

La présente publication est une version condensée de la dissertation défendue à l'Université de Liège et pour laquelle le grade académique d'Agrégé de l'Enseignement Supérieur a été conféré à l'unanimité le 28 janvier 2002.

Jean-Henri HECQ,

Maître de Recherches du FNRS.

Centre MARE. Université de Liège.

Institut de Chimie B6c Sart-Tilman LIEGE

[Jh.hecq@ulg.ac.be](mailto:Jh.hecq@ulg.ac.be)

## Remerciements

C'est le Professeur J.C.J. Nihoul qui m'a mis sur la voie et m'a guidé depuis le début de mes recherches.

Ce sont le Professeur J.M. Bouqueneau, le Dr. A. Goffart et le Professeur D. Ribbens qui m'ont donné la force de mener à bien ce travail.

Ce sont les Professeurs A. Distèche, J. Godeaux et Ch. Jeuniaux qui par leur sagesse m'ont enseigné la méthode.

Ce sont ces Océanographes de Liège et d'Ailleurs qui partagent avec moi l'effort de recherche et l'enthousiasme pour cet écosystème dont la beauté nous attire. Ils se nomment R. Azzolini, D. Bay, J.M. Beckers, P. Brasseur, J.C. Bussers, P. Dauby, F. Dehairs, E. Delhez, V. Demoulin, S. Djenidi, K. El Khalay, C. Frangoulis, M. Frankignoulle, L. Geron, S. Gobert, L. Guglielmo, M.L. Grégoire, L. Goyens, C. Joiris, G. Lacroix, C. Lancelot, J. Le Fèvre, L. Legendre, P. Lejeune, G. Lepoint, A. Norro, G. Pichot, L. Prieur, F. Ronday, M. Rhixen, N. Skliris, P. Tréguer et P. Vandewalle.

Ce sont le Fonds National de la Recherche Scientifique, la Communauté Française de Belgique, les Services Fédéraux de la Politique Scientifique et l'Université de Liège qui ont financé mes recherches.

C'est grâce au Programme Belge de Recherches en Antarctique, au Programme National Italien de Recherches en Antarctique et au Professeur F. Faranda que j'ai pu participer aux missions dans l'Océan Austral.

C'est le personnel de l'AGMEE et de l'UNIPC et celui du département d'Océanologie qui a assuré le soutien informatique et technique.

C'est à Anne et à mes parents, enfants, frères, sœur et amis, que j'ai dérobé cette part de temps et d'affection qui leur était due.

Je les remercie tous.

# Sommaire

<b>Introduction</b>	99
<b>Chapitre 1. Une Méthode de Modélisation de l'Ecosystème Planctonique</b>	101
1.1. Le concept de modélisation	101
1.2. La stratégie de modélisation de l'écosystème planctonique	105
<b>Chapitre 2. La Sélection des Variables Biologiques de l'Ecosystème Planctonique</b>	115
2.1. Les concepts généraux	115
2.2. L'identité des groupes phytoplanctoniques principaux	117
2.3. La diversité zooplanctonique	125
2.4. La sélection des variables du modèle	137
<b>Chapitre 3. Les Processus Biologiques et leur Paramétrisation</b>	138
3.1. L'absorption de lumière, la photosynthèse et la production phytoplanctonique	138
3.2. Les nutriments, l'absorption par le phytoplancton et la composition élémentaire des organismes	150
3.3. Les bactéries hétérotrophes et la reminéralisation	156
3.4. Les processus zooplanctoniques	160
<b>Chapitre 4. La Modélisation Conceptuelle de l'Ecosystème Planctonique</b>	182
4.1. Les interactions entre les variables biologiques et les phases de l'écosystème planctonique	182
4.2. Les contraintes physiques et la variabilité de l'écosystème planctonique	203
4.3. L'ajustement écohydrodynamique ou le comportement du plancton face à la turbulence, aux tourbillons et aux contraintes physiques en général	218
4.4. Le schéma de modélisation de l'écosystème planctonique	222
<b>Chapitre 5. Le Développement Numérique du Modèle 1D de l'Ecosystème Planctonique</b>	225
5.1. La modélisation de la structure physique verticale des couches supérieures de la colonne d'eau	225
5.2. Le calcul des flux atmosphériques	233
5.3. Le bilan énergétique aux interfaces et la formation de la glace	238

5.4. La détermination des flux de sédimentation	240
5.5. La formulation des équations des variables biologiques du modèle 1D de l'écosystème planctonique océanique	242
5.6. Les performances et les limites du modèle de l'écosystème planctonique	251
<b>Chapitre 6. L'Application du Modèle 1 D à l'Etude de l'Ecosystème Planctonique de la Mer de Ross</b>	<b>254</b>
<b>Chapitre 7. L'Application du Modèle d'Ecosystème Planctonique à la Région Côtière Occidentale Corse</b>	<b>263</b>
<b>Chapitre 8. Conclusions et Perspectives</b>	<b>271</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>278</b>

# Introduction

Le milieu pélagique océanique occupe la majeure part de la planète. Il est le lieu initial de la vie et un des réservoirs de la biodiversité mondiale. L'écosystème planctonique y joue un rôle essentiel dans la production de matière organique consommable par les poissons, dans l'exportation des éléments biogènes vers le fond des océans et dans le contrôle des gaz à effet de serre.

L'étude scientifique de l'écosystème planctonique est interdisciplinaire par essence. D'une part, la diversité des assemblages biotiques planctoniques et la multiplicité des facteurs qui contrôlent leur fonctionnement requièrent l'acquisition et la comparaison d'informations lors de campagnes océanographiques sur divers océans de la planète. D'autre part, la dépendance de la structure spatiale et temporelle des communautés planctoniques vis-à-vis des contraintes hydrodynamiques impose une approche couplée écohydrodynamique de cet écosystème.

Par sa nature l'écosystème planctonique ne se prête guère à l'expérimentation. Son étude fait appel à l'acquisition de données et à la modélisation. Ces deux voies sont complémentaires et ont été utilisées lors des phases de notre recherche. Les données que nous avons acquises lors de campagnes océanographiques (Hecq, 2002) nous permettent de décrire la distribution et la structure des communautés. La modélisation mathématique nous procure les moyens de confronter les hypothèses sur le fonctionnement et le contrôle multiple des écosystèmes.

L'objectif de notre approche est d'aboutir à une vision conceptuelle originale de l'écosystème planctonique océanique, en recherchant comment la structure et le fonctionnement de cet écosystème sont contrôlés par des contraintes physiques, chimiques et biologiques. Les similitudes rencontrées au sein de divers écosystèmes planctoniques nous ont suggéré le développement d'un modèle conceptuel synthétique unique de cet écosystème applicable à l'Océan Mondial et permettant d'illustrer sa variabilité.

Par cette stratégie d'approche, nous répondons aux recommandations des programmes internationaux tels que GLOBEC International (Global Ocean Ecosystem Dynamics), "Global Change Research Initiative" et JGOFS (Joint Global Ocean Flux Studies) qui visent à développer des modèles permettant de prédire les réponses de l'écosystème océanique aux changements globaux affectant la planète et utilisables en termes d'outils d'aide à la décision.

L'originalité de notre manuscrit réside dans la présentation du développement conceptuel et numérique d'une modélisation d'un écosystème soumis à de fortes contraintes tant physiques que biologiques: l'écosystème planctonique. Il retrace, sous forme de chapitres, les différentes étapes de ce développement depuis l'acquisition de données jusqu'à la simulation sous contraintes réelles ou hypothétiques en passant par la formulation et la paramétrisation des équations.

Lors de la première étape, nous mettons au point une stratégie de modélisation adaptée aux besoins de l'écologie planctonique. Pour les océanographes biologistes, les outils de

modélisation souvent développés par les hydrodynamiciens sont encore les balais de l'apprenti sorcier. Ils se développent plus vite que la compréhension des processus gouvernant l'écosystème; dès lors une définition de règles d'emploi, réalistes et applicables à l'écosystème océanique, s'est révélée utile.

Lors de la deuxième étape, nous décrivons et analysons, sur base d'observation de campagnes, l'écosystème planctonique de divers milieux océaniques: la Méditerranée, l'Océan Austral et la Mer du Nord. Nous en identifions les similitudes et les particularités. Cette étape n'est pas présentée dans la version actuelle de la publication

Lors de la troisième étape, nous abordons la sélection des variables biologiques du système, la détermination de leur comportement, l'identification des voies d'échange entre ces variables et enfin la reconnaissance des facteurs physiques qui contrôlent, à différentes échelles d'espace et de temps, le fonctionnement de ces variables biologiques. Au cours de cette étape, nous sélectionnons les processus planctoniques de base (production, consommation, excrétion, etc.), nous déterminons leur valeur maximale pour un écosystème donné, nous établissons les limitations par la physique (éclairage, température, turbulence, etc.) et la biologie (autres processus) et nous définissons les relations sous forme de fonctions mathématiques. Cette étape aboutit à un schéma conceptuel représentant notre vision de l'écosystème planctonique généralisable à l'Océan Mondial.

Lors de la quatrième étape, nous construisons un modèle numérique de l'écosystème planctonique sur base du schéma conceptuel élaboré. Nous établissons les équations d'évolution des variables biologiques que nous couplons avec les équations physiques. Nous développons volontairement ce modèle sur un mode déterministe et naturaliste, l'objectif poursuivi étant de fournir un outil disponible à des écologistes pour tester des hypothèses concernant les processus de l'écosystème.

Enfin lors de la dernière étape, nous appliquons le modèle ainsi construit à la simulation des écosystèmes décrits précédemment. Il est utilisé comme outil formel pour tester la variabilité de l'écosystème planctonique en réponse à diverses contraintes réelles ou potentielles.