de la répartition spatiale du stock macroalgal de l'*Ostreopsis* repose pour le volet 1 d'OSCREEN sur 3 campagnes d'échantillonnages espacées d'un mois (juin, juillet et août). Aussi il est apparu utile dans le présent volet 2 de compléter cet échantillonnage, sur quelques stations, par des prélèvements plus serrés dans le temps, afin de mieux apprécier l'évolution temporelle du stock d'*Ostreopsis* macroalgal. L'objectif de cette étude, développé ci-dessous, prend la suite d'une première approche exploratoire réalisée à l'Ifremer de la Seyne-sur-Mer lors du stage de Julien Sgheiz en 2009<sup>2</sup>. Dans ce travail, une analyse préliminaire des températures estivales de surface par satellite a permis de distinguer dans la zone d'étude deux sous-zones : une zone « Ouest-Provence » aux eaux relativement froides et agitées et une zone « Est-Provence et Ligurie » moins ventée et aux eaux plus chaudes. L'analyse n'a pas permis alors d'identifier de scénarii environnementaux favorables à l'*Ostreopsis* qui soient évidents et généraux. Néanmoins des éléments intéressants ont semblé s'en dégager : en zone Ouest, les proliférations semblent apparaître le plus souvent suite à des baisses brutales de température (coup de vent) suivies de remontée rapide de la température, à un niveau de température relativement bas, de l'ordre de 22 degrés. En zone Est, en revanche, les proliférations se feraient plutôt suite à des conditions calmes prolongées avec des températures élevées de l'ordre de 26 degrés.

Cette étude de 2009 a montré clairement l'intérêt des données spatialisées pour la caractérisation des conditions environnementales propices à l'*Ostreopsis*. Complémentaires des données de terrain qui sont inévitablement ponctuelles, elles apportent une dimension spatiale et temporelle permettant d'identifier des changements autrement indétectables. L'étude conclut en ouvrant des perspectives d'intérêt de ce type d'approche en appui à la définition de futurs systèmes de surveillance et d'évaluation du risque lié à l'*Ostreopsis*.

Enfin, toutes ces réflexions se font alors que se mettent en place les dispositions réglementaires<sup>3</sup> relatives à la surveillance sanitaire et environnementale de l'*Ostreopsis* pour les eaux de baignade. Cette surveillance concerne actuellement un nombre restreint de sites de baignade. Elle ne porte que sur le dénombrement de l'*Ostreopsis* dans l'eau, et, se référant à deux niveaux d'alerte (30 000 et 100 000 cellules d'*Ostreopsis*/litre), prend en compte dans ses algorithmes décisionnels « surveillance humaine » et « surveillance environnementale » les conditions et les prévisions météorologiques touchant particulièrement au régime de vent, en raison du risque de formation d'embruns éventuellement porteurs de toxines, comme constaté à San-Andreu de Llavaneres sur la côte catalane en 2004 et à Gênes (Italie) en 2005. Dans ses considérants, cette note de service<sup>3</sup> précise les modalités de gestion des produits de la mer issus de la pêche de loisir.

---

<sup>2</sup> Julien Sgheiz, 2009, Caractérisation environnementale du développement et du passage en suspension de l'algue toxique *Ostreopsis* à l'aide de données spatialisées, rapport de stage Master2 « Environnement marin », C.O.M.

<sup>3</sup> NOTE DE SERVICE N°DGS/EA3/EA4/2010/238 du 30 juin 2010 relative à la surveillance sanitaire et environnementale et aux modalités de gestion des risques sanitaires pour la saison balnéaire 2010, liés à la présence de la microalgue toxique *Ostreopsis* spp. dans les eaux de baignade en méditerranée et à la contamination par ses toxiques des produits de la mer issus de la pêche de loisir. Ministère de la Santé et des Sports, Direction Générale de la Santé.

Dans le cas des baignades, les communes littorales ont à définir les « profils » de chacun de leurs sites de baignade, et dans les éléments à renseigner est explicitement listé l'évaluation du risque lié à l'*Ostreopsis*. Il semble bien que le premier élément d'information pertinent réside dans la connaissance de la présence d'un stock macroalgal de l'*Ostreopsis* sur un littoral

De manière assez évidente, il apparaît utile que puissent être précisées les conditions environnementales propices aux efflorescences de l'*Ostreopsis*, dont on sait que le stock macroalgal est le premier support. Dans une optique de surveillance et de réseau d'alerte, il est intéressant d'explorer, avec les outils actuels de détection des paramètres environnementaux (données satellitaires) et avec les outils prédictifs tels que les modèles météorologiques appliqués au domaine marin côtier, notre capacité actuelle à comprendre la genèse des blooms d'*Ostreopsis* et à prévoir, selon les sites, leur risque d'apparition. C'est dans cet objectif que se situe la démarche développée dans le volet 2 du projet OSCREEN.

Pour rappel, la figure ci-après illustre les différents modes de présence de l'*Ostreopsis* dans le milieu côtier, ainsi que les principaux usages encourageant les risques sanitaires associés.

Mais il conviendra de ne pas oublier dans ce contexte d'évaluation générale des risques liés à l'*Ostreopsis* la composante environnementale comprise dans le sens de « l'état de santé de l'écosystème ». Celui-ci doit prendre en compte les effets (i.e. les impacts) de la présence de l'*Ostreopsis* macroalgal **en particulier sur la faune de l'écosystème benthique**, ou fréquentant cet écosystème pour y trouver leur alimentation. Les constats de mortalités d'oursins ne sont qu'un exemple parmi d'autres, pour lesquels les recherches doivent encore se poursuivre.

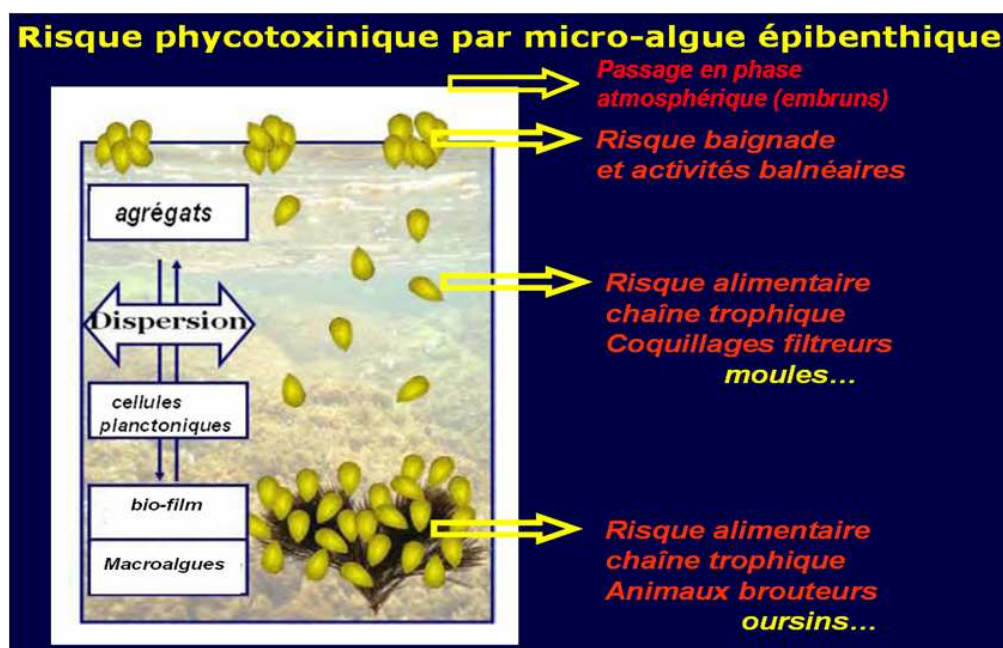


Figure 1 : schéma simplifié des différentes composantes et compartiments où se présente l'*Ostreopsis*, et les risques associés.



## 2. Objectifs

Dans le cadre de ce travail réalisé durant l'été 2011 et soutenu financièrement par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, des contacts ont été établis avec quelques partenaires impliqués dans l'observation du milieu littoral afin de réaliser une série de prélèvements en vue d'évaluer le stock d'*Ostreopsis* macroalgal, selon un pas de temps ajusté par les partenaires en fonction des évolutions constatées de la température de l'eau de mer.

Si l'on admet comme acquis que les macroalgues sont un des principaux réservoirs de l'*Ostreopsis*, la bonne évaluation du stock d'*Ostreopsis* macroalgal doit être un préalable à l'évaluation des risques induits par cette espèce soit directement au niveau benthique, soit en second lieu après décrochage des cellules épibenthiques et passage dans le compartiment planctonique.

C'est par l'usage de données spatialisées telles que les images satellites ou les sorties de modèles hydrodynamiques ou atmosphériques que l'on pourra accéder facilement et rapidement à un certain nombre de variables environnementales.

Ces données se présentent sous forme de grilles de points géoréférencés et permettent d'appréhender des variables environnementales telles que la température, la salinité et le vent avec des avantages indéniables par rapport aux données de terrain très ponctuelles, lorsqu'elles existent. Bien que moins précises, elles leur sont très complémentaires en apportant une dimension spatiale et temporelle bien supérieure. On se propose ainsi d'étudier ces conditions environnementales avec des données satellites (température de surface de la mer) et des données de sortie de modèles hydrodynamiques et atmosphériques (température de surface, salinité et vent).

L'objectif principal de l'étude est, au travers des données échantillonnées, spatialisées et modélisées disponibles, de tenter de caractériser les conditions environnementales qui favoriseraient les efflorescences d'*Ostreopsis* et/ou la disparition de ces phénomènes.

Le rapport commence par une présentation détaillée des différents sites ainsi que des données environnementales utilisées (origine et mode de production des données). Suivra un chapitre portant, après extraction des données environnementales, sur la validation des températures par comparaison des données issues des différentes sources (terrain, modèle et satellite) dans le but de vérifier leur validité pour décrire les conditions environnementales.

Les valeurs environnementales extraites (température de surface, salinité et vent) sont replacées dans le cadre des occurrences d'*Ostreopsis* pour chacun des 8 sites, et utilisées pour élaborer des produits graphiques de caractérisation environnementale de ces événements. C'est à partir de ces graphes que l'on a tenté d'identifier des scénarios environnementaux propices à l'apparition et au développement d'*Ostreopsis* pour ensuite discuter du potentiel des données spatialisées afin d'optimiser la prévention des risques sanitaires qui lui sont liés.

Au final, il s'agit d'apporter à la réflexion en cours sur la (les) stratégie(s) pertinente(s) de surveillance de l'*Ostreopsis* des orientations permettant de guider les choix des gestionnaires par l'usage d'outils susceptibles d'apporter des éléments prédictifs pour la gestion.





### 3. Méthodologie

Les aspects méthodologiques concernant les prélèvements de macroalgues et de décrochage de l'*Ostreopsis* sont ceux qui ont été adoptés pour le volet 1 d'OSCREEN en concertation avec l'équipe de l'Université de Nice (ECOMERS), et transférés aux équipes partenaires.

Les mesures de température de l'eau de mer et de salinité sont réalisées par les équipes partenaires.

Les dénombrements de l'*Ostreopsis* macroalgal sont réalisés par deux méthodes qui ont été statistiquement comparées et déclarées commutables, avec des résultats équivalents au seuil de tolérance de 5%. Il s'agit de la méthode Utermöhl, utilisant un microscope inversé et des chambres de sédimentation de 10 mL, et la méthode utilisant un microscope droit avec des lames de Sedgwick-Rafter de volume 1 mL. Ces dénombrements sont exprimés en nombre de cellules d'*Ostreopsis* par gramme de poids frais de macroalgues (cell./g.PF).

Les données de ce rapport sont archivées et traitées par Excel 2003 et Grapher 8 pour la représentation graphique, et avec le logiciel R 2.12.1 (R Development Core Team 2005) pour les traitements statistiques. Concernant les statistiques, on notera toutefois que les résultats sont à envisager avec prudence au vu de la faible taille des échantillons de dénombrement de l'*Ostreopsis* macroalgal à chaque station (<30 données). A ce titre, certaines lois statistiques comme la normalité ou l'homogénéité des jeux de données n'ont pas pu être établies, d'où le choix d'effectuer le test non paramétrique de corrélation de Spearman. Néanmoins, des tests d'analyse multifactorielle (ACP) ont été utilisés en appui de certaines interprétations. La description de ces différents tests est à consulter en annexe 6.4.

Les équations de Reynolds (1997)<sup>4</sup> ont servi à l'évaluation des taux de croissance et de temps de génération des populations d'*Ostreopsis* macroalgal (annexe 6.3).

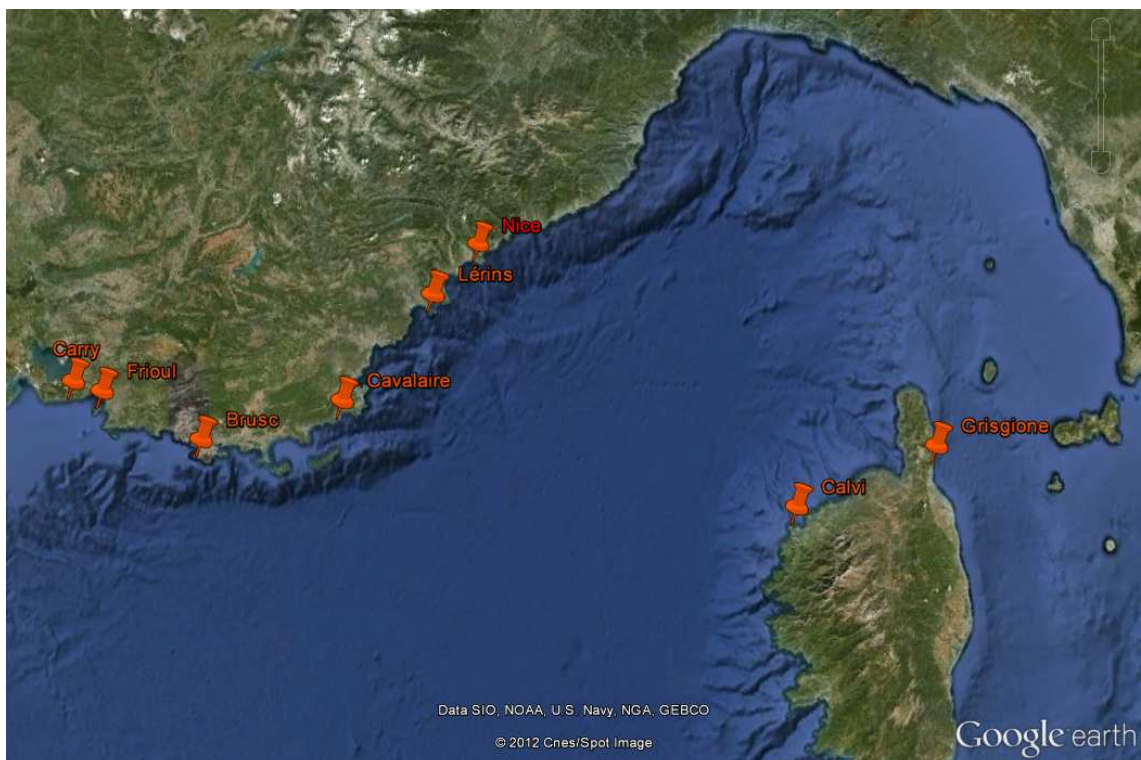
#### 3.1. Les partenaires et les sites de prélèvement

Au total 8 sites ont été sélectionnés, chacun par les partenaires en fonction de son accessibilité et de la typologie de la côte, en privilégiant une côte rocheuse portant une couverture macroalgale significative.

1. Carry le Rouet, sur la Côte bleue à l'ouest de Marseille, avec la collaboration de l'équipe du Parc Marin de la Côte Bleue (Frédéric Bachet, directeur). Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 19.

<sup>4</sup> Reynolds, C. S. (1997) Vegetation Processes in the Pelagic: a Model for Ecosystem Theory, 371 pp., Ecology Institute, Oldendorf.

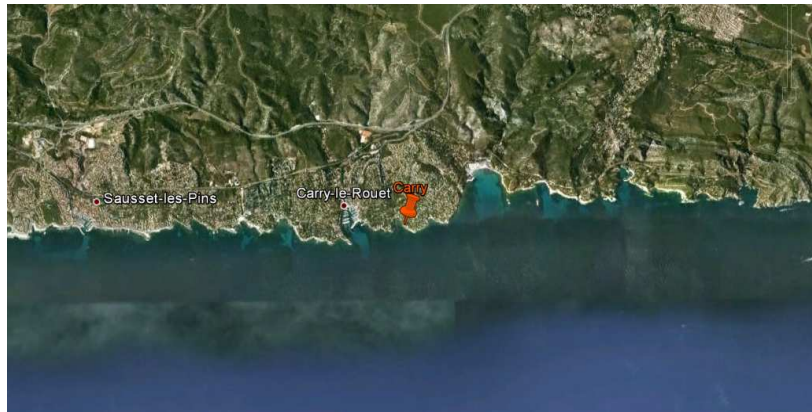
2. La calanque de Morgeret sur l'île du Frioul (rade de Marseille), avec la collaboration du Parc maritime des îles du Frioul (Patrick Vidal, directeur). Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 22.
3. Le Brusco (île du Petit Gaou), commune de Six-Fours, prélèvements et analyses réalisés par l'équipe Ifremer du LER-PAC de la Seyne-sur-Mer. Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 19.
4. Plage de Bonporteau à Cavalaire, avec la collaboration de l'Observatoire Marin du SIVOM du littoral des Maures (Valérie Vidal, chargée de mission). Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 19.
5. Pointe du Dragon, Île Sainte Marguerite (Îles de Lérins), avec la collaboration du Conseil Scientifique des Îles de Lérins (Françoise Loquès, directrice). Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 13.
6. Cap de Nice, prélèvements et analyses réalisés par Aurélie Blanfuné du laboratoire ECOMERS, Université de Nice. Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 8.
7. Plage de Grisghione (nord de Bastia), prélèvements et analyses réalisées par l'Ifremer LER-PAC de Bastia. Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 6.
8. Calvi, au droit de la station de la STARESO. Prélèvements réalisés par l'équipe d'Anne Goffart de la STARESO. Les prélèvements sur ce site ont été au nombre de 15 (dont 10 couvrant la période de l'étude).



### 3.1.1. Description des stations

La description des stations de prélèvement peut apporter des informations importantes pour l'analyse et la compréhension des conditions environnementales ayant régné sur chaque site durant la période de l'étude. En particulier, les conditions de vent influent directement sur l'état de la mer (déferlement des vagues à la côte) en fonction de la configuration de terrain. Dans les descriptions ci-dessous, l'examen du régime des vents durant la période des échantillonnages permet de caractériser une des composantes environnementales importantes qui entrent en jeu dans le décrochage des *Ostreopsis* de leur support macroalgal et leur passage en phase planctonique. Dans les tableaux ci-dessous, les roses des vents (vitesse et origine) présentent pour chaque station la moyenne journalière du 1<sup>er</sup> juin au 15 septembre résultant des calculs de modèles atmosphériques (cf. présentation plus loin).

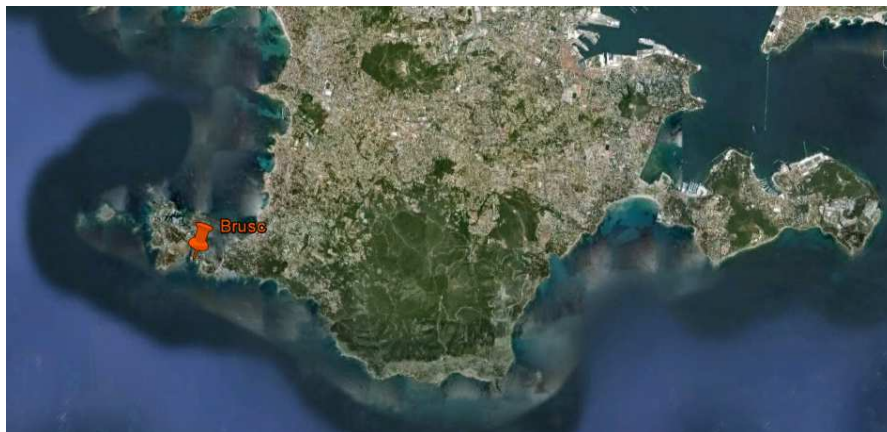
**Carry** : le site de prélèvement se trouve à l'entrée Est de la calanque du Cap Rousset, sur une côte rocheuse accore, globalement rectiligne orientée Est-Ouest à l'Ouest de la rade de Marseille.



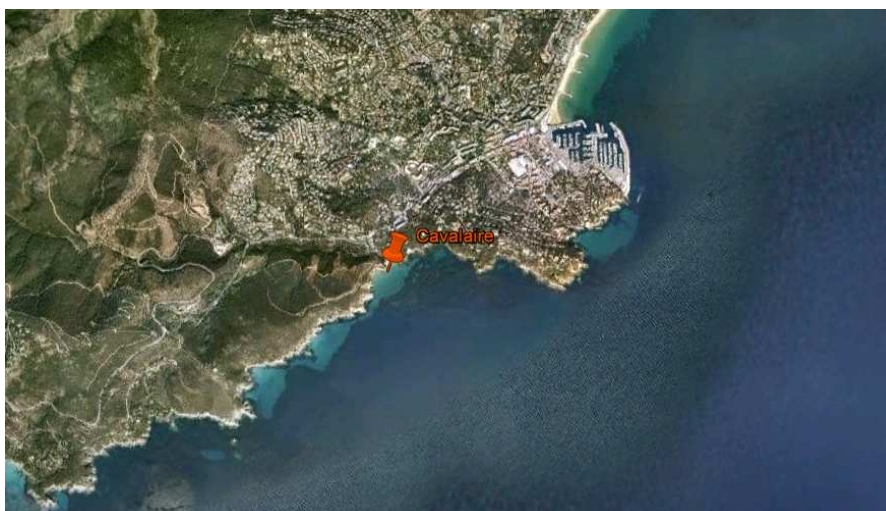
**Le Frioul** : les prélèvements sont réalisés dans la calanque de Morgeret, ouverte en plein Ouest sur l'île Ratonneau. Ce site a été le premier en France à être concerné par une alerte sanitaire liée à l'*Ostreopsis* en août 2006, ce qui lui a valu d'être suivi durant les étés suivants (2007, 2008 et 2009) pour des programmes de recherches dédiés à l'*Ostreopsis*. Les données correspondantes à ces trois années sont utilisées dans le présent rapport.



**Le Brus** : les prélèvements sont réalisés dans une petite crique située à l'ouest de l'île du Petit Gaou, tournée vers le Sud, proche de la passe qui la sépare de l'île des Embiez.



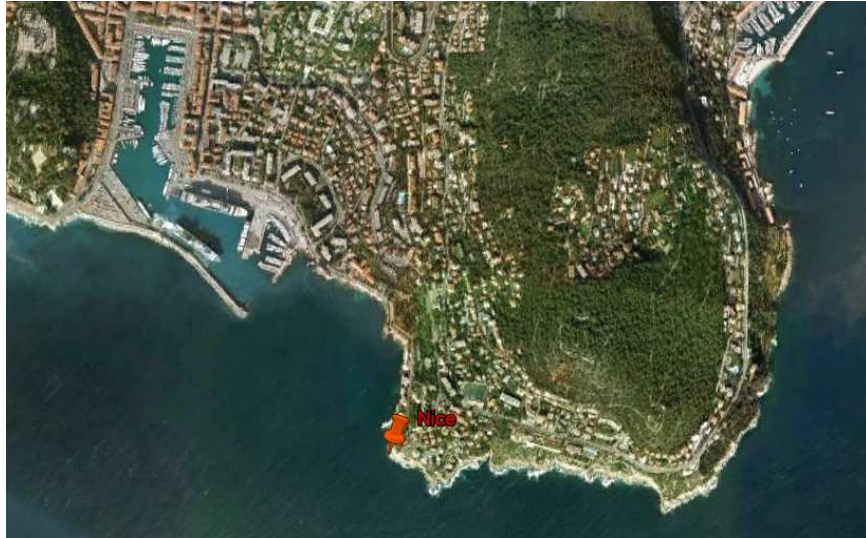
**Cavalaire** : les prélèvements sont réalisés sur la pointe rocheuse à l'Ouest de la plage de Bonporteau.



**Îles de Lérins** : les prélèvements sont faits sur les rochers de la pointe du Dragon de l'île Sainte Marguerite.



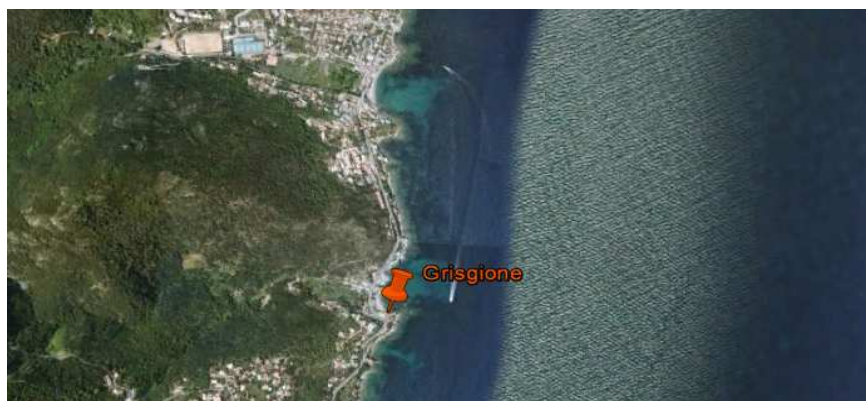
**Nice** : les prélèvements sont réalisés sur le cap de Nice, à l'Est de la sortie du port, dans une mare peu profonde mais ouverte sur la mer (pénétration de l'eau avec les vagues).


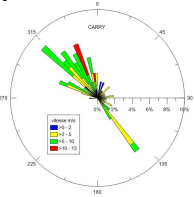
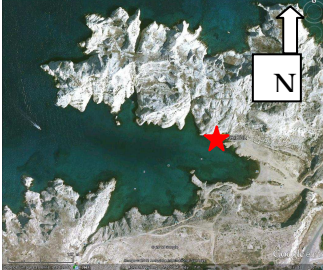
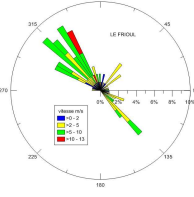
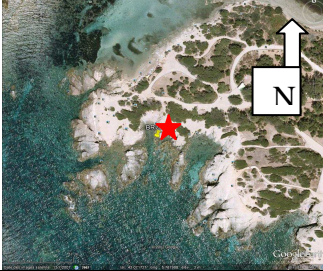
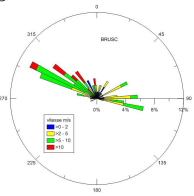

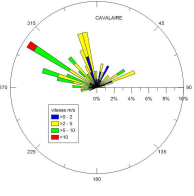


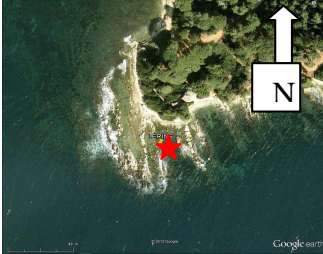
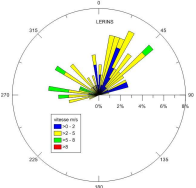

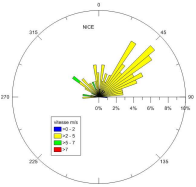

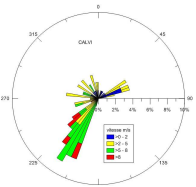

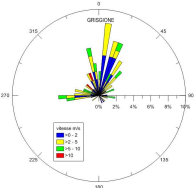
**Calvi** : prélèvements au droit de la station STARESO de l'Université de Liège.



**Grigione** : prélèvements sur la pointe au sud d'une petite plage à environ 3 km au Nord de Bastia.



Vue satellitaire des sites d'étude	Stations et coordonnées géographiques	Régimes des vents (détails en annexe 6.1)	Température (eau)	Ostreopsis (charge macroalgale)	Occurrences des pics d'Ostreopsis M	Caractéristiques géomorphologiques des stations
	CARRY 43.32812°N 5.16148°E	Min :0.8 m/s Max :11.3 m/s Moy :4.4 m/s 	Min : 16°C Max : 22°C  Moyenne : 18.7°C	Min : 73 cell/g Max : 47780 Moy : 8944	24/08/11 >450000 cell/g	Anse ouverte côté S-SE avec un environnement rocheux
	LE FRIOUL (calanque du Morgeret) 43.282688°N 5.304805°E	Min :0.7 m/s Max :11.4 m/s Moy :4.4 m/s 	Min : 15°C Max : 22°C  Moyenne : 16.6°C	Min : 1 cell/g Max : 450000 Moy : 105888	15/06/11 >40000 cell/g 05/07/11 >40000 cell/g 03/08/11 >245000 cell/g	Anse ouverte O-NO avec environnement rocheux
	LE BRUSC 43.071679°N 5.787806°E	Min :1.2 m/s Max :14.2 m/s Moy :5 m/s 	Min : 14°C Max : 23°C  Moyenne : 19.2°C	Min : 336 cell/g Max : 6110 Moy : 2076	08/07/11 <4000 cell/g 22/08/11 >4000 cell/g	Crique ouverte S-SO
	CAVALAIRE 43.16444°N 6.52053°E	Min :1.1 m/s Max :12 m/s Moy :3.7 m/s 	Min : 16°C Max : 24°C  Moyenne : 20.8°C	Min : 0 cell/g Max : 163 Moy : 16	01/09/11 < 200 cell/g	Baie ouverte SE, peu de rochers et plus de sable aux alentours

Vue satellitaire des sites d'étude	Stations et coordonnées géographiques	Régimes des vents (détails en annexe)	Température (eau)	Ostreopsis (charge macroalgale)	Occurrences des pics d'Ostreopsis M	Caractéristiques géomorphologiques des stations
	<p>LES ILES DE LERINS 43.51755°N 7.03460°E</p>	<p>Min :1.3 m/s Max :7.7 m/s Moy :2.7 m/s</p> 	<p>Min : 19°C Max : 25°C  Moyenne : 22.5°C</p>	<p>Min : 25 cell/g Max : 86420 Moy : 12390</p>	<p>03/08/11 &gt;80000 cell/g</p>	<p>Langue de terre rocheuse ouverte sur la mer et sur l'île Ste Marguerite (orientation S-SE)</p>
	<p>NICE 43.686655°N 7.293783°E</p>	<p>Min :1.5 m/s Max :6.6 m/s Moy :2.7 m/s</p> 	<p>Min : 20°C Max : 25°C  Moyenne : 22.5°C</p>	<p>Min : 663 cell/g Max : 325200 Moy : 83475</p>	<p>23/07/11 &gt;300000 cell/g</p>	<p>Cap rocheux orienté S-SO, pas d'obstacle particulier</p>
	<p>CALVI 42.580034°N 8.724346°E</p>	<p>Min :0.8 m/s Max :9.6 m/s Moy :2.3 m/s</p> 	<p>Min : 19°C Max : 25°C  Moyenne : 22.7°C</p>	<p>Min : 2 cell/g Max : 1249 Moy : 327</p>	<p>15/07/11 &lt;1000 cell/g 11/08/11 &lt;1500 cell/g</p>	<p>Petite anse ouverte au sud et protégée des vents de secteur nord par une langue de terre en amont du site</p>
	<p>GRIGIONE 42.733370°N 9.461651°E</p>	<p>Min :1.2 m/s Max :14.2 m/s Moy :5 m/s</p> 	<p>Min : 14°C Max : 23°C  Moyenne : 19.2°C</p>	<p>Min : 5 cell/g Max : 304 Moy : 127</p>	<p>25/08/11 &lt;300 cell/g</p>	<p>Milieu ouvert sur la mer, pas d'obstacles particuliers</p>





### 3.2. Facteurs environnementaux : choix, description et obtention des données

Le choix s'est porté sur l'étude des données spatialisées telles que la température de l'eau en surface, la vitesse ainsi que la direction du vent et la salinité. Il s'appuie sur les résultats obtenus dans plusieurs études concernant l'*Ostreopsis* et les espèces de phytoplancton toxique (Pezzolesi 2012<sup>5</sup>, Cohu 2011<sup>6</sup>, Granéli 2011<sup>7</sup>, Scalco 2012<sup>8</sup>), qui montrent le rôle important que ces facteurs jouent au sein de la dynamique de croissance de ces micro-organismes, même si cette influence n'est pas encore quantifiable de façon précise à l'heure actuelle.

L'autre raison qui a influencé ce choix provient du fait que le but ultime de la présente démarche sur l'*Ostreopsis* étant de préparer la mise en place d'un système de prévention des blooms, il faut pouvoir accéder facilement aux données informatives, la température et le vent rentrant dans cette catégorie. En ce qui concerne la salinité, il s'est avéré qu'en étudiant de plus près certains résultats de mise en relation de ce facteur avec l'*Ostreopsis*, il est apparu qu'il pourrait être intéressant de creuser cette piste et qu'inclure ce paramètre dans un futur modèle de prédiction pourrait s'avérer pertinent.

L'obtention ainsi que la description détaillée des données concernant ces différents facteurs abiotiques est relatée dans le paragraphe qui suit.

### 3.3. Les données spatialisées pour la caractérisation environnementale

#### 3.3.1. Qu'est-ce qu'une donnée spatialisée ?

Les données spatialisées sont des données sous forme de grille de points géo-référencés. Chaque cellule formant la grille de points possède ainsi une référence spatiale en latitude et longitude (éventuellement altitude) c'est à dire des coordonnées permettant de définir la position du point par rapport à un système de référence spatiale. Ces données proviennent typiquement de deux sources :

- **la télédétection**, avec en particulier l'imagerie satellite ;
- **la modélisation**, avec en particulier les résultats de simulations par les modèles hydrodynamiques et/ou météorologiques.

<sup>5</sup> Pezzolesi Laura & al, 2012, Influence of temperature and salinity on *Ostreopsis* cf. *ovata* growth and evaluation of toxin content through HR LC-MS and biological assays, *Water Research* 46 (2012) 82-92.

<sup>6</sup> Cohu Stéphanie & al, 2011, Occurrence of the toxic dinoflagellate *Ostreopsis* cf. *ovata* in relation with environmental factors in Monaco (NW Mediterranean), *Marine Pollution Bulletin*, 62 (2011), 2681-2691.

<sup>7</sup> Granelli Edna & al, 2011, Can increase in temperature stimulate blooms of the toxic benthic dinoflagellate *Ostreopsis* *ovata* ? *Harmful Algae* 10 (2011), 165-172.

<sup>8</sup> Scalco Eleonora & al, Growth and toxicity response of Mediterranean *Ostreopsis* cf. *ovata* to seasonal irradiance and temperature conditions, *Harmful Algae* 17 (2012), 25-34.

**La télédétection satellitaire** est une mesure à distance de la lumière réfléctée, émise ou rétro diffusée par la surface terrestre grâce à des instruments embarqués à bord de satellites en orbite terrestre. A partir de ces mesures dites « radiométriques » fournies par les capteurs orbitaux, on peut dériver certaines variables comme la température de la surface, la concentration chlorophyllienne de l'eau, etc... Ces capteurs peuvent être portés par deux types de systèmes orbitaux d'observation de la terre : les satellites géostationnaires (stables au dessus d'un même point en orbite équatoriale haute : 36 000 km) et les satellites défilants (avec une orbite polaire basse, entre 700 et 900 km environ). C'est ce dernier type de satellite qui est utilisé pour l'acquisition des données servant à notre étude. Les capteurs correspondants sont principalement des capteurs « optiques » qui mesurent la réflectance (proportion de l'énergie solaire réfléctée par une surface pour une longueur d'onde donnée) ou l'émittance (énergie lumineuse émise par la surface pour une longueur d'onde donnée). L'acquisition se fait par un scan latéral couplé à une avancée longitudinale, le procédé permettant de créer les images numériques sous forme de grilles de points individuels (ou « pixels »), auxquels correspond pour chacun une valeur numérique.

L'imagerie satellite est donc une source pratique de données pour la caractérisation environnementale des eaux côtières, avec un potentiel d'acquisition régulier et rapide. Il existe toutefois quelques limitations à son utilisation, comme par exemple la présence de nuages empêchant parfois les capteurs optiques d'acquérir la donnée sur la surface terrestre, les interférences avec la terre quand on veut un point proche de la côte comme c'est le cas dans notre étude.

La modélisation, conçue initialement par les physiciens, a pour but la représentation virtuelle de phénomènes réels grâce à des algorithmes et des modèles mathématiques. Ces calculs se font selon une grille régulière dans l'espace et génèrent, comme les images satellites, des matrices de points individuels avec une valeur numérique. La modélisation permet l'élaboration d'un modèle d'un phénomène afin d'en proposer une simulation interprétable. Les données modélisées ont aussi une caractéristique intéressante : elles peuvent servir à « prédire », ce qui est intéressant dans un objectif de mise en place d'un système de prévention des risques. A l'heure actuelle les modèles élaborés pour la Méditerranée sont encore en cours d'optimisation, en particulier pour les zones les plus côtières, pour lesquelles les interférences avec le continent peuvent introduire des biais, compliquant ainsi les interprétations.

Les données spatialisées, avec leur couverture totale, ont des aspects pratiques indéniables. Elles sont très complémentaires des données de terrain. Bien que n'ayant pas la précision des données mesurées in situ, elles ont l'avantage de couvrir de grandes superficies régulièrement et avec une grande facilité d'acquisition. De plus leur résolution temporelle est en général plus fine que celle des données in situ du fait d'une grande facilité d'acquisition

(satellites) ou régularité de calcul (modèles). Les données spatialisées sont d'ailleurs non seulement d'accès facile et rapide, mais on en possède aussi souvent d'importantes archives permettant de remonter jusqu'au début des années 80 dans certains cas.

En conclusion, on rappellera ici que les zones d'étude de l'*Ostreopsis* étant situées immédiatement à la côte (dans les tous premiers mètres à partir de la côte, et jusqu'à une profondeur n'excédant pas les 5 mètres), rencontrent donc une difficulté importante dans l'interprétation des données spatialisées sur lesquelles on travaille, qu'elles soient issues de la télédétection satellitaires ou de la modélisation. A l'heure actuelle, ces données, pour celles qui sont les plus côtières et qui correspondent à la problématique de l'*Ostreopsis*, résultent toutes d'extrapolations mathématiques à partir des données marines les plus proches validées, afin d'éviter les biais dus à l'interface terre-mer. L'optimisation de ces extrapolations fait partie des travaux en cours sur ces outils.

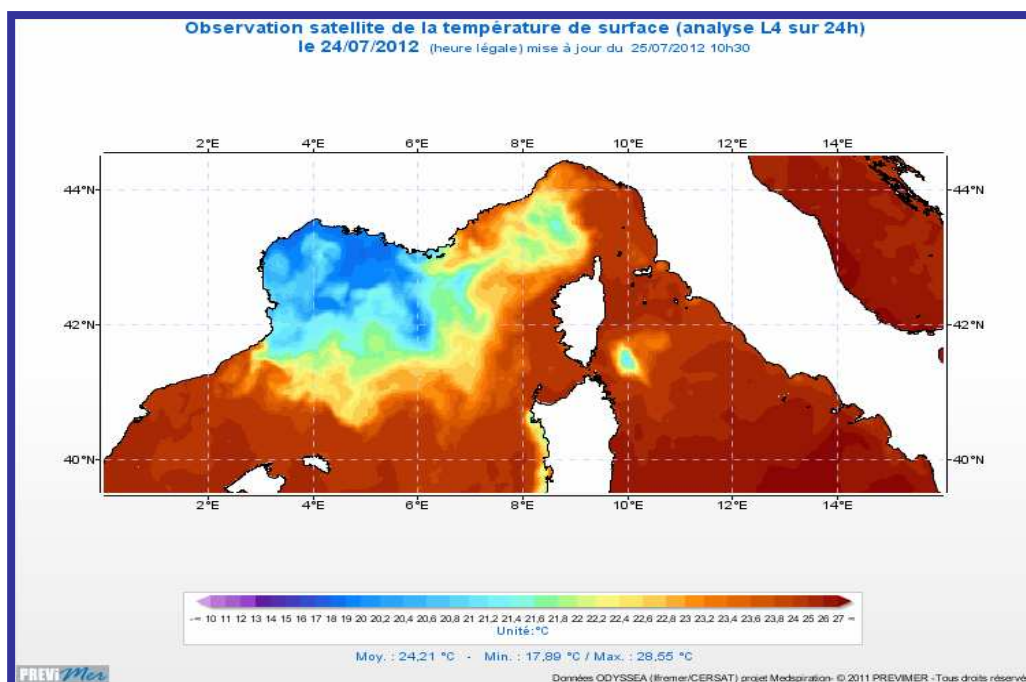
### 3.3.2. Données spatialisées disponibles pour l'étude

Les données recherchées sont les suivantes :

- la température de surface de la mer dérivée d'imagerie satellite dans les canaux thermiques,
- la température de surface de la mer résultant des calculs de modèles hydrodynamiques,
- le vent (vitesse et direction) résultant des calculs de modèles atmosphériques,
- la salinité résultant des sorties de modèles hydrodynamiques.

#### 3.3.2.1. Température de surface de la mer par satellite

Les données de SST (Sea Surface Temperature) utilisées dans cette étude ont été obtenues grâce aux canaux thermiques du capteur AVHRR (algorithmes Very High Resolution Radiometer) de la NOAA, l'Agence Nationale Américaine de L'océan et de l'Atmosphère et distribuées par le CERSAT (Centre ERS d'Archivage et de Traitement) de l'Ifremer.



Carte 2 : exemple d'image des températures de l'eau de la Méditerranée Nord Occidentale issues du satellite (SST)

Le principe de l'estimation de la température de surface de l'eau à partir des données radiométriques se base sur la loi de Planck : la longueur d'onde émise par un corps est inversement proportionnelle à sa température. Les images dans les canaux thermiques, correspondant aux longueurs d'ondes d'émission de la terre, permettent de retrouver sa température de surface par inversion de la loi de Planck.

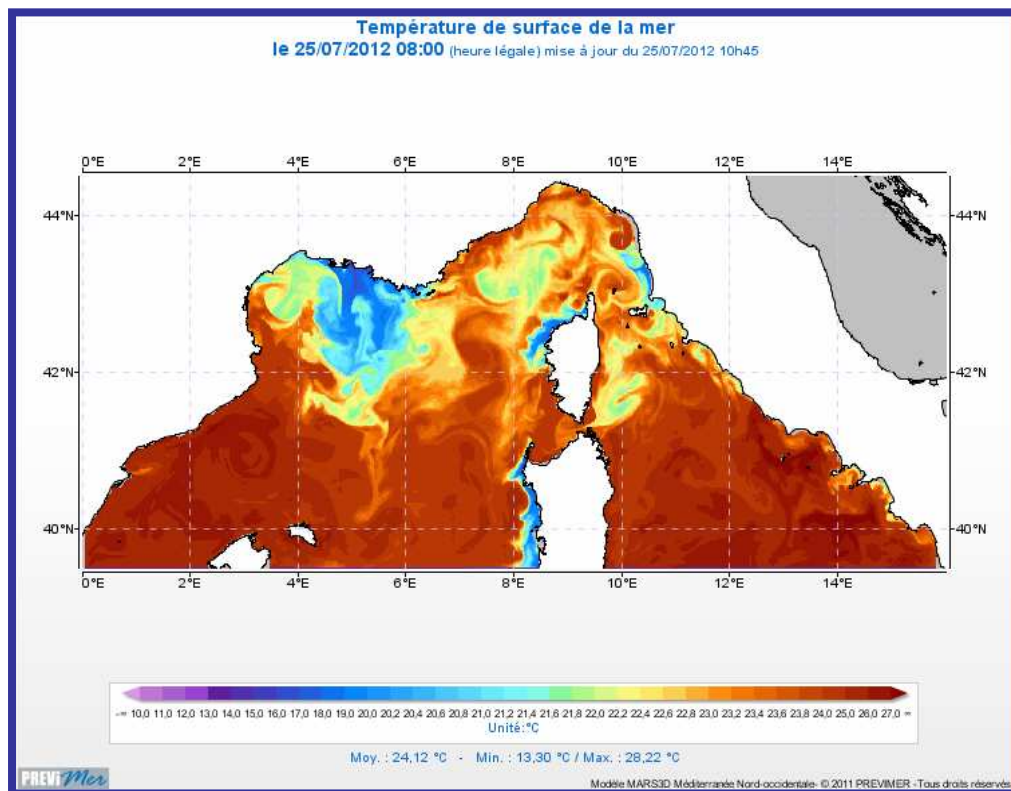
Les capteurs tels que AVHRR sont des instruments à basse résolution spatiale et haute résolution temporelle. La résolution spatiale de ces données est de 1,2 km, mais leur haute résolution temporelle permet d'obtenir des données plusieurs fois par jour et tous les jours par faible « ennuagement ». Elles couvrent en outre de très grandes zones (une image fait plus de 2000 km de large), pouvant englober la Méditerranée nord-occidentale dans une seule et même image comme on peut le voir sur la carte 2 ci-dessus.

### 3.3.2.2. Température de surface de la mer en sortie de modèle MARS-3D

Dans cette étude, on a également fait appel à des données de température de surface générées grâce au modèle MARS-3D (3D hydrodynamical Model for Application at Regional Scale) développé par l'Ifremer au laboratoire DYNECO/PHYSED (Dynamiques de l'Environnement Côtier / Physique et Sédimentologie). MARS-3D, en tant que modèle hydrodynamique, permet de simuler entre autres la salinité, la température et les courants. Les simulations de variables reposent sur la résolution d'équations primitives de la dynamique des fluides (connues sous le nom d'équations de Navier Stokes) et prennent en compte comme données d'entrée :

- la bathymétrie, essentielle pour les phénomènes de circulation ;
- la météorologie avec le vent, la pluie et la pression atmosphérique ;
- des conditions initiales et des conditions aux limites provenant en général de modèles de plus grande emprise.

Les calculs sont faits sur une maille régulière de points et sur plusieurs niveaux de profondeur ce qui permet de décrire le comportement masses d'eau en trois dimensions. Les résultats sont stockés sous forme d'une série temporelle de vecteurs (courants) et de scalaires (température, salinité, hauteur de la colonne d'eau...) en coordonnées géographiques. On dispose ainsi, pour l'étude, de données simulées de température de l'eau sur 30 niveaux de profondeur représentant l'ensemble de la colonne d'eau. Etant donné que, dans cette étude, on s'intéresse à des eaux très côtières et peu profondes, on ne s'intéressera qu'aux données simulées pour la couche de surface. Les grilles extraites correspondent ainsi à la couche de surface du modèle MENOR (Méditerranée Nord-Occidentale) élaboré en relation avec l'AERM&C, elles sont générées toutes les trois heures en mode opérationnel à une maille de 1,2 kilomètre environ. Elles sont traitées afin d'en extraire les moyennes journalières dans un souci de facilitation du traitement et de l'interprétation. La visualisation journalière de ces données peut se faire avec l'utilisation de l'outil Prévimer<sup>9</sup>.



Carte 3 : image globale des températures de l'eau issues de la modélisation pour la Méditerranée Nord Occidentale (source Prévimer)

<sup>9</sup> Prévimer : système pré-opérationnel qui s'adresse à un large public souhaitant obtenir des prévisions à court terme de l'environnement côtier sur les trois façades métropolitaines Manche, Atlantique et Méditerranée. Son objectif principal est de produire en routine des analyses et des prévisions sur l'état de l'environnement marin dans la zone côtière.

### 3.3.2.3. Données de vent en sortie de modèle météorologique MM5

Le modèle météorologique MM5 a été développé aux Etats-Unis par la Pennsylvania State University (PSU) et le National Center for Atmospheric Research (NCAR) pour la prévision et la simulation de la circulation atmosphérique. Il permet de simuler les grandes variables telles que la température de l'air et le vent en s'appuyant, comme en hydrodynamique sur les principes de la dynamique des fluides. Pour le vent, qui nous intéresse plus particulièrement, le modèle fournit la direction et la vitesse. Les données météorologiques simulées par MM5 sont disponibles dans les bases de données de l'Ifremer qui les utilise régulièrement comme données de forçage des modèles hydrodynamiques.

Ces données de vent MM5 sont livrées en sortie de modèle sous forme de vecteurs  $u$  et  $v$ , représentant les composantes nord-sud et est-ouest du vecteur vent. Pour qu'elles soient plus facilement utilisables dans cette étude, un traitement leur a été appliqué pour les convertir en un seul vecteur résultant défini par sa direction et sa norme, fournissant ainsi la force et la direction du vent, représentation des données équivalente à celle des données météorologiques telles qu'elles sont livrées habituellement.

## 4. Résultats

### 4.1. Validation des données spatialisées disponibles

Etant le résultat de mesures à distance ou de calculs par des modèles complexes, il importe de vérifier que les données utilisées correspondent au mieux à la réalité terrain relevée lors des prélèvements, ou qu'elles en sont suffisamment proches pour bien la représenter. Cette validation se fait par comparaison entre les données mesurées et les données extraites des images ou des sorties de modèle aux coordonnées des stations de mesures pour les variables considérées. Comme cela a été indiqué plus haut (cf.3.3.1.) la validation des données est d'autant plus importante que l'extraction des valeurs dans les images et les sorties de modèle ne peut souvent pas être réalisée exactement aux mêmes endroits que les mesures de terrain, en raison de la caractéristique très côtière des sites d'observation, et pour éviter les interférences terre-mer.

Les graphiques ci-dessous représentent les données de températures de terrain prélevées lors de la campagne OSCREEN (T terrain), mises en parallèle avec les données satellitaires (SST) et celles des sorties du modèle MARS-3D de Prévimer (T Prev).

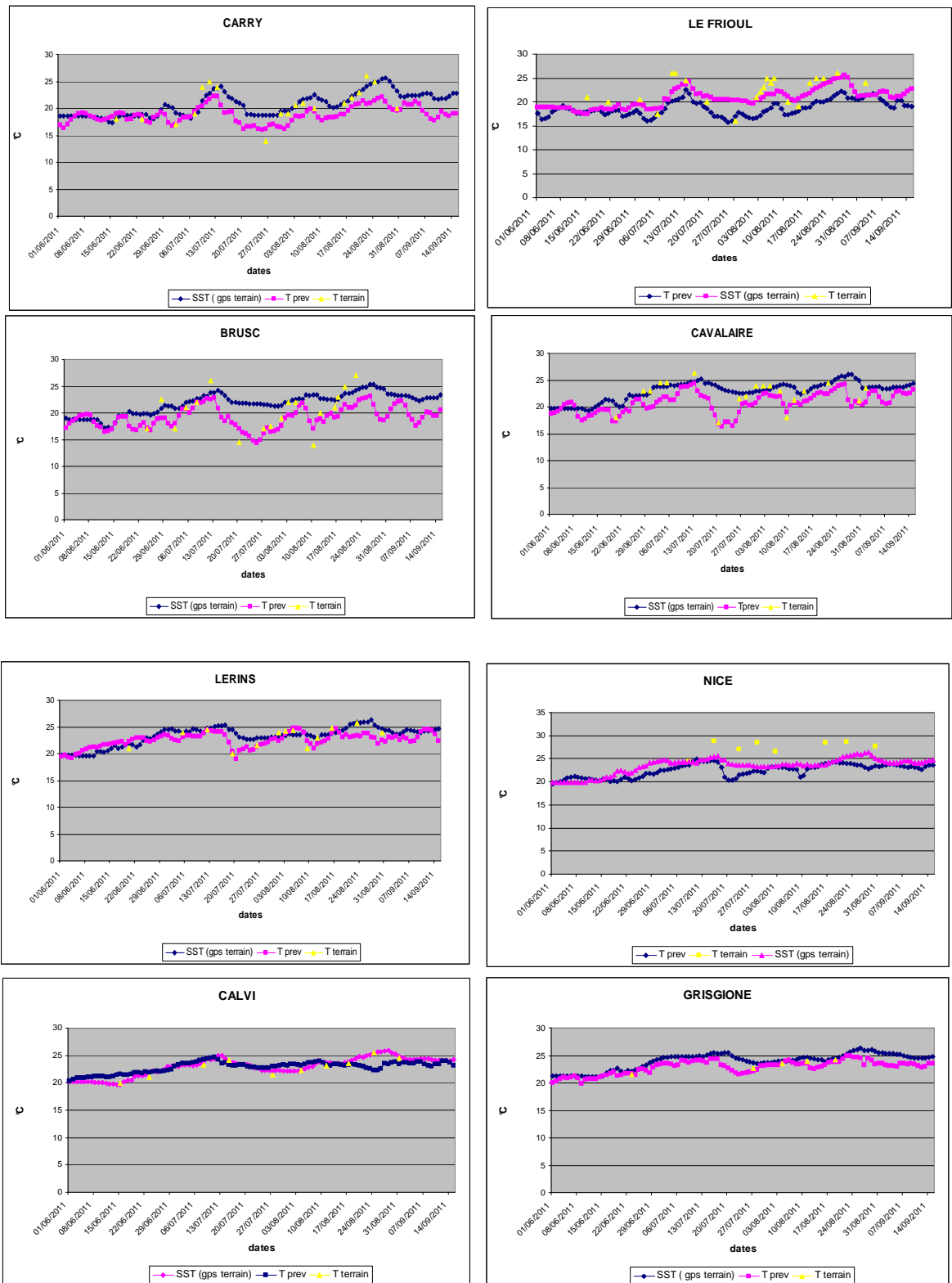


Figure 1 : graphiques représentant les différentes données de température superposées entre elles pour les 8 sites d'études. Jaune= terrain ; bleu=modèle et rose=satellite



Cette inter-comparaison entre la réalité terrain, le satellite et le modèle servira à choisir pour la suite de l'étude quelles données de températures seront mises en relation avec les concentrations d'*Ostreopsis macroalgal*.

Après examen de ces résultats les choix pour les stations sont les suivants :

Carry : modèle

Frioul: SST

Brusc : modèle

Cavalaire : modèle

Lérins : modèle

Nice : le choix s'est porté ici sur les données de SST. Cas particulier de la station de Nice car le relevé terrain a été effectué dans une zone d'eau très peu profonde de type mare, bien qu'ouverte à la mer.

Calvi : SST

Grisgione : modèle

On observe que les données issues du modèle semblent être ici plus proches de la réalité terrain que les SST pour la majeure partie des sites.

## 4.2. Variabilité spatio-temporelle et dynamique de croissance de l'*Ostreopsis* macroalgal en relation avec l'environnement

### 4.2.1. Carry

On observe sur la figure 2a, qui représente l'évolution de la température et du stock d'*Ostreopsis* macroalgal en fonction du temps, une évolution croissante de la charge d'*Ostreopsis*, avec des maxima relevés les 22 et 30 août (concentrations proches ou supérieures à 45000 cellules/g.PF). Pendant le reste de la période d'échantillonnage les concentrations varient entre 70 et 25000 cellules/g.PF. Le vent dominant (cf. rose des vents) est resté de secteur Nord-Ouest à l'exception du 22 août où il provient alors du Sud-Est.

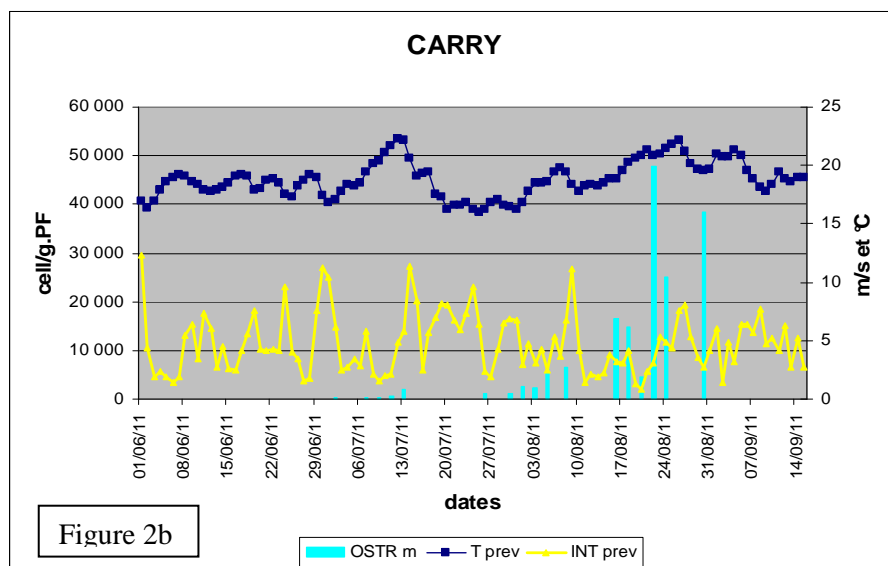
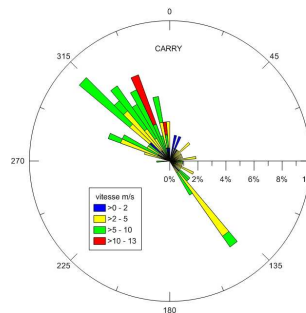
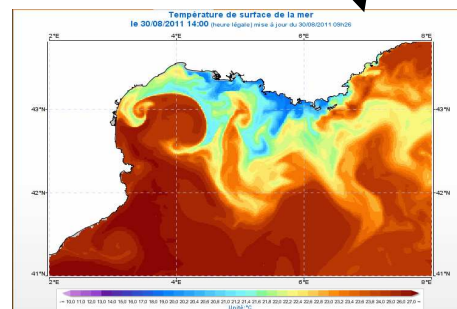
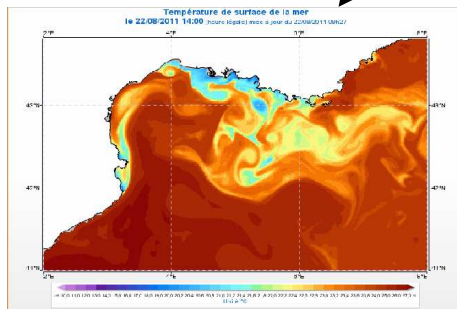
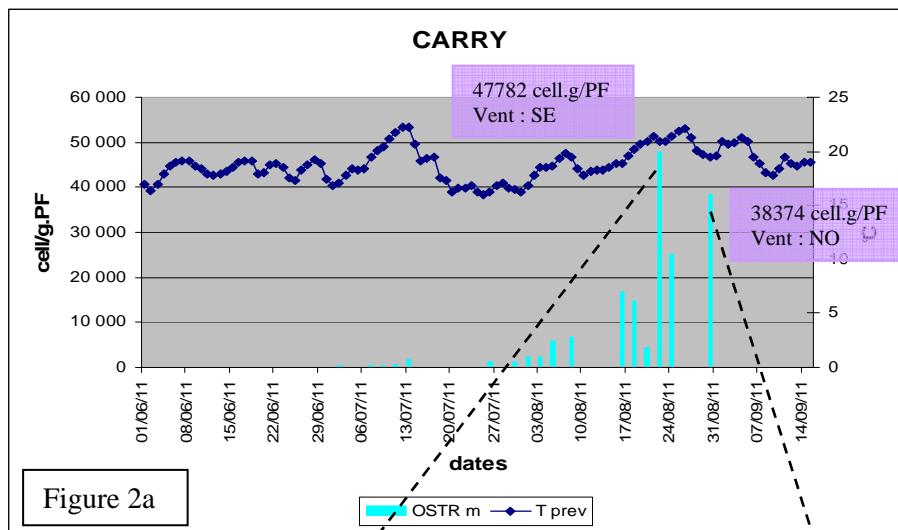
Concernant les températures de l'eau nous pouvons observer sur les cartes 4 et 5 issues du modèle, qu'elles sont à cette période relativement fraîches près de la côte (souvent <20°C). La zone est fréquemment soumise à des épisodes de mistral qui engendrent des phénomènes d'upwelling, faisant ainsi chuter la température de l'eau près des côtes (et provoquant potentiellement un enrichissement en nutriments venant avec les eaux de fond), et entraînant une dérive potentielle du panache du Rhône dans ce secteur.

Les sorties de modèle (issues de Prévimer) pour la température et le vent montrent en figure 2b que les variations de la température sont corrélées de manière négative avec celles de la vitesse du vent. Comme le vent majoritaire est le mistral, cette dynamique paraît logique.

Pour la mise en relation de l'*Ostreopsis* macroalgal avec la température, les choses ne sont ni nettes ni probantes. Si le stock d'*Ostreopsis* paraît augmenter avec une période de vent calme et une hausse des températures (corrélation positive significative : corr sp = 0.53 ; p < 0.05) vers la mi-août (figure 2b : évolution temporelle du stock d'*Ostreopsis* macroalgal mise en parallèle avec l'évolution de la température et de la vitesse du vent) cela ne semble pas être un schéma récurrent. Plus tôt vers début juillet, on observe aussi une période de hausse des températures mais le stock d'*Ostreopsis* est alors faible. L'étude de ce premier site nous montre déjà que la température et le vent ont leur importance dans la compréhension de la croissance de l'*Ostreopsis* mais d'autres facteurs clés pourraient intervenir dans le déclenchement de cette phase exponentielle de croissance.

L'influence du panache du Rhône serait peut-être une hypothèse intéressante, hypothèse que l'on étayera plus tard dans le rapport à propos du site du Frioul.

Concernant le taux de croissance spécifique du stock macroalgal d'*Ostreopsis*, il est de l'ordre de  $0.47 \text{ j}^{-1}$ , le temps de génération est de 4.86 j.



#### 4.2.2. Le Frioul : calanque de Morgeret

C'est sur ce site proche de Carry (environ 13 km) qu'en août 2006 le premier évènement à caractère sanitaire lié à l'*Ostreopsis* a été détecté. De cet évènement découle la mise en place sur ce site d'un suivi et de recherches couvrant les étés 2007-2008 et 2009. En 2011 pour le volet 2 d'OSCREEN, la dynamique d'évolution du stock d'*Ostreopsis* y est très différente de celle de Carry. La figure 3a montre 3 pics d'*Ostreopsis* consécutifs ( $>2 \cdot 10^5$  cellules/g.PF) qui sont beaucoup plus précoces (dès le 15 juin). Ils sont aussi beaucoup plus importants, et finissent plus tôt (mi-août). Pendant ces occurrences exceptionnelles, le régime de vent est majoritairement de secteur Nord-Ouest (cf. rose des vents). Il y a ici aussi des upwellings récurrents et donc un refroidissement de l'eau à la côte (et enrichissement en nutriments). En observant la courbe des températures et les images satellites issues du site Prévimer au moment des blooms d'*Ostreopsis* (cartes 6 et 7), on remarque que le plus souvent les températures ne dépassent pas les 20°C, ce qui n'empêche pas le développement de l'*Ostreopsis*.

Concernant le taux de croissance spécifique il est ici de l'ordre de  $0.38 \text{ j}^{-1}$ , le temps de génération de 3.50 j.

L'analyse rétrospective de l'évolution de l'*Ostreopsis* et de la température durant les étés 2007, 2008 et 2009 (figure 4 a et b), montre une évolution croissante du stock avec un début de la période de bloom en 2007 et en 2009 qui est plus tôt dans la saison estivale par rapport à 2008 où il ne démarre qu'en août.

La température varie selon l'intensité et la provenance du vent. On ne peut pas dégager de liaison significative entre les évolutions à court terme du stock d'*Ostreopsis* macroalgal et celles de la température. On note toutefois un coefficient de régression linéaire positif, qui montre une augmentation des températures (légère) entre 2007 et 2009, allant de paire avec une élévation des stocks sur ces trois années.

Afin de tenter de mieux expliquer cette évolution, nous nous sommes intéressés à la salinité. Sur les figures 5a et 5c (qui représentent respectivement les évolutions des la salinité et des concentrations d'*Ostreopsis* macroalgal mises en parallèle (sur une échelle logarithmique pour la figure 5c), on observe pour l'année 2008 un épisode de dessalure remarquable entre la mi-juin et la mi-juillet, faisant suite à une crue du Rhône exceptionnelle pour cette saison (cf. figure 5b données de la Compagnie Nationale du Rhône). Parallèlement à ce phénomène, les quantités d'*Ostreopsis* macroalgal échantillonnées pendant cette période sont très faibles. Pour 2008 l'évolution de la salinité est corrélée positivement avec les dénombrements d'*Ostreopsis* macroalgal ( $\rho = 0.51$  ;  $p = 0.04$ ).

Ainsi, l'examen de cet évènement particulier pourrait suggérer une piste de recherche dans l'analyse des effets induits par des apports d'eau douce (éventuellement chargés en nutriments) sur le développement du stock d'*Ostreopsis* dans les périodes qui suivent.

Les panaches descriptifs des variations de salinité, correspondant à cet épisode de dessalure de la mi-juin à la mi-juillet suite aux flux du Rhône (cartes générées sur le site Prévimer, résultats de sorties de modèle) sont joints en annexe 6.2.

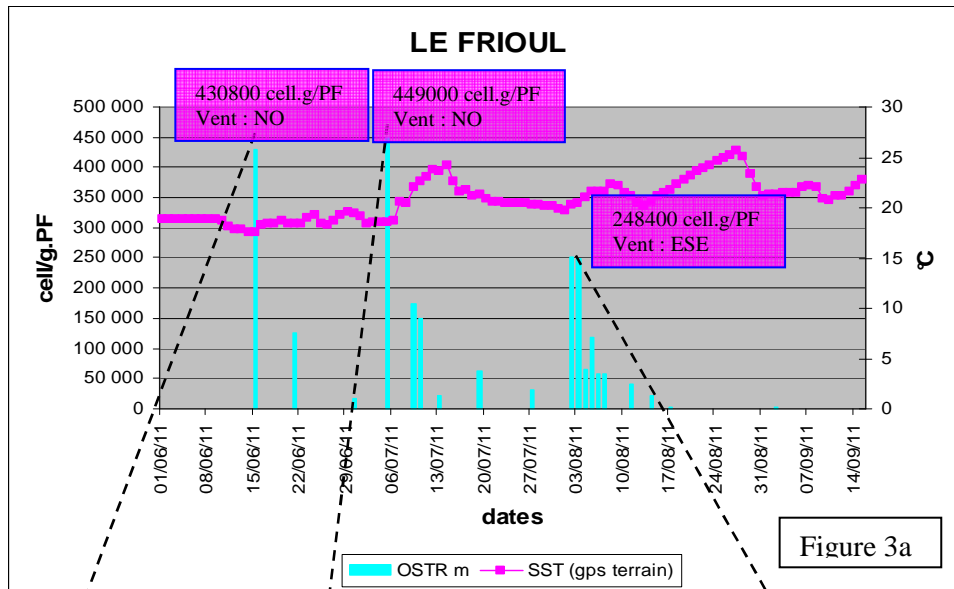
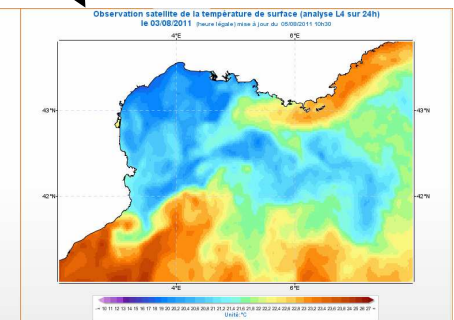
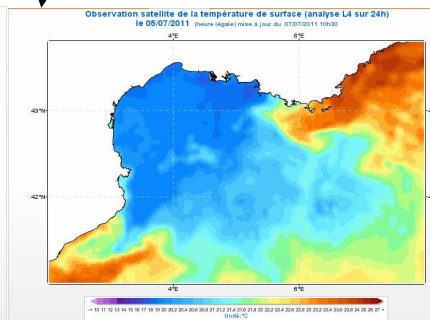
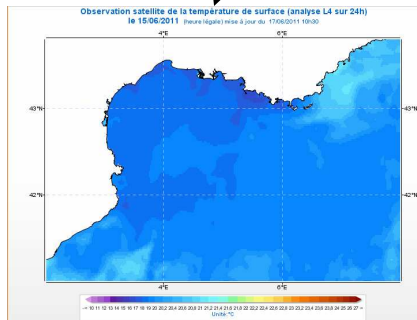


Figure 3a



De gauche à droite : cartes 6,7 et 8

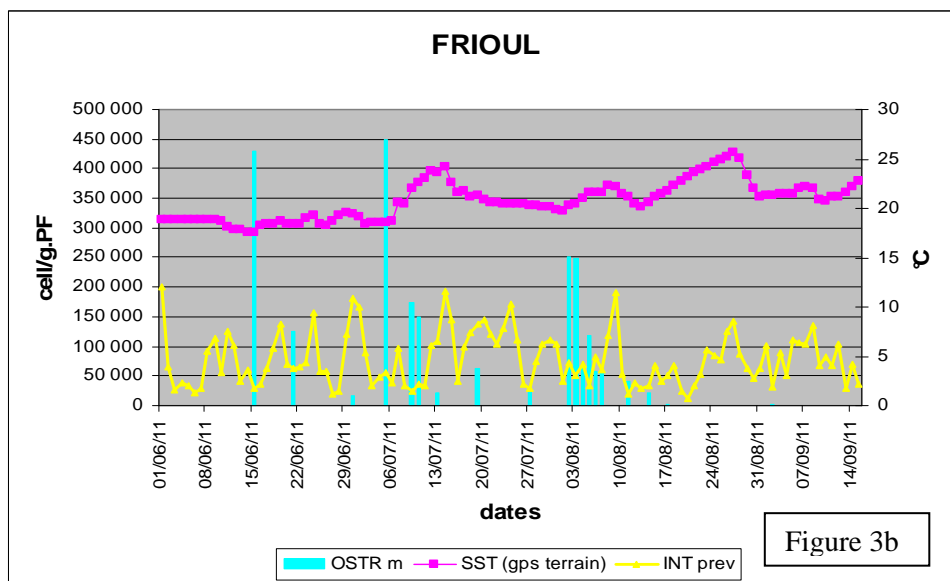
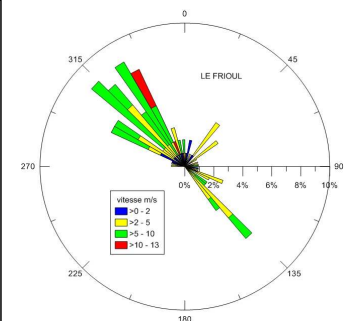


Figure 3b



Rose des vents

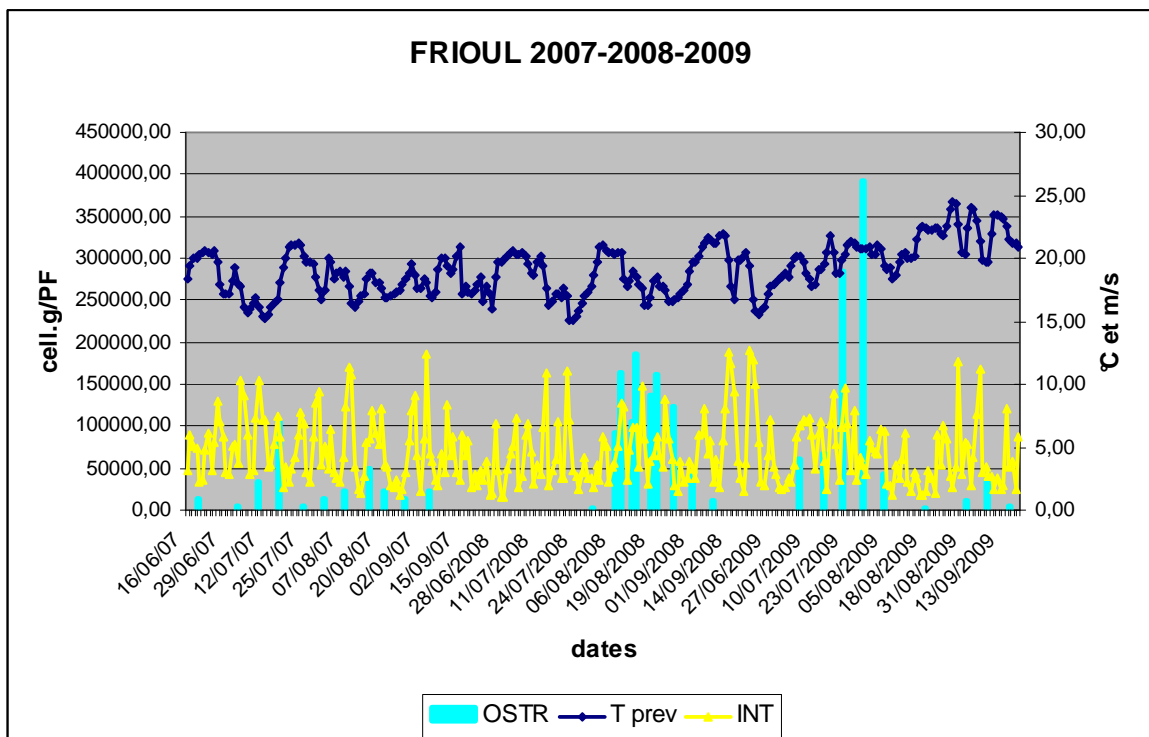
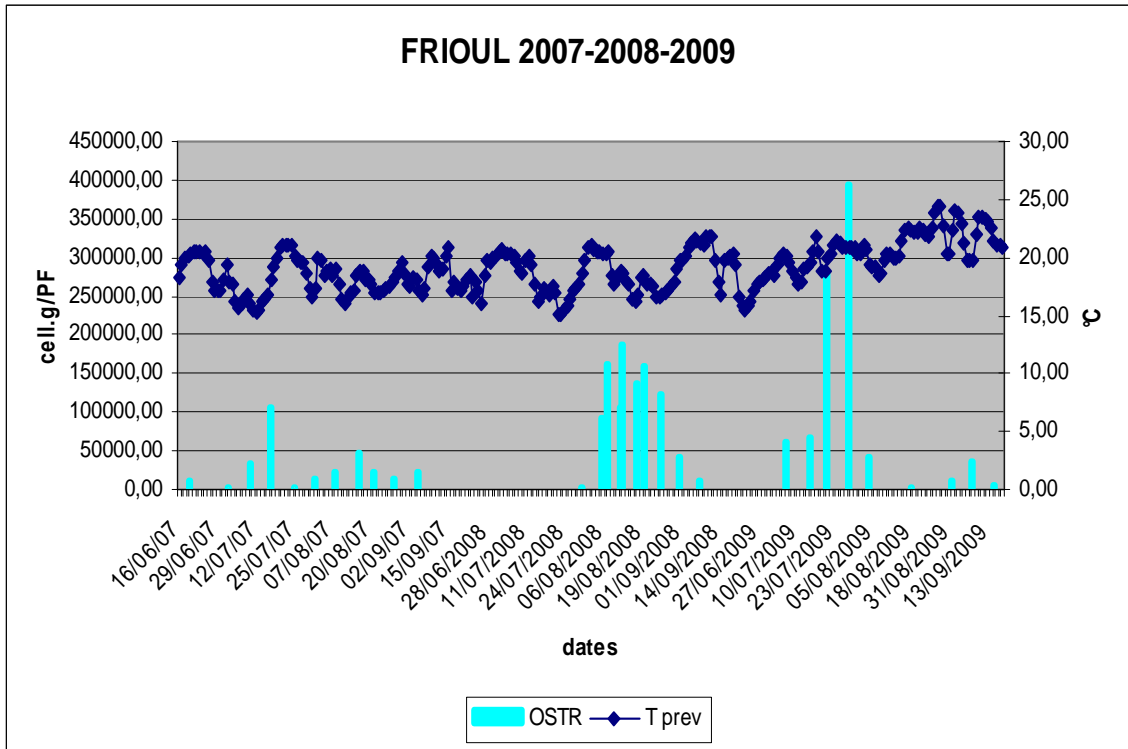
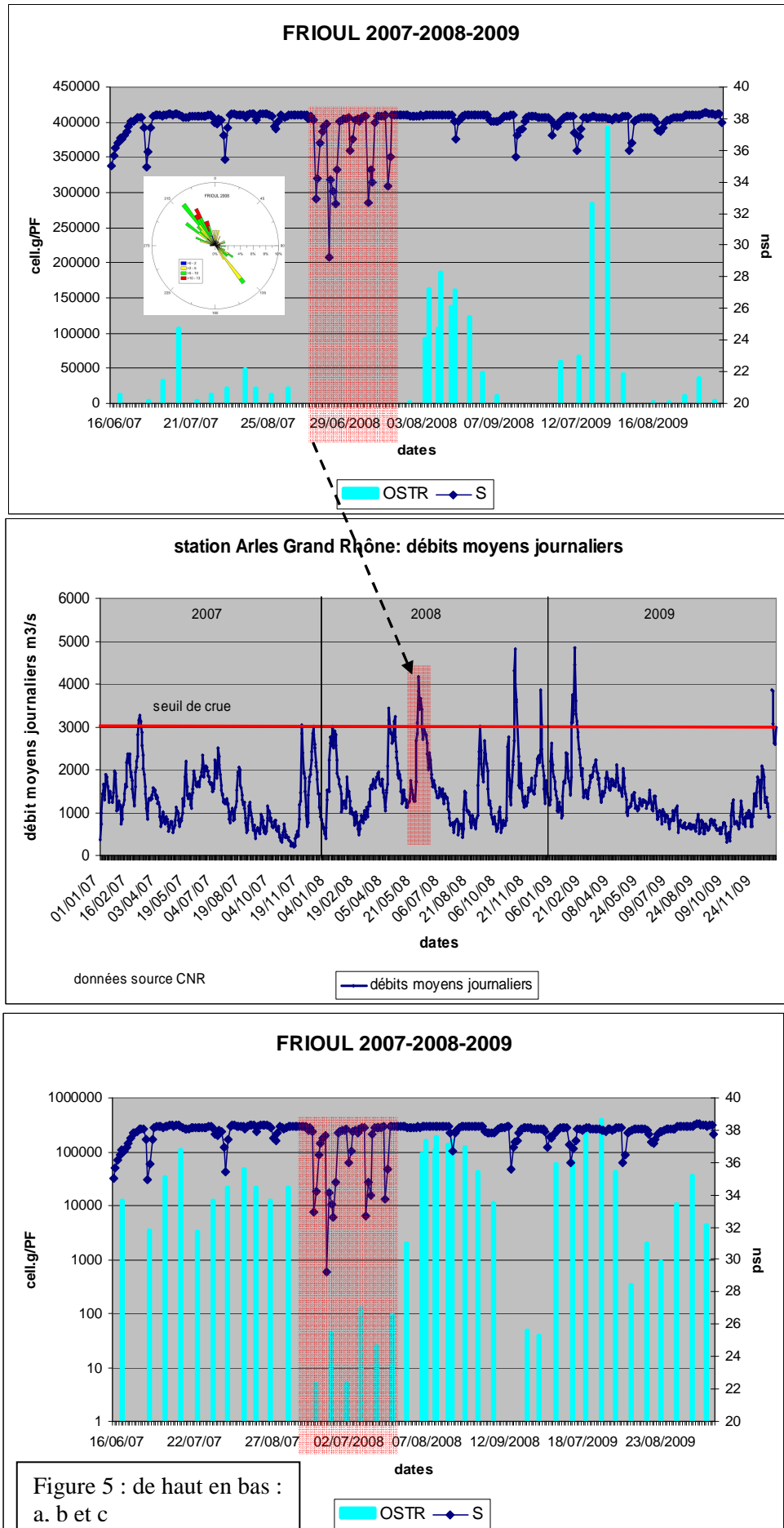


Figure 4 : de haut en bas : a et b INT = intensité du vent en m/s



### 4.2.3. Le Brusç

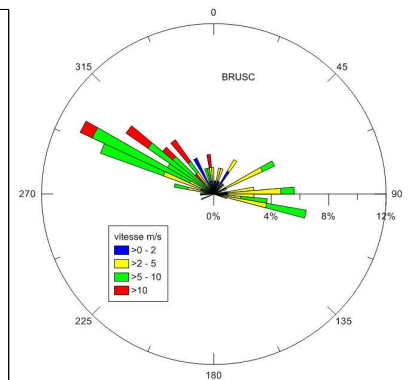
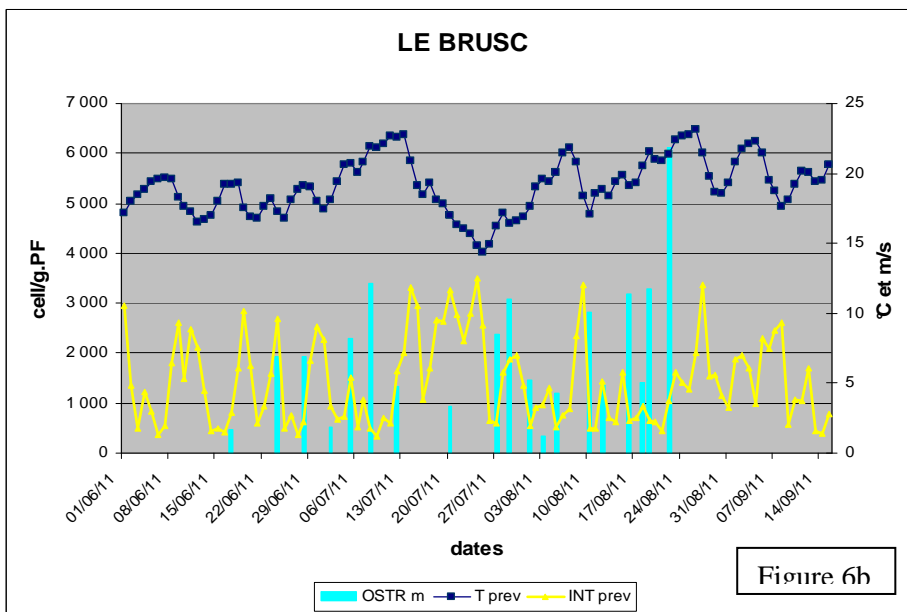
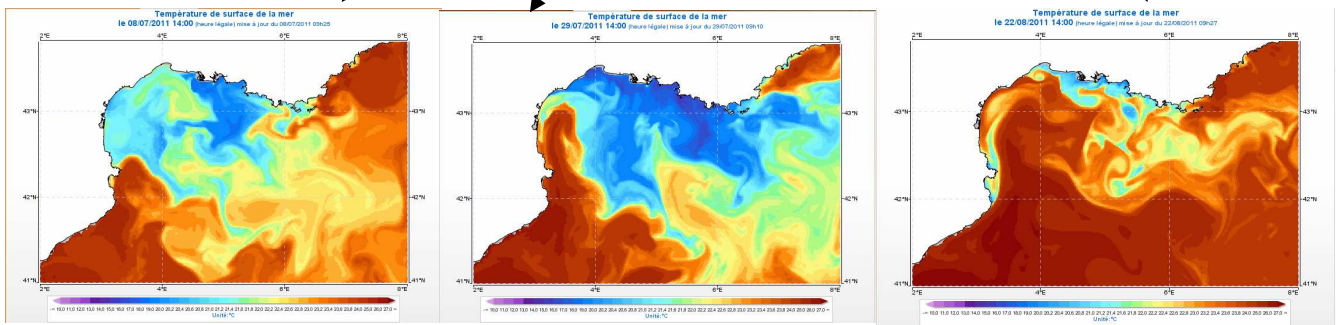
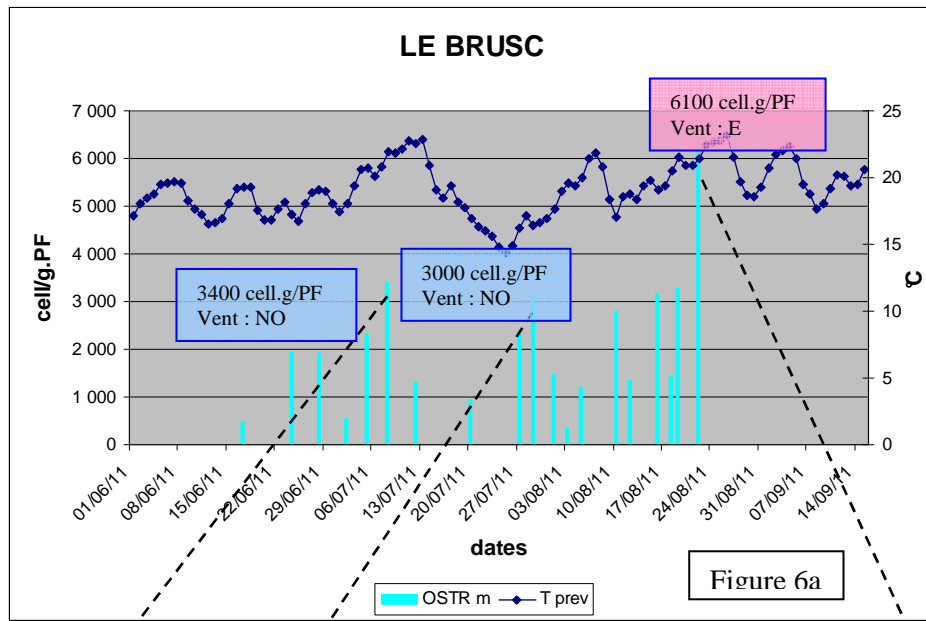
Le premier constat porte sur le niveau modeste du stock d'*Ostreopsis* macroalgal sur ce site (maximum enregistré à 6100 cellules/g.PF). Il apparaît à la mi-juin (en faible concentration), puis succèdent des oscillations jusqu'à fin août avec des concentrations ne dépassant pas les 4000 cellules/g.PF. On note fin août l'apparition d'un pic atteignant les 6000 cellules/g.PF.

Concernant les facteurs environnementaux : la provenance des vents varie entre Nord-Ouest et Sud-Est mais le mistral reste majoritaire pendant la période d'échantillonnage. Il y a ici aussi successions d'upwelling avec refroidissement des masses d'eau côtières. Fin août le vent est plus orienté Sud-Est et d'intensité moindre, ce qui engendre un réchauffement de la masse d'eau que l'on peut observer sur la carte 11.

La température varie tout au long de la période d'observation entre 15°C et 23°C. L'amplitude des variations est assez prononcée et en lien avec la dynamique du vent (rose des vents et figure 6b). Les périodes où la présence de l'*Ostreopsis* est plus prononcée semblent être caractérisées par des vents de plus faible intensité (2-5 m/s) avec une augmentation des températures significative.

Le taux de croissance spécifique au niveau de ce site est de l'ordre de  $0.18 \text{ j}^{-1}$ , le temps de génération de 4.39 j.





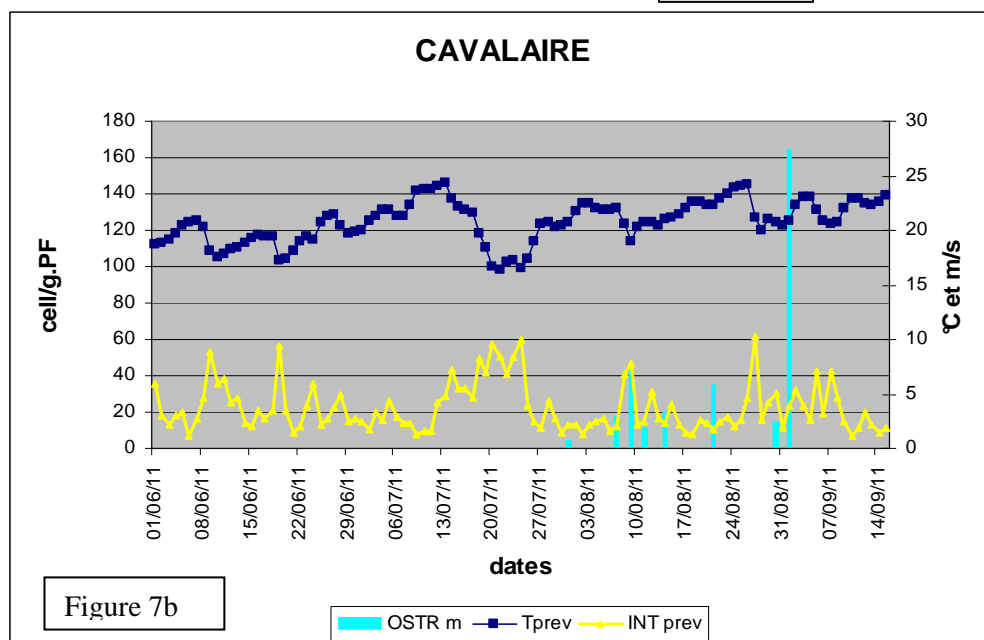
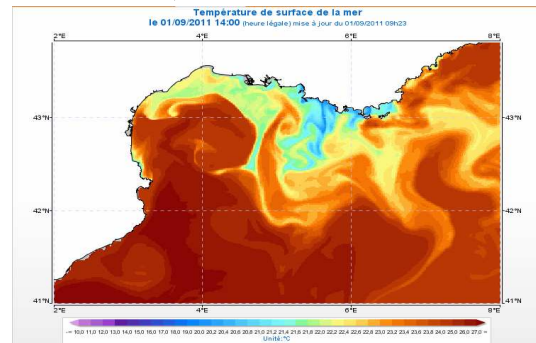
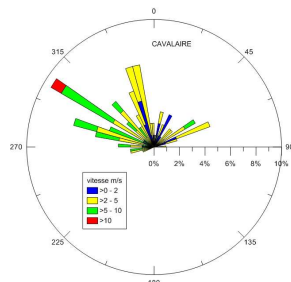
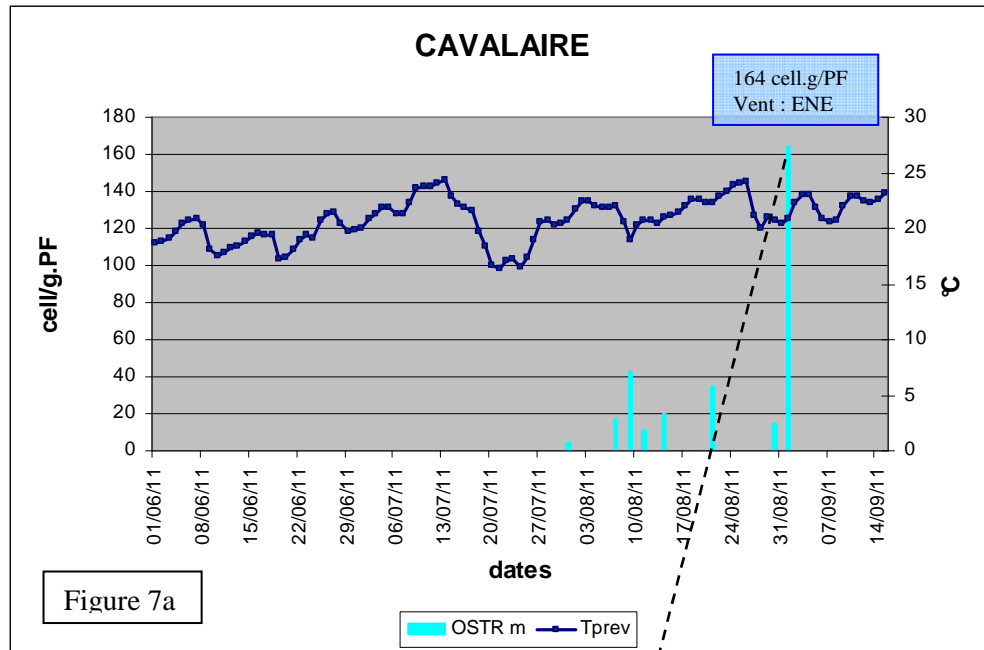
#### 4.2.4. Cavalaire

Pour cette station l'apparition de l'*Ostreopsis* est très tardive dans la période estivale (début août) par rapport aux stations situées plus à l'Ouest. La croissance est faible et la concentration maximale observée ne dépasse pas les 170 cellules/g.PF lors du dernier prélèvement le 1<sup>er</sup> septembre. Cette station est très peu impactée par l'*Ostreopsis*, du moins cet été là.

Au niveau du facteur température on observe une hausse par rapport aux autres stations plus à l'Ouest et ici le régime de vent oscille entre N-O et N-E. Cette hausse des températures de l'eau de mer résulte de la situation de ce site le long de la côte, plus à l'Est et un peu plus à l'abri du mistral et de ses effets, bien que la relation entre le vent et la température de l'eau reste encore bien marquée (fig. 7b)

L'explication des faibles concentrations en *Ostreopsis* macroalgal n'est pas avancée. Elles pourraient provenir de la plus faible couverture rocheuse des fonds (et des macroalgues inféodées) que sur les autres sites, tel que cela apparaît sur la vue aérienne de la page 22. Mais d'autres pistes resteraient à explorer (apports en nutriments, etc...).

Le taux de croissance au niveau de cette station est de l'ordre de  $0.33 \text{ j}^{-1}$ , le temps de génération de 4.09 j.



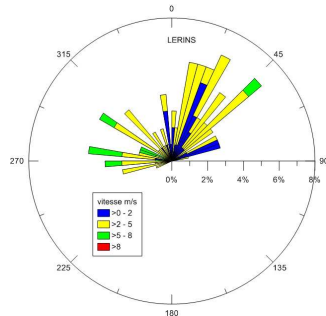
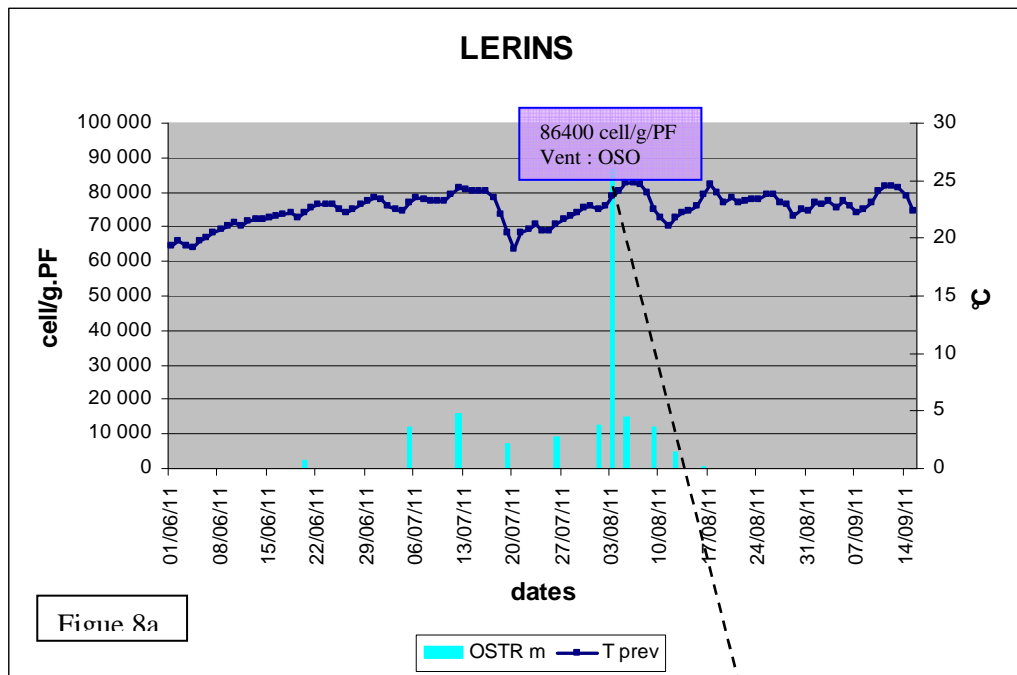
#### 4.2.5. Les Iles de Lérins

Cette station située beaucoup plus à l'Est que les sites précédents révèle un stock macroalgal pour tous les échantillons qui reste en dessous des 20 000 cellules/g.PF à l'exception du 3 août où l'on observe un bloom conséquent atteignant les 86 000 cellules/g.PF. Quelques jours après ce pic on enregistre une chute massive du stock d'*Ostreopsis*, qui tombe alors à moins de 2000 cellules/g .PF.

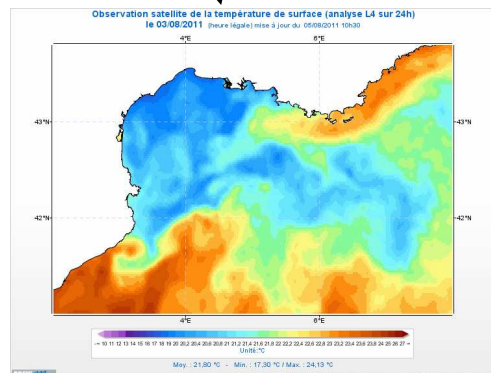
En figure 8b la température augmente de façon continue pendant la période qui précède le bloom. Cette évolution coïncide avec des vents de faible intensité (<3 m/s). Les valeurs de températures dépassent ici les maxima enregistrés aux stations précédentes (25°C à certaines dates).

Les vents proviennent majoritairement du Nord-Est et un peu du Nord-Ouest mais sont de faible intensité (cf. rose des vents). D'après ces résultats le bloom d'*Ostreopsis* semble être lié ici à des vents faibles et à une élévation progressive de la température jusqu'à dépasser les 25°C. Cependant quelques semaines avant ce bloom, la même dynamique au niveau de la température et du vent est observée sans que cela ne déclenche pour autant une hausse des stocks d'*Ostreopsis*.

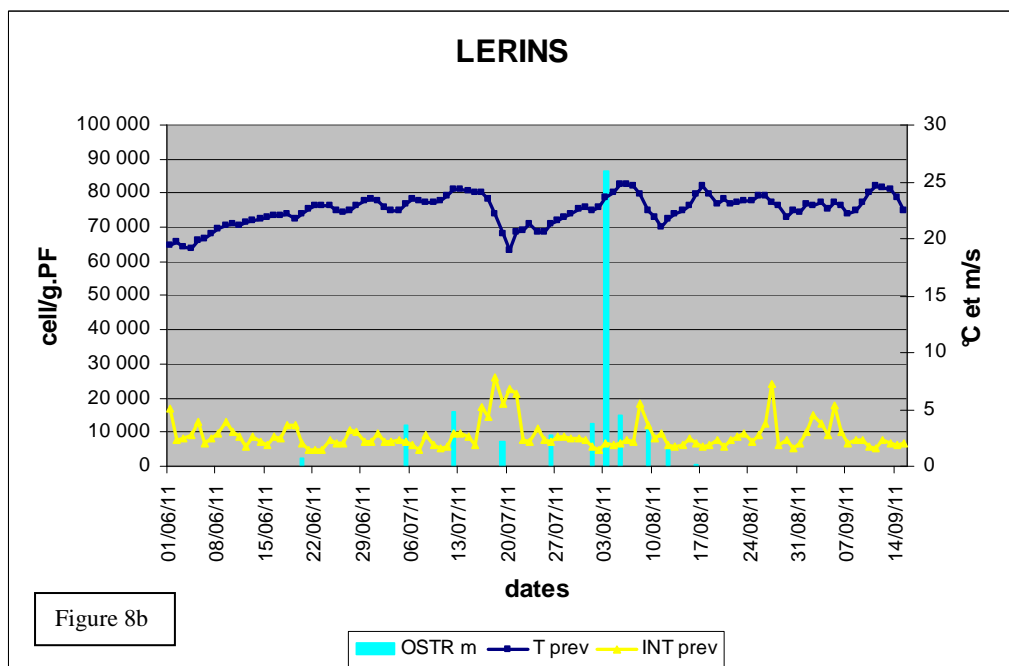
Le taux de croissance spécifique est de l'ordre de  $0.16 \text{ j}^{-1}$ , le temps de génération de 4.21 j.



Rose des vents



Carte 13



#### 4.2.6. Nice

Comparé à celui observé sur l'île de Lérins qui est distante de moins de 30 km, le schéma d'évolution du stock d'*Ostreopsis* porte sur la même période, mais avec un bloom plus précoce et beaucoup plus important dépassant les 325 000 cellules/g.PF le 23 juillet (figure 9a).

Les températures sont ici sensiblement plus chaudes qu'au niveau des stations plus à l'ouest (cf. cartes satellitaires 14 et 15), et surtout sont moins perturbées par le vent qui au demeurant reste toujours faible (fig. 9b). Cette région Est de la région PACA est sous l'influence du courant ligurien, qui déplace les eaux plus chaudes ayant transité devant le golfe de Gênes.

On constate en figure 9b que le maximum de stock d'*Ostreopsis* macroalgal est détecté en fin de période d'échauffement progressif, juste après un petit épisode venteux ayant provoqué une légère baisse de la température.

Le taux de croissance spécifique est de l'ordre de  $0.17 \text{ j}^{-1}$ , le temps de génération de 4.07 j.

On remarquera qu'avec le site du Frioul à Marseille, ce sont de loin les deux sites les plus concernés par les fortes charges en *Ostreopsis* macroalgal.

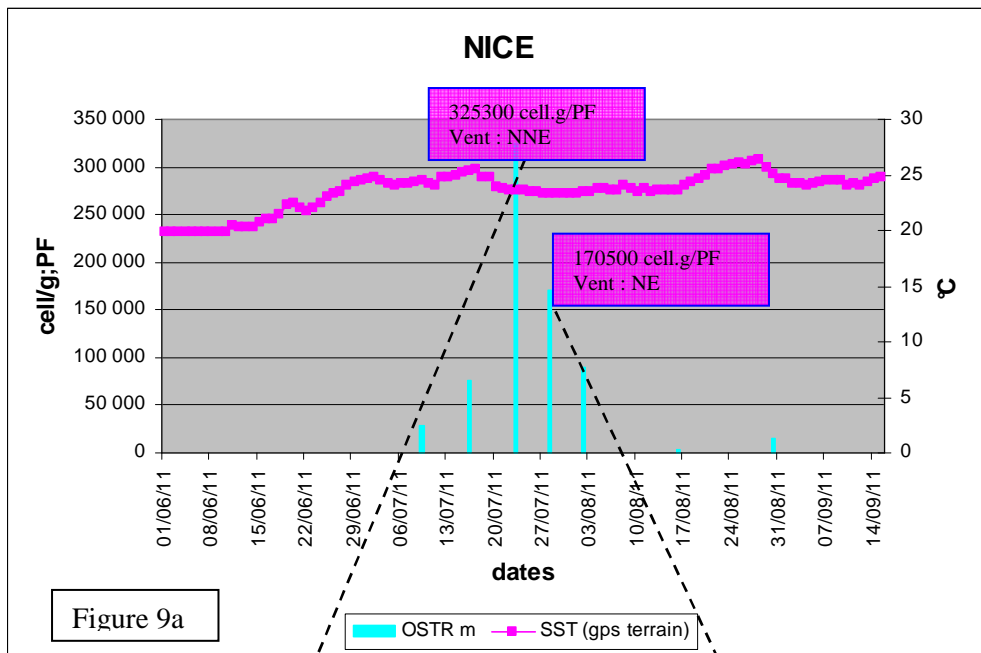
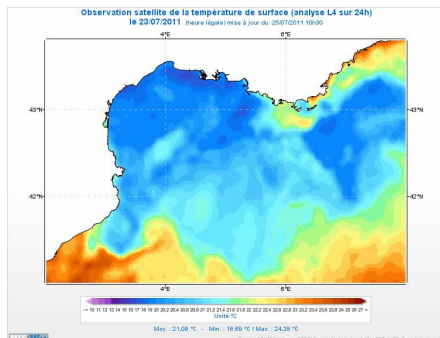
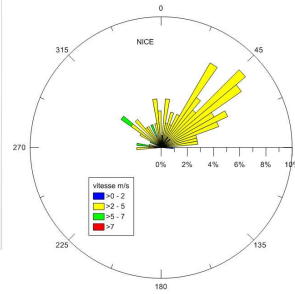


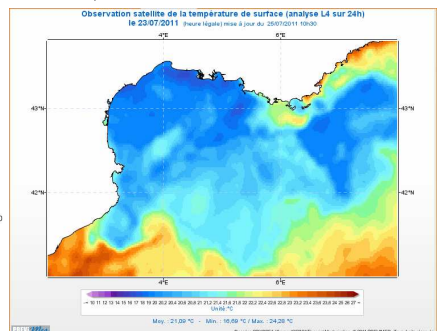
Figure 9a



Carte 14



Rose des vents



Carte 15

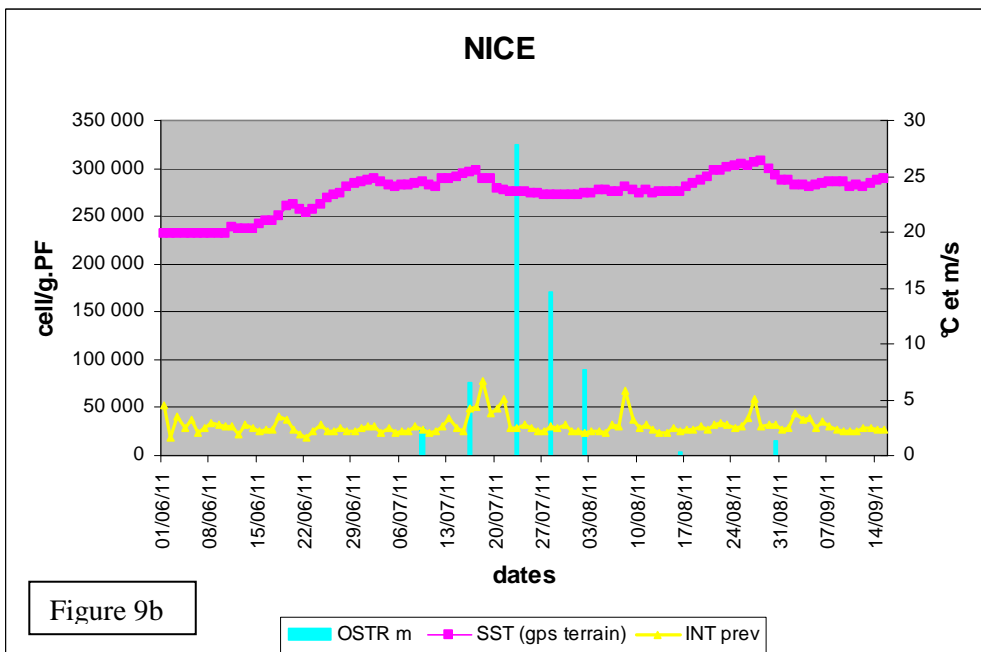


Figure 9b



#### 4.2.7. La Corse : Calvi et Grigione

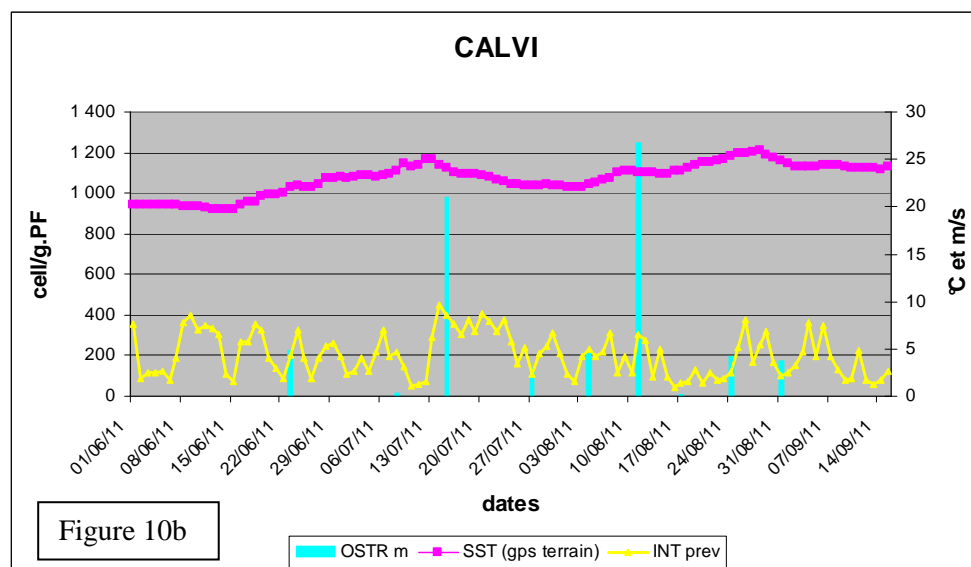
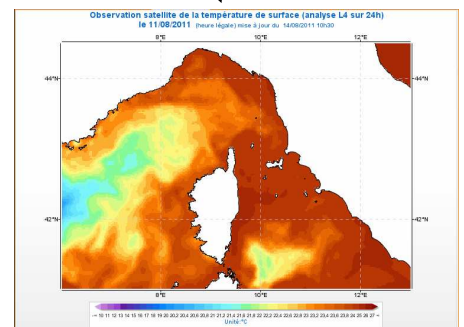
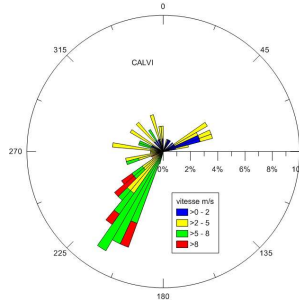
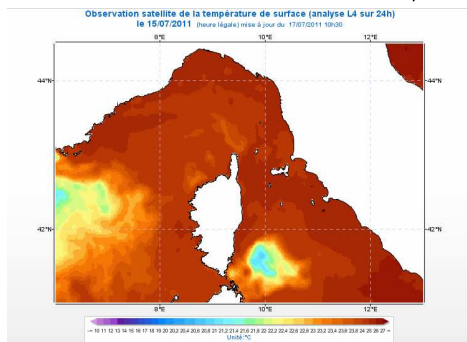
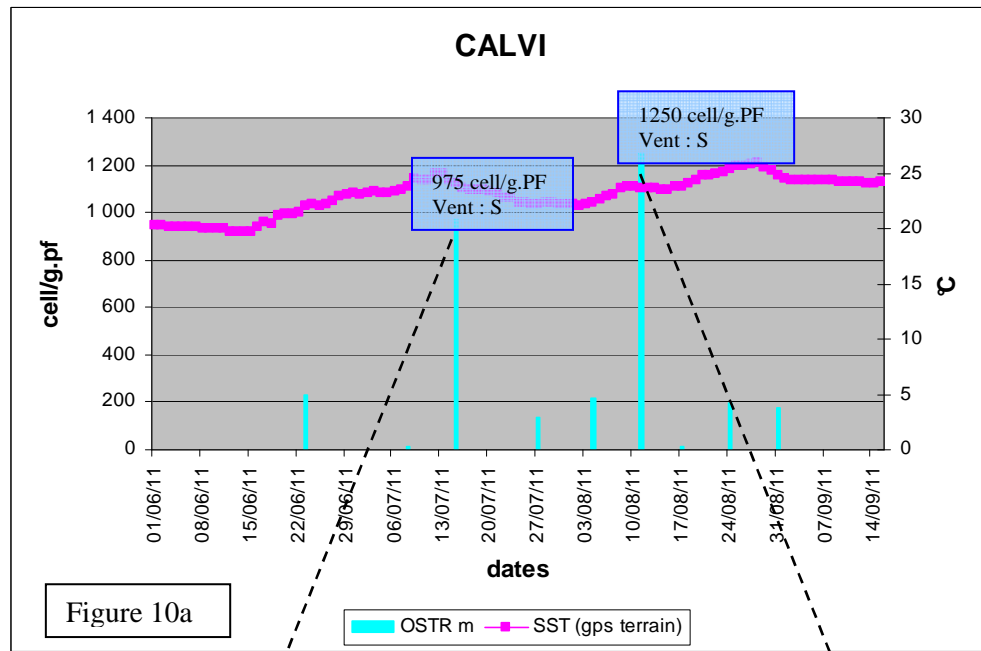
Calvi et Grigione sont caractérisées par des températures de l'eau qui s'élèvent progressivement durant la période de l'étude, relativement élevées (autour des 25°C cf. carte satellite 16,17, 18 et 19), et par des vents d'intensité variable présentant quelques épisodes provenant du Sud pour Calvi et du Nord pour Grigione (cf. rose des vents). Là encore, les épisodes de vent provoquent en général un refroidissement des masses d'eau.

A Calvi, l'*Ostreopsis* apparaît dans les échantillons vers fin juin (200 cellules/g.PF) avec une élévation du stock mi-juillet suivie d'une baisse qui s'étend jusqu'à mi-août, où le maximum observé dépasse à peine les 1200 cellules/g.PF. Dans le cadre du volet 2 d'OSCREEN, ce site s'est avéré relativement pauvre en *Ostreopsis* macroalgal. Pour Grigione (très peu d'échantillons) le stock d'*Ostreopsis* macroalgal est très faible et ne dépasse pas les 300 cellules/g.PF.

Sur aucun de ces deux sites les observations ne permettent d'établir un scénario caractérisé reliant les populations d'*Ostreopsis* macroalgal avec les conditions de températures et de vent.

Les taux de croissance pour ces deux stations sont de  $0.17 \text{ j}^{-1}$  pour Calvi et de  $0.22 \text{ j}^{-1}$  pour Grigione, les temps de génération de 4.04 j pour Calvi et de 3.03 j pour Grigione.





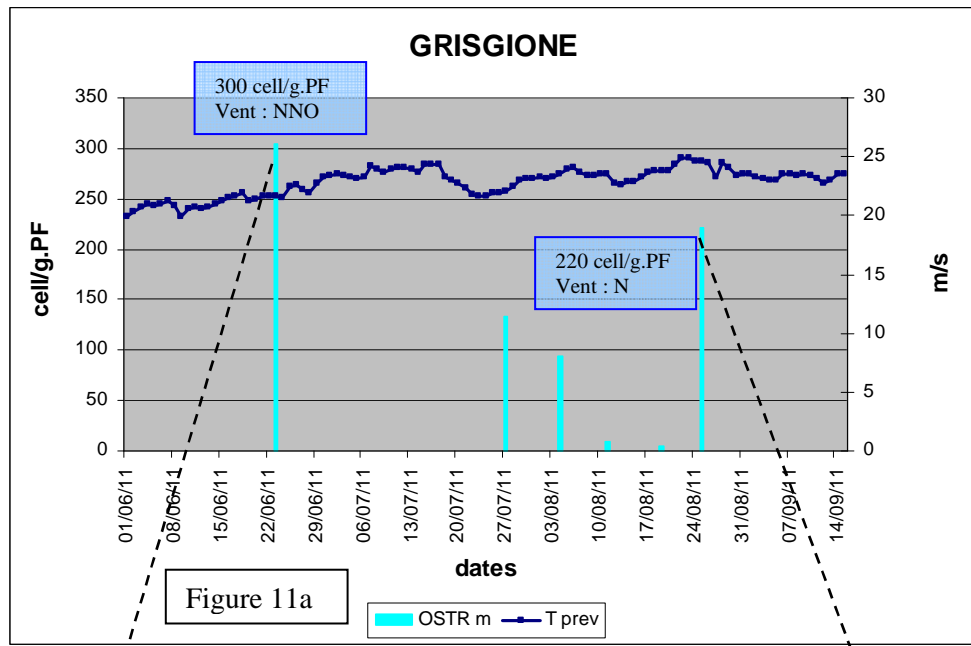
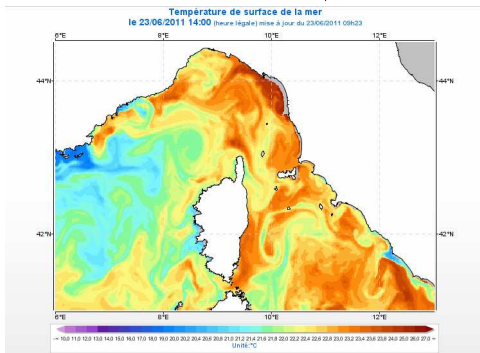
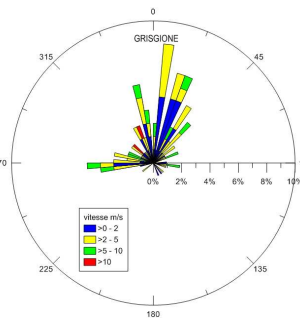


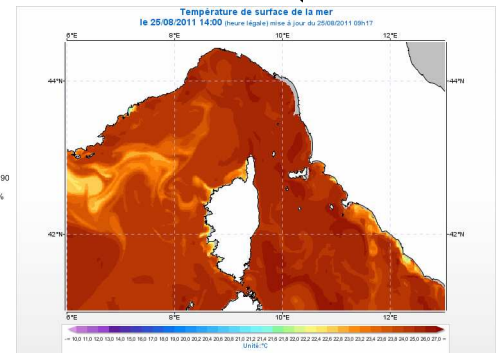
Figure 11a



Carte 18



Rose des vents



Carte 19

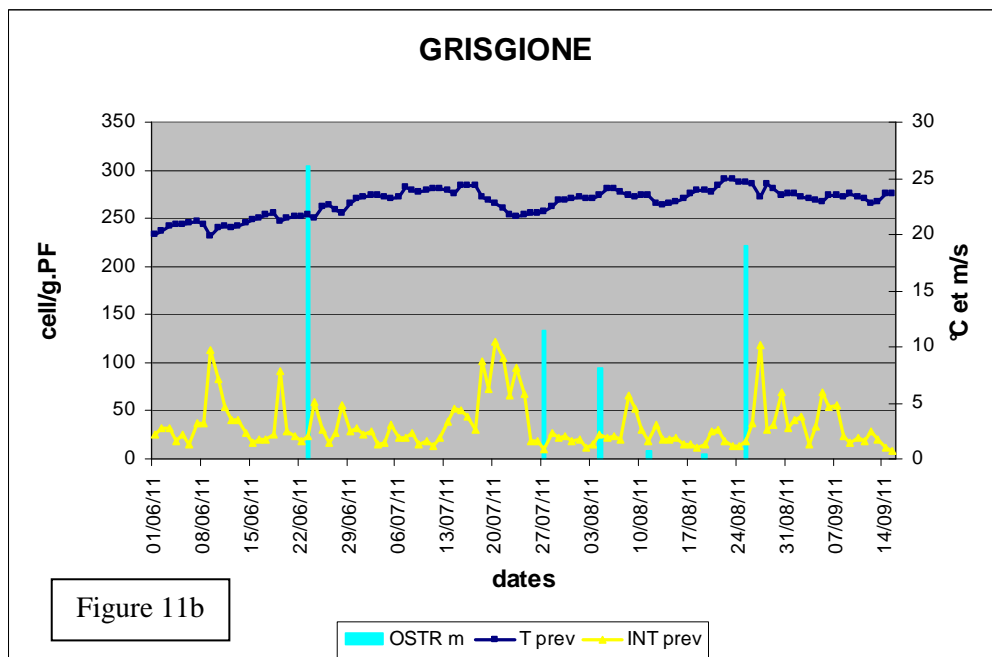


Figure 11b

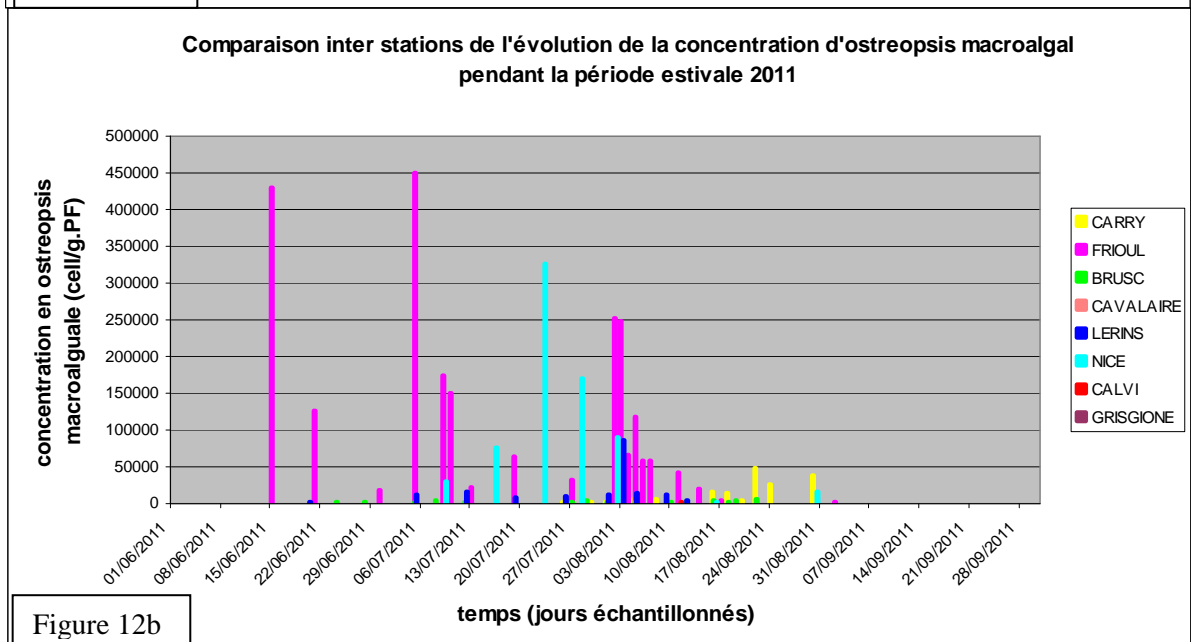
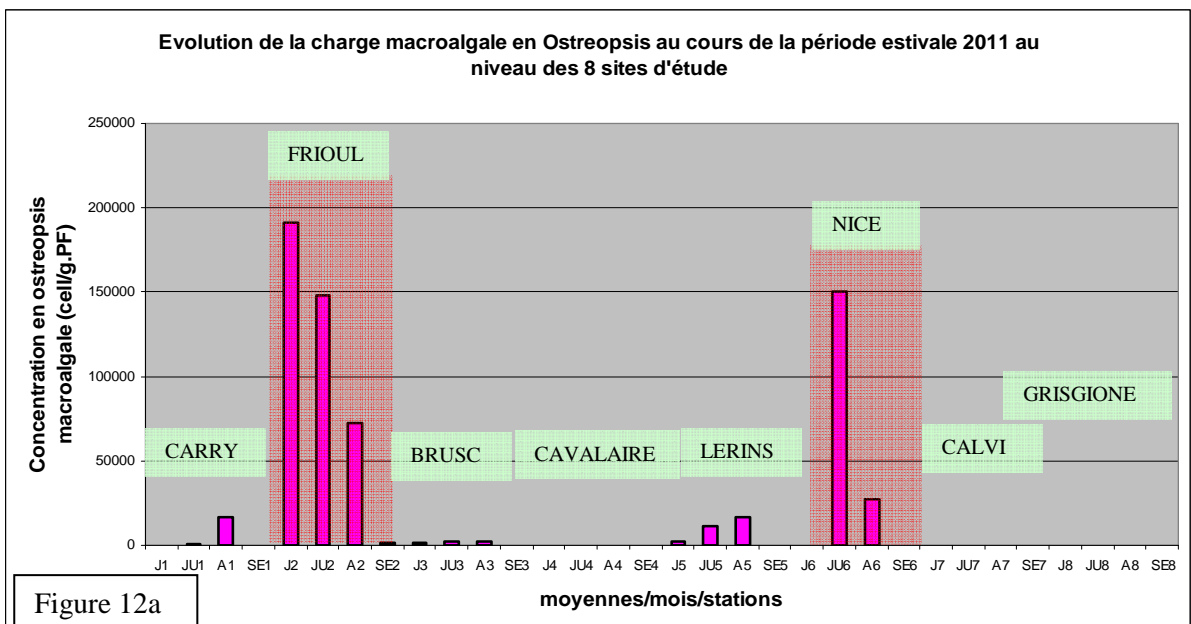
### 4.3. Comparaison inter stations et bilan

#### 4.3.1. Amplitude des stocks d'*Ostreopsis* macroalgal

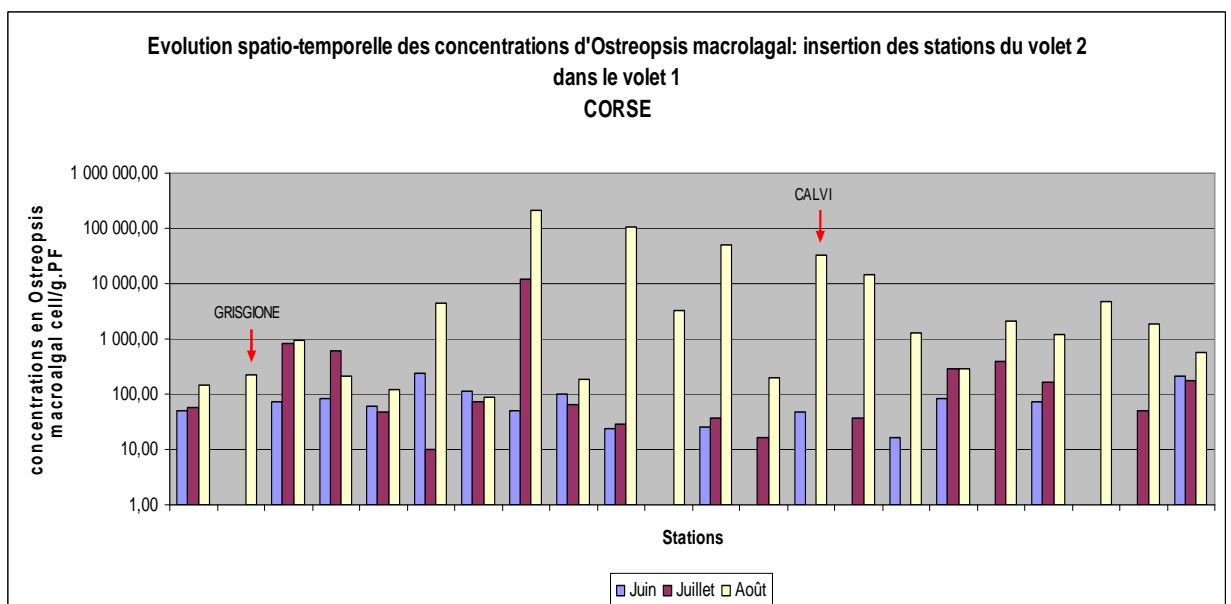
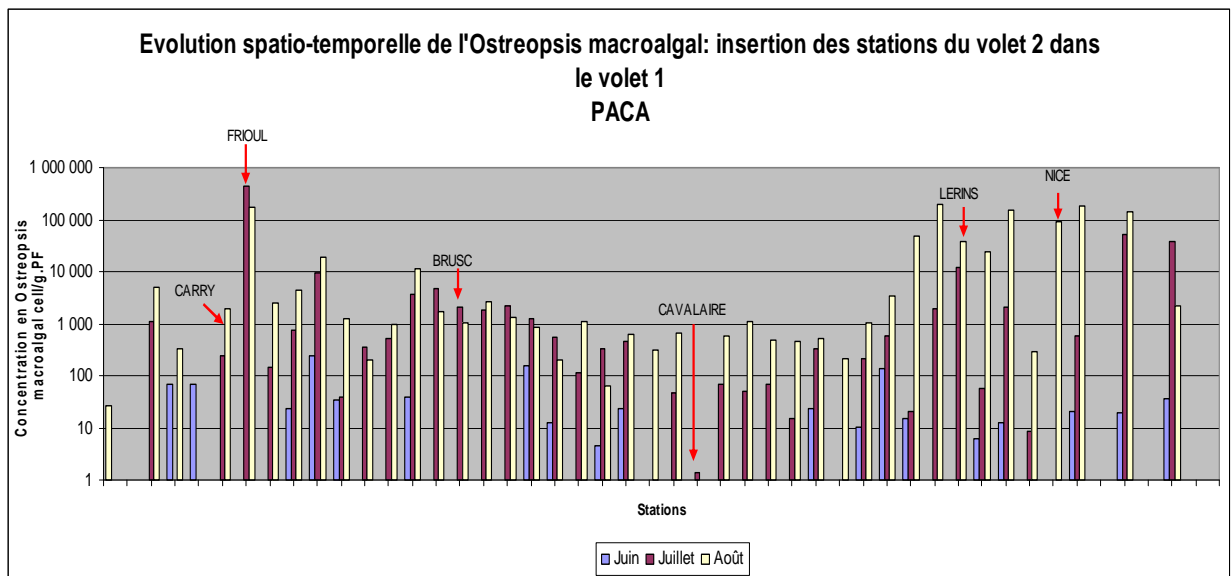
La figure 12a compare les concentrations en *Ostreopsis* macroalgal moyennées par mois pour les 8 stations. Le Frioul et Nice se distinguent nettement des autres stations par l'importance de leur stock d'*Ostreopsis*, suivis, mais à des niveaux sensiblement inférieurs, par les îles de Lérins et Carry. Pour les 4 autres stations on relève des concentrations bien plus faibles avec quelques élévations ponctuelles du stock.

On notera le cas particulier de la calanque de Morgeret au Frioul qui montre dès le premier prélèvement du 15 juin l'un des deux résultats les plus importants, avec plus de 400 000 cellules d'*Ostreopsis*/g.PF, témoignant du début précoce, en saison pré-estivale et donc non décelé dans la présente étude, du phénomène d'implantation de la population d'*Ostreopsis*.

La figure 12b illustre la chronologie des dénombrements sur l'ensemble des sites.



Enfin, les résultats concernant les dénombrements des stocks d'*Ostreopsis* du volet 2 d'OSCREEN peuvent venir en complément et en comparaison de ceux ayant fait l'objet du volet 1. Les deux figures suivantes (les données du volet 2 sont moyennées/mois) montrent bien qu'à l'exception de Cavalaire, le volet 2 s'insère dans la série des stations du volet 1 de façon cohérente en terme d'amplitude des stocks observés. On remarquera la part que prend le site du Frioul dans cette répartition géographique des stocks, avec des niveaux équivalents, voire même supérieurs à ceux des Alpes-Maritimes.



### 4.3.2. Dynamique de croissance des stocks

Évaluée en sélectionnant quelques épisodes significatifs de l'évolution temporelle des stocks à chacune des stations (périodes retenues en annexe 6.5), leur dynamique de croissance ne peut être interprétée qu'en acceptant plusieurs approximations, dont les deux principales sont sans doute :

- l'incertitude sur la variabilité liée à l'échantillonnage lors du prélèvement des macroalgues ;
- l'absence de prise en compte du phénomène de décrochage des *Ostreopsis* de leur support macroalgal, phénomène capital au niveau des interprétations pour ce type d'étude : en effet, le différentiel de stock entre deux dates de prélèvement résulte bien du couplage simultané de la dynamique de croissance de la population d'*Ostreopsis* macroalgal et de la dynamique de décrochage des cellules, qui dépend à la fois de processus purement biologiques, mais aussi de conditions environnementales telle que l'agitation de la mer.

Ces considérants amènent donc à relativiser les résultats ci-dessous (ils peuvent être minorés car ils ne distinguent pas les effets du décrochage), mais permettent de donner un cadre à la prévision de scénarii de croissance des stocks macroalgaux dans un objectif de prévision.

Calculés selon les équations de Reynolds (1997), deux indicateurs ont été retenus : le taux de croissance spécifique, et le temps de génération (cf annexe 6.3).

Concernant les taux de croissance spécifiques ( $r$  en figure 13), les valeurs calculées sont comprises entre 0,15 et 0,50 jour<sup>-1</sup> ce qui entre dans la fourchette des valeurs relevées dans la littérature pour des recherches sur les preferendum environnementaux de l'*Ostreopsis* en milieu de culture. Les taux les plus élevés sont par ordre décroissant Carry, le Frioul, Cavalaire, puis Grisgione, le Brusuc, Calvi, Nice et Lérins.

Pour les temps de génération ( $T$  en figure 13), l'ensemble des résultats est compris entre 3 et 5 jours, avec par ordre croissant Grigione, le Frioul, le groupe Calvi-Nice-Cavalaire-Lérins très proche de 4 jours, puis Carry proche de 5 jours.

Le temps de génération, aussi appelé temps de doublement de la population, peut donner lieu à un calcul prévisionnel approximatif de l'augmentation de la population connue au temps  $t$  en faisant la projection au temps  $t+n$ .

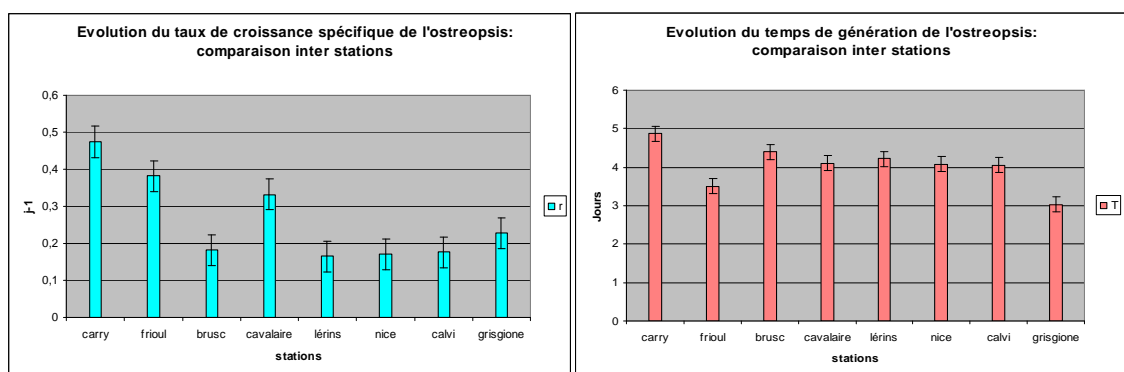
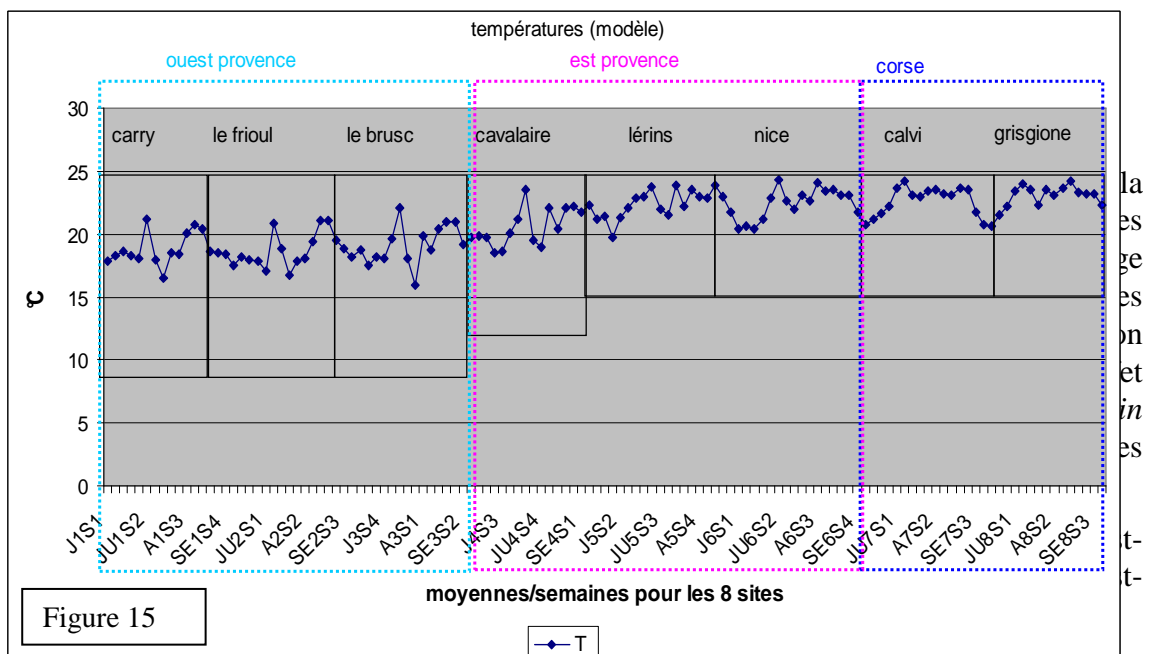
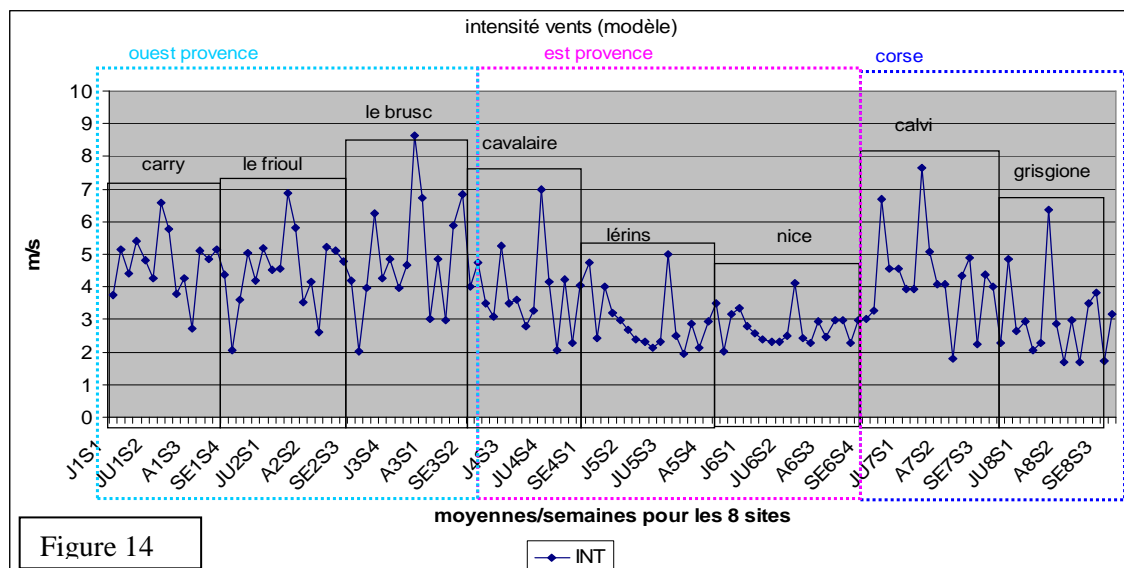


Figure 13 :  $r$  = taux de croissance spécifique ;  $T$  = temps de génération

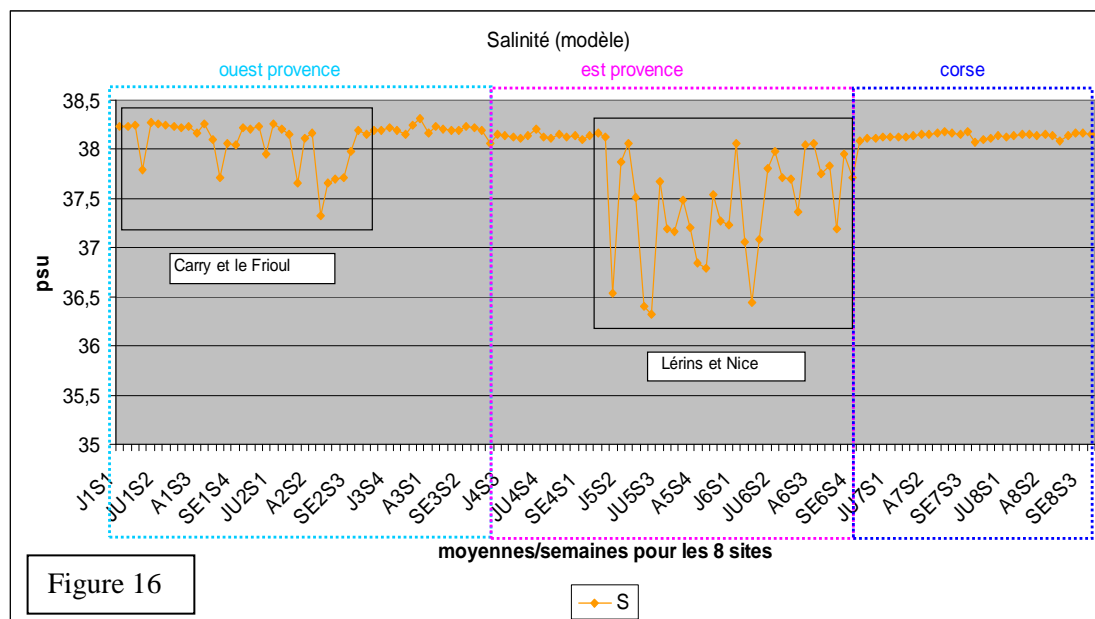
### 4.3.3. Caractérisation environnementale des stations : la température et le vent

Comme relaté par Julien Sghez en 2009, 3 sous zones se détachent : une zone Ouest-Provence plus agitée et plus froide, une zone Est-Provence ligure plus calme et chaude et la Corse. Ces résultats sont illustrés sur les figures ci-dessous (14 et 15), elles représentent l'évolution des vitesses de vent et des températures de l'eau moyennées par semaine avec les 8 stations juxtaposées afin de faciliter la représentation spatiale et temporelle de ces caractéristiques. Cavalaire semble être intermédiaire entre la zone Ouest-Provence et Est-Provence ligure.



### 4.3.4. Caractérisation environnementale des stations : la salinité

Avec la même représentation que ci-dessus, la figure 16 met en évidence des différences très importantes entre les sites : sur les 8 sites étudiés, 4 se distinguent nettement par l'évolution de la salinité telle que modélisée avec prise en compte des débits à la mer issus des bassins versants, provoqués par les événements météorologiques (pluies) durant la période d'étude. Il s'agit des sites de Carry et du Frioul, concernés par une dérive potentielle des panaches issus de l'exutoire du Rhône, et des sites de Lérins et de Nice, concernés quant à eux par des apports de fleuves côtiers tels que la Siagne, le Var et l'Argens. Or il se trouve que ces 4 sites sont ceux où ont été relevées les plus fortes densités d'*Ostreopsis macroalgal*. Les données de la littérature, issues d'observations de terrain, sur les liens entre l'*Ostreopsis* et la salinité sont loin d'être concordantes, de même que celles concernant l'*Ostreopsis* et les teneurs en nutriments, mais cette approche plus globale du volet 2 d'OSCREEN, autorisée par l'utilisation des données spatialisées est novatrice dans ce domaine, et semble bien ouvrir un champ d'hypothèses qu'il serait intéressant d'explorer plus à fond.



La figure 17 ci-dessous illustre la représentation spatiale des salinités sur l'ensemble de la zone à la fin mai, c'est-à-dire juste avant le début des prélèvements. On y voit bien représentés les panaches en provenance du Rhône, mais aussi celui venant de l'exutoire des fleuves côtiers de la région de Cannes et de Nice.

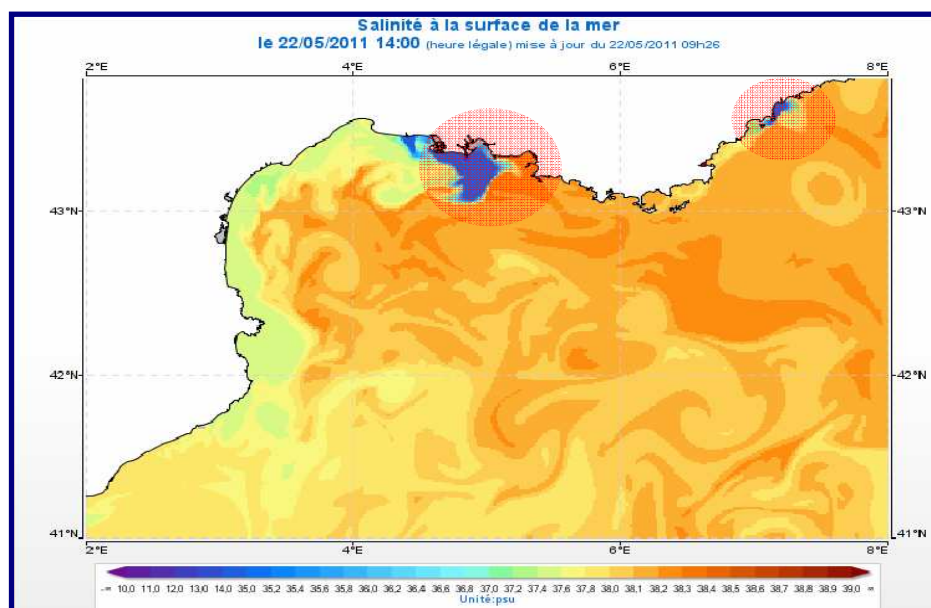


Figure 17 : exemple de représentation des variations de salinité issue du modèle Mars-3D (Prévimar)

Les trois cartes de pluviométrie mensuelle de juin, juillet et d'août 2011 rassemblées en annexe 6.6 confortent les hypothèses relatives à l'origine des panaches de dessalures durant la période d'étude (pluies excédentaires en juin, et surtout juillet).

#### 4.3.5. Caractérisation environnementale des stations : les variations quotidiennes des paramètres environnementaux

La comparaison des sites décrivant les variations journalières de la salinité et des températures, tel que présenté en figure 18, confirme bien ce qui vient d'être présenté ci-dessus. Les quatre sites de Carry, du Frioul, de Lérins et de Nice sont bien ceux pour lesquels les oscillations conjuguées de la température et de la salinité correspondent aux plus fortes productions d'*Ostreopsis* macroalgal. Les quatre autres sites (Brusc, Cavalaire, Calvi et Grigione) subissent certes eux aussi des variations de température, mais la salinité reste très stable en comparaison. Ce sont les sites pour lesquels la production d'*Ostreopsis* macroalgal reste faible. Ces commentaires ont une portée générale sur la relation entre l'*Ostreopsis* et l'instabilité du milieu pour la salinité, mais les graphes produits n'autorisent pas à relier formellement la réponse des stocks d'*Ostreopsis* macroalgal à ces variations quotidiennes à court terme. A ce titre, les constats posés ci-dessus doivent être approfondis de façon à conforter des indicateurs d'alerte à venir.



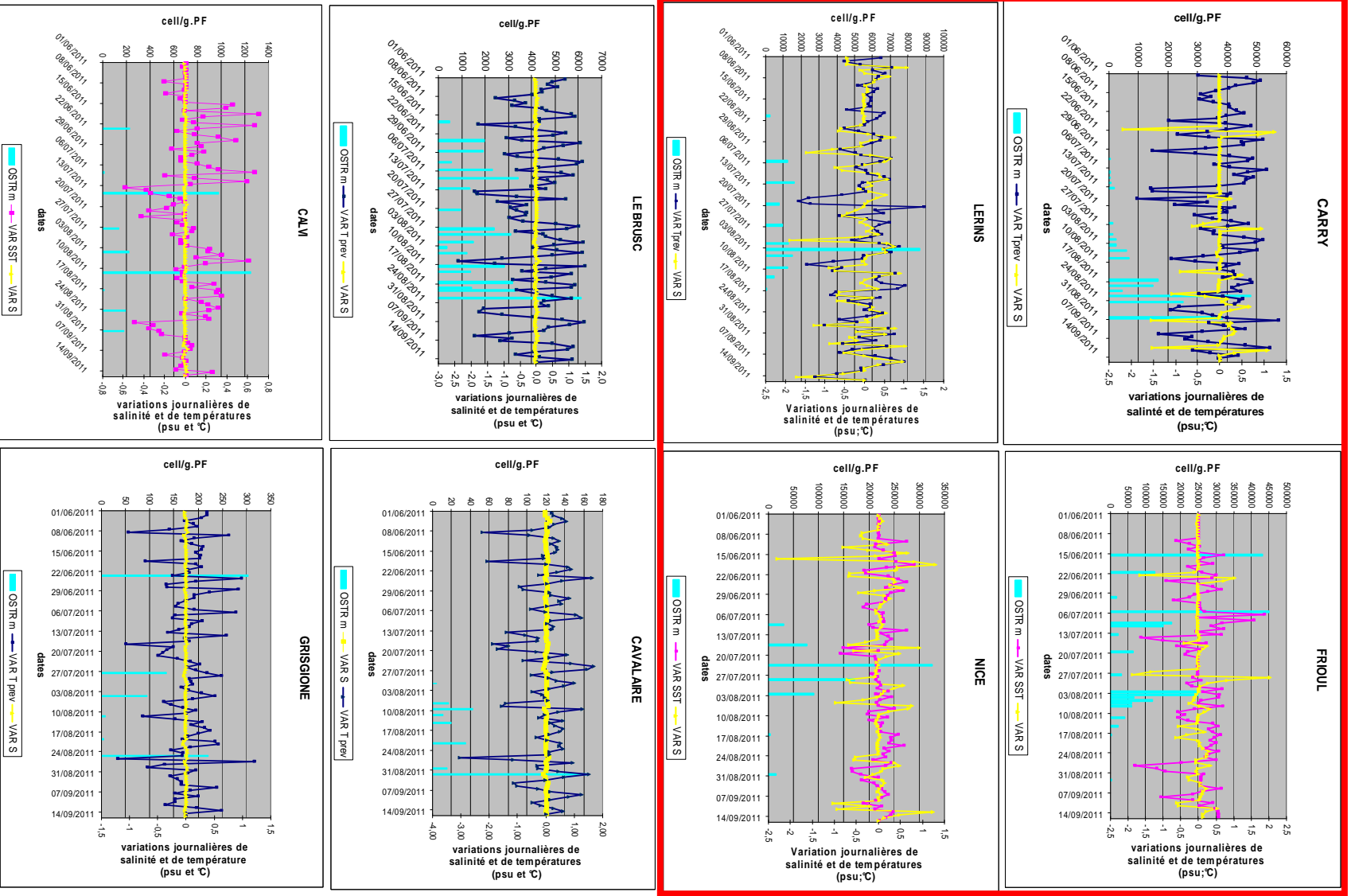


Figure 18 : représentations des variations journalières de salinité et de température mises en parallèles avec les abondances d'Ostreopsis macroalgale pour les 8 sites d'étude.

#### 4.3.6. Analyse statistique des paramètres environnementaux

Les résultats de l'analyse en composante principale présentés ci-dessous donnent une synthèse des informations que l'on peut tirer de l'analyse de ces données biotiques et abiotiques. Tout d'abord sur le cercle des corrélations qui nous informe sur les liens existant entre les variables, on observe une corrélation positive entre la variable OSTR (qui représente les concentrations en *Ostreopsis* macroalgal de toutes les stations moyennées par mois) et la variable VS qui représente les données de variations journalières de salinité ; ces deux variables expliquent positivement l'axe 2. Ce même axe est expliqué négativement ici par la variable VT qui représente les variations journalières de températures au sein des 8 sites et toujours moyennées par mois. Cette variable est anti-corrélée avec la variable OSTR. La variable DIR (direction du vent) explique positivement l'axe 1 et est anti-corrélée avec la variable INT (intensité du vent) qui explique négativement l'axe 1.

Les résultats sur le plan des individus semblent dans leur globalité cohérents avec ceux notés plus haut lors de la description des stations, comme par exemple le mois de juillet au Frioul qui est caractérisé par de fortes concentrations en *Ostreopsis*. Pour interpréter les résultats sur le plan des individus il faut superposer sur celui-ci les informations du cercle des corrélations.

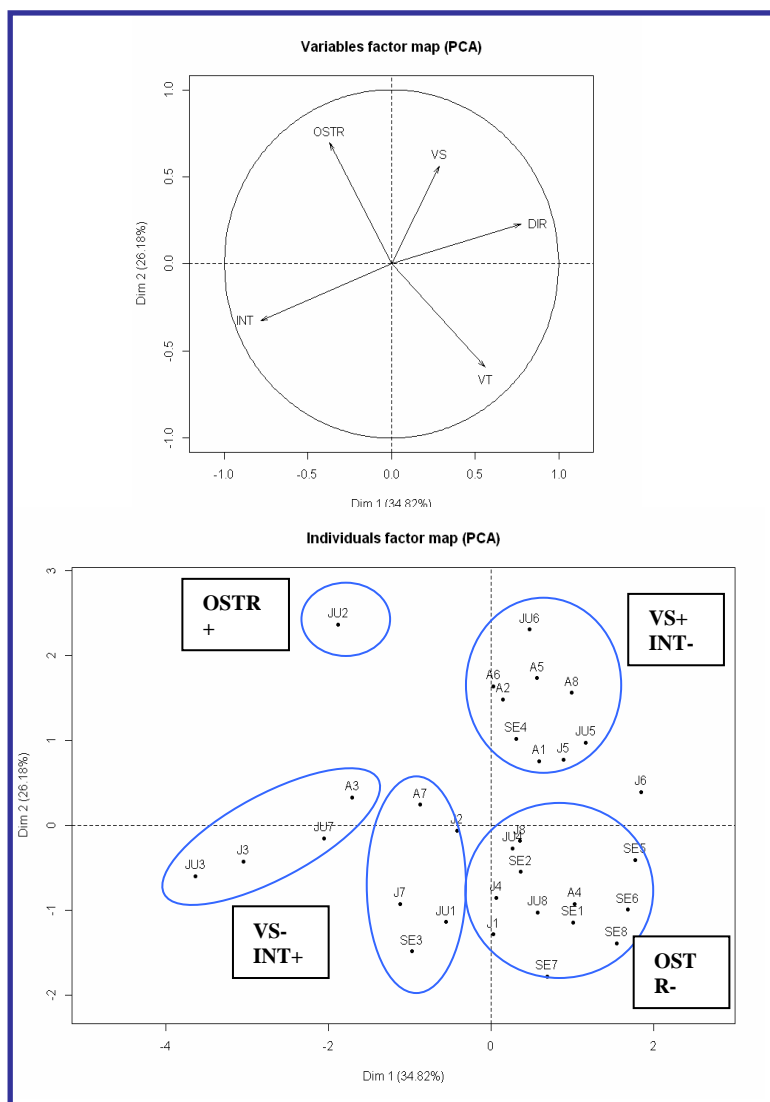


Figure 19 : de haut en bas ; cercle des corrélation et plan des individus  
Code : J, JU, A, SE= juin, juillet, août, septembre et les chiffres correspondent aux 8 stations avec 1 =carry, 2=frioul, 3=brusc, 4=cavalaire, 5=lérins, 6=nice, 7=calvi, 8=grisgone  
Les encadrés avec les variables annotés d'un + ou d'un - signifient par quoi les différents mois aux différents stations se caractérisent.  
VT= variation journalière de température  
VS= variation journalière de salinité  
INT= intensité du vent  
DIR= direction du vent  
OST= concentration en *Ostreopsis*

De plus si on se reporte aux figures 5a et 5c qui concernent le Frioul pour les années 2007, 2008 et 2009, on observe des variations de salinités importantes en 2008 qui sont corrélées positivement de façon significative avec les variations des abondances d'*Ostreopsis* ( $\rho = 0.51$  ;  $p = 0.04$  corr de sp).





## 5. Conclusion et perspectives

Revenant sur l'objectif principal du volet 2 d'OSCREEN qui est, au moyen des données échantillonnées, spatialisées et modélisées disponibles, de tenter de caractériser les conditions environnementales qui favoriseraient les efflorescences d'*Ostreopsis* et/ou la disparition de ces phénomènes, on peut faire ressortir de cette étude les points suivants :

- ✓ A partir de l'exemple des huit sites étudiés, il se confirme que l'*Ostreopsis* se développe dans des milieux n'ayant pas les mêmes caractéristiques environnementales (exemple des conditions opposées de température et de vent pour Nice et pour le Frioul).
- ✓ Pour un site donné, le lien entre la température et les concentrations d'*Ostreopsis* n'est pas établi. Les températures auxquelles l'*Ostreopsis* se développe varient entre 16°C et 26°C selon les sites, ce qui est en accord avec les données de la littérature.
- ✓ De plus, le lien entre les phases constatées de développement de la population macroalgale d'*Ostreopsis* et les évolutions journalières de la température n'est pas non plus établi. Sur un même site, une période de réchauffement de l'eau pourra coïncider avec un accroissement du stock d'*Ostreopsis* macroalgal à un moment donné, alors que cela ne sera pas observé à un autre moment.
- ✓ Pour l'ensemble des sites, l'évaluation du taux de croissance spécifique (indicateur de la dynamique de croissance des stocks d'*Ostreopsis* macroalgal) aboutit à des valeurs comparables à celles relevées dans la littérature dans le cas d'expérimentations de cultures d'*Ostreopsis*. Cela confirme pour le moins les conditions favorables rencontrées par l'*Ostreopsis* sur le terrain pour assurer son développement.
- ✓ L'étude du vent couplé à la température nous donne des informations sur la dynamique de croissance de l'*Ostreopsis* mais site par site et pas de façon globale. Concernant les vents, l'alternance de périodes agitées et d'accalmies paraît être propice au développement de la microalgue, avec les phases de croissance du stock macroalgal pendant les périodes calmes. Ce schéma semble être vérifié pour l'ensemble des sites sauf peut-être à Calvi. Par son importance en tant qu'évènement météorologique récurrent, particulièrement dans les Bouches-du-Rhône et dans le Var, le mistral apparaît comme un acteur important dans l'évolution du cycle de vie de l'*Ostreopsis*. Les effets de telles conditions liées au mistral peuvent être de plusieurs ordres : effet direct sur la température, effet direct par accélération du décrochage des *Ostreopsis* de leur support, mais aussi effets indirects et sans doute retardés par enrichissement en nutriments des masses d'eau.

- ✓ L'étude de la salinité semble pouvoir apporter des informations intéressantes avec l'optimisation des outils de représentation spatiale et de prédiction. Mais (comme pour le mistral) la part n'est pas faite entre les effets décalés potentiels d'une période de dessalure et les éventuels enrichissements en nutriments qu'elle pourrait induire. Des études en vue de la validation de telles hypothèses mériteraient d'être approfondies, car même si la relation entre les débits fluviaux commence à être validée dans plusieurs études concernant d'autres espèces de dinoflagellés toxiques, il serait intéressant de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses pour l'*Ostreopsis* en tant que genre épibenthique. Il apparaît que les enjeux liés à une meilleure connaissance entre la dynamique de l'*Ostreopsis* et ce type de forçage justifient sans doute une poursuite des recherches.
- ✓ Les outils d'analyse des données satellitaires et la modélisation se sont considérablement améliorés en milieu marin côtier, et continuent de le faire. Mais une de leurs difficultés techniques et méthodologiques porte sur un point très particulier qui recoupe directement la problématique liée à l'*Ostreopsis*, à savoir la bande très côtière, les premiers mètres à partir de la côte. A l'heure actuelle, ces données, pour celles qui sont les plus côtières, résultent toutes d'extrapolations mathématiques à partir des données marines validées les plus proches, afin d'éviter les biais dus à l'interface terre-mer. L'optimisation de ces extrapolations fait partie des travaux en cours sur ces outils. La méthodologie utilisée dans la présente étude doit donc prendre en compte cette situation pour pondérer éventuellement les interprétations actuelles.

Il reste de nombreux axes de recherche à développer afin d'améliorer les connaissances sur cette espèce : mise en culture avec identification des facteurs limitants et preferendum, aspects toxiques (chimie et contamination de la chaîne alimentaire), géno-typicité des différentes espèces d'*Ostreopsis*, et enfin études environnementales sur sites, qui montrent bien que la multiplicité des facteurs en jeu et leurs interférences rendent difficile aujourd'hui une modélisation capable d'être validée sur le terrain. La relation avec la couverture macroalgale elle-même devra être précisée, la diversité de celle-ci évoluant avec l'avancement des saisons, ainsi que les densités respectives des espèces.

Il conviendra de ne pas oublier d'approfondir nos connaissances sur le risque induit par l'*Ostreopsis* sur l'écosystème lui-même (exemple des oursins), en rappelant que de nombreuses zones concernées par ces phénomènes sont incluses dans des zones faisant l'objet de protection au titre de la bio-diversité.

L'évaluation du risque lié à l'*Ostreopsis* doit passer par la connaissance, sur le terrain, des niveaux de présence de l'*Ostreopsis* dans l'eau, mais surtout sur son support d'origine qui est pour l'essentiel le support macroalgal. On pourra ici suggérer l'intérêt qu'il y aurait pour les scientifiques et les gestionnaires de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour élargir le concept de « stock macroalgal d'*Ostreopsis* » à celui de « réservoir d'*Ostreopsis* », qui consisterait à croiser les densités cellulaires identifiées dans le stock (c'est l'approche du présent travail) avec les surfaces en macroalgues dont la bathymétrie (à définir) pourrait être de 0 à

5 mètres par exemple. Ainsi ce « réservoir » pourrait être considéré comme la source potentielle d'un relargage modélisable de cellules d'*Ostreopsis* planctoniques lors d'un évènement météorologique significatif.

A l'heure actuelle, il est difficile d'anticiper un risque de bloom d'*Ostreopsis* et de se préparer à une éventuelle alerte, même en connaissant l'abondance de l'*Ostreopsis* macroalgal un jour donné, et en disposant en parallèle pour les jours qui suivent de prévisions météorologiques ou de modélisation fiables pour la température et le vent.

Une bonne connaissance des sites, par des personnes en charge de leur surveillance et informées des niveaux du stock d'*Ostreopsis* et de prévisions météorologiques fiables (Prévimer doit remplir là un de ses objectifs), devrait **permettre d'anticiper une possible situation d'alerte**, sans que pour autant celle-ci soit assurée. Néanmoins, on rappelle que le stock d'*Ostreopsis* macroalgal est en lui-même un risque vis-à-vis de l'usage « consommation des produits de la mer » tel que oursins (dont la pêche est interdite en été) mais aussi tout ce qui peut être pêché en zone très côtière dans la cadre des activités de loisir.

De la même façon, la connaissance d'une situation à risque *Ostreopsis* sur un site donné ne semble pas à l'heure actuelle être extrapolable aux sites voisins. Mais l'identification d'un risque à un endroit devrait amener à s'interroger sur la situation potentielle sur d'autres sites voisins.

Enfin, la connaissance approfondie de leur littoral par les acteurs locaux (configuration de la côte, connaissance des effets des vents sur le degré d'agitation de la mer, observation des détails de la côte comme l'aspect de la couverture algale, et l'aspect de la qualité de l'eau, etc...), se confirme comme un élément déterminant et complémentaire des outils plus sophistiqués qui pourront éventuellement être mis à disposition d'une surveillance à plus large échelle.

En conclusion, il semble bien que les choix de mise en place d'un réseau de surveillance dédié à l'*Ostreopsis* dépendront d'abord de l'importance que les acteurs impliqués accorderont à ce risque émergent, et des répercussions sociétales potentielles en cas d'évènement important. Des réseaux existent déjà (eaux de baignade et activités aquacoles), mais en fonction des usages visés leur portage devra sans doute être optimisé.

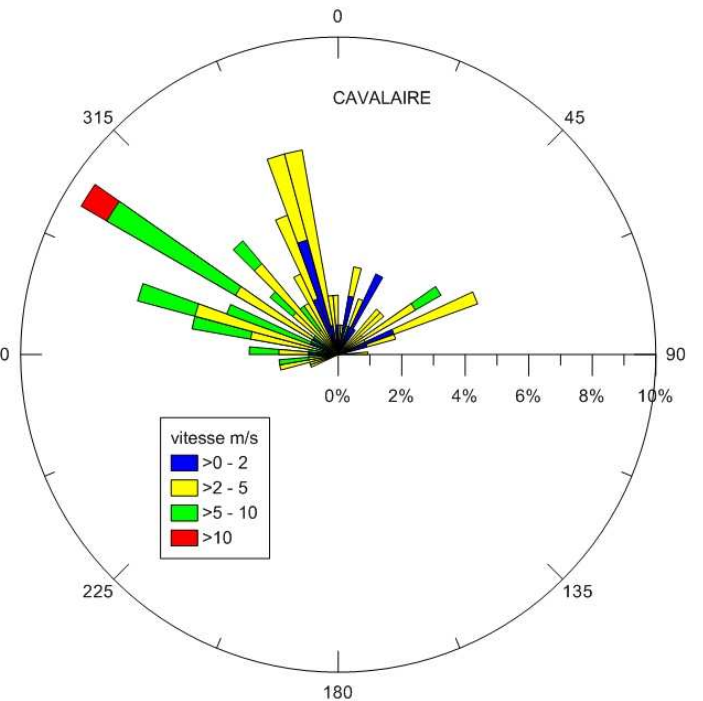
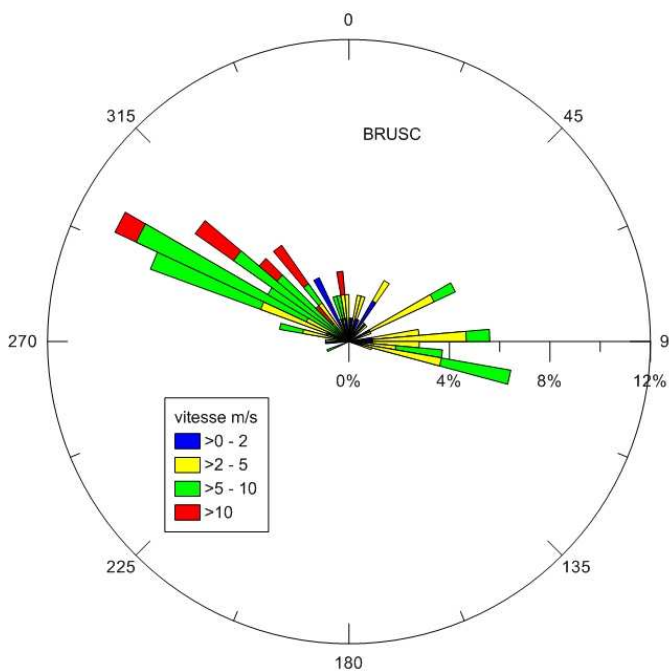
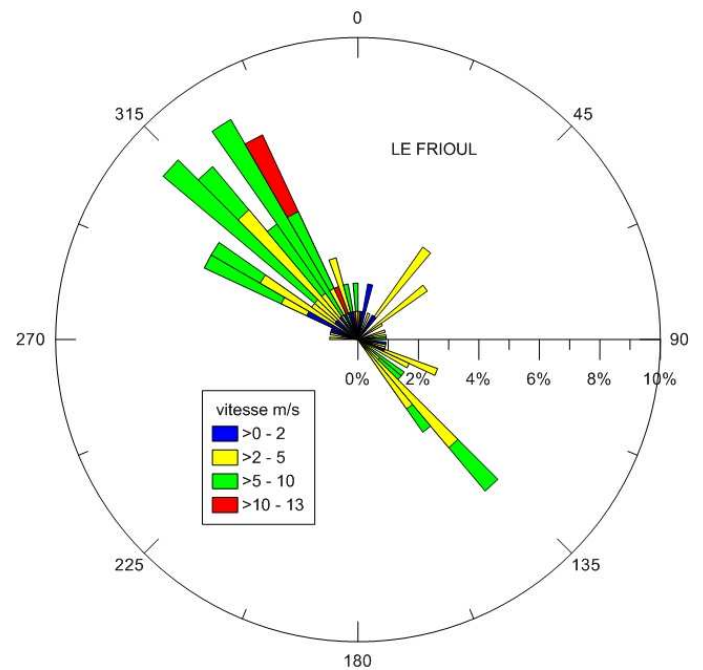
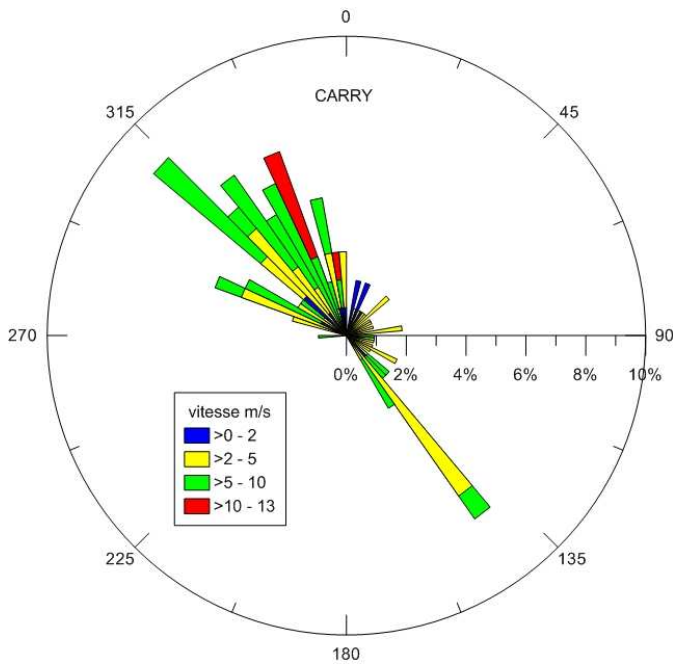


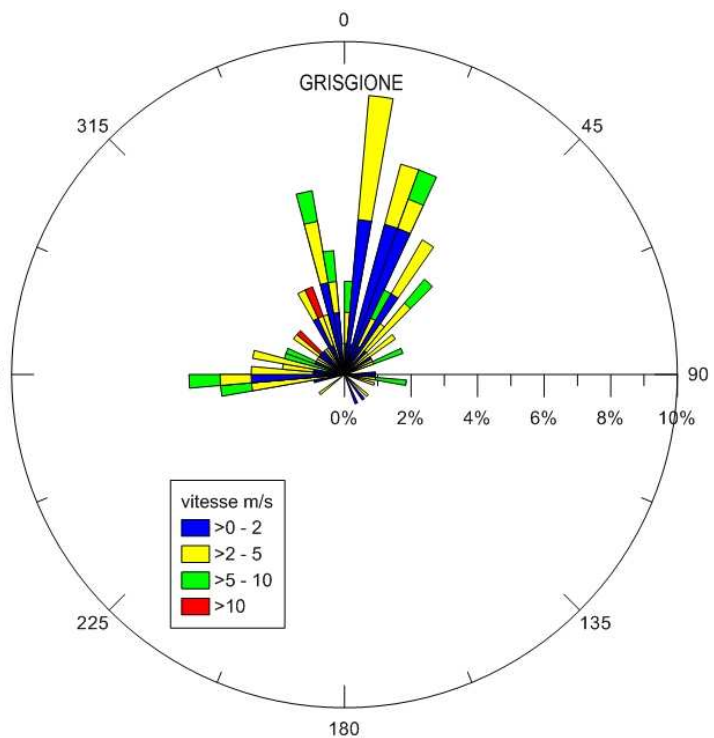
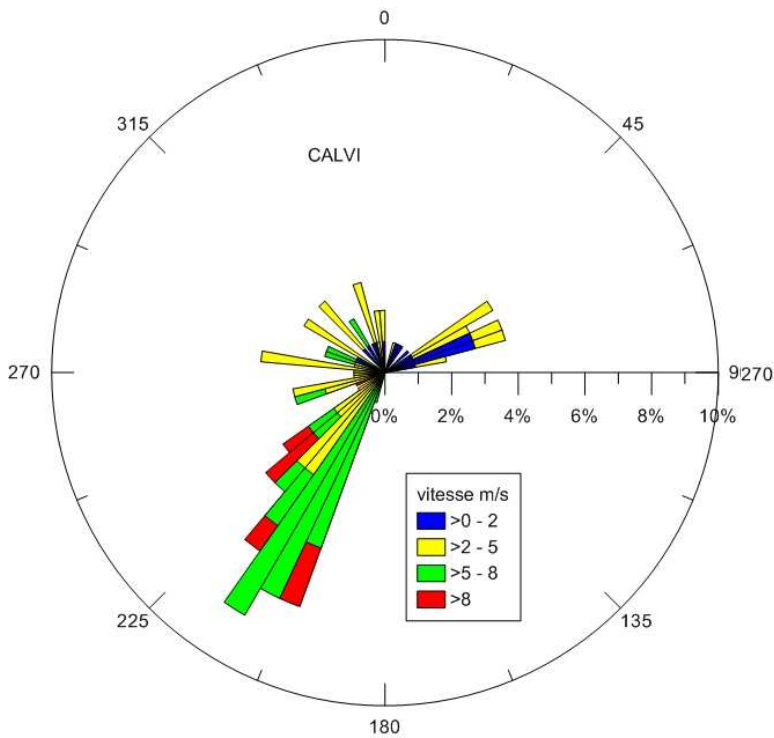
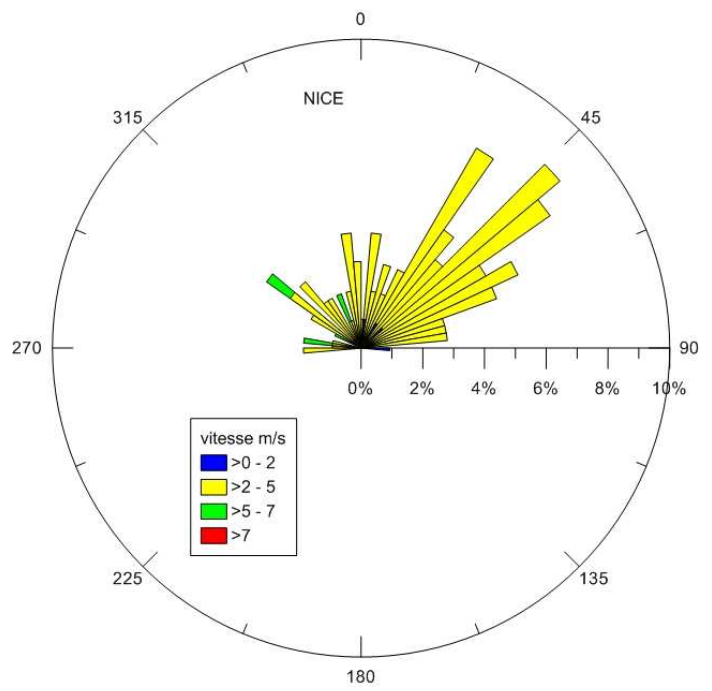
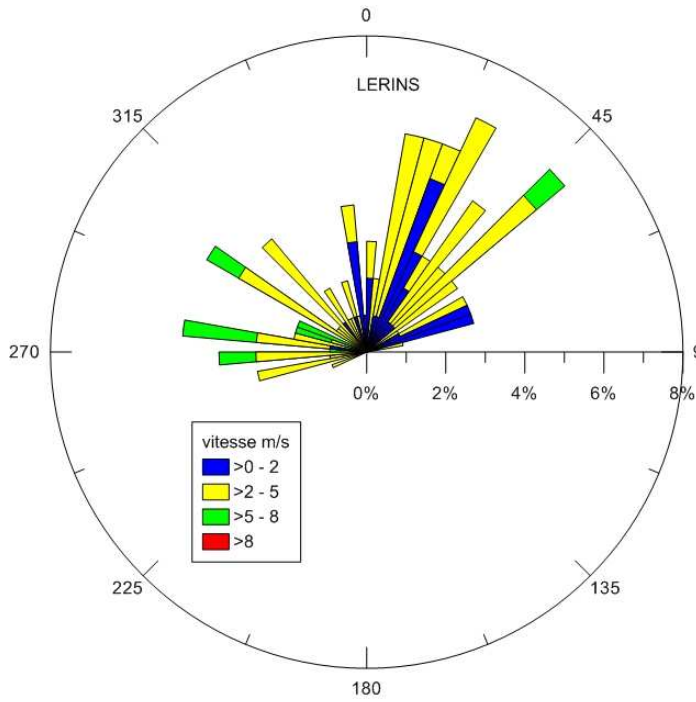


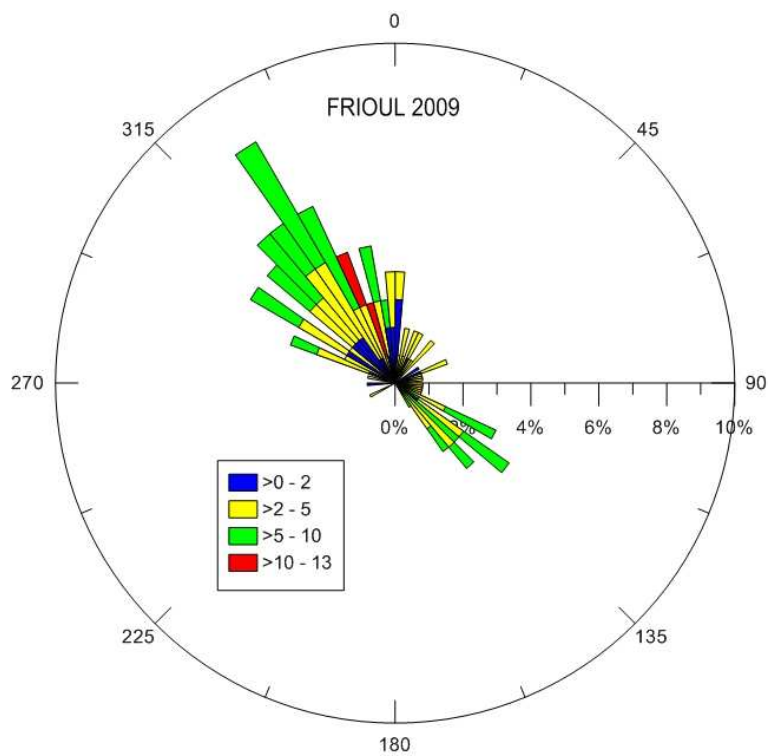
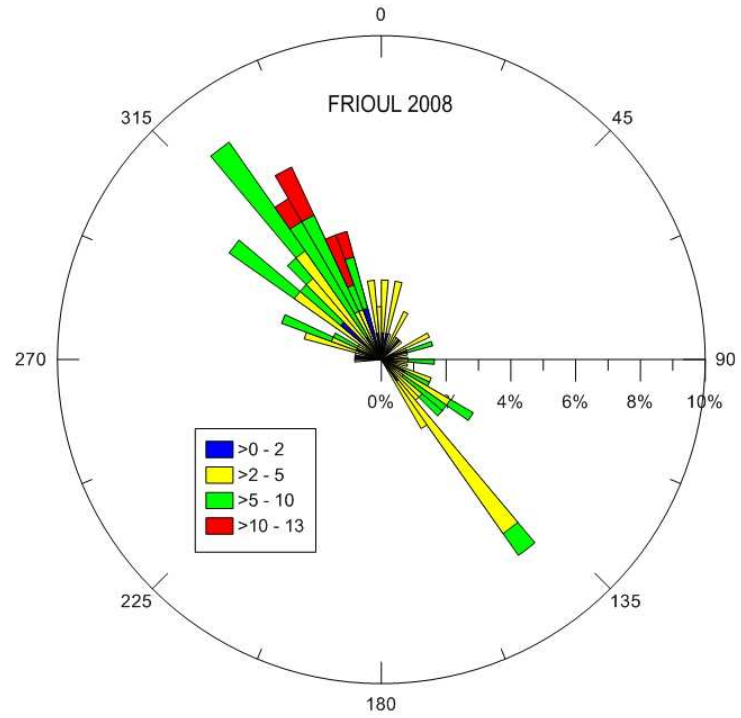
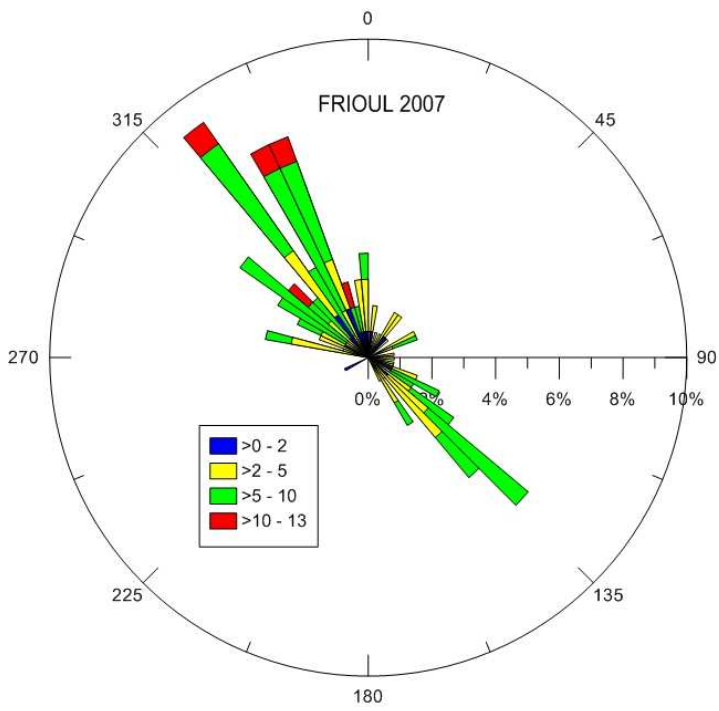
## 6. Annexes



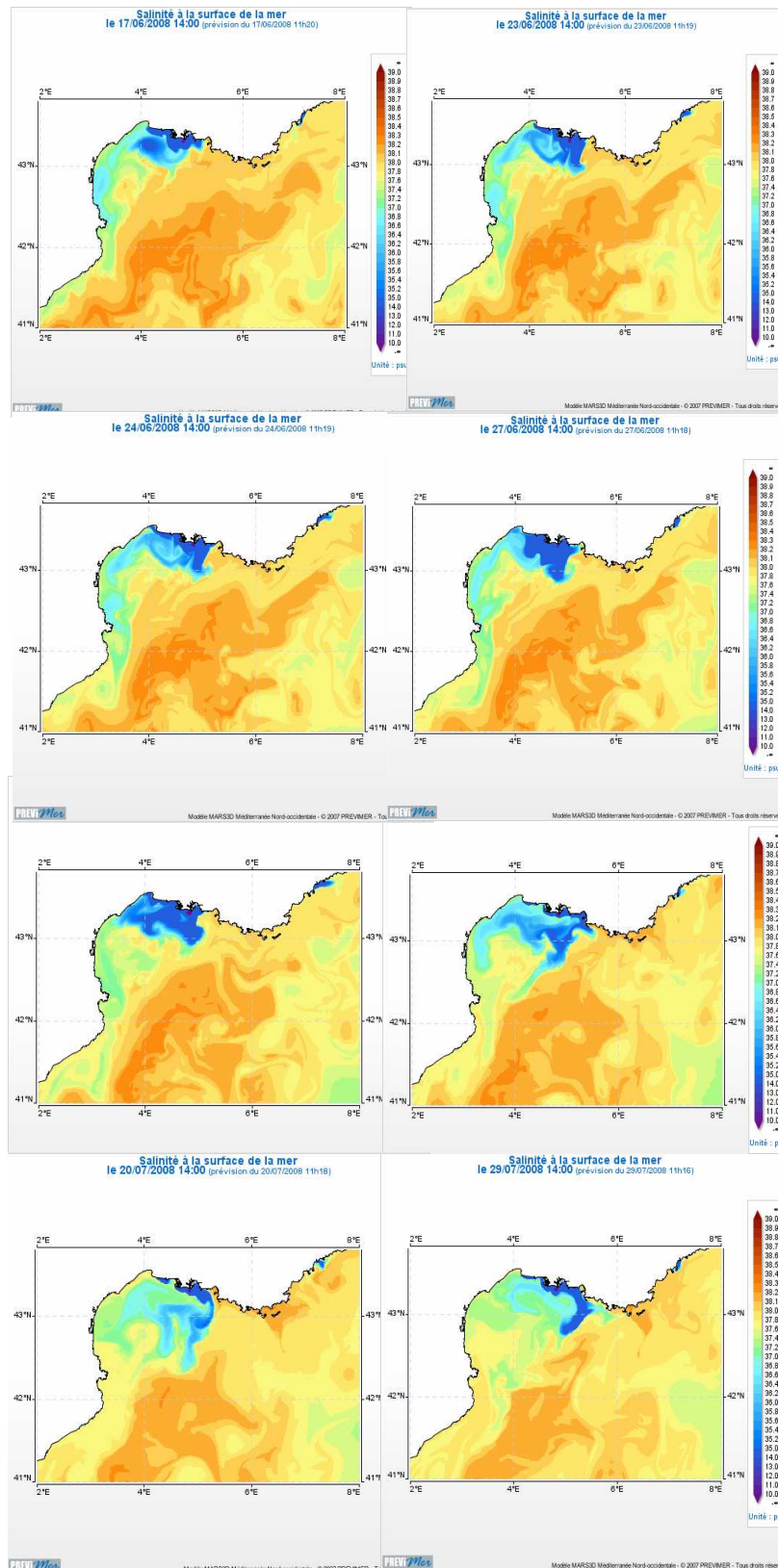
## 6.1. Rose des vents







## 6.2. Cartes des salinités issus du modèle (Prévimer) lors de la dessalure de mi-juin à mi-juillet 2008



### 6.3. Equations de Reynolds

Pour le Volet 2 d'OSCREEN, le taux de croissance spécifique ( $r$ ) et le temps de génération ( $T$ ) ont été retenus comme indicateurs de la productivité de la population de l'*Ostreopsis* macroalgal.

Sur chaque site, les périodes de croissance caractéristiques ont été identifiées, les indicateurs calculés selon la méthodologie ci-dessous, et ensuite moyennés pour ne retenir qu'une valeur par site.

#### RAPPEL : calcul du taux de croissance

La majorité des végétaux planctoniques est unicellulaire ou constituée sous formes de colonies (cénobes) de quelques individus. Le cycle cellulaire est donc l'élément central de leur écologie. Reynolds (1997) a défini les termes relatifs à la croissance des populations planctoniques. Une génération peut ainsi se définir comme l'ensemble des individus issus du mécanisme de division cellulaire et de répllication. Dans le même ordre d'idée, la réalisation du cycle de répllication complet (c'est-à-dire depuis la séparation d'une cellule-fille de sa cellule parentale jusqu'à sa propre division en deux nouvelles cellules-filles) définit une échelle de temps fondamentale: le temps de génération.

Pour des organismes unicellulaires, les cellules-filles sont identiques aux cellules parentales et l'accroissement du nombre de cellules est analogue au taux de croissance. Ceci n'est pas complètement réalisé pour les diatomées puisque la taille d'une des cellules-filles diminue après division, compte tenu des mécanismes de formation du frustule. En réalité, l'accroissement dans les communautés naturelles est la moyenne du comportement de l'ensemble des individus, tenant compte des accidents individuels et des phénomènes de mortalité notamment. Le taux de croissance spécifique,  $r$ , d'une population de micro-organismes peut être représenté par l'équation suivante, en faisant l'hypothèse d'une augmentation exponentielle du nombre d'individus :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{N_t}{N_0} = e^{rt} \quad (\text{R-1})$$

$$\text{soit: } N_t = N_0 \cdot e^{rt} \quad (\text{R-2})$$

avec:  $N_0$  : nombre d'individus au temps  $t = 0$ ,  
 $N_t$  : nombre d'individus au temps  $t$ .

Le taux de croissance spécifique est alors calculé par la relation:

$$r = \frac{\ln(N_t/N_0)}{t} \quad (\text{R-3})$$

Le temps de génération,  $T$ , peut donc être estimé en considérant un doublement de la population, soit  $N_t = 2 \cdot N_0$ , d'où :

$$T = \frac{\ln(2)}{r} = \frac{0.693}{r} \quad (\text{R-4})$$

$r$  s'exprime en inverse d'unités de temps ( $\text{h}^{-1}$  ou  $\text{j}^{-1}$ , selon le groupe de micro-organismes) et  $T$  en unités de temps correspondantes ( $\text{h}$  ou  $\text{j}$ ). On peut également définir le taux de doublement de la population (divisions/h ou divisions/j), paramètre souvent utilisé par les biologistes, de la façon suivante:

$$k = 1/T \quad (\text{R-5})$$

Source : cours de B. Quéguiner OBG14\_2007

## 6.4. Description des tests statistiques

### Test de Corrélation de Spearman :

En statistique, la corrélation de Spearman est étudiée lorsque deux variables statistiques semblent corrélées sans que la relation entre les deux variables soit de type affine. Elle consiste à trouver un coefficient de corrélation, non pas entre les valeurs prises par les deux variables mais entre les rangs de ces valeurs. Elle permet de repérer des corrélations monotones. Il faut également souligner que la corrélation de Spearman utilise les rangs plutôt que les valeurs exactes. Cette corrélation est utilisée lorsque les distributions des variables sont asymétriques. C'est un test non paramétrique.

### Test de l'Analyse en Composante Principale :

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables décorréelées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales", ou axes. Elle permet au praticien de réduire l'information en un nombre de composantes plus limité que le nombre initial de variables.

Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (représentation des variables dans un nouvel espace géométrique selon des directions d'inertie maximale) et statistique (recherche d'axes indépendants expliquant au mieux la variabilité - la variance - des données). Lorsqu'on veut alors **compresser** un ensemble de  $N$  variables aléatoires, les  **$m$  premiers axes** de l'ACP sont un **meilleur choix**, du point de vue de l'inertie ou la variance expliquée.

## 6.5. Feuille de calcul des taux de croissance et des temps de génération pour les 8 sites

<b>carry</b>	dates	30/07-16/08	20/08-22/08	24/08-30/08		<b>moyennes</b>
	tx croiss	0,16963078	1,18356181	0,06978506		0,47432588
	t jours	16	2	6		8
	TG	4,08621107	0,58564511	9,93260194		4,86815271
<b>frioul</b>	dates	30/06-05/07	13/07-03/08			
	tx croiss	0,64600983	0,11689544			0,38145263
	t jours	5	21			13
	TG	1,07296693	5,92963388			3,50130041
<b>brusc</b>	dates	17/06-28/06	02/07-08/07	20/07-29/07	03/08-22/08	
	tx croiss	0,12583756	0,3194871	0,12894308	0,15266163	0,18173234
	t jours	11	6	9	19	11
	TG	5,50826926	2,16956233	5,37560602	4,54041529	4,39846322
<b>cavalaire</b>	dates	04/08-09/08	11/08-01/09	11/08-21/08		
	tx croiss	0,75224002	0,12866529	0,11574528		0,33221687
	t jourd	5	21	10		12
	TG	0,92144417	5,38721176	5,98855683		4,09907092
<b>lérins</b>	dates	19/07-03/08				
	tx croiss	0,16443153				0,16443153
	t jours	15				15
	TG	4,21541526				4,21541526
<b>nice</b>	dates	09/07-23/07				
	tx croiss	0,1701877				0,1701877
	t jours	14				14
	TG	4,07283946				4,07283946
<b>calvi</b>	dates	15/06-15/07	27/07-11/08			
	tx croiss	0,2071536	0,14595043			0,17655202
	t jours	30	15			22
	TG	3,34605418	4,74919597			4,04762508
<b>grisgone</b>	dates	11/08-25/08				
	tx croiss	0,2283145				0,2283145
	t jours	14				14
	TG	3,03593152				3,03593152
	tx croiss= taux de croissance					
	t jours= nombres de jours entre les deux dates					
	TG= temps de génération					

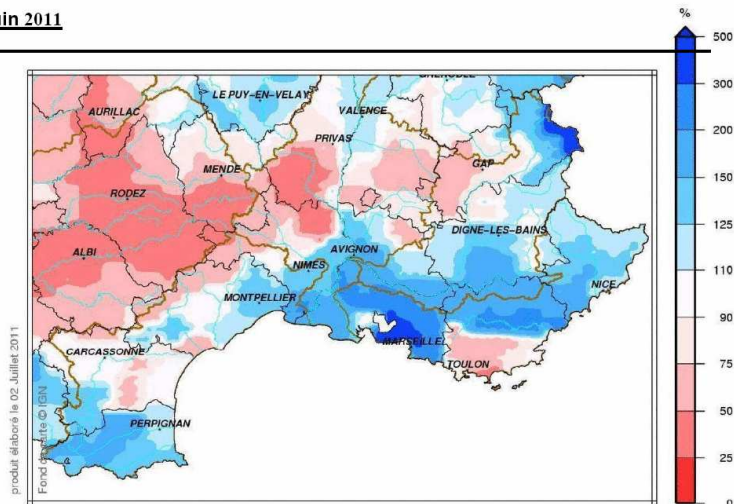


## 6.6. Données pluviométriques mensuelles

(source : DREAL PACA Bulletin de situation hydrologique)

Données météorologiques : Rapport aux normales 1971/2000 des précipitations

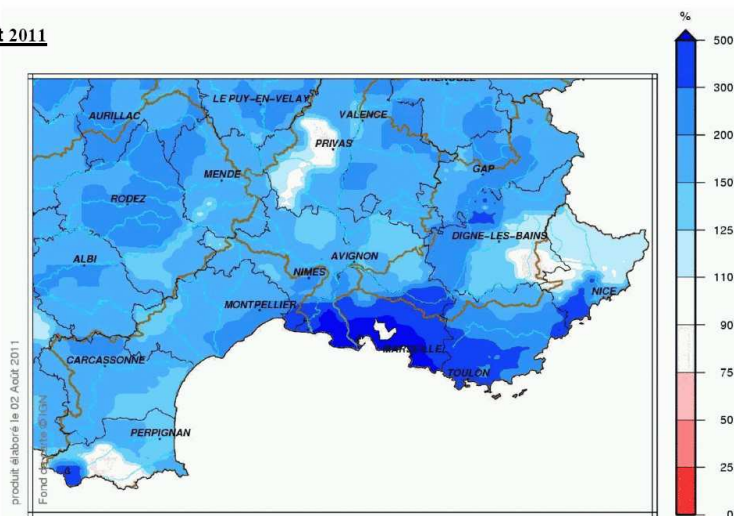
**Juin 2011**



Source METEO France

Données météorologiques : Rapport aux normales 1971/2000 des précipitations

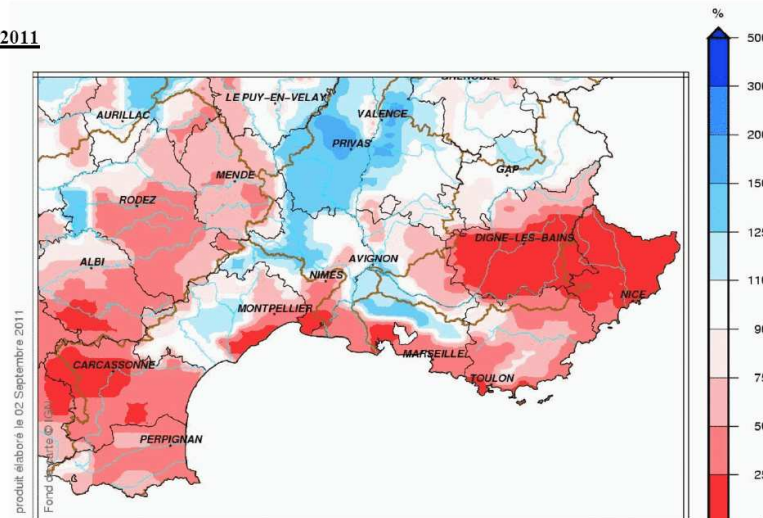
**Juillet 2011**



Source METEO France

Données météorologiques : Rapport aux normales 1971/2000 des précipitations

**Août 2011**



Source METEO France

## 6.7. Tableau des mesures des prélèvements terrain

CARRY	T°C	Nb de cellules /g.PF
16/06/2011	19	74
23/06/2011	19	85
02/07/2011	17	173
07/07/2011	19	308
09/07/2011	20	200
11/07/2011	21	704
13/07/2011	22	1 872
26/07/2011	16	1 075
30/07/2011	16	1 133
01/08/2011	16	2 448
03/08/2011	18	2 400
05/08/2011	18	5 844
08/08/2011	19	6 574
16/08/2011	18	16 620
18/08/2011	20	14 775
20/08/2011	20	4 443
22/08/2011	20	47 782
24/08/2011	21	25 055
30/08/2011	19	38 374

FRIOUL 2011	T°C	Nb de cellules /g.PF
15/06/2011	21	430 845
21/06/2011	20	125 406
30/06/2011	20,5	17 765
05/07/2011	17,5	449 097
09/07/2011	26	173 009
10/07/2011	26	149 897
13/07/2011	24,5	21 470
19/07/2011	20	63 305
27/07/2011	16	31 747
02/08/2011	21	251 884
03/08/2011	22	248 433
04/08/2011	23	65 759
05/08/2011	25	117 460
06/08/2011	24	58 099
07/08/2011	25	58 064
11/08/2011	20	41 309
14/08/2011	19	20 823
17/08/2011	24	3 318
19/08/2011	25	456
21/08/2011	25	1
25/08/2011	26	1
02/09/2011	24	1 400

<b>FRIOUL 2007</b>	<b>T°c</b>	<b>Nb de cellules /g.PF</b>
20/6/07	24,5	12 390
3/7/07	19,5	3 581
10/7/07	17,8	33 262
17/7/07	19,2	105 923
25/7/07	21,5	3 372
1/8/07	17,7	12 813
8/8/07	21,6	21 701
16/8/07	22,1	48 228
21/8/07	19,4	21 786
28/8/07	23,5	12 750
5/9/07	18,9	21 609
11/9/07	19,4	-----

<b>FRIOUL 2008</b>	<b>T°c</b>	<b>Nb de cellules /g.PF</b>
18/6/08	20,4	0
25/6/08	23,6	44
2/7/08	25,2	0
9/7/08	21,5	124
16/7/08	18,3	25
23/7/08	17,5	96
30/7/08	24,5	2 018
6/8/08	24,5	91 760
8/8/08	23,5	163 427
12/8/08	21	105 919
13/8/08	21,5	186 480
18/8/08	21	136 594
20/8/08	21	160 138
26/8/08	19	123 409
28/8/08	19	-
1/9/08	24	42 581
8/9/08	-	10 899

<b>FRIOUL 2009</b>	<b>T°C</b>	<b>Nb de cellules /g.PF</b>
24/06/2009	19,6	48
29/06/2009	21,7	38
07/07/2009	23,2	60 440
15/07/2009	19,0	67 068
21/07/2009	19,4	283 582
28/07/2009	21,5	392 756
04/08/2009	21,4	41 618
11/08/2009	23,4	339
18/08/2009	25,9	2 000
25/08/2009	24	931
01/09/2009	21,2	10 601
08/09/2009	17,7	35 246
15/09/2009	22,2	4 402
29/09/2009	22,3	0
14/10/2009	18,3	27 560
27/10/2009	19,3	24 688
17/11/2009	17	17 487

<b>LE BRUSC</b>	<b>T°C</b>	<b>Nb de cellules /g.PF</b>
17/06/2011	-	481
24/06/2011	17	1 936
28/06/2011	22,5	1 920
02/07/2011	17	535
05/07/2011	21	2 308
08/07/2011	22	3 393
12/07/2011	26	1 322
20/07/2011	14,5	941
27/07/2011	17	2 370
29/07/2011	17,5	3 080
01/08/2011	19	1 472
03/08/2011	22	336
05/08/2011	22	1 212
10/08/2011	14	2 812
12/08/2011	20	1 356
16/08/2011	21	3 178
18/08/2011	23	1 418
19/08/2011	25	3 282
22/08/2011	27	6 110

CAVALAIRE	T°C	Nb de cellules /g.PF
20/06/2011	18	0
28/06/2011	23	0
30/06/2011	23	0
03/07/2011	24,5	0
05/07/2011	24,5	0
13/07/2011	26,3	0
20/07/2011	17	0
26/07/2011	21,6	0
28/07/2011	22	0
31/07/2011	24	4
02/08/2011	24	0
04/08/2011	24	0
07/08/2011	23	17
09/08/2011	18	43
11/08/2011	21,3	11
14/08/2011	23	20
21/08/2011	24,5	35
30/08/2011	21,1	15
01/09/2011	23,5	164

LERINS	T°C	Nb de cellules /g.PF
20/6/11	21	2 500
5/7/11	24	12 256
12/7/11	24,5	15 796
19/7/11	20	7 302
26/7/11	21,5	9 120
1/8/11	23,9	12 587
3/8/11	24,2	86 429
5/8/11	24,3	14 889
9/8/11	21	12 214
12/8/11	23	4 814
16/8/11	24,8	545
23/8/11	25,8	25
30/8/11	24	118

Nice	T°C	Nb de cellules /g.PF
09/07/11	24,4	29155
16/07/11	28,8	75793
23/07/11	27	325292
28/07/11	28,5	170480
2/08/11	26,5	89688
16/08/11	28,5	2635
22/08/11	28,7	683
30/08/11	27,7	15371,62162

<b>CALVI</b>	<b>T°C</b>	<b>Nb de cellules /g.PF</b>
24/01/11	12,86	0
16/02/11	13,30	0
14/03/11	13,55	0
20/04/11	14,74	4
25/05/11	19,40	195
15/06/11	19,95	2
23/06/11	21,07	227
08/07/11	23,30	16
15/07/11	24,11	975
27/07/11	21,51	137
04/08/11	22,22	218
11/08/11	23,11	1249
17/08/11	23,49	10
24/08/11	25,46	193
31/08/11	24,56	175

<b>GRISGIONE</b>	<b>T°C</b>	<b>Nb de cellules /g.PF</b>
23/06/11	336	21,56
27/07/11	143	22,70
04/08/11	97	23,48
11/08/11	10	23,96
19/08/11	5	24,26
25/08/11	228	26,55