

# RÉSUMÉ DE THÈSE DE DOCTORAT

## **"Variabilité océanique de méso-échelle dans les systèmes d'upwelling du Humboldt et des Canaries: une comparaison à partir des données satellite"\***

**Karen Nieto Saavedra**

Un résumé extensif de la thèse est présenté, thèse qui a été initialement rédigé en espagnol. Dans ce résumé se présente d'abord la traduction du résumé inclus dans la thèse et la table de matières du manuscrit (chapitres, sections et subsectiones). Un extrait de l'introduction a été fait, où on a présenté le problème de recherche, des hypothèses et les objectifs de la thèse. Les chapitres un et deux ont été consacrés à la caractérisation des zones d'étude, la description des structures à méso-échelle et l'état de l'art des algorithmes de détection automatique de ces structures à partir de données satellitaires. Le chapitre trois a été consacré à les données satellitaires et la méthodologie, et a été brièvement décrits dans le présent résumé. La section *Comparaison entre les systèmes* du quatrième chapitre "Résultats et discussion" est présentée dans son intégralité, ainsi comme le chapitre des conclusions et perspectives.

*\* Thèse développée dans le sein du Centre de Recherche Halieutique Méditerranéenne et Tropicale (CRH), appartenant à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), grâce à une bourse de l'IRD de 36 mois de durée.*

## Résumé

L'écosystème pélagique dans les régions d'upwelling côtier est soumis à une variabilité spatio-temporelle à de multiples échelles, qui touchent tous les niveaux de la chaîne alimentaire. Il a été montré que les caractéristiques physiques liées aux processus de méso-échelle (qui s'étend de quelques dizaines à centaines de kilomètres et de quelques jours à plusieurs semaines) jouent un rôle important sur les cycles de vie et la distribution des populations de poissons pélagiques, comme sur les populations planctoniques.

Cette thèse a étudié la variabilité des structures de méso-échelle océanique, essentiellement frontales et d'autres paramètres généraux de l'environnement et ses effets sur l'abondance et la répartition spatio-temporelle de la chlorophylle dans les Systèmes d'upwelling du Chili-Humboldt (SCH, 18°S-40°S) et des Canaries Central (SCC, 20°N-36°N). Des indices de biomasse phytoplanctonique ont été utilisés, basés sur les données SeaWiFS pour le SCH (1997-2004) et sur les données MODIS pour la SCC (2002-2007). Dans une première phase a été mise en oeuvre une amélioration de l'algorithme de détection frontale de Cayula et Cornillon, qui a permis une augmentation des détection de plus de 130 % par rapport à l'algorithme original. On utilisé 3460 images journalières de température de surface, à 1 km de résolution pour l'identification des fronts dans les deux systèmes.

L'influence des forçages physiques sur la biomasse phytoplanctonique a été étudiée indirectement en utilisant des variables telles qu'un indice frontal, la distance frontale, l'indice d'upwelling, l'énergie cinétique turbulente (EKE), la largeur du plateau continental et l'orientation de la côte. Des analyses de régression multiple ont été utilisées pour déterminer les relations statistiques entre la distribution de la chlorophylle (indice spatialement intégré de chlorophylle, valeur moyenne, extension spatiale et maximum local) et les variables physiques, en tenant compte également des effets sous-régionaux, de la saisonnalité et les caractéristiques de l'année (phases négatives, neutres et positives de l'El Niño et du NAO pour le SCH et le SCC, respectivement).

Les résultats révèlent que la variabilité de la biomasse chlorophyllienne est globalement mieux expliquée dans SCC que dans le SCH ( $r^2$  de 0,6 et 0,4 respectivement), et que pour le SCC la variable la mieux expliquée est la

mesure de l'extension spatiale de la chlorophylle ( $Cloa_{ext}$ ), alors que dans le Humboldt ce sont les mesures quantitatives: indice intégré de chlorophylle ( $Cloa_{ind}$ ) et maximum local de chlorophylle ( $Cloa_{max}$ ). Pour le SCH, la simple largeur du plateau continental explique en premier lieu les variations de  $Cloa_{ind}$  et  $Cloa_{max}$ , suivie par l'impact négatif du phénomène El Niño, puis les variations saisonnières. Pour le SCC, la  $Cloa_{ext}$  est principalement expliquée par des critères très variables tels que l'indice d'upwelling et l'énergie cynétique.

Les paramètres caractérisant l'activité frontale de méso-échelle sont rarement directement dominants dans les modèles statistiques car les mécanismes mis en jeu se situent à des échelles spatiales inférieures, avec des différences locales fortes. Cependant, une remarquable spécificité des deux systèmes réside dans leur différence entre l'extension de la chlorophylle et la distance moyenne de l'activité frontale thermique. Dans le Nord du Humboldt, les distances sont voisines et l'extension de la chlorophylle est plus côtière que la distance frontale. Au sud du système, la chlorophylle s'étend en moyenne sur 100 km au delà de la position moyenne des fronts thermiques. Pour tout le SCC, la distance frontale est supérieure à l'extension de la chlorophylle, surtout au Nord du système. Enfin, la construction d'un indice d'occurrence des filaments d'upwelling, détectés par une analyse spécifique des fronts thermiques, révèle de très fortes variations locales.

## **La table de matières de la thèse à été le suivant:**

### **Introduction générale**

#### **1. Caractéristiques de la zone d'étude**

##### 1.1. Système Chilien d'Humboldt

###### 1.1.1. Courants et masses d'eau

###### 1.1.2. Upwellings

###### 1.1.3. Productivité

###### 1.1.4. Espèces pélagiques et pêcheries

###### 1.1.5. Variabilité spatio-temporelle à différentes échelles

##### 1.2. Système Central des Canaries

###### 1.2.1. Courants et masses d'eau

###### 1.2.2. Upwellings

1.2.3. Productivité

1.2.4. Espèces pélagiques et pêche

1.2.5. Variabilité spatio-temporelle à différentes échelles

1.3. Conclusion

## **2. Structures océanique de Mésos-échelle**

2.1. La Mésos-échelle

2.2. Upwellings

2.3. Fronts

2.3.1. Processus physiques et biologiques associés aux fronts et filaments

2.3.2. Données disponibles pour l'observation des fronts

2.3.3. Techniques de détection des structures frontales

2.4. Tourbillons

2.4.1. Processus physiques et biologiques associés aux tourbillons

2.4.2. Données disponibles pour l'observation des tourbillons

2.4.3. Techniques de détection des tourbillons

2.5. Indices de structures de méso-échelle

2.6. Conclusion

## **3. Données et Méthodes**

3.1. Données satellitaires

3.1.1. Température de surface de la Mer

3.1.2. Chlorophylle-a

3.1.3. Anomalie du niveau de la mer et de la vitesse géostrophique

3.1.4. Vent de surface

3.1.5. Bathymétrie

3.2. Algorithmes existants pour la détection de structures frontales

3.2.1. Détecteur de Canny

3.2.2. Détection frontale par l'algorithme de Cayula-Cornillon

3.2.2.1. Processus au niveau fenêtre

3.2.2.2. Processus au niveau de l'image

3.3. Proposition d'amélioration des algorithmes existants

3.3.1. Détection des nuages sur les images de TSM

3.3.1.1. Critère climatologique

3.3.1.2. Critère de déviation standard

3.3.2. Amélioration de l'implémentation de l'algorithme de Cayula-Cornillon

3.3.2.1. Fenêtres multiples de détection et combinaison optimale

3.3.2.2. Méthode de récupération des segments

3.3.2.3. Quantification de l'amélioration

3.3.2.4. Comparaison de la performance des algorithmes de Cayula-Cornillon et de Canny pour la détection frontale

3.3.3. Identification des filaments

3.4. Définition des indices de mesoechelle

3.4.1. Indice de Chlorophylle

3.4.2. Indice de Activité Frontal

3.4.2.1. Image composé de fronts et gradient

3.4.2.2. Distance Frontal

3.4.3. Indice d'Upwelling

3.4.4. Energía cinética de turbulencia

3.4.5. Plataforma Continental y Orientación de la costa

3.4.6. Análisis de Regresión Múltiple

## **4. Résultats y Discusion**

4.1. Detection des structures frontales de meso-échelle dans des images satellite

4.1.1. Validation de masque des nuages

4.1.2. Quantification du amériolation

4.1.3. Validation Cayula-Cornillon fenêtres multiples versus Canny Detector

4.2. Systeme Chileanne d'Humboldt

4.2.1. Images y series moyenne de toute le periode

4.2.2. Variabilité seasonal

4.2.3. Variabilité interannual

4.2.4. Approche modelisatrice

4.3. Système de Canaries Central

4.3.1. Images y series moyenne de toute le periode

4.3.2. Variabilité seasonal

4.3.3. Variabilité interannual

4.3.4. Approche modelisatrice

4.4. Comparaison entre systèmes : similitudes et spécificités

## **5. Conclusions et Perspectives**

### **Bibliographie**

## Introduction Générale

Les quatre systèmes d'upwelling mondiaux des marges océaniques orientales (Californie, Canaries, Humboldt et Benguela), sont des régions océaniques de très forte productivité biologique et soutiennent parmi les plus grandes pêcheries commerciales. Ces systèmes occupent moins de 0.3% de la surface océanique mondiale mais sont à l'origine de plus de 2% de la production primaire marine totale (Carr, 2002). Leur productivité biologique provient d'un pompage actif par le transport d'Ekman sous l'impulsion des vents alizés locaux, induisant une remontée d'eaux froides riches en éléments nutritifs dissous le long des côtes (Thomas *et al.*, 2001; Carr, 2002; Thomas *et al.*, 2003; Carr & Kearns, 2003). La force du vent varie saisonnièrement et en fonction de la latitude pour chaque système d'upwelling, induisant une forte variabilité saisonnière et spatiale des concentrations de chlorophylle. Certains signaux climatiques se superposent à cette variabilité, comme les cycles de type ENSO dans le pacifique ou l'oscillation Nord Atlantique (NAO) pour le système des Canaries. De même, une variabilité aux échelles interdécadales peut être observée (Chávez *et al.*, 2003). Les facteurs locaux propres à chaque système induisent également une variabilité spatio-temporelle importante de l'activité biologique caractérisée par la concentration phytoplanctonique de surface (Thomas *et al.*, 2001; Carr & Kearnes, 2003).

Si les différences régionales induisent des spécificités propres à chacun des systèmes d'upwelling, leurs dynamiques environnementales sont toutefois similaires sur plusieurs points et donnent toutes lieu à des concentrations importantes de poissons pélagiques, intensivement exploitées mais d'abondance variable. Dans la mesure où les espèces concernées font état de comportements analogues dans les différents systèmes, les études comparatives inter-régionales peuvent apporter une information pertinente sur l'effet de l'environnement sur le succès de la reproduction (Parrish *et al.*, 1983). Cury *et al.* (2001) indiquent que les études comparatives entre écosystèmes constituent une approche puissante en écologie et doivent largement être promues. La comparaison des systèmes d'upwelling des hautes et basses latitudes ainsi que de différents hémisphères permet une approche plus pertinente de leur spécificités et induit en retour de nouvelles questions sur leur

fonctionnement interne.

Il n'existe pas de théorie générale et unifiée du fonctionnement des écosystèmes d'upwelling côtier, mais des propositions suggèrent que ces écosystèmes peuvent être contrôlés par un niveau trophique intermédiaire, occupé par un nombre limité d'espèces de petits pélagiques planctonophages qui exercent un contrôle majoritaire sur le flux d'énergie, appelé contrôle wasp-waist (Cury *et al.*, 2001). Cependant, ces auteurs indiquent qu'un écosystème n'est pas lié à un seul type de contrôle mais que sa structure, diversité et intégrité dépendent de la combinaison subtile et changeante de trois grands types de contrôle: bottom-up, top-down et wasp-waist.

Carr (2002), en comparant la production primaire des quatre systèmes d'upwelling mondiaux avec des données de couleur de l'eau et de température de surface, montre que le système le plus productif est celui du Benguela et le moins productif celui de Californie. Alors qu'il permet de loin les plus grandes pêcheries mondiales, le système du Humboldt n'est qu'à mi chemin entre les précédents. Le système des Canaries, à peine moins productif que le Benguela, possède en outre la plus grande surface active. La comparaison entre la chlorophylle de surface et les cycles saisonniers du transport d'Ekman, calculés à partir de données de vent satellital, montre que les variabilités saisonnières ont des phases semblables dans des hautes latitudes ( $> 32^{\circ}$ ) entre le Courant de Californie, du Humboldt et du Benguela ( $> 30^{\circ}\text{S}$ ) ainsi qu'avec les basses latitudes ( $< 20^{\circ}\text{N}$ ) pour le système des Canaries (Thomas *et al.*, 2001).

Le système des Canaries est probablement le plus complexe, particulièrement près du Cap Blanc ( $20^{\circ}\text{S}$ ), zone de convergence entre l'eau Centrale Nord Atlantique et l'eau Centrale Sud Atlantique. Le mélange entre les masses d'eau se superpose à l'effet de l'upwelling, au point qu'il est difficile d'évaluer la part de la production primaire due au mélange ou à l'advection (Tomczay et Godfrey, 2001). Ce système présente une haute variabilité à méso-échelle, qui influence des changements saisonniers marqués dans la structure de la communauté planctonique (Arístegui et Montero, 2005). Dans la région des îles Canaries, Guindos *et al* (2004) identifient de telles structures associées aux tourbillons (froids et chauds) et aux upwellings côtiers. D'autre part, les upwellings côtiers requièrent des sources externes de fer (Fe), élément trace qui joue un rôle critique dans l'utilisation nutriments et la croissance phytoplanctonique et par

conséquent dans la réponse du dioxyde de carbone des eaux superficielles océaniques (Coale, 2001). L'obstacle du Fer dans le système des Canaries pourrait être influencé significativement par les dépôts de poussière provenant des vents de sable. Vinck y Measures (2001) observent que les hautes valeurs de Fer dans la zone de convergence intertropicale sont associées aux périodes d'arrivée de poussière. Les vents de sable peuvent être étudiés à partir des données satellitales (Vermote *et al.*, 2002; Chung *et al.*, 2003).

La production primaire soutenue du système du Humboldt pourrait provenir des intenses échanges côte-large, soutenant aussi la présence de populations trans-zonales et hautement migratrices de poissons et d'invertébrés. Barbieri *et al.* (1995) identifient des tourbillons, filaments et fronts de la plume d'upwelling dans la côte nord du Chili (18°24'-24°S), et Hormazábal *et al.* (2004) indiquent que pour la zone de transition du Chili la variabilité à méso-échelle de basse fréquence (tourbillons et méandres) est principalement associée à l'instabilité barocline des courants côtiers et à la propagation vers l'ouest des ondes de Rossby depuis la marge orientale.

Plusieurs études ont montré que les structures à méso-échelle (fronts océaniques, tourbillons et filaments) sont des structures dynamiques complexes ayant une grande influence dans les processus biologiques, comme l'enrichissement de nutriments associés aux tourbillons (Levy, 2003; Mizobata et Sayito, 2004). Des processus de transport de carbone depuis le plateau continental sont également associés à ces structures. L'étude des liens entre physique et biologie dans les systèmes d'upwelling permettra une meilleure compréhension de leur fonctionnement et de leurs différences. Les structures océaniques de méso-échelle présentent une variabilité spatiale et temporelle souvent associée à la forme de la côte, à la bathymétrie et au vent local (Barbieri *et al.* 1995, Van haren *et al.*, 2004; Hormazábal *et al.*, 2004). Hormazábal *et al.*, (2004) indiquent que peu de recherches ont traité des échelles spatiales et temporelles associées à ces structures ainsi que des mécanismes de leur formation.

Les structures océaniques de méso-échelle sont régulièrement observées dans les différents systèmes d'upwelling, aussi bien à partir des données satellitales (TSM et altimétrie) que des données hydrographiques et des modèles de circulation. Les données satellitales (principalement les données AVHRR de

satellites NOAA) ont permis de palier à la limitation spatio-temporelle des données *in situ*, qui représentent une source importante de données dans les études. Ces dernières années, ont également été utilisées les données de concentration en chlorophylle de surface (capteur SeaWiFS), et d'anomalies de la hauteur de la mer (satellite TOPEX/Poseidon) (Machu *et al.*, 1999; Thomas *et al.*, 2001; Mizobata & Sayito, 2004; Demarcq *et al.*, 2003; Hormazábal *et al.*, 2004; Carr & Kearns, 2003), la tendance étant d'utiliser des données multi-capteurs.

Étant donné le grand volume de données satellitales disponible pour les études océaniques, un système automatique pour le traitement des images est nécessaire. Des auteurs comme Cayula & Cornillon (1992; 1995); Krishnamurthy *et al.* (1994); Luque-Escamilla *et al.* (1999); Smyth *et al.* (2001); Torres *et al.* (2003) y Guindos *et al.* (2004), ont développé des algorithmes pour détection automatique de différentes structures océaniques à méso-échelle en utilisant la télédétection. Le principal obstacle de beaucoup de modèles de détection automatique est leur spécialisation à un type particulier de structure, principalement tourbillons ou fronts océaniques, et qu'ils utilisent plusieurs langages de programmation dans leurs différentes phases d'automatisation (Torres *et al.*, 2003).

## **Problème de recherche, hypothèses et objectifs**

Bien que les études de méso-échelle ont augmenté ces dernières années grâce à la compréhension de l'importance de cette échelle espace-temporelle dans les processus physiques et biologiques qui affectent les populations marines, la plus part sont les travaux qui sont réalisé pour étudier une zone en particulier et dans un moment déterminé. Moins abondantes sont les publications où s'étudie l'influence de l'activité de méso-échelle dans un contexte espace-temporelle plus générale, par exemple en considérant plus que un système d'upwellings et plusieurs années d'étude. Pour ce type approche il est nécessaire de disposer des indices de méso-échelle comparables avec d'autres séries d'indicateurs écosystemiques..

Est bien accepté le paradigme que l'upwelling est le responsable de la production primaire dans les systèmes d'upwelling. Cependant, il y a des autres variables physiques, comme la morphologie de la côte et la bathimétrie, qui ont

une influence sur la production primaire. Plus qu'une seule variable serait un ensemble des variables qui expliqueraient la variabilité de la production primaire dans ces systèmes.

Le télédétection résout le problème de continuité de données dans l'espace et le temps. La détection des structures de meso-échelle dans un grand nombre d'images satellitaires suppose un travail colossal par le grand nombre d'images à traiter et à analyser. Raison par laquelle beaucoup des études se sont orientées à l'étude d'un évènement particulier qui requiert seulement l'utilisation de quelques images. En général, on peut dire qu'existe une nécessité de traiter automatiquement la grande quantité d'information disponible à partir des outils qui permettent de décrire l'activité de meso-échelle et de démontrer l'importance de ces structures dans les processus biologiques.

Il y a plusieurs questions qui surgissent: Est-ce que les images satellitaires résolvent l'étude du meso-échelle ? Est-il possible d'obtenir des indices d'activité de mesoescala comparables d'autres indices ecosistémicos ? Quelle est l'influence de l'activité de meso-échelle dans la variabilité de la chlorophylle? Quelle est l'influence de l'upwlling dans la variabilité de la chlorophylle? Quel est l'impact des caractéristiques morphologiques de la côte et la bathymétrie? Est-ce que ce possible d'atteindre un des résultats concluants à partir de la comparaison des différences et des spécificités des deux systèmes d'upwelling?

Cette thèse a été réalisée dans le cadre conceptuel présenté dans la Figure 1, sur la base des hypothèses présentés ci-dessous.

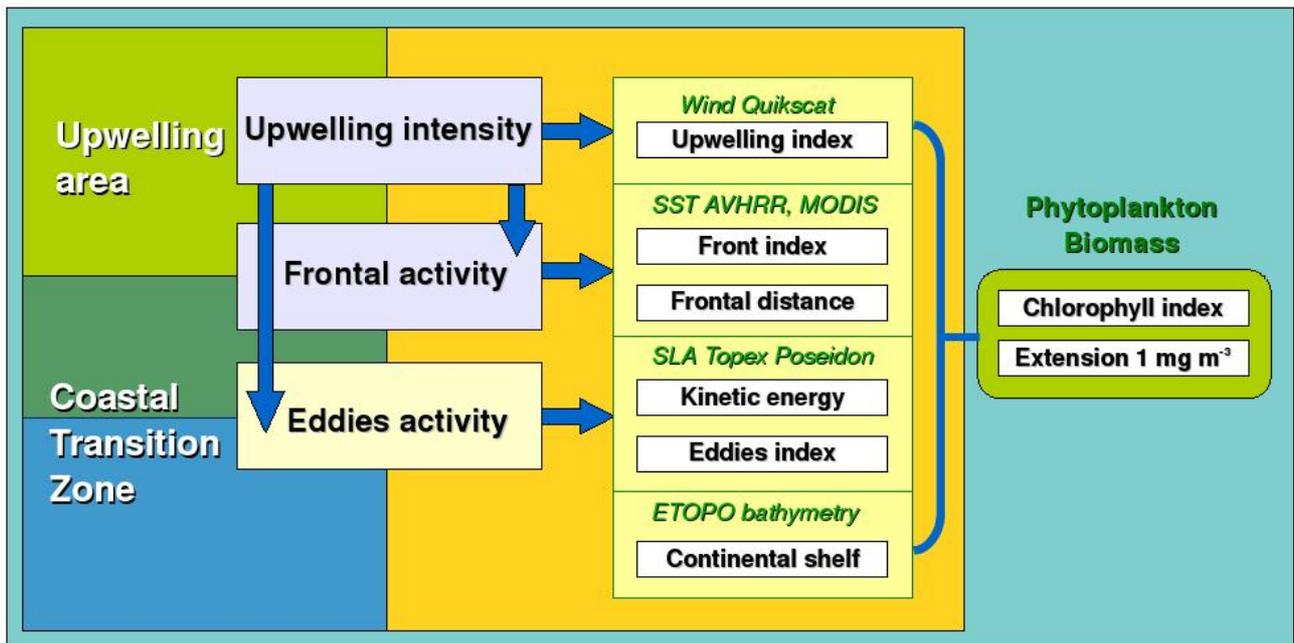


Figura 1. Cadre conceptuel de la thèse

## Hypothèses

- La variabilité de meso-échelle de la chlorophylle-a dans le système chilien de Humboldt et du système Canaries centrale est liée essentiellement à l'upwelling et à des structures de meso-échelles associées, telles que les fronts, les tourbillons et les filaments, ainsi que des flux côtiers et les caractéristiques morphologiques de la côte.
- La relation entre l'activité physique et biologique de meso-échelle peut être étudiée à travers de l'observation par satellite et la génération d'indices espace-temporales qui représentent ces caractéristiques physiques et biologiques à méso-échelle.
- Les principales différences dans les modèles de distribution et concentrations de chlorophylle entre le système chilien de Humboldt et Canaries centrale sont liés aux caractéristiques morphologiques de chaque système (topographie, orientation de la côte) et les conditions de chaque région en termes d'apport d'éléments nutritifs, associées à l'upwelling côtier.

## L'objectif générale est de:

Déterminer la variabilité des structures océaniques de meso-échelles et ses effets sur la distribution de la chlorophylle dans les écosystèmes d'upwelling de

Humboldt et des Canaries.

### **Les objectifs spécifiques sont :**

- Caractériser et quantifier la variabilité océanique de méso-échelle et ses relations avec la chlorophylle satellitale.
- Analyser les relations entre les structures de méso-échelle et la distribution de la chlorophylle dans un contexte un espace - temporelle général
- Comparer la variabilité océanique de méso-échelle entre les deux systèmes d'upwelling
- Sélectionner, implementer et améliorer les outils disponibles pour la détection de structures océaniques de méso-échelles en utilisant des données satellitales

### **Caractéristiques de la zone d'étude**

Ce chapitre a décrit les principales caractéristiques physiques et biologiques des régions d'upwelling considérées dans cette thèse. Pour chaque système on a présenté la circulation océanique et les masses des eaux présentes dans chaque région, ainsi que la localisation des centres principaux d'upwelling, la productivité biologique du système, les espèces et les principales pêcheries pélagiques. Enfin, il ya une brève description de la variabilité spatio-temporelle à laquelle sont soumis ces deux systèmes. L'upwelling comme processus physique, chimique et biologique a été décrit dans le chapitre suivant, ainsi que la forme d'identifier et d'étudier ces événements à travers des indices d'upwelling. Bien que l'upwelling n'est pas une structure à méso-échelle en tant que telle, il est à l'origine de la formation de ces structures dans les systèmes d'upwelling, donc, il a été estimé pertinent d'approfondir sur ce processus dans le chapitre « Structures à méso-échelle ».

### **Structures océanique de Méso-échelle**

Dans ce chapitre se présente d'abord une définition de la méso-échelle, suivi par une description de l'upwelling comme un phénomène physique et une

source principale de génération de structures de meso-échelle dans ces systèmes. On a réalisé une description des principales structures de meso-échelle: fronts, filaments et tourbillons, ainsi que les processus physiques et biologiques associées à ces structures, et les données et les techniques disponibles pour sa détection.

## Données et Méthodes

La méthodologie a été appliquée sur le système d'upwelling des Chile et Canaries, à titre de comparaison entre deux systèmes d'upwelling différents, autant sur le plan physique que sur celui de leur productivité. Elle s'a divisé en quatre parties:

### 1) Données satellitales

Les données de base utilisées ont été en priorité des images journalières (plutôt que des images composites), représentées au moins par la température de surface de la mer (TSM), et en priorité celles comprenant une observation comparable pour la chlorophylle de surface. Dans les tables 1 et 2 se montrent les données satellitales utilisés dans cette thèse, pour le Système Chilien et pour le Système des Canaries:

Tableau 1. Nombre des images pour le Système Chilien d'Humboldt

Variabes	Sensor/Satélite	Res.espacial	Res.temporal	Nº de imágenes
Temperatura	AVHRR/NOAA	1 km	diaria	1473
Clorofila	SeaWiFS/SeaStar	1 km	diaria	1760
Vientos	ERS y Quikscat/SeaWinds	0,25°	diaria	2675
Altura del Mar	Topex/Poseidon	0,25°	semanal	400
C. Geostróficas	Topex/Poseidon	0,25°	semanal	400

Tableau 2. Nombre des images pour le Système de Canaries

Variabes	Sensor/Satélite	Res.espacial	Res.temporal	Nº de imágenes
Temperatura	MODIS/Aqua	1 km	diaria	1988
Clorofila	MODIS/Aqua	1 km	diaria	1988
Vientos	Quikscat/SeaWinds	0,25°	diaria	2005
Altura del Mar	Topex/Poseidon	0,25°	semanal	300
C. Geostróficas	Topex/Poseidon	0,25°	semanal	300

## **2) Algorithmes existants pour la détection de structures frontales**

On a analysé les performances des différents algorithmes et on a choisi l'algorithme de Cayula et Cornillon. L'algorithme Cayula et Cornillon (1992; 1995) consiste en une amélioration des algorithmes de la famille des "gradients". Des auteurs comme Ullman & Cornillon (1999), Royer *et al.* (2003), Belkin *et al.* (2004) ont utilisé avec succès cet algorithme dans des images AVHRR. Miller (2004) la généralise à l'utilisation d'images SeaWiFS, en démontrant la robustesse de cette technique, et en identifiant les découpes des fronts dans des séquences d'images SeaWiFS et AVHRR. Cependant, il a été nécessaire d'adapter cet algorithme pour les zones d'upwelling, cette amélioration a été décrite dans le chapitre suivant. Un autre algorithme a été implémenté, le détecteur de bord « Canny », pour valider la performance de l'algorithme de Cayula-Cornillon.

## **3) Proposition d'amélioration des algorithmes existants**

### ***Détection des nuages sur les images de TSM***

En général, une phase préliminaire est commune à toutes les méthodologies de détection automatique, qui consiste en la séparation rigoureuse des zones préalablement reconnues comme nuageuses. Cette phase a une importance cruciale car une élimination incomplète de pixels contaminés par des nuages peut résulter dans fausses détections de fronts thermiques. Un algorithme de masque de nuages, sur la base de deux critères (critère climatologique et critère de déviation standard) a été proposé.

### ***Amélioration de l'implémentation de l'algorithme de Cayula-Cornillon***

Dans le but de détecter le plus grand nombre de fronts et améliorer sa continuité spatiale, une innovation de l'algorithme de Cayula-Cornillon a été proposée. Au lieu d'utiliser une seule fenêtre, plusieurs fenêtres sont utilisées pour la détection des fronts, tout en conservant la même taille de la fenêtre de 32x32, mais associée à un réseau de quatre fenêtres. À cette fin, la grille d'origine est déplacée sur une distance égale à la moitié de la taille de la fenêtre, c'est-à-dire 16 pixels, verticalement et horizontalement, et dans les deux

directions. Par conséquent, il s'agit d'une première grille, le `` original'', une seconde grille est le résultat de décalage horizontal, la troisième grille quand est déplacé verticalement et un dernier grille quand elle est diagonalement décalé. Cette méthode a été inspirée par le fait que l'algorithme est très sensible à la position de la fenêtre de l'image, un paramètre qui modifie la forme de l'histogramme, et donc de la décision sur la présence de front. Ensuite, les quatre grilles sont combinés de façon optimale pour produire une seule image de fronts.

Après l'application de le méthode des fenêtres multiples de détection et combinaison optimale, s'applique un méthode de récupération des segments. Un quantification de l'amélioration est réalisé aussi en comparant le méthode Cayula-Cornillon original et le amélioration proposé dans cette thèse. En fin, l'algorithme Cayula-Cornillon fenêtres multiples et confronté a les résultats de l'algorithme Canny.

Un algorithme pour la détection des filaments a partir des images de fronts a été proposé, en utilisant une approche de dimension de l'objet. Chaque front est identifié comme une unité des segments et l'angle par rapport à la côte a été calculé. Tous les segments qui sont quasi perpendiculaire à la côte ont été considérés comme des filaments.

#### **4) Définition des indices de mesoéchelle**

Finalement une série d'indices ont été définis. D'abord des indices liés à la chlorophylle; indice de chlorophylle (Demarcq et al., 2000), la chlorophylle moyenne et l'extension de la chlorophylle (depuis la côte à la concentration  $1 \text{ mg m}^{-3}$ ), la chlorophylle maximale et la distance à cette valeur maximale. L'activité de meso-échelle a été décrite pour l'indice frontal, la distance frontal, et l'énergie cinétique de turbulence (comme un indicateur de l'activité tourbillonnaire). La largeur du plateau continental et l'orientation de la côte ont été calculés. Enfin, une analyse de régression multiple est appliquée pour élucider la relation entre les variables.

## Résultats et Discussion

### Comparaison entre systèmes : similitudes et spécificités

Le Système Chilien du Humboldt (SCH) et le Système Central des Canaries (SCC) se situent à des latitudes comparables, bien que dans différents hémisphères, à une distance similaire de l'équateur. Les résultats pour les deux systèmes ont montré que la variabilité de la chlorophylle est nettement mieux expliquée dans le SCC que dans le SCH, pour les différents paramètres considérés. Cela confirme la plus grande complexité du SCH, qui est considéré comme un système ayant une productivité primaire plutôt moindre que les autres EBUS (Carr, 2002; Carr et Kearns, 2003), en particulier au-dessous du Système des Canaries, mais qui soutient cependant les plus grandes pêcheries du monde, sans comparaison à celles des autres EBUS. En effet, dans la partie chilienne du Humboldt la prise moyennée de petits poissons pélagiques au cours des 10 dernières années est de près de 4 millions de tonnes, en comparaison à moins de 1 million en moyenne pour le système des Canaries.

À ce jour, aucune étude intégrant les effets de la variabilité à méso-échelle dans une dimension spatio-temporelle à grande échelle, et plus encore de la comparaison des deux systèmes d'upwelling, n'a été réalisée. L'un des principaux résultats obtenus est que pour le Système Chilien de Humboldt la largeur du plateau continental est la première variable expliquant la variabilité de la chlorophylle (indice intégré), ainsi que son étendue spatiale et la concentration moyenne. Suit la variabilité interannuelle, principalement l'effet négatif de El Niño, la variabilité saisonnière puis l'intensité de l'upwelling. Bien que l'indice frontal et l'indice d'upwelling soient également significatifs, leur influence est donc moindre. L'indice d'upwelling ne semble pas être un paramètre limitant dans le système du Humboldt, sans doute car les valeurs observées semblent être suffisantes pour soutenir la production primaire. L'intensité de l'upwelling joue par contre un rôle plus important dans les concentrations maximales de chlorophylle observées (entre la côte et le large), suggérant un effet à des échelles de temps inférieures au mois, en réponse à la variation du vent.

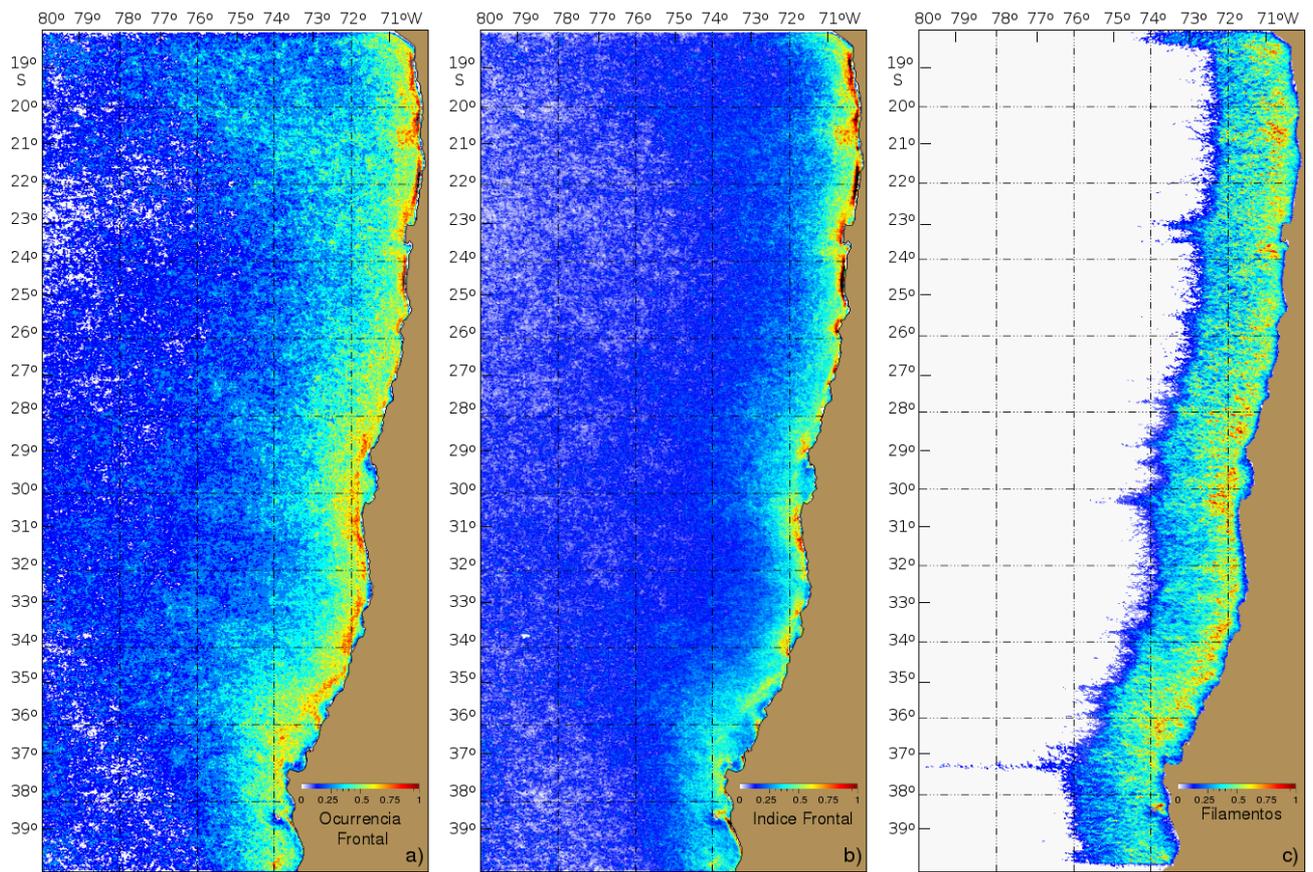


Figura 2. Images de occurrence de fronts, indice frontal et occurrence des filaments pour le SCH

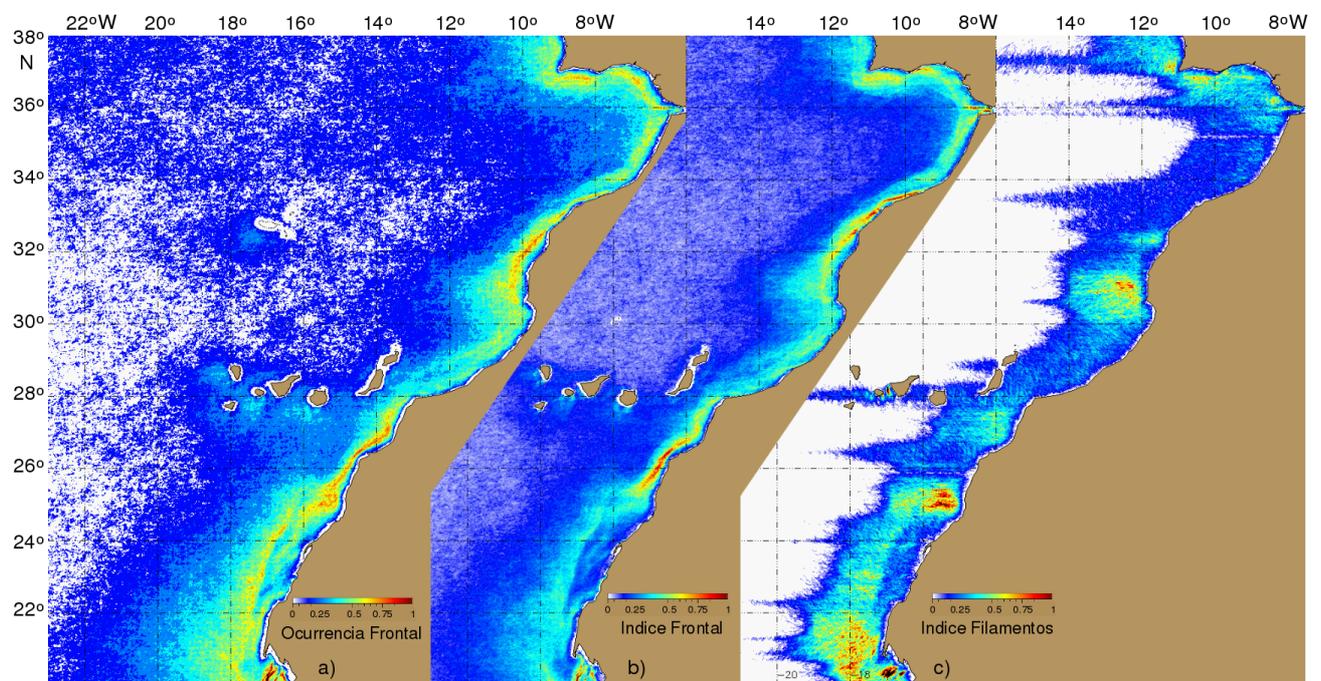


Figura 3. Images de occurrence de fronts, indice frontal et occurrence des filaments pour le SCC

En revanche, pour le Système des Canaries, l'intensité de l'upwelling est la plus grande source d'explication de la variabilité de la biomasse, principalement en ce qui concerne son extension spatiale. L'énergie cinétique turbulente est la deuxième variable expliquant la variabilité observée.

En ce qui concerne les similitudes entre les systèmes, on a pu observer que l'indice frontal a un effet similaire et positif sur l'indice de chlorophylle, et un effet négatif sur la chlorophylle maximale. Une autre similitude est l'effet positif de l'indice d'upwelling sur la valeur maximale de la chlorophylle. Ce dernier paramètre est en moyenne plus élevé dans toutes les zones du Système des Canaries que dans le Système Chilien, alors que l'indice d'upwelling au Chili est pratiquement le double de celui dans le Système des Canaries, un paradoxe qui montre clairement la plus grande efficacité du système du Humboldt dans les échelons immédiatement supérieurs de la chaîne trophique.

Il est très probable qu'il existe un effet combiné de processus à différentes échelles spatio-temporelles, influant sur la variabilité observée de la chlorophylle à l'échelle mensuelle. Par contre, déterminer l'importance relative de ces interactions n'est pas une tâche facile, mais une partie de la réponse se situe visiblement au niveau de la méso-échelle, voire de la sub-méso-échelle, là où les processus d'enrichissement ont vraiment un effet. Par exemple dans un article récent publié par Bakun et Weeks (2008) ont indiqué que l'effet « reset » qui suit un phénomène El Niño, serait avantageux pour la productivité de l'écosystème en général. L'influence de la variabilité interannuelle de l'ENSO sur la productivité du SCH a été clairement démontrée dans ce travail, où l'on observe que le phénomène El Niño a un fort effet négatif sur la distribution et concentration de la chlorophylle dans le SCH. Encore plus révélateur est l'effet positif des années "normales" sur la concentration de la chlorophylle ce qui confirmerait la théorie du « reset » du système après un phénomène El Niño. Bien que pour le SCC, il est aussi possible d'observer un effet de l'interannualité, son influence est moindre que dans le SCH.

En plus des descripteurs statistiques de méso-échelle utilisés dans cette thèse, il existe d'autres variables qui peuvent jouer un rôle important dans l'explication de la variabilité de la chlorophylle. Par exemple, la variabilité associée à l'influence des ondes planétaires sur la modulation de la production primaire. Selon Uz et al. (2001), cité par Correa et al. (2007), les ondes de Rossby

expliquent 5 à 20 % de la variance de la chlorophylle satellitale océanique. Cipollini et al. (2001) étudient les ondes de Rossby à partir des données satellitales d'une couleur de l'océan et suggèrent deux hypothèses sur l'effet que ces ondes auraient sur les processus biologiques dans l'océan. Une première explication que ces auteurs suggèrent est simplement mécanique et serait une relation avec la modification des isopiches au passage de l'onde de Rossby ce qui provoquerait une alternance d'enrichissement superficiels (et donc une production phytoplanctonique accrue près de la surface), et d'approfondissement, alternance particulièrement visible grâce à l'observation satellitale. Hormázabal et al. (2006) remarquent que la variabilité des ondes de Rossby et de Kelvin peut également moduler la position des points source d'upwelling par soulèvement ou approfondissement de la thermocline, ainsi que d'influencer sur la profondeur de la couche du minimum d'oxygène.

Dans le Système Central des Canaries, on constate une très forte étendue spatiale de la zone de forte biomasse planctonique ainsi que de la distance frontale, particulièrement dans les moyennes latitudes (20°N à 26°N), avec des valeurs moyennes de 104.2 km et 130.6 km respectivement pour ces deux paramètres. Ces valeurs sont très supérieures à la moyenne observée dans l'ensemble du système. Elles coïncident également avec les plus grandes valeurs du rayon de déformation de Rossby.

Pour le Système Chilien du Humboldt on observe une situation opposée c'est-à-dire que la plus grande étendue de la biomasse concerne les zones les plus éloignées de l'équateur, avec un maximum de 163.4 kms entre 32°S et 37°S. Au nord de 32°S les fronts thermiques sont par contre situés plus au large que le front chlorophyllien, ce qui est une particularité que l'on ne retrouve dans aucun autre système d'upwelling.

Conformément à la théorie de l'influence du rayon de déformation de Rossby dans la propagation des structures de méso-échelle (Shelton et al., 1998), il faudrait s'attendre à ce que la plus grande étendue de la chlorophylle se trouve dans la zone nord (près de l'équateur). Cependant, on observe que cette zone est caractérisée par une très faible extension des structures frontales thermiques qui sont par contre très intenses (Fig. 2b), très vraisemblablement dû au forçage par la topographie avec une quasi absence de plateau continental et une pente très prononcée du talus. On pourrait donc s'attendre à ce que cette

configuration agisse comme une barrière pour la propagation de la chlorophylle vers la large. Cependant la zone de forte occurrence filamentaire est tout aussi étendue qu'au sud de la zone, ce qui suggère la présence un mécanisme supplémentaire favorisant cette extension, favorisée par l'augmentation du rayon de déformation de Rossby avec la diminution de latitude. Tailleux (2006) a également montré plus que les ondes de Rossby sont influencées par les variations topographiques de la côte. Grâce à l'importance des variables liées à la morphologie de la côte mises en évidence dans cette étude, principalement pour le SCH, l'effet de ces ondes constitue une piste de recherche à explorer.

Parmi les facteurs qui favorisent la formation de filaments des cellules d'upwelling de la côte, on compte la largeur et la profondeur du plateau continental. Celui-ci est plus large et moins profond dans le Système des Canaries que dans le Système Chilien de Humboldt, ce qui serait en théorie plus favorable à l'advection des cellules d'upwelling. Dans la partie nord du SCH le plateau continental est quasi inexistant, immédiatement suivi par la fosse de Pérou - Chili, qui atteint une profondeur de plus de 8000 m.

D'autres caractéristiques morphologiques peuvent jouer un rôle important dans les mécanismes de génération de filaments d' upwelling comme la présence de promontoires (des caps et des pointes), qui selon Estrade (2005) peuvent avoir un effet stabilisateur sur les plumes d'eau froide. En effet, les cellules d'upwelling et les filaments se trouvent souvent associés à des pointes. Barbieri et al. (1995) remarquent que les centres principaux d'upwelling au nord du Chili se trouvent associés à des pointes: punta Pichalo (19°35'S), Chuchumata (20°31'S), Lobos (21°01'S) et Angamos (23°02'S).

Dans le Système des Canaries, Pelegrí et al. (2005), trouvent que les zones de filaments sont associés aux Cap Ghir (31°N), Cap Jubi (28°N), Cap Bojador (26°N) et Cap Blanco (21°N). Dans les images de filaments pour les deux systèmes, il est possible d'observer que ces structures sont associées aux caps et pointes et dans les deux cas leur formation est associée à la divergence horizontale créée entre la côte et le flux de surface qui se dirige vers l'équateur. Cependant, cette situation est beaucoup plus nette pour le Système des Canaries que pour le Système Chilien de Humboldt, à cause de la configuration de la côte, qui présente des pointes beaucoup plus proéminentes dans le SCC que dans le SCH. En conséquence, la divergence locale du vent local crée en

surface des conditions favorables à la création de filaments.

Bien que quelques auteurs aient montré une relation significative entre la bathymétrie et la production primaire (Patti, 2008), les processus sous-jacents à cette relation sont très peu étudiés. Durski et Allen (2005), ont remarqué une forte relation entre la complexité des structures frontales d'upwelling et la bathymétrie locale. Le plateau continental agit comme une barrière pour les fronts, associés au talus continental, où l'activité frontale commence à se développer. Si le plateau est étroit, la distance frontale est donc proche de la côte, comme dans le nord du Chili. Estrade (2005), montre également que grâce à la plus faible stratification (traduisant l'existence d'une cellule côtière de recirculation), comme au sud du Maroc, la capacité de rétention augmente, et dépasse même celle du sud du Sénégal.

Un aspect intéressant à noter est que dans le cas d'un plateau continental étroit, la localisation du front ne varie pas avec l'intensification du vent surtout en présence de forte pente. Cela a été démontré par Garvin (1973) dans des simulations en laboratoire, et peut être vu dans les images de fréquence des fronts dans le SCH, où il a été constaté que les fronts sont beaucoup plus forts et fixes dans le nord et dispersés dans le sud.

D'un autre côté, les résultats pour le Système Chilien du Humboldt ont révélé que la lumière peut être un facteur limitant dans ce système. La profondeur de la zone euphotique influe sur la production primaire intégrée, en conditionnant l'intensité lumineuse disponible pour que les organismes autotrophes réalisent la photosynthèse. Ce facteur limitant est plus critique à mesure que les régions d'upwelling s'éloignent de l'équateur. Kelble et al. (2005) remarquent que l'atténuation de la lumière dans les écosystèmes marins peut non seulement limiter la production primaire mais aussi déterminer la composition et l'abondance des producteurs primaires.

Une importante source d'information pour étudier l'énergie lumineuse disponible est indirectement obtenue avec les données satellitales de couleur de l'océan, et exprimée sous la forme de Radiation Photosynthétiquement Disponible (PAR; Photosynthetically Available Radiation), quantité de lumière entre 400 à 700 nanomètres

Le PAR est supérieur au Chili qu'aux Canaries, spécialement au nord et pourrait

expliquer en partie l'efficacité du Système Chilien de Humboldt, avec un taux de transfert supérieur en production primaire et secondaire. En revanche dans la zone sud, la consommation serait inférieure et la biomasse transportée offshore potentiellement supérieure. De plus dans la zone le sud le plateau continental est plus large, la pente est moins accentuée, et des conditions favorables existent pour présence de tourbillons de méso-échelle qui facilite le transport de chlorophylle vers le large (Correa et al., 2007). Pour pouvoir déterminer les taux de consommation du zooplancton sur le phytoplancton est nécessaire de disposer de données in situ, ce qui serait particulièrement utile pour déterminer la dynamique de la chlorophylle dans les deux zones. Les mêmes remarques sont valables pour le Système des Canaries, où le plateau continental est assez plus large que dans le Système Chilien de Humboldt.

Une variable très utile et très peu utilisée, mais qui devrait être davantage considérée dans des études futures, c'est la Fluorescence naturelle de la Chlorophylle (Chlorophyll Fluorescence Line Height, FLH) obtenue à partir des données satellitales, disponible avec des données MODIS-Aqua depuis décembre 2005. La FLH permet d'évaluer l'état de croissance du phytoplancton, en quantifiant directement son état physiologique, (Bartlett et al., 2000)

Par rapport à l'indice d'upwelling utilisé dans cette thèse, celui de Bakun (1973), Estrade (2005) remarque que d'un point de vue quantitatif l'intérêt d'indice est discutable, parce qu'il dépend de la qualité des données de tension du vent, et du choix de l'orientation de la ligne de côte comme base de projection. De plus cet auteur discuté de la modification possible de l'indice d'upwelling de Bakun en considérant l'effet de la topographie, pour obtenir des résultats plus réalistes en termes de position, d'étendue et intensité de la cellule d'upwelling, en proposant estimer le transport d'Ekman traversé par la projection orthogonale du vent au long d'un isobathe critique représentatif de la barrière cinématique.

Comme l'indice d'upwelling est calculé sur la base de vents parallèles à la côte, dans certains cas, par exemple pendant le phénomène El Niño l'indice d'upwelling d'Ekman garde des valeurs élevées. Mais en raison de l'approfondissement de la thermocline, la masse d'eau upwellée a les mêmes caractéristiques que celle de surface, c'est-à-dire que l'upwelling ne fournit pas d'éléments nutritifs. En revanche, l'indice frontal, qui prend en compte la valeur du gradient thermique, serait un indicateur plus précis. Pendant El Niño l'indice

frontal a des faibles valeurs, ce qui suggère bien que les masses d'eau sont semblables.

Un autre résultat révélé par la thèse est l'observation de zones de rétention associées à des valeurs élevées du maximum de chlorophylle près de la côte. Cette situation est observée dans les deux systèmes, vers 30°S dans le SCH (Bahía de Coquimbo) et entre les Caps Ghir et Jubi (28°N-30°N) pour le SCC. La caractéristique commune est le fait que ces deux régions sont situées dans un espace entre deux Cap (ou pointes), où les valeurs de l'indice d'upwelling sont extrêmes, très élevé au Chili et très faible aux Canaries, alors que leur valeur de production est faible dans les deux cas. Cela conduit à penser que ces deux extrêmes, en théorie, ne seraient pas favorable à la production primaire pour des raisons différentes, rejoignant le concept de fenêtre environnementale optimale. En revanche ces deux zones sont protégées et constituent des zones rétention privilégiées. Pour des raisons topographiques, ces deux zones présentent une forte valeur d'indice d'activité frontale, mais une faible valeur de présence de filaments, ce qui est conforme aux caractéristiques d'une zone de rétention.

La possibilité d'utiliser différents paramètres liés à l'activité de méso-échelle ouvre de nouvelles voies pour l'étude de la distribution d'oeufs et des larves, une phase cruciale dans le recrutement et, par conséquent, sur les pêcheries. Sadrozinski (2008) a étudié la distribution des larves de différents poissons dans le système d'upwelling de Californie, et a noté que beaucoup de ces larves sont réparties entre la côte et les fronts mais très rarement distribuées au-delà de ces fronts. L'auteur conclut que les fronts d'upwelling et des structures associées aux fronts, peuvent affecter la survie des larves et de succès dans le recrutement de ces poissons dont les premières étapes de la vie sont planctoniques. La caractérisation fine de ces zones est également importante pour l'établissement optimal de zones de protection marines, qui doivent tenir compte des différents critères dans les traits de vie des espèces.

## **Conclusions et Perspectives**

Dans l'introduction de cette thèse nous examinons l'importance de l'activité océanique dite de méso-échelle dans la distribution et la variabilité de la biomasse chlorophyllienne dans les systèmes d'upwelling. Nous rassemblons ici les résultats de l'étude des deux systèmes d'upwelling: le système chilien du Humboldt et le système central du courant des Canaries. Nous montrons les résultats pour chaque système du point de vue de la variabilité spatio-temporelle des paramètres étudiés, et nous poursuivons par les principales conclusions issues de la comparaison des deux systèmes. Ensuite, un bilan est fait sur les techniques de détection de structures océaniques de méso-échelle à partir de données satellitaires et sur la façon de synthétiser les informations pour obtenir des indices de méso-échelle comparables, de grandeurs à la fois physiques et biologiques. Enfin, les perspectives sont ouvertes sur les études futures.

C'est la première fois qu'une étude statistique des structures frontales a été réalisée à l'échelle d'un sous-système d'upwelling côtier, couvrant 1500 à 2000 km de côtes, à une résolution spatiale fine (1 km) et sur une période de 5 à 7 ans. Cela permet d'appréhender la variabilité spatiale et temporelle (saisonnière et interannuelle) des principales structures observables en surface à méso-échelle pour deux sous-systèmes d'upwelling contrastés: celui du Chili-Humboldt et celui de la partie centrale du systèmes des Canaries.

Les liens entre l'activité de méso-échelle et la production primaire ont été examinés dans un cadre général, à l'aide de plusieurs critères basés sur la biomasse phytoplanctonique et les paramètres généraux de l'environnement. L'analyse a montré que, si la saisonnalité demeure un facteur dominant de la variabilité de ces systèmes, on constate l'importance des paramètres purement spatiaux, comme la largeur du plateau continental.

### **Système Chilien du Humboldt (SCH)**

L'occurrence frontale (nombre de fronts observés mensuellement) est plus forte au nord de 26°S puis diminue progressivement au sud, avec toutefois la présence de maxima locaux. L'intensité des fronts (leur gradient thermique

associé) est également plus élevée dans la partie nord du système, probablement dû aux différences entre les eaux océaniques et les eaux côtières. Ces dernières sont plus chaudes dans la partie nord du système dû à l'intrusion saisonnière de masses d'eau subtropicale, de l'équateur jusqu'à 26°S.

De 37° à 26°S, l'activité frontale et filamentaire (fronts quasi perpendiculaires à la côte) est plus modérée, probablement en raison de l'orientation différente de la côte. Au sud de 37°S où la côte est plus rectiligne et de nouveau nord-Sud (davantage parallèle au vent), les filaments sont très peu nombreux. On constate donc une influence forte de l'orientation de la côte, combinée à un effet de la latitude, mais pas d'influence directe apparente de la bathymétrie.

Les variations latitudinales de la chlorophylle ne seraient pas liées à des variations latitudinales de l'intensité de l'upwelling, du moins pas de manière directe. Les valeurs les plus élevées de la concentration en chlorophylle se situent dans les zones extrêmes du SCH, où l'upwelling est modéré, et les valeurs minimales sont dans la zone intermédiaire (24°-32°S), où le taux de remontée est maximum. Ceci suggère l'existence d'une fenêtre environnementale optimale qui favorise la productivité primaire, par un compromis entre enrichissement maximal et turbulence minimale.

Il existe par ailleurs un lien assez direct entre la largeur du plateau continental et la valeur moyenne de la biomasse chlorophyllienne ainsi que de l'extension spatiale de cette biomasse, surtout au sud de 32°S. Au nord de cette limite, où le plateau est très étroit, la disponibilité accrue de l'énergie lumineuse pourrait expliquer la présence de biomasses spatialement intégrées comparables à celles des zones où le plateau continental est plus large, mais où l'énergie lumineuse est nettement inférieure. Ce qui conduit de nouveau à considérer que c'est la combinaison de nombreux facteurs qui contribue au développement de la biomasse phytoplanctonique.

Pour toute la période d'étude (Septembre 1997 à Décembre 2004) aucune tendance temporelle significative n'est enregistrée parmi les variables analysées, même si l'on peut estimer les effets d'El Niño en début de la série. L'étude de la saisonnalité montre un écart remarquable d'un à deux mois entre la biomasse chlorophyllienne et l'indice d'upwelling, qui s'explique sans doute par le fait que le maximum d'upwelling se produit au début du printemps,

quand l'intensité de la lumière est encore un facteur limitant la croissance phytoplanctonique. Un écart saisonnier significatif est également observé entre les valeurs maximales de chlorophylle et l'indice frontal, qui est effectivement maximal (comme l'upwelling) avant le début du cycle de la période productive.

Les résultats de l'analyse de régression multiple confirment ce qui a été observé dans l'analyse descriptive spatio-temporelle, en fournissant une indication chiffrée de l'importance relative des variables explicatives. Comme indiqué dans l'analyse temporelle, la variable "maximum de chlorophylle" (valeur en général très côtière) montre les meilleures relations avec l'ensemble des variables ( $r^2$  de 0.4), et la variable "largeur du plateau continental" est la plus importante des variables explicatives.

### **Systeme des Canaries Central**

L'approche spatiale montre que l'activité frontale pure (occurrence frontale) apparaît comme très élevée dans tout le système des Canaries (nettement plus que dans le Humboldt), particulièrement dans deux zones côtières, l'une entre le Cap Ghir et le Cap Bedouzza (30°-33°N), l'autre entre le Cap Bojador et le Cap Jubi (26°N-28°N). La première raison en est la complexité de la ligne de côte, entaillée de nombreux caps perturbant le courant général. La deuxième raison en est la largeur du plateau continental, la plus grande parmi tous les grands systèmes d'upwelling, particulièrement dans sa partie sud, avec souvent un découplage de la ligne du talus continental qui ne suit pas la ligne de côte, augmentant la complexité bathymétrique.

Naturellement, cette activité frontale intense se retrouve dans l'activité filamentaire, encore plus importante, particulièrement sous le courant des principaux caps, comme le Cap Ghir et le Cap Bojador. Le Cap Blanc, déjà connu pour favoriser la formation de filaments géants, s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres montre une zone couverte par les filaments encore plus large. Ce tableau est renforcé par la présence des îles des Canaries, dont la partie sous le vent est également génératrice d'activité de type méso-échelle ainsi que d'un niveau d'énergie cinétique tourbillonnaire supérieure. En conséquence, les zones de rétention côtière sont nombreuses et jouent un rôle important dans l'adaptation du cycle de vie des espèces pélagiques.

D'un point de vue temporel, la saisonnalité est forte (quoique inférieure à celle dans le système du Humboldt), sauf un nord de 26°N, et la saison productive est en moyenne moins longue. L'étude phénologique montre que la physique (intensité de l'upwelling) est complètement en phase avec la saison estivale de maximum d'abondance planctonique.

Durant la période d'étude, il est visible que ce système est soumis à un forçage climatique fort, avec une nette décroissance de l'intensité des vents d'upwelling (très visible sur l'indice d'upwelling), qui le démarque des autres grands systèmes d'upwelling, soit stables soit en phase de renforcement.

Les relations statistiques entre biomasse chlorophyllienne et les facteurs environnementaux montrent globalement une forte relation ( $r^2$  de 0.6), surtout avec la valeur moyenne ou spatialement intégrée de la biomasse, plus qu'avec des facteurs spatiaux comme la largeur de la zone biologiquement active de l'upwelling. Si l'activité frontale joue un rôle important (nettement plus que dans le Humboldt), voir très important dans certaines zones au voisinage des caps, le premier facteur explicatif reste l'intensité de l'upwelling, suivi de l'énergie cinétique turbulente. Les effets climatiques régionaux (NAO) ont peu d'influence sur ce système. L'importance de l'intensité de l'upwelling est en accord avec l'examen des tendances temporelles récentes (Demarcq, 2009), qui montrent une nette diminution de la biomasse de la partie centrale du système sous l'effet de la baisse des alizés, conjointement à une augmentation de température, la plus forte parmi les systèmes d'upwelling durant les deux dernières décennies.

### **Comparaison des deux systèmes**

D'un point de vue spatial l'extension de la chlorophylle (de la côte vers le large) est mieux expliquée dans le système des Canaries (où elle est beaucoup plus prononcée) que dans le système du Humboldt ( $r^2$  de 0,6 et 0,3 respectivement). Mais le maximum local côtier de chlorophylle est mieux expliqué dans le système du Humboldt ( $r^2$  de 0,4) dans le système central des Canaries ( $r^2$  de 0,2).

La plus frappante des similitudes entre ces deux systèmes est l'influence à

laquelle ils sont soumis à travers la mesure des grands signaux climatiques, représentés par les indices NAO et ENSO, respectivement pour le système chilien du Humboldt et le Système central des Canaries. Outre l'influence forte de la saisonnalité dans les deux cas, la synchronicité entre le forçage physique et le maximum productif est différent, en étant plus favorable au système des Canaries, qui possède logiquement les biomasses les plus élevées.

En outre, les deux systèmes montrent que l'activité frontale de méso-échelle est positive dans les deux cas avec un effet maximal à travers l'indice intégré de chlorophylle et plus surprenant un effet négatif sur la chlorophylle maximum. Ce dernier point signifie que l'activité de méso-échelle favorise globalement la productivité mais à une tendance à "répartir" spatialement les zones productives et à diminuer les maximums locaux. Quant à l'énergie cinétique (EKE), son effet est positif sur les deux systèmes, mais son effet est beaucoup plus importante dans le système central des Canaries que dans le système Chilien du Humboldt.

La différence la plus révélatrice entre les deux systèmes réside dans les combinaisons les plus significatives observées entre variables explicatives et expliquées, parmi lesquelles on trouve systématiquement une variable morphométrique (plutôt associée à des mécanismes de transport et de rétention), et une variable de processus, liée à l'enrichissement. Cette relation est inversée dans les deux systèmes. Dans le cas du système central des Canaries, c'est l'extension spatiale de la biomasse qui est expliquée par l'indice d'upwelling, suggérant une relation directe de type transport → enrichissement. Dans le cas du système chilien de Humboldt, le maximum de chlorophylle est expliqué par l'importance de la largeur du plateau continental, c'est-à-dire une combinaison de type topographie → enrichissement local. Ceci amène à considérer l'importance des interactions entre les contraintes liées soit à la morphologie soit directement au transport (ces deux paramètres se traduisant par l'efficacité de l'enrichissement), dont la résultante est la disponibilité des éléments nutritifs (enrichissement) puis la réponse biologique dans les deux systèmes. Le secret de la productivité totale du système chilien du Humboldt pourrait résulter d'une combinaison entre sa morphologie réduite (particulièrement si l'on considère son volume) et une faible turbulence (un effet de sa faible latitude) qui favorise l'efficacité des transferts entre la physique et

le premier niveau de la pyramide trophique. En contrepartie, la largeur du plateau (donc le volume utile) serait le premier élément limitant. Au contraire, le système des Canaries serait surtout limité par l'intensité de l'upwelling, et le brassage vertical favorisé par la méso-échelle y aurait un rôle plus important.

En outre, l'analyse descriptive des structures frontales de méso-échelle a révélé que dans les deux systèmes la formation des filaments est associée à une zone frontale intense juste avant un promontoire (pointe ou cap) dans le sens de la circulation du courant côtier. La présence de ces filaments favorise l'exportation vers le large de l'eau qui a été confinée à la côte par des fronts côtiers, et les caractéristiques de maturation de l'eau advectée par l'upwelling sont à l'origine d'une production planctonique plus forte dans la partie côtière de la zone filamentaire.

### **Considérations sur la détection automatique de structures de méso-échelle à partir des données satellitaires**

Une comparaison des algorithmes utilisés en océanographie pour la détection des structures frontales a été faite entre les méthodes basées uniquement sur l'analyse des gradients, en particulier l'algorithme de Canny, et d'autres, plus mathématiques basées sur d'autres critères morphologiques. La principale préoccupation a été d'adapter une méthode adaptée à la complexité rencontrée dans les systèmes d'upwelling côtier, où coexistent des échelles de structure différentes, de la méso-échelle, à la sub méso-échelle (<10km), alors que les algorithmes sont définis et testés sur des structures frontales du large, généralement en bordure de grand courants océaniques tels le Gulf Stream.

L'algorithme choisi, une extension de la méthode développée par Cayula et Cornillon (1992) a été soigneusement validée, d'abord par une méthode différente (Canny) puis par une évaluation de sa performance a été réalisée. L'amélioration de performance constatée par rapport à la stricte application de l'algorithme original a été de plus de 130% de détection de pixels frontaux pour le système chilien de Humboldt et plus de 140% pour le système Central des Canaries. Les détections spatiales obtenues ont ensuite été combinées avec des mesures de gradient thermique associés aux détections qui a conduit à la définition d'un indice frontal (paramètre combiné) ainsi qu'une distance frontale

pondérée. Ces deux mesures ont été synthétisées dans l'espace-temps comparable à la série d'autres variables (1 mois et 25 km), qui a finalement permis de confronter la variabilité de l'activité de méso-échelle à la variabilité de la biomasse chlorophyllienne.

A également été développé un algorithme spécifique de détection des pixels nuageux adapté aux zones côtières des régions d'upwelling, étape cruciale dans l'identification correcte des structures frontales. Ce que n'assure pas les produits standard de température la surface de la mer (SST AVHRR et MODIS) pour la détection des fronts, en éliminant de nombreuses zones côtières considérées à tort comme des nuages en raison de leur ressemblance avec des pixels nuageux. Le masque spécifique a permis de récupérer environ 20% de pixels valides dans la zone côtière, et un pourcentage bien plus grand de structures frontales.

Un autre nouvel aspect de la thèse et qui ouvre de nombreuses possibilités pour de futures applications comme la définition d'un indice de filaments, a été l'utilisation d'une approche orientée objet qui a été faite dès le début du travail (en partie grâce à la méthode choisie), qui permet d'aller au-delà d'un indice de type grille (ou "raster") en identifiant chaque segment comme une unité clairement identifiée dans l'espace et qui permet l'élaboration d'indices structurels, où chaque objet possède des caractéristiques ou des attributs tels que la longueur et la direction. Ce dernier attribut est utilisé dans l'identification des filaments, sur l'hypothèse que ces fronts quasi perpendiculaire à la côte correspondent à des filaments. Les résultats présentés ont montré l'aspect très complémentaire de cette approche, qui a permis d'aborder certaines relations fortes entre les régions frontales en général et des zones à dominance de filaments.

Cette thèse a porté principalement sur les structures frontales. Mais elle a inclus indirectement l'activité tourbillonnaire par la prise en compte de l'énergie cinétique tourbillonnaire. Les deux paramètres sont très complémentaires, à la fois dans leur nature mais aussi dans leur localisation, les fronts étant caractéristiques des zones côtières alors que les tourbillons sont caractéristiques des zones côtières de la transition entre la zone côtière sensu stricto et la zone océanique du large. De plus, les tourbillons ne sont observables qu'à partir de l'altimétrie satellitale d'anomalie de hauteur de la

mer, informations qui ne couvre pas une zone côtière d'environ 50 km. À l'heure actuelle, la majorité de la recherche se concentre sur l'une ou l'autre des structures. Un travail qui intègre les résultats de la détection automatique de ces deux types de structures, avec des données satellitaires et des approches méthodologiques conjointes, est un défi qui a été amorcé dans ce travail de thèse.

## **Perspectives**

Ce travail de thèse montre l'importance de la topographie dans les zones côtières d'upwelling et de son rôle dans la modulation de la distribution et la biomasse chlorophyllienne. Il est prévu de prendre en compte la pente de la bathymétrie, qui agit à la fois sur le lieu de remontée de l'eau d'upwelling en surface, ainsi que sur la génération des structures de type filamentaire. Les variables utilisées doivent tenir compte des trois dimensions spatiales, dont la distribution de la chlorophylle, pour s'approcher davantage de la description des processus et de leur compréhension, au-delà de l'observation faite en utilisant l'imagerie par satellite.

En outre, les données des modèles hydrodynamiques sont très précieuses pour comprendre les processus physiques qui dominent l'enrichissement de l'upwelling côtier, dont les données se prêtent encore plus facilement que l'imagerie satellitaire à la détection de structures frontales. Une application intéressante à initier dans le court terme, serait la mise en œuvre de l'algorithme de détection de structures frontales proposé dans cette thèse sur les champs thermiques issus des modèles à différentes profondeurs, afin d'analyser l'évolution frontale en 3 dimensions et de ses impact sur l'enrichissement et la biologie des systèmes d'upwelling.

Les relations statistiques définies dans cette thèse peuvent être utilisées comme une base pour l'étude des traits de vie des espèces pélagiques, en particulier sur la distribution et l'abondance des oeufs et larves de poissons pélagiques, ainsi que sur les premiers stades de la chaîne alimentaire. Ce travail exige une analyse multidisciplinaire entre les océanographes et les experts de la pêche, notamment avec des informations de diverses sources, y compris les données de campagnes océanographiques, les évaluations hydro-acoustique,

les données de pêche, les données sur les modèles physiques et biologiques, et bien sûr l'imagerie par satellite.

En ce qui concerne l'utilisation des nouvelles données recueillies par satellite, en suivant cette approche, deux candidats naturels ont émergé à la fin de cette thèse. D'un côté le rayonnement photosynthétiquement disponible pour la photosynthèse (PAR, Photosynthétic Available Radiation), qui donne une indication du facteur limitant pour le développement du phytoplancton, particulièrement pour le système du Humboldt. D'autre part, les données de la fluorescence de la chlorophylle (Chlorophylle Fluorescence Line Hauteur, FLH), en fournissant un indicateur de l'état de croissance du phytoplancton, basé non seulement sur sa biomasse mais sur son état physiologique. Ce dernier est très utile pour déterminer l'état de maturité d'un bloom planctonique, et d'aborder des questions fascinantes telles que le cycle de vie des cellules planctoniques dans une région donnée, leur adaptation aux effets phénologiques, voire l'estimation du broutage zooplanctonique, ce qui à son tour permettrait de soulever de nouvelles hypothèses sur l'efficacité productive des premiers maillons de l'écosystème pélagique dans les systèmes d'upwelling.