



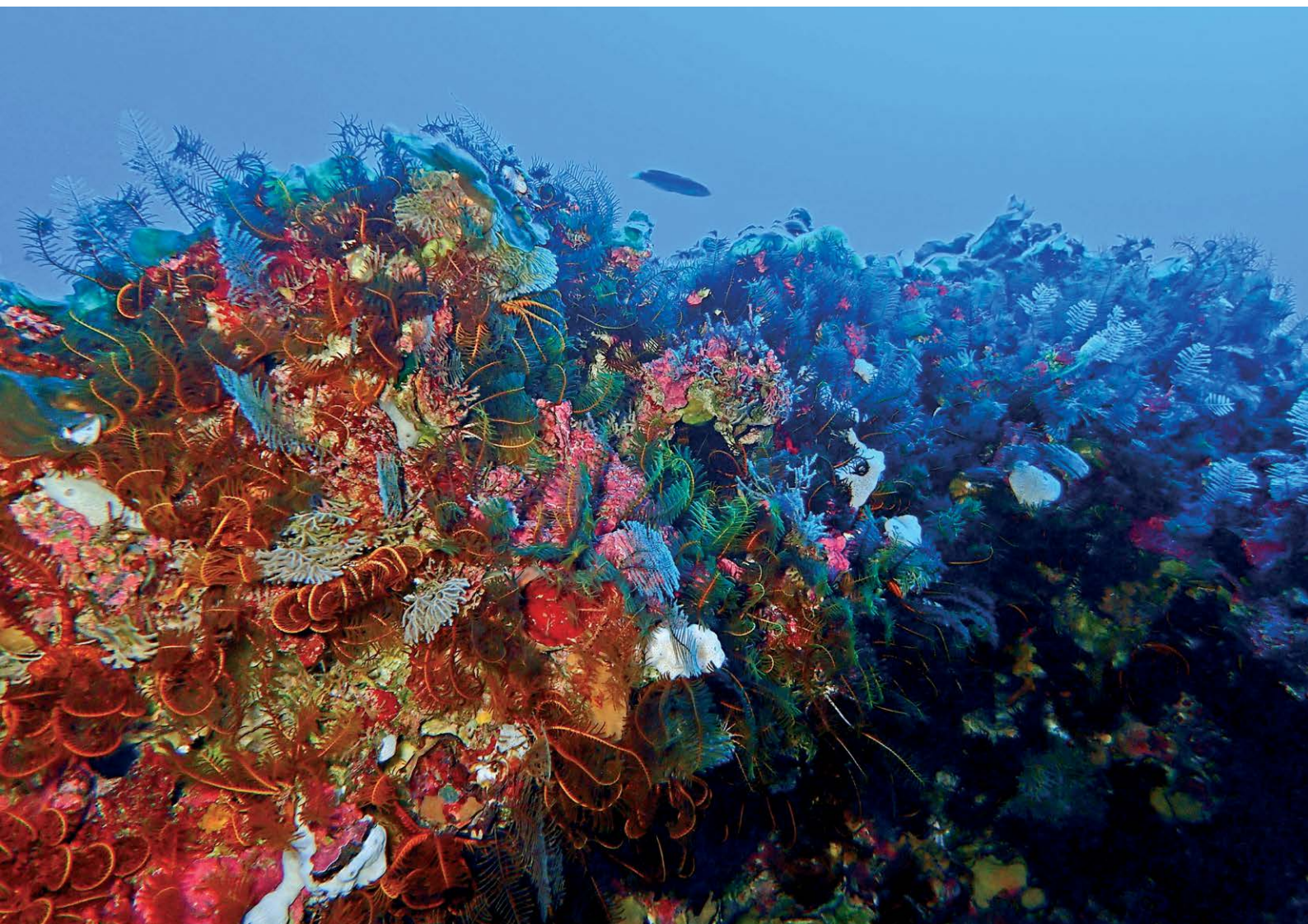
# Oases for marine life

State of knowledge on seamounts and hydrothermal vents

# Oasis de vie marine

Etat des lieux des connaissances sur les monts sous-marins et les sources hydrothermales

Sara Zucchi, Jean-François Ternon, Hervé Demarcq, Frédéric Ménard, Sabrina Guduff, Aurélie Spadone



INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE



FONDS FRANÇAIS POUR  
L'ENVIRONNEMENT MONDIAL



Institut de Recherche  
pour le Développement  
FRANCE

## About IUCN

IUCN is a membership Union uniquely composed of both government and civil society organisations. It provides public, private and non-governmental organisations with the knowledge and tools that enable human progress, economic development and nature conservation to take place together.

Created in 1948, IUCN is now the world's largest and most diverse environmental network, harnessing the knowledge, resources and reach of more than 1,300 Member organisations and some 10,000 experts. It is a leading provider of conservation data, assessments and analysis. Its broad membership enables IUCN to fill the role of incubator and trusted repository of best practices, tools and international standards.

IUCN provides a neutral space in which diverse stakeholders including governments, NGOs, scientists, businesses, local communities, indigenous peoples organisations and others can work together to forge and implement solutions to environmental challenges and achieve sustainable development.

[www.iucn.org](http://www.iucn.org)  
<https://twitter.com/IUCN/>

---

## À propos de l'IUCN

L'IUCN est une union de Membres composée de gouvernements et d'organisations de la société civile. Elle offre aux organisations publiques, privées et non-gouvernementales les connaissances et les outils nécessaires pour que le progrès humain, le développement économique et la conservation de la nature se réalisent en harmonie.

Créée en 1948, l'IUCN s'est agrandie au fil des ans pour devenir le réseau environnemental le plus important et le plus diversifié au monde. Elle compte avec l'expérience, les ressources et le poids de ses plus de 1300 organisations Membres et les compétences de ses plus de 10 000 experts. Elle est l'un des principaux fournisseurs de données, d'évaluations et d'analyses sur la conservation. Sa taille lui permet de jouer le rôle d'incubateur et de référentiel fiable de bonnes pratiques, d'outils et de normes internationales.

L'IUCN offre un espace neutre où diverses parties prenantes – gouvernements, ONG, scientifiques, entreprises, communautés locales, groupes de populations autochtones, organisations caritatives et autres – peuvent travailler ensemble pour élaborer et mettre en œuvre des solutions pour lutter contre les défis environnementaux et obtenir un développement durable.

<http://www.iucn.org/fr>  
<https://twitter.com/IUCN/>

# Oases for marine life

State of knowledge on seamounts and hydrothermal vents

Sara Zucchi, Jean-François TERNON, Hervé Demarcq, Frédéric Ménard,  
Sabrina Guduff, Aurélie Spadone

The designation of geographical entities in this book, and the presentation of the material, do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IUCN or other participating organisations concerning the legal status of any country, territory, or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The views expressed in this publication do not necessarily reflect those of IUCN or other participating organisations.

This publication has been made possible in part by funding from the French Global Environment Facility.

Published by: IUCN, Gland, Switzerland

Copyright: © 2018 IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources

Reproduction of this publication for educational or other non-commercial purposes is authorised without prior written permission from the copyright holder provided the source is fully acknowledged.

Reproduction of this publication for resale or other commercial purposes is prohibited without prior written permission of the copyright holder.

Citation: Zucchi, S., Ternon, J.-F., Demarcq, H., Ménard, F., Guduff, S. and Spadone, A. (2018). *Oasis for marine life. State of knowledge on seamounts and hydrothermal vents*. Gland, Switzerland: IUCN, vi + 50pp.

ISBN: 978-2-8317-1934-4 (PDF)

DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.14.en-fr>

Cover photo: Front cover: Summit area of the Walters Shoal, South West Indian Ocean  
© Expedition MD208-Walters Shoal IUCN/FFEM/Institut Polaire Français IPEV - Alain Barrère (MEN)  
Back cover: Summit area of the Walters Shoal, South West Indian Ocean  
© Expedition MD208-Walters Shoal IUCN/FFEM/Institut Polaire Français IPEV - Sébastien Faninoz (MNHN)

Layout by: Imre Sebestyén jr. / Unit Graphics

Available from: IUCN (International Union  
for Conservation of Nature)  
Global Marine and Polar Programme  
Rue Mauverney 28  
1196 Gland  
Switzerland  
Tel +41 22 999 0000  
Fax +41 22 999 0002  
[marine@iucn.org](mailto:marine@iucn.org)  
[www.iucn.org/resources/publications](http://www.iucn.org/resources/publications)

# Oasis de vie marine

Etat des lieux des connaissances sur les monts sous-marins et les sources hydrothermales

Sara Zucchi, Jean-François Ternon, Hervé Demarcq, Frédéric Ménard, Sabrina Guduff, Aurélie Spadone

La terminologie géographique employée dans cet ouvrage, de même que sa présentation, ne sont en aucune manière l'expression d'une opinion quelconque de la part de l'UICN ou des autres organisations concernées sur le statut juridique ou l'autorité de quelque pays, territoire ou région que ce soit, ou sur la délimitation de ses frontières.

Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles de l'UICN ou des autres organisations concernées.

Le présent ouvrage a pu être publié grâce à un soutien financier du Fond Français pour l'Environnement Mondial.

Publié par : UICN, Gland, Suisse

Droits d'auteur : © 2018 UICN, Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources

La reproduction de cette publication à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite préalable du [des] détenteur[s] des droits d'auteur à condition que la source soit dûment citée.

La reproduction de cette publication à des fins commerciales, notamment en vue de la vente, est interdite sans autorisation écrite préalable du [des] détenteur[s] des droits d'auteur.

Citation : Zucchi, S., Ternon, J.-F., Demarcq, H., Ménard, F., Guduff, S. and Spadone, A. (2018). *Oasis de vie marine. Etat des lieux des connaissances sur les monts sous-marins et les sources hydrothermales*. Gland, Suisse: UICN, vi + 50pp.

ISBN: 978-2-8317-1934-4 (PDF)

DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.14.en-fr>

Traduction: Laurence Echasserieau

Photo couverture : Photo de couverture avant: Partie sommitale du Banc Walters, sud-ouest de l'océan Indien  
© Expedition MD208-Walters Shoal IUCN/FFEM/Institut Polaire Français IPEV - Alain Barrère (MEN)  
Photo de couverture arrière: Partie sommitale du Banc Walters, sud-ouest de l'océan Indien  
© Expedition MD208-Walters Shoal IUCN/FFEM/Institut Polaire Français IPEV - Sébastien Faninoz (MNHN)

Mise en page : Imre Sebestyén jr. / Unit Graphics

Disponible auprès de : UICN (Union internationale  
pour la conservation de la nature)  
Programme Global Milieu Marin et Polaire  
Rue Mauverney 28  
1196 Gland  
Suisse  
Tél +41 22 999 0000  
Fax +41 22 999 0002  
[marine@iucn.org](mailto:marine@iucn.org)  
[www.iucn.org/resources/publications](http://www.iucn.org/resources/publications)

# Table of Contents

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Acknowledgements .....                                                                            | vi |
| 1. Introduction .....                                                                             | 1  |
| 2. Seamounts and hydrothermal vent ecosystems: overview and associated benthic biodiversity ..... | 3  |
| Seamounts .....                                                                                   | 3  |
| Hydrothermal vents .....                                                                          | 7  |
| 3. Pelagic biodiversity associated with seamounts and ocean dynamics .....                        | 14 |
| Physical processes resulting from current-topography interaction .....                            | 14 |
| Impact of seamounts on low trophic levels .....                                                   | 16 |
| Phytoplankton and primary production .....                                                        | 16 |
| Zooplankton and micronekton .....                                                                 | 17 |
| Marine apex predators .....                                                                       | 19 |
| Marine mammals .....                                                                              | 20 |
| Seabirds .....                                                                                    | 20 |
| 4. Special focus: South-West Indian Ocean .....                                                   | 22 |
| Geological and oceanographic characteristics of the SWIO .....                                    | 22 |
| Biology of seamounts and hydrothermal vents in the SWIO .....                                     | 23 |
| Resources associated with seamount ecosystems .....                                               | 23 |
| Resources associated with hydrothermal vent ecosystems .....                                      | 24 |
| The Madagascar Ridge and the Walters Shoal .....                                                  | 24 |
| Remote sensing monitoring of environmental patterns in the SWIO .....                             | 27 |
| Main hydrographic features .....                                                                  | 28 |
| 5. Knowledge gaps .....                                                                           | 34 |
| 6. Conclusion .....                                                                               | 39 |
| Annex: Observation of the world's oceans by autonomous Argos floats .....                         | 40 |
| References .....                                                                                  | 41 |

# Table des matières

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Remerciements .....                                                                                  | vi |
| 1. Introduction .....                                                                                | 2  |
| 2. Monts sous-marins et sources hydrothermales: présentation et biodiversité associée .....          | 3  |
| Monts sous-marins .....                                                                              | 3  |
| Sources hydrothermales .....                                                                         | 7  |
| 3. Biodiversité pélagique associée aux monts sous-marins et dynamique des océans .....               | 14 |
| Processus physiques résultant de l'interaction entre le courant et la topographie .....              | 14 |
| Impact des monts sous-marins sur les faibles niveaux trophiques .....                                | 16 |
| Phytoplancton et la production primaire .....                                                        | 16 |
| Zooplancton et micronekton .....                                                                     | 17 |
| Prédateurs supérieurs marins .....                                                                   | 19 |
| Mammifères marins .....                                                                              | 19 |
| Oiseaux de mer .....                                                                                 | 20 |
| 4. Région ciblée : le Sud-Ouest de l'océan Indien .....                                              | 22 |
| Caractéristiques géologiques et océanographiques de la région du SWIO .....                          | 22 |
| Biologie des monts sous-marins et des sources hydrothermales dans la région du SWIO .....            | 23 |
| Ressources associées aux écosystèmes de monts sous-marins .....                                      | 23 |
| Ressources associées aux écosystèmes de sources hydrothermales .....                                 | 24 |
| La ride de Madagascar et le banc Walters .....                                                       | 25 |
| La surveillance continue des modèles environnementaux par télédétection dans la région du SWIO ..... | 27 |
| Les principales caractéristiques hydrographiques .....                                               | 30 |
| 5. Lacunes des connaissances .....                                                                   | 34 |
| 6. Conclusion .....                                                                                  | 39 |
| Annexe : Observation de l'océan mondial par des flotteurs autonomes Argos .....                      | 40 |
| Références .....                                                                                     | 41 |

## Acknowledgements

---

IUCN and the authors of this report warmly thank the French Global Environment Facility for the financial support with which this report has been produced. This work has been successfully completed within the framework of the IUCN French Global Environment Facility (FFEM) - South West Indian Ocean (SWIO) project, supported within the FFEM by the French Ministry of Europe and Foreign Affairs and the Ministry of Higher Education, Research and Innovation. We would like to express our sincere gratitude to them.

The Global Marine and Polar Programme of IUCN warmly thanks all the people who contributed to the realization of this report for their valuable work, especially our scientific partners of the Research Institute for Development (IRD), Jean-François Ternon (UMR MARBEC-IRD), Hervé Demarcq (UMR MARBEC-IRD), Frédéric Ménard (MIO-IRD) and their collaborators. We also express our deep gratitude to our collaborators, Sara Zucchi and Sabrina Guduff, who were involved at different stages of the realization of this work. Thanks to Susan Pfiffner for her careful review. Finally, we thank all the partners of the FFEM-SWIO project.

## Remerciements

---

L'IUCN et les auteurs de ce rapport remercient vivement le Fonds Français pour l'Environnement Mondial pour le soutien financier grâce auquel ce rapport a été réalisé. Ce travail a été mené à bien dans le cadre du projet de l'IUCN Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) – South West Indian Ocean (SWIO), porté au sein du FFEM par le Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères et le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation français. Nous leur exprimons notre sincère gratitude.

Le Programme Global pour les Milieux Marin et Polaire de l'IUCN remercie chaleureusement toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce rapport pour leur précieux travail, en particulier nos partenaires scientifiques de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Jean-François Ternon (U.M.R. MARBEC- IRD), Hervé Demarcq (U.M.R. MARBEC- IRD), Frédéric Ménard (MIO – IRD) et leurs collaborateurs. Nous exprimons également notre vive reconnaissance à nos collaboratrices, Sara Zucchi et Sabrina Guduff, impliquées à différents stades de la réalisation de ce travail. Merci à Susan Pfiffner pour sa relecture attentive. Nous remercions, enfin, tous les partenaires du projet FFEM-SWIO.

# 1. Introduction

---

This bibliographic study was carried out within the framework of the IUCN French Global Environment Facility (FFEM)-South-West Indian Ocean (SWIO) project for the *Conservation and sustainable use of seamount and hydrothermal vent ecosystems in areas beyond the national jurisdiction of the South-West Indian Ocean*. Funded by the FFEM, the project's overall objectives are to contribute to improving the scientific knowledge of these types of ecosystems, to strengthen the governance of international waters and to promote the development of integrated management tools for high-seas biodiversity.

The project focused on threats from two types of human activities for these particular high-seas ecosystems: the exploitation of fisheries resources by the fishing industry and future offshore mining.

The purpose of this bibliographic study on seamount and hydrothermal vent ecosystems is to review the state of knowledge on the subject matter in order to better guide decision-making processes to develop and implement conservation and sustainable management measures.

The first two sections of the document summarise knowledge of these two types of ecosystems and of their benthic (living on or next to the seabed) and pelagic (in the water column) associated biodiversity. Characteristic physical processes, enrichment of trophic levels and their importance and role for large predators and marine megafauna are described and highlighted. Seamount ecosystems have a high biological productivity supplying fish, seabirds and marine mammals. They are also connecting zones for the distribution of tropical and temperate species, and the associated features feed into highly productive ecosystems, unique species and essential ecological services. Hydrothermal vent ecosystems also have high productivity and host unique and specific species.

In addition, these formations present a strong potential for exploitable mineral resources contained in polymetallic sulphides (hydrothermal vents) and cobalt-rich crusts (seamounts).

In the third section, the report focuses on the SWIO, the region targeted by the project, and describes its specificities in terms of geology and oceanography, quality of available data and knowledge about specific diversity. This region, which has a greater occurrence of seamounts and hydrothermal vents than the Atlantic or the Pacific Oceans, has been the least studied. It is a region of high biodiversity with a number of important endemic species and, in particular, has seen its fish catches increase for more than a decade.

Finally, knowledge gaps are discussed in the last section and accompanied by recommendations. Among other things, the difficulties of localising these habitats, the lack of knowledge about the dynamics of these ecosystems, the weaknesses related to the identification and documentation of the biodiversity, and the quantification of impacts are discussed. The need for further data acquisition through standardised protocols, improved international sharing of information and the establishment of mechanisms that strengthen the link between science and governance are all recommended actions to achieve the objectives of conservation and sustainable exploitation of these ecosystems.

# 1. Introduction

---

Cette étude bibliographique a été réalisée dans le cadre du projet de l'UICN Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) – South West Indian Ocean (SWIO) sur la *Conservation et l'exploitation durable des écosystèmes de monts sous-marins et sources hydrothermales dans les zones au-delà de la juridiction nationale du sud-ouest de l'océan Indien*. Financé par le FFEM, les objectifs généraux du projet sont de contribuer à l'amélioration des connaissances scientifiques sur ces types d'écosystèmes, de renforcer la gouvernance des eaux internationales et de promouvoir le développement d'outils de gestion intégrée de la biodiversité en haute mer.

Le projet a mis l'accent sur les menaces provenant de deux types d'activités humaines pour ces écosystèmes particuliers de haute mer : l'exploitation des ressources halieutiques par l'industrie de la pêche et la future exploitation minière offshore.

Une première partie présente l'état des connaissances actuelles sur ces deux types d'écosystèmes particuliers. Dans un deuxième temps, ce rapport se concentre sur la région ciblée par le projet à savoir le sud-ouest de l'océan Indien. Enfin, les lacunes de connaissance existantes sont examinées dans un dernier chapitre.

Le but de cette étude bibliographique sur les écosystèmes marins et hydrothermaux est de passer en revue l'état des connaissances sur le sujet afin de mieux guider les processus décisionnels pour développer et mettre en œuvre des mesures de conservation et de gestion durable.

Les deux premières sections du document résument la connaissance de ces deux types d'écosystèmes et de leur biodiversité associée benthique (vivant sur ou à proximité du fond marin) et pélagique (dans la colonne d'eau). Les processus physiques caractéristiques, l'enrichissement des niveaux trophiques et leur importance et rôle pour les grands prédateurs et la mégafaune marine sont décrits et mis en évidence. Les écosystèmes des monts sous-marins ont une productivité biologique élevée qui approvisionne poissons, oiseaux de mer et mammifères marins. Ils relient également des zones de distribution d'espèces tropicales et tempérées, et leurs caractéristiques connexes contribuent à en faire des écosystèmes hautement productifs, peuplés d'espèces uniques et fournissant des services écologiques essentiels. Les écosystèmes de sources hydrothermales ont aussi une productivité élevée et hébergent des espèces uniques et spécifiques.

De plus, ces formations présentent un fort potentiel de ressources minérales exploitables contenues dans les sulfures polymétalliques (sources hydrothermales) et les encroûtements riches en cobalt (monts sous-marins).

Dans la troisième section, le rapport se concentre sur le sud-ouest de l'océan Indien, la région ciblée par le projet, et décrit ses spécificités en termes de géologie et d'océanographie, la qualité des données disponibles et les connaissances sur la diversité spécifique. Cette région, qui compte plus de monts sous-marins et de sources hydrothermales que les océans Atlantique ou Pacifique, a été la moins étudiée. C'est une région à forte biodiversité avec un nombre important d'espèces endémiques et, en particulier, ses prises de poissons ont augmenté pendant plus d'une décennie.

Enfin, les lacunes dans les connaissances sont discutées dans la dernière section et accompagnées de recommandations. Entre autres choses, les difficultés de localiser ces habitats, le manque de connaissances sur la dynamique de ces écosystèmes, les faiblesses liées à l'identification et à la documentation de la biodiversité, et la quantification des impacts sont discutés. La nécessité d'acquérir davantage de données grâce à des protocoles normalisés, d'améliorer le partage international de l'information et la mise en place de mécanismes renforçant le lien entre science et gouvernance sont autant d'actions recommandées pour atteindre les objectifs de conservation et d'exploitation durable de ces écosystèmes.

## 2. Seamounts and hydrothermal vent ecosystems: overview and associated benthic biodiversity

Oceans cover nearly 71% of the Earth's surface. With an average depth of almost 4,000 metres, the oceans provide more than 90% of the habitable area for life on Earth. Beyond the continental shelves, 88% of the oceans are deeper than 1 kilometre and 76% have depths of 3,000–6,000 m (UNEP, 2006).

The sea floor is reached at a depth of about 4,000 m and extends over the ocean basins at depths of 5,000 m on average. This is called the abyssal plain. The zone between the continental shelf and the abyssal plain is the bathyal zone. In some places, the sea floor drops again into elongated trenches with depths of 10–11 km. This region is the hadal zone. The ocean floor is interrupted by a mountain chain known as the mid-oceanic ridge system. Other features on the ocean floor are seamounts and hydrothermal vents (Kaiser et al., 2005).

### Seamounts

Seamounts occur from the Equator to the Poles and are morphologically distinct elevations beneath the surface of the sea, rising relatively steeply from the seabed, but they do not emerge above the surface (Santos et al., 2009; Rogers, 2012).

They are present throughout the world's ocean basins across a wide range of latitudes and depths (Figure 1) and form distinctive habitats in areas that would otherwise be dominated by sedimentary plains (Clark et al., 2010).

Most seamounts are of volcanic origin, although some, such as the Atlantis Bank in the South-West Indian Ocean, are formed by tectonic uplift or even from serpentine mud (Fryer, 1992). They are commonly conical in shape, with a circular, elliptical or more elongated base (Consalvey et al., 2010).

## 2. Monts sous-marins et sources hydrothermales: présentation et biodiversité associée

Les océans couvrent près de 71 % de la surface de la Terre. Avec une profondeur moyenne de près de 4 000 mètres, les océans procurent plus de 90 % des zones habitables pour la vie sur Terre. Au-delà des plateaux continentaux, 88 % des océans atteignent une profondeur supérieure à 1 kilomètre et 76 % des profondeurs allant de 3 000 à 6 000 m (PNUE, 2006).

Le plancher océanique est atteint à une profondeur d'environ 4000 mètres et s'étend sur les bassins océaniques à des profondeurs de 5 000 mètres en moyenne. Il s'agit de la plaine abyssale. La zone située entre le plateau continental et la plaine abyssale est la zone bathyale. À certains endroits, le fond océanique forme des fosses allongées à des profondeurs allant de 10 à 11 kilomètres. Cette région est la zone hadale. Interrompu par une chaîne de montagnes connue sous le nom de ride médio-océanique, le fond océanique compte également d'autres formations : les monts sous-marins et les sources hydrothermales (Kaiser et al., 2005).

### Monts sous-marins

On trouve des monts sous-marins de l'équateur jusqu'aux pôles. Il s'agit d'élévations distinctes sur le plan morphologique situées au-dessous de la surface de la mer, qui s'élèvent de manière relativement abrupte au-dessus du plancher océanique, mais n'émergent pas (Santos et al., 2009 ; Rogers, 2012).

Présents dans le monde entier sur le bassin océanique sous différentes latitudes et à différentes profondeurs (Figure 1), les monts sous-marins constituent des habitats caractéristiques dans des régions qui seraient sinon dominées par des plaines sédimentaires (Clark et al. 2010).

Si la plupart d'entre eux sont d'origine volcanique, certains, comme l'Atlantis Bank situé dans le Sud-Ouest de l'océan Indien, sont formés par un soulèvement tectonique ou même à partir de boue de serpentine (Fryer, 1992). Généralement de forme conique, ils sont

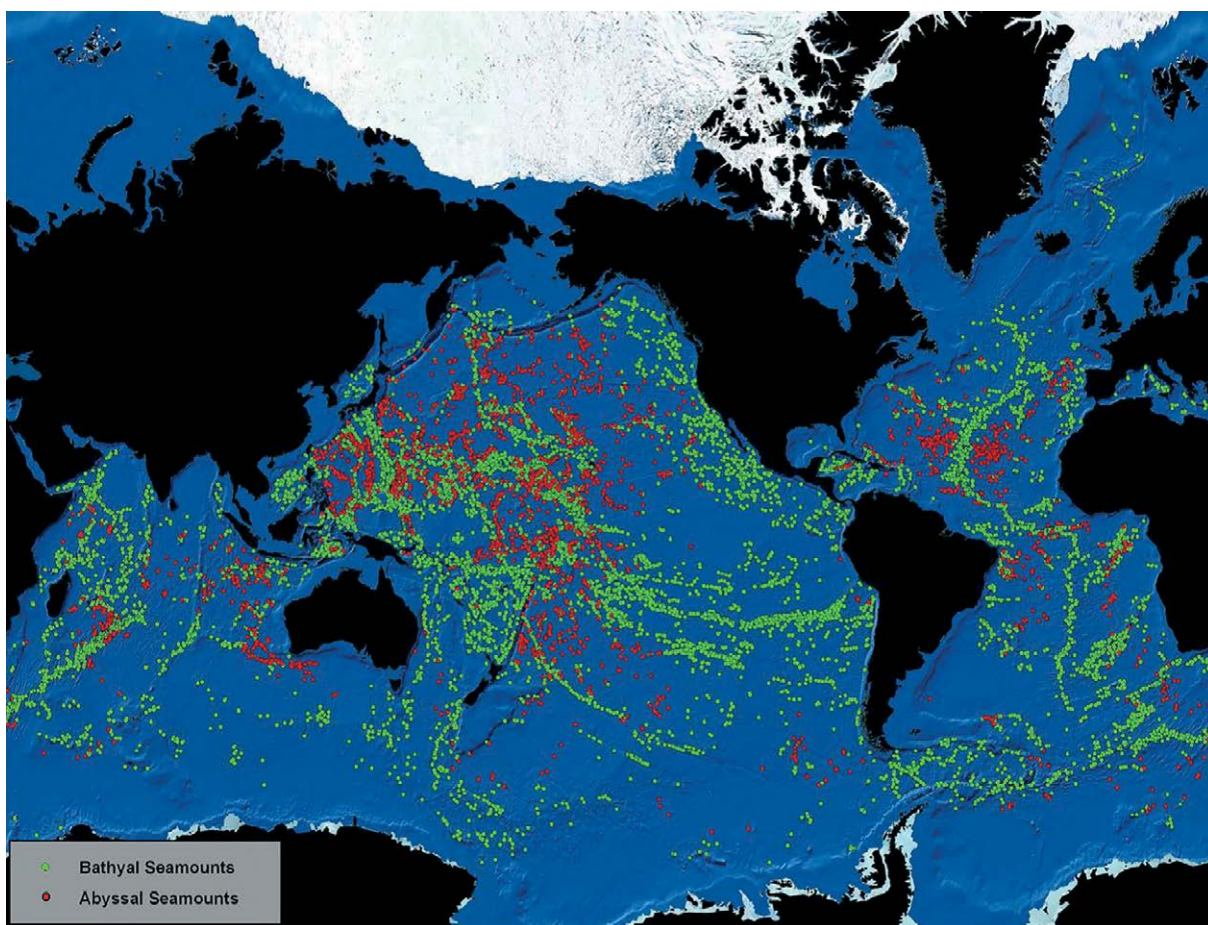
Geologists have traditionally defined seamounts as topographic features with an elevation exceeding 1,000 m above the seabed. In most current definitions of seamounts, however, the restriction to a minimum height of 1,000 m seems to be based primarily on practical criteria since elevations of less than 1,000 m on the seafloor may enclose morphologic structures of diverse origins such as fault blocks or blocks within debris avalanche deposits (Menard, 1964; Schmidt & Schmincke, 2000). Smaller submarine knolls (with an elevation of 500–1,000 m) and hills (elevation of less than 500 m) also share many of the environmental characteristics of larger features and, given that the size distribution of such elevations are continuous, the term ‘seamount’ is used interchangeably for most features of more than 100 m in elevation (Wessel, 2007; Staudigel & Clague, 2010).

In the present report, we adopt an ‘ecological’ definition on the basis of previous publications (Pitcher et al., 2007) that includes seamounts, knolls and hills.

Because seamounts do not break the sea’s surface, knowledge of their distribution comes primarily from

dotés d’une base circulaire, elliptique ou plus allongée (Consalvey et al., 2010).

Les géologues définissent traditionnellement les monts sous-marins comme des formations topographiques dont l’élévation dépasse 1 000 m au-dessus du plancher océanique ; dans la plupart des définitions actuelles, la restriction des monts sous-marins à une hauteur minimale de 1 000 m semble toutefois reposer principalement sur des critères pratiques, puisque les élévations de moins de 1 000 m au-dessus du fond océanique peuvent inclure des structures morphologiques d’origines diverses telles que des blocs entre deux failles ou des blocs au sein des dépôts d’avalanche de débris (Menard, 1964 ; Schmidt et Schmincke, 2000). Cependant, compte tenu du grand nombre des caractéristiques environnementales que les dômes sous-marins (élévation de 500-1 000 m) et les collines (élévation de moins de 500 m) partagent avec des formations plus élevées, et compte tenu de la répartition continue de la taille de ces élévations, le terme mont sous-marin est employé de manière interchangeable pour la plupart



**Figure 1:** The distribution of seamounts predicted by Kitchingman and Lai (2004).

**Figure 1 :** La répartition des monts sous-marins estimée par Kitchingman et Lai (2004).

Source: <https://marine-conservation.org/>

remote sensing. The abundance and distribution of seamounts at a global scale have been predicted many times, mostly based on satellite altimetry and ship-based sounding extrapolations (Costello et al., 2010; Wessel et al., 2010; Yesson et al., 2011). At present, these approaches are unable to adequately detect small and deep peaks, and thus estimates of the global abundance of seamounts are still uncertain (Morato et al., 2013).

Recent estimates (Wessel et al., 2010; Kim and Wessel, 2011; Yesson et al., 2011) of the number of seamounts in the world's underwater topography range approximately from 25,000 to 140,000 large features and potentially from 125,000 to 25 million small seamounts or knolls greater than 100 m in height.

Despite this uncertainty and a general perception that seamounts are small isolated spots scattered in remote areas, this habitat is one of the most extensive of all oceanic environments comprising an estimated area of about 28.8 million square kilometres (Etnoyer et al., 2010).

The largest contiguous area of seamounts is found in the central portion of the Pacific Plate, where most studies have been conducted (Gubbay, 2003), with lower numbers in the Indian, Atlantic, Arctic and Southern Oceans (Wessel, 2007).

**Seamounts have been recognised as significant habitats for a wide diversity of species (Clark et al., 2012) and are subject to human exploitation (Rowden et al., 2010). Despite an increase in research on seamounts and oceanic islands ecology and biogeography, however, many basic aspects of their biodiversity are still unknown.**

As described by Rogers (1994; 2004; 2012; Rogers et al., 2007), the dominant large fauna of hard substrate on many deep-sea seamounts are attached, sessile organisms (corals, sponges) that feed on particles of food suspended in the water. Also, pelagic species of fishes, sharks, squids and whales tend to aggregate over shallow seamounts because of the Taylor columns that form over them. Taylor columns are gently rotating water eddies that can aggregate food resources (small fishes, larvae and plankton), due to down-welling currents around the seamounts.

The predominant seamount's phylum is Cnidaria (Figure 2), which includes black, stony and gorgonian corals, sea pens and anemones, and hydroids (Consalvey et al., 2010).

des formations de plus de 100 m de hauteur (Wessel, 2007 ; Staudigel et Clague, 2010).

Dans le présent rapport, nous adoptons une définition 'écologique' découlant des précédentes publications (Pitcher et al. 2007) qui comprend les monts sous-marins, les dômes et les collines.

Comme les monts sous-marins n'émergent pas, nos connaissances sur leur répartition proviennent essentiellement de la télédétection. L'abondance et la répartition des monts sous-marins à une échelle mondiale ont été estimées à maintes reprises, essentiellement par altimétrie satellitaire et extrapolations tirées de sondage par système embarqué (Costello et al., 2010 ; Wessel et al., 2010 ; Yesson et al., 2011). À l'heure actuelle, ces méthodes ne permettent pas de détecter correctement les sommets petits et profonds si bien que les estimations de l'abondance mondiale de monts sous-marins présentent encore des parts d'incertitude importantes (Morato et al., 2013).

D'après les estimations récentes (Wessel et al., 2010 ; Kim et Wessel, 2011 ; Yesson et al., 2011), le nombre de monts sous-marins caractérisant la topographie sous-marine du globe est compris entre 25 000 et environ 140 000 formations importantes et potentiellement entre 125 000 et 25 millions de petits monts sous-marins ou dômes de plus de 100 m de haut.

Malgré cette incertitude et le sentiment général que les monts sous-marins désignent de petites portions isolées, éparpillées dans des zones éloignées, cet habitat constitue l'un des plus vastes environnements océaniques, qui s'étend sur une zone estimée à environ 28,8 millions de km<sup>2</sup> (Etnoyer et al., 2010).

La plus vaste étendue continue de monts sous-marins se trouve dans la partie centrale de la Plaque pacifique, où la plupart des études ont été menées (Gubbay, 2003), avec des nombres inférieurs dans les océans Indien, Atlantique, Arctique et Austral (Wessel, 2007).

**Les monts sous-marins ont été reconnus comme étant des habitats importants pour une grande diversité d'espèces (Clark et al, 2012) et sont soumis à l'exploitation humaine (Rowden et al, 2010). Cependant, malgré une forte hausse des recherches menées sur l'écologie et la biogéographie des monts sous-marins et des îles océaniques, bien des aspects élémentaires de leur biodiversité demeurent inconnus.**

Comme l'a décrit Rogers (1994 ; 2004 ; 2012 ; Rogers et al. 2007), l'importante faune dominante du substrat dur sur de nombreux monts sous-marins des grands



**Figure 2:** Cnidaria (Anthozoa) from seamounts: left, a Basket star (*Gorgonocephalus* sp) and right, Brisingid sea stars (Order Brisingida). South-West Indian Ocean Ridge. © NERC/IUCN.

**Figure 2 :** Cnidaires (Anthozoaires) provenant de monts sous-marins : à gauche, une gorgonocéphale (*Gorgonocephalus* sp) et à droite, des étoiles de mer Brisingidés (Ordre Brisingida). Ride du Sud-Ouest de l'océan Indien. © NERC/IUCN.

Seamounts have often been regarded as biodiversity hotspots as they have high endemism relative to other habitats (Richer de Forges et al., 2000; Morato & Clark, 2007; Rogers, 2004; 2012). Understanding of global seamount biodiversity, however, is still poor, as fewer than 300 seamounts have been properly studied (Consalvey et al., 2010) in order to describe reliably the assemblage composition of seabed organisms. Furthermore, sampling has been biased towards larger fauna such as fishes, crustaceans and corals (Stocks, 2009).

Limited biological surveys of seamounts are a problem for assessing accurate levels of species richness and endemism (Stocks & Hart, 2007) and conservation measures. In addition, the hypothesis of high endemism has been questioned in recent years (Rowden et al., 2010). As a result, seamount data are very sparse and the 'oasis hypothesis' (Samadi et al., 2006), related to biomass, remains quantitatively untested (Rowden et al., 2010).

At the macro-ecological scale, the fauna of individual seamounts have been found to reflect the species groups present on neighbouring seamounts and continental margins (Samadi et al., 2006; Stocks & Hart, 2007; McClain et al., 2009; Brewin et al., 2009; Clark et al., 2010). Even if dominant evidence suggests that broad assemblage composition may be similar to surrounding deep-sea environments, community structure may differ between habitats (Consalvey et al., 2010).

Rogers (2012) described in detail seamount habitats and associated communities, and the different hypotheses by which seamounts are locations of enhanced trophic input and determinant of community

fonds est constituée par des organismes sessiles fixés (coraux, éponges), qui se nourrissent de particules alimentaires en suspension dans l'eau. Par ailleurs, des espèces pélagiques de poissons, des requins, des calmars et des baleines se rassemblent généralement sur des monts sous-marins situés à une faible profondeur en raison des colonnes de Taylor qui se forment au-dessus d'eux. Les colonnes de Taylor désignent des tourbillons caractérisés par une légère rotation, qui peuvent agréger des nutriments (petits poissons, larves et plancton) du fait de la plongée des eaux de surface autour des monts sous-marins.

Le phylum prédominant du mont sous-marin correspond aux Cnidaires (Figure 2), qui comprennent les coraux noirs, les coraux durs et les coraux gorgoniens, les plumes de mer et les anémones, ainsi que les hydroïdes (Consalvey et al., 2010).

Les monts sous-marins ont souvent été considérés comme des points chauds de la biodiversité dont l'endémisme est élevé, comparativement aux autres habitats (Richer de Forges et al., 2000 ; Morato et Clark 2007 ; Rogers, 2004 ; 2012). Néanmoins, nous avons encore une connaissance imparfaite de la biodiversité mondiale des monts sous-marins, moins de 300 d'entre eux ayant été suffisamment étudiés (Consalvey et al., 2010) afin de décrire de manière systématique la composition d'assemblage des organismes benthiques. Par ailleurs, l'échantillonnage a privilégié la faune de taille supérieure comme les poissons, les crustacés et les coraux (Stocks, 2009).

Les études biologiques limitées des monts sous-marins posent un problème pour l'évaluation des niveaux exacts de richesse des espèces et d'endémisme (Stocks et Hart, 2007) ainsi que les mesures de conservation ; par

composition. However, to date, understanding of seamount ecosystems is hindered by significant gaps in global sampling, diverse analytical and scientific approaches, and sampling methods, as well as a lack of large-scale data synthesis and sharing.

Overall, seamount biota can host abundant and diverse benthic and pelagic communities. As previously stated, however, several studies have demonstrated that in many instances community composition might be similar to that in adjacent habitats including continental slopes.

In general, acquisition of knowledge about seamount ecosystems and their associated resources is still ongoing.

## Hydrothermal vents

Similarly to seamounts, hydrothermal vent faunal compositions are characterised by an elevated number of endemic and exclusive species.

Thirty-eight years after the discovery of hydrothermal vents, the investigation of vent habitats and their associated fauna is still in a critical exploratory and discovery phase.

The discovery of hydrothermal vents along the Galapagos Rift in the eastern Pacific in 1977 (Corliss et al., 1979) represented one of the most important findings in biological science in the latter quarter of the 20th century (Glowka, 2003) and led to the identification of chemoautotrophic symbiosis (Dubilier et al., 2008). Hydrothermal vents are underwater oases, providing habitat for many creatures that are not found anywhere else in the ocean. More than 550 new hydrothermal vent species and their composition and distribution at more than 100 vent sites along the global mid-ocean ridge system (Desbruyères et al., 2006) have been identified since the first vent was discovered (Figure 3).

On average, two new species are described each month, a rate of discovery that has been sustained over the past 25–30 years (Van Dover et al., 2002).

Deep-sea hydrothermal vents are extreme environments and they also represent some of the most dynamic environments on Earth, with unpredictable temperatures, chemical concentrations, flow dynamics and seasonality (Childress et al., 1992).

ailleurs, ces dernières années, l'hypothèse d'un endémisme élevé a été remise en cause (Rowden et al., 2010). Les données sur les monts sous-marins se font donc très rares et « l'hypothèse d'oasis » (Samadi et al., 2006), liée à la biomasse, n'a pas encore été testée sur le plan quantitatif (Rowden et al., 2010).

À l'échelle macroécologique, on a constaté que la faune des monts sous-marins individuels reflétait les groupes d'espèces présents sur les marges continentales et les monts sous-marins avoisinants (Samadi et al. 2006 ; Stocks et Hart 2007 ; McClain et al. 2009 ; Brewin et al., 2009 ; Clark et al. 2010). Si, de par l'état actuel des connaissances, tout porte à croire que la composition large de l'assemblage peut être semblable aux environnements d'eaux profondes avoisinants, la structure des communautés peut cependant varier d'un habitat à l'autre (Consalvey et al., 2010).

Dans une description détaillée des habitats de monts sous-marins et des communautés associées, Rogers (2012) a émis l'hypothèse différente selon laquelle les monts sous-marins seraient des lieux d'apport trophique amélioré et joueraient un rôle déterminant de la composition communautaire. Cependant, à ce jour, notre compréhension des écosystèmes des monts sous-marins est entravée par des lacunes importantes dans l'échantillonnage mondial, par une diversité de méthodes analytiques et scientifiques ainsi que de méthodes d'échantillonnage et par un manque de synthèse et de partage des données à grande échelle.

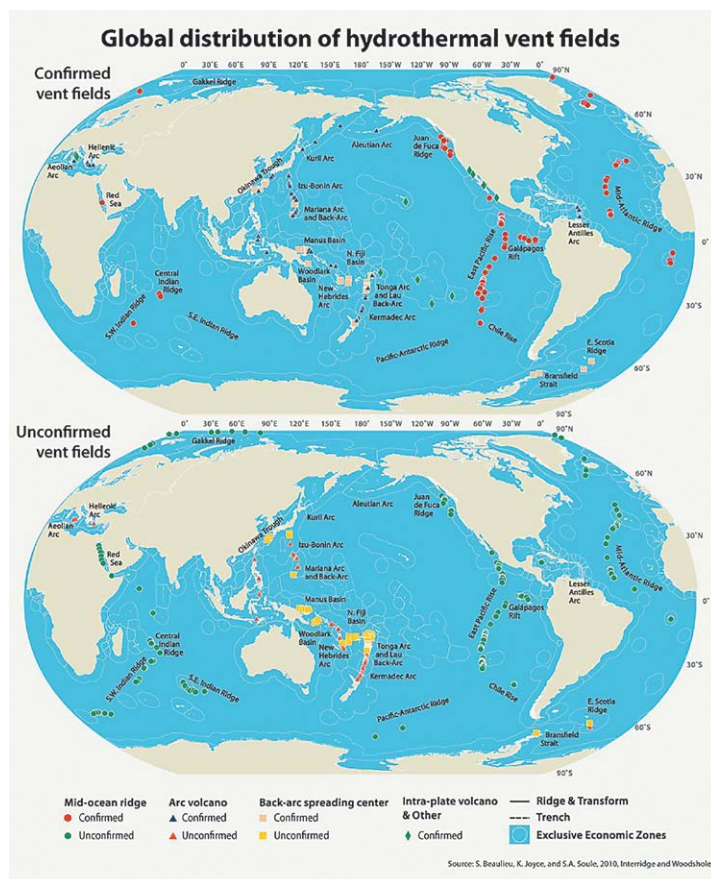
Dans l'ensemble, le biote des monts sous-marins peut abriter des communautés benthiques et pélagiques abondantes et diverses ; cependant, comme cela a été souligné précédemment, plusieurs études ont démontré que, dans bien des exemples, la composition de la communauté pourrait être analogue aux habitats adjacents, y compris au talus continental.

De façon générale, l'acquisition des connaissances sur les monts sous-marins et les ressources associées est encore en cours.

## Sources hydrothermales

À l'instar des monts sous-marins, la composition faunistique des sources hydrothermales se caractérise par un nombre élevé d'espèces endémiques et exclusives.

Trente-huit ans après la découverte des sources hydrothermales, la recherche des habitats formés par les sources hydrothermales et de la faune associée est



**Figure 3 :** Global distribution of hydrothermal vent fields. GRID-Arendal source web page: [http://www.grida.no/graphicslib/detail/global-distribution-of-hydrothermal-vent-fields\\_1840](http://www.grida.no/graphicslib/detail/global-distribution-of-hydrothermal-vent-fields_1840).

**Figure 3:** Distribution mondiale des champs de sources hydrothermales. Page Web source du centre GRID-Arendal : [http://www.grida.no/graphicslib/detail/global-distribution-of-hydrothermal-vent-fields\\_1840](http://www.grida.no/graphicslib/detail/global-distribution-of-hydrothermal-vent-fields_1840).

Hydrothermal vents occur along spreading ridges (such as the Mid-Atlantic Ridge), fracture zones and back-arc basins (Gage & Tyler, 1991) and on volcanic seamounts. They are produced by seawater penetrating the upper levels of the oceanic crust through channels formed in cooling lava flows, reacting chemically with hot basalt inside the crust and then rising back to the seabed to vent as superheated water containing compounds such as sulphides, metals, carbon dioxide and methane (Gubbay, 2002). The vent fluid is geothermally heated close to the magma chamber that feeds the ridge, reaching temperatures that can exceed 400°C.

The water may trickle out from cracks and crevices on the seabed as hot springs (5–250°C) or as highly concentrated jets of superheated water (270–380°C).

The 360°C sulphide chimneys of the vent systems are primordial environments recognised as reminiscent of

encore dans une phase cruciale d'exploration et de découverte.

L'une des plus importantes découvertes en biologie du dernier quart du 20<sup>ème</sup> siècle (Glowka, 2003) a été celle de sources hydrothermales le long du rift des Galápagos dans le Pacifique Est en 1977 (Corliss et al., 1979, qui a abouti à l'identification de la symbiose chimiotrophe (Dubilier et al., 2008). Les sources hydrothermales (Figure 3) constituent des oasis sous-marines qui offrent un habitat à de nombreuses créatures que l'on ne trouve nulle part ailleurs dans l'océan. On a dénombré plus de 550 nouvelles espèces présentes dans les sources hydrothermales et déterminé leur composition et répartition dans plus de 100 sites de sources situés le long de la ride médio-océanique mondiale (Desbruyères et al., 2006) depuis que les premières sources hydrothermales ont été découvertes (Figure 3).

En moyenne, deux nouvelles espèces ont été décrites chaque mois lors des 25 à 30 dernières années (Van Dover et al., 2002).

Environnements extrêmes, les sources hydrothermales en eaux profondes comptent parmi les milieux les plus dynamiques sur Terre, avec des températures, des concentrations chimiques, une dynamique des flux et une saisonnalité imprévisibles (Childress et al., 1992).

Les sources hydrothermales se trouvent le long des dorsales d'accrétion (par exemple la ride médio-atlantique), des zones de fracture et des bassins arc-arrière (Gage et Tyler, 1991) ainsi que sur les monts sous-marins volcaniques. Elles sont produites par l'eau de mer qui s'infiltre dans les niveaux supérieurs de la croûte océanique par des canaux formés dans les flux de lave en cours de refroidissement, réagit chimiquement avec le basalte chaud à l'intérieur de la croûte, puis remonte jusqu'au fond marin pour s'échapper sous forme d'eau surchauffée, riche en composés comme des sulfures, des métaux, du CO<sub>2</sub> et du méthane (Gubbay, 2002). Le fluide émis par la source est chauffé par géothermie, à proximité de la chambre magmatique qui alimente la dorsale, et peut atteindre des températures supérieures à 400°C.

L'eau peut s'écouler de fissures et de crevasses situées sur le sol marin sous forme de sources chaudes (5–250°C) ou de jets d'eau surchauffée (270–380°C).

early Earth, with reactive gases, dissolved elements and thermal and chemical gradients that operate over spatial scales of centimetres to metres (Martin et al., 2008).

Hydrothermal activity is an important consequence of volcanic activity at the mid-ocean ridge and this process has made its imprint on the chemical composition of the oceans.

Current data suggest that hydrothermal systems probably occur every 50–100 km. However, only about 10% of the total 60,000 km of the global mid-ocean ridge has been surveyed in any detail for the presence of hydrothermal activity (Baker & German, 2004).

Despite the fact that a very limited proportion of active hydrothermal vents potentially existing worldwide have been discovered, scientists suggest distinct assemblages of animal species in six major seafloor regions (six distinct biogeographical domains) characterised by specific faunal assemblages:

- the Azores shallow Atlantic vent communities (80–1700 m);
- the fauna of the deep Mid-Atlantic Ridge vents between the Azores Triple Junction and the Equator;
- the East Pacific Rise communities found from 30°N to the Easter Micro-Plate;
- the North-East Pacific vent communities of the Explorer, Juan de Fuca and Gorda Ridges;
- the western Pacific back-arc basin communities;
- the vent fauna of the Central Indian Ocean (Van Dover et al., 2002; Shank, 2004; Ramirez-Llodra et al., 2007).

The largest and most abundant vent creatures are tube worms (for example, *Riftia pachyptila*) and giant white clams, animals that thrive because they have developed a symbiotic, or mutually beneficial, relationship with the bacteria. Notably, some species of fish have been found to live within vent environments and more live in their vicinity (Bischoff et al., 2002).

A distinctive characteristic of vent biological communities is the high degree (around 85%) of species endemism, with many species displaying important physiological, morphological and ecological adaptations to particular and extreme environmental factors (Ramirez-Llodra et al., 2007). Hydrothermal vent habitats are thus considered to hold intrinsic scientific value (Van Dover, 2012).

The hydrothermal trophic web is based on the production of chemoautotrophic microbes (Cavanaugh,

Les cheminées aux fluides sulfurés à 360°C des systèmes hydrothermaux constituent des environnements primordiaux qui rappellent la Terre primitive, avec des gaz réactifs, des éléments dissous et des gradients thermiques et chimiques qui opèrent sur des échelles spatiales allant du centimètre au mètre (Martin et al., 2008).

L'activité hydrothermale est une conséquence importante de l'activité volcanique dans la ride médio-océanique et ce processus a laissé son empreinte sur la composition chimique des océans.

D'après les données actuelles, on trouve probablement des systèmes hydrothermaux tous les 50–100 km. Cependant, sur les 60 000 km de dorsale médio-océanique que compte le globe, seuls 10 % ont été étudiés en détail pour rechercher la présence d'une activité hydrothermale (Baker et German, 2004).

Bien qu'on n'ait découvert qu'une proportion très restreinte des sources hydrothermales actives qui existeraient dans le monde, les scientifiques avancent l'idée d'assemblages distincts d'espèces animales dans six régions majeures du plancher océanique (six domaines biogéographiques distincts) caractérisées par des assemblages de faune spécifiques :

- les communautés des sources hydrothermales des bas-fonds depuis l'Atlantique jusqu'aux Açores (80–1 700 m) ;
- la faune des sources hydrothermales profondes de la ride médio-atlantique entre la jonction triple des Açores et l'Équateur ;
- les communautés de la ride Est-Pacifique situées entre 30°N et la microplaque de l'île de Pâques ;
- les communautés des sources du Pacifique Nord-Est des rides océaniques Explorer, Juan de Fuca et Gorda ;
- les communautés du bassin arc-arrière du Pacifique occidental ;
- la faune des sources hydrothermales de l'océan Indien central (Van Dover et al., 2002 ; Shank, 2004 ; Ramirez-Llodra et al., 2007).

Parmi les créatures de grande taille les plus abondantes qu'abritent les sources hydrothermales figurent les vers turbicoles (par exemple : *Riftia pachyptila*) et les palourdes blanches géantes qui prospèrent grâce à la relation symbiotique, ou mutuellement profitable, développée avec les bactéries. On a également découvert certaines espèces de poissons qui vivent dans des environnements hydrothermaux. Ils sont encore plus nombreux à vivre dans leur voisinage (Bischoff et al., 2002).

Une caractéristique distinctive des communautés biologiques des sources hydrothermales est le haut degré

## From the Madagascar Ridge to the Walters Shoal: seamounts as productive ecosystems?

South of Madagascar, the Madagascar Ridge is the bathymetric boundary between the Madagascar and Mozambique Basins. The whole area constitutes one of the EBSAs according to the Convention on Biological Diversity (CBD). It is indeed an important area for many seabirds, such as albatrosses and petrels, which nest in the southern islands (including the Kerguelen and Crozet Islands) in the summer and move to the Walters Shoal and around the Madagascar Ridge during the austral winter. This is also an important feeding area for tropical seabird species, as Barau's petrel, an endemic species of the island of Reunion. Tropical (yellowfin) and temperate (albacore) tunas also converge in this area and represent an abundant stock of pelagic fish resources caught by long-liners (swordfish and tunas).

The Madagascar Ridge has a variety of climatic and hydrodynamic environments. At 20°S, the South Equatorial Current hits the east coast of Madagascar and splits into northern and southern branches, the North and South-East Madagascar Currents (NMC and S-EMC respectively). The S-EMC flows along the east coast then turns westward at the southern tip of Madagascar towards the east coast of southern Africa. Part of the S-EMC undergoes a retroflexion south-west of Madagascar, forming the Subtropical Indian Counter Current (Siedler et al., 2009) which flows eastward. South of Madagascar is also a corridor for mesoscale eddies and eddy dipoles coming from the east and migrating to the west (to feed the Agulhas Current system; De Ruijter et al., 2004) or to the north within the Mozambique Channel (along the west coast of Madagascar; Srokosz et al., 2004). A seasonal upwelling also develops on the continental shelf south of Madagascar (Machu et al., 2002) which may provide biological production (plankton) towards the northern part of the Madagascar Ridge. An unnamed seamount lies about 200 km to the south of the Madagascar, on the northern part of the Madagascar Ridge (at 27°30'S). The seamount, which rises at about 200 m below the sea surface, is located in a very dynamic environment (the eddy corridor and the retroflexion of the S-EMC) and it may benefit from the biological production of the upwelling cell to the south of Madagascar.

At the south of the Madagascar Ridge is Walters Shoal (33°S), a shallow seamount (20 m below the surface at its highest summit) lies within a completely different dynamic environment: at the southern boundary of the South Indian Subtropical Gyre, with very low mesoscale eddy activity.

Despite their structural and environmental differences, there is evidence that the unnamed seamount and Walters Shoal sustain biological productivity for top predators: both of them are feeding areas for some species of seabirds during the feeding period (Pinet et al., 2012) and both have been (or are still) fishing grounds for demersal (Walters Shoal) and pelagic (unnamed seamount) resources (Romanov, 2003; Bach et al., 2011).

1983; Jannasch, 1984) that use reduced compounds from the vent fluids to fix carbon dioxide from seawater.

The biological communities associated with hydrothermal vents are unusual in that they are able to derive energy under conditions where photosynthesis is not possible.

Until the discovery of hydrothermal vents, photosynthesis had been the best-known metabolic process for the sustaining life on Earth (Martin et al., 2008).

In chemoautotrophy, the source of carbon is again inorganic (carbon dioxide), but the source of energy is chemical, obtained from sulphide or methane. Vent organisms are, therefore, independent of sunlight. For this reason, it has been suggested that hydrothermal

(~ 85 %) d'endémisme des espèces, de nombreuses espèces présentant d'importantes adaptations physiologiques, morphologiques et écologiques aux facteurs environnementaux particuliers et extrêmes (Ramirez-Llodra et al., 2007). Les habitats des sources hydrothermales sont par conséquent considérés comme ayant une valeur scientifique intrinsèque (Van Dover, 2012)

Le réseau trophique hydrothermal est basé sur la production de microbes chimio-autotrophes (Cavanaugh, 1983 ; Jannasch, 1984), qui utilisent des composés réduits provenant des fluides émis par les sources hydrothermales pour fixer le dioxyde de carbone contenu dans l'eau de mer.

Les communautés biologiques associées aux sources hydrothermales sont inhabituelles dans la mesure où

## De la ride de Madagascar au banc Walters : les monts sous-marins comme systèmes productifs ?

Au sud de Madagascar, la ride de Madagascar marque la frontière bathymétrique entre les bassins de Madagascar et du Mozambique. L'ensemble de la région constitue l'une des zones biologiquement et écologiquement importantes (ZBEI) d'après la Convention sur la Diversité Biologique (CDB). Il s'agit en effet d'une région importante pour de nombreux oiseaux de mer, tels que les albatros et les pétrels, qui nichent dans les îles du sud (dont les îles Kerguelen et Crozet) en été et migrent sur le banc Walters et à proximité de la ride de Madagascar pendant l'hiver austral. C'est également une importante aire de nourrissage pour les espèces tropicales d'oiseaux de mer, comme le Pétrel de Barau, une espèce endémique de l'île de la Réunion. Les thons tropicaux (albacore) et des eaux tempérées (thon blanc germon) convergent également dans cette zone et constituent un stock abondant de poissons pélagiques attrapés par les palangriers (espadons et thons).

La ride de Madagascar offre divers environnements climatiques et hydrodynamiques. À 20°S, le courant équatorial Sud (South Equatorial Current - SEC) frappe la côte Est de Madagascar et se sépare en branches septentrionale et méridionale, les courants Nord et Sud-Est malgaches. La branche méridionale du courant Est de Madagascar (southern branch of the East Madagascar Current ou S-EMC) passe le long de la côte Est, puis tourne vers l'ouest, au sud de Madagascar vers la côte Est de l'Afrique du Sud. Une partie du courant Sud-Est malgache subit une rétroflexion au sud-ouest de Madagascar, formant le Contre-courant subtropical indien (Subtropical Indian Ocean Countercurrent ou SICC, Siedler et al., 2009) qui se dirige vers l'est. Le sud de Madagascar est également un corridor pour les tourbillons de mésoéchelle et les dipôles tourbillonnaires venant de l'est et migrant vers l'ouest (pour alimenter le courant des Aiguilles - de Ruijter et al., 2004) ou vers le nord, dans le canal du Mozambique (le long de la côte Ouest de Madagascar - Srokosz et al., 2004). Un upwelling saisonnier se développe également sur le plateau continental au sud de Madagascar (Machu et al., 2002), qui peut fournir une production biologique (plancton) à la partie nord de la ride de Madagascar. Un mont sous-marin sans dénomination se trouve à environ 200 km au sud de Madagascar, sur la partie Nord de la ride de Madagascar (à 27°30'S). S'élevant à environ 200 m sous la surface de la mer, il est situé dans un environnement très dynamique (le corridor de tourbillons et la rétroflexion du S-EMC) et peut profiter de la production biologique de la cellule d'upwelling au sud de Madagascar.

Au sud de la ride de Madagascar se trouve le banc Walters (33°S), un mont sous-marin à faible profondeur (20 m sous la surface pour son sommet le plus élevé), qui se situe dans un environnement dynamique entièrement différent : à la frontière sud du Gyre subtropical Sud Indien, avec une activité de tourbillon de mésoéchelle très faible.

Malgré leurs différences structurelles et environnementales, il y a lieu de penser que les deux sites (mont sous-marin sans dénomination et banc Walters) maintiennent la productivité biologique pour les prédateurs supérieurs : tous deux constituent des aires de nourrissage pour certaines espèces d'oiseaux de mer pendant la période de nourrissage (Pinet et al., 2012) et ont été (ou sont encore) des lieux de pêche pour les ressources démersales (banc de Walter) et pélagiques (mont sous-marin sans dénomination) (Romanov et al., 2003 ; Bach et al., 2011).

vents could have been the location for the origin of life on Earth. The associated animal communities are particularly unusual; as mentioned above, the species derive energy under conditions where photosynthesis is not possible and can also tolerate great extremes and variability in the temperature and the chemical composition of the surrounding water and cope with potentially toxic concentrations of various heavy metals.

With respect to the mineral richness of hydrothermal vents, interest in seafloor exploitation such as mineral mining in deep-sea hydrothermal fields has increased

elles peuvent tirer de l'énergie dans des conditions où la photosynthèse n'est pas possible.

Jusqu'à la découverte des sources hydrothermales, la photosynthèse avait été le processus métabolique le mieux connu pour le maintien de la vie sur Terre (Martin et al., 2008).

Dans la chimio-autotrophie, la source de carbone est là encore inorganique (CO<sub>2</sub>), mais la source d'énergie est chimique, obtenue à partir de sulfure ou de méthane. Les organismes des sources hydrothermales sont par conséquent indépendants de la lumière du

recently; however, the environmental impact of anthropogenic disturbance to the seafloor and associated communities is poorly known (Nakajima et al., 2015). Deep-sea mining has been proposed not only for hydrothermal vents, but for different types of seafloor habitats including seamounts and manganese nodules on the abyssal plain. Obviously, this activity prompts concerns about whether hydrothermal vents need protection from some types of exploitation.

The report, *Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas*, states clearly, “as human activities such as fishing and oil, gas and mineral exploration and exploitation move into deeper waters both within and beyond national jurisdiction, the relative lack of data on deep seabed ecosystems and biodiversity makes it difficult to predict and control their impacts” (UNEP, 2006). In this respect, additional efforts (political, scientific, etc.) are needed to compile and review existing knowledge and to engage the use of modern technologies for the discovery, quantification, identification and understanding of deep-sea life (UNEP, 2006).

Areas beyond national jurisdiction (ABNJ) make up a big part of these environments and cover more than 64% of the world’s ocean surface (UNEP, 2006). Knowledge about these habitats, the life histories and dynamic of most species and biological communities living in them and their functions and processes is, however, very limited.

soleil. C’est la raison pour laquelle il a été avancé que les sources hydrothermales auraient pu être le lieu de l’origine de la vie sur notre planète. Les communautés animales associées sont particulièrement atypiques, car les espèces tirent leur énergie dans des conditions où la photosynthèse n’est pas possible, supportent des températures extrêmes, une forte variabilité de la température et de la composition chimique de l’eau environnante et font face à des concentrations potentiellement toxiques de divers métaux lourds.

En ce qui concerne la richesse minérale des sources hydrothermales, l’exploitation du plancher océanique, notamment pour l’exploitation minière des champs hydrothermaux en eaux profondes, a suscité récemment un intérêt croissant ; néanmoins, l’impact environnemental des perturbations anthropogènes du plancher océanique et des communautés associées est méconnu (Nakajima et al., 2015). L’extraction minière en eaux profondes a été proposée non seulement pour les sources hydrothermales, mais pour différents types d’habitats du plancher océanique, notamment les monts sous-marins et les nodules de manganèse sur la plaine abyssale. Bien évidemment, cette activité fait naître des inquiétudes quant à la nécessité de protéger les sources hydrothermales contre certains types d’exploitation.

Le rapport *Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas*, établit clairement que « les activités humaines comme la pêche ainsi que la prospection et l’exploitation pétrolières, gazières et minières, progressent dans les eaux plus profondes tant à l’intérieur qu’au-delà des juridictions nationales ; le manque relatif de données sur les écosystèmes et la biodiversité du plancher océanique profond rend difficiles la prévision et le contrôle de leurs impacts » (PNUE, 2006). À cet égard, des efforts supplémentaires (politiques, scientifiques, etc.) sont nécessaires pour compiler et examiner les connaissances existantes et mobiliser l’utilisation des technologies modernes aux fins de découverte, de quantification, d’identification et de compréhension de la vie marine profonde (PNUE, 2006).

Les Zones Au-delà des Juridictions Nationales (ZAJN) occupent une grande partie de ces environnements et couvrent plus de 64 % de la surface des océans à l’échelle planétaire (PNUE, 2006). Nos connaissances de ces habitats, de ces histoires de vie et de la dynamique de la majorité des espèces et des communautés biologiques qui y habitent ainsi que de leurs fonctions et processus sont, cependant, très limitées.

In summary, seamounts and hydrothermal vents display common features. Both ecosystem types:

- are considered 'hotspots' of species biodiversity;
- are already under potential threat from intensive commercial exploitation (such as mining, fishing, pharmaceutical) (UNEP, 2006; UNCLOS, [1982]);
- could be proposed as Marine Protected Areas (MPAs), Ecologically or Biologically Significant Marine Areas (EBSAs) or Areas of Particular Environmental Interest (APEIs);
- need a higher and targeted level of protection in particular for vulnerable and unique associated species.

In this respect, considerably more exploration and investigation (that follow responsible research activities; see six recommendations described in Devey et al., 2007) of new sites at key locations are essential to fill in important gaps in the biogeographical, ecological, geological, evolutionary and genetic puzzle of hydrothermal vents and seamounts, in order to advise the public and policy makers on how best to preserve these ecosystems and their outstanding beauty for future generations.

En résumé, les monts sous-marins et les sources hydrothermales présentent des caractéristiques communes. En effet, les deux types d'écosystèmes :

- sont considérés comme des 'points chauds' de la biodiversité des espèces ;
- sont déjà exposés à une menace potentielle d'exploitation économique intense (minière, pêche, pharmaceutique) (PNUE, 2006 ; CNUDM, [1982]) ;
- pourraient être proposés comme « Aires Marines Protégées » et/ou des « zones marines écologiquement et biologiquement importantes », et/ou encore des « Zones d'Intérêt Environnemental Particulier »;
- nécessitent un niveau de protection ciblé en particulier pour les espèces vulnérables et uniques associées.

À cet égard, il est essentiel d'effectuer considérablement plus de travaux d'exploration et d'investigation (en menant des activités de recherche responsable ; voir les six recommandations décrites dans Devey et al., 2007) dans les nouveaux sites situés aux emplacements clés afin de combler les lacunes importantes du puzzle biogéographique, écologique, géologique, évolutionnaire et génétique des sources hydrothermales et des monts sous-marins. La finalité est de conseiller le public et les décideurs sur le mode de préservation de ces écosystèmes et de leur beauté exceptionnelle pour les générations futures.

### 3. Pelagic biodiversity associated with seamounts and ocean dynamics

---

#### Physical processes resulting from current–topography interaction

Interaction between oceanic currents and the topography potentially results in different processes. The actual situation depends on:

- the impinging current (speed of the current, horizontal and vertical gradients in the velocity field, tidal current);
- the shape of the seamount (height above the bottom, depth of the summit below surface, thickness or width of the structure);
- the vertical stratification of the water column at the seamount location which may limit the vertical propagation of a ‘seamount effect’ (White et al., 2007).

Depending on at which latitude the seamount is located, the dynamics may also differ due to the variation of the Coriolis factor (that is, the effect of the rotation of the Earth) which controls oceanic circulation at different spatial scales. Of particular interest for biological issues is the distance of the summit to the surface (euphotic or sunlit) layer as far as the primary producers are concerned.

One signature of the interaction of currents and topography is the Taylor column (or Taylor cone in certain circumstances). An oceanic flow that encounters a topographic feature tends to be deviated and to form meanders in its trajectory. In a stratified water column, such behaviour may generate mesoscale (around 100 km) instabilities. Depending on the size and shape of the seamount, the meanders may form an eddy (anticyclonic, according to the theory) than can be trapped over the summit of the seamount. This corresponds to the Taylor column (Huppert, 1975; Huppert & Bryan, 1976). A cyclone is also produced and, in the case of a weak incident flow, it can also be trapped and form a dipole with the anticyclonic eddy (Verron & Le Provost, 1985). In turn, the interactions between pre-formed mesoscale eddies and seamounts can result in the deformation, split or

### 3. Biodiversité pélagique associée aux monts sous-marins et dynamique des océans

---

#### Processus physiques résultant de l'interaction entre le courant et la topographie

L'interaction entre les courants océaniques et la topographie peut entraîner différents processus. La situation réelle dépend :

- du courant incident (vitesse du courant, gradients horizontal et vertical dans le champ de vitesse, courant de marée),
- de la forme du mont sous-marin (hauteur au-dessus du fond, profondeur du sommet sous la surface, épaisseur ou largeur de la structure)
- de la stratification verticale de la colonne d'eau à l'emplacement du mont sous-marin, qui peut limiter la propagation verticale d'un 'effet de mont sous-marin' (White et al., 2007).

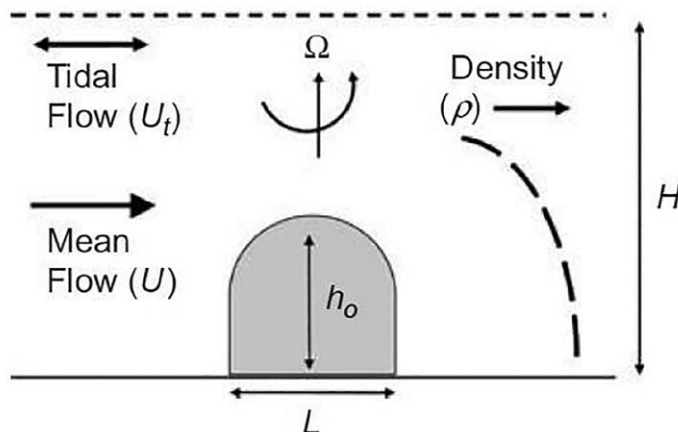
Selon la latitude à laquelle le mont sous-marin est situé, la dynamique peut également varier en raison de la variation du facteur de Coriolis (~effet de la rotation de la Terre) qui contrôle la circulation océanique à différentes échelles spatiales. La distance séparant le sommet de la couche de surface (euphotique ou ensoleillée) revêt un intérêt particulier pour les questions biologiques relatives aux producteurs primaires.

L'interaction courant/topographie se caractérise par la célèbre colonne de Taylor (ou cône de Taylor dans certaines circonstances particulières). Un courant océanique qui rencontre un élément topographique est généralement dévié et forme des méandres dans sa trajectoire. Dans une colonne d'eau stratifiée, un tel comportement peut générer des instabilités (environ 100 km) à mésoéchelle. En fonction de la taille et de la forme du mont sous-marin, les méandres peuvent former un tourbillon (anticyclonique, selon la théorie) qui peut être piégé sur le sommet du mont sous-marin. Cela correspond à la colonne de Taylor (Huppert, 1975 ; Huppert et Bryan, 1976). Un cyclone est

destruction of the structures, leading to the release of the water masses transported by the eddies (Herbette et al., 2003; 2005). This was observed west of South Africa, in the South Atlantic Ocean (Arhan et al., 1999).

The generation of eddies at mesoscale (around 100 km) – and associated processes at sub-mesoscale (around 10 km) – generally promotes vertical fluxes (upwelling) and the upward transport of nutrients to the surface layer of the sea, resulting in an enhancement of the primary production (Lévy, 2008; Capet et al., 2008).

également produit et, en cas de flux incident faible, peut également être piégé et former un dipôle avec le tourbillon anticyclonique (Verron et Le Provost, 1985). À leur tour, les interactions entre les tourbillons de mésoéchelle préformés et les monts sous-marins peuvent entraîner la déformation, la division ou la destruction des structures, provoquant le rejet des masses d'eau transportées par les tourbillons (Herbette et al., 2003, 2005). Cela a été observé à l'ouest de l'Afrique du Sud, dans l'océan Atlantique Sud (Arhan et al., 1999).



**Figure 4:** Sketch of the main physical factors that control the localised dynamics at seamounts (White et al., 2007).

**Figure 4 :** Schéma des principaux facteurs physiques qui contrôlent la dynamique localisée dans les monts sous-marins (White et al., 2007) : courant de marée (tidal flow), masse volumique (density), courant moyen (mean flow).

Other physical processes resulting from the interaction with topographic structures are the generation of oceanic waves – topographic Rossby waves (Chapman, 1989; Brink, 1990) or internal waves (Nikurashin & Ferrari, 2010) – that participate in the generation of dynamic structures (eddies as retention cells, upwelling for vertical transport) associated with the seamounts, to the transport of water and biologically significant properties such as nutrients and chlorophyll (White & Mohn, 2002) and to the vertical mixing within the water column (St. Laurent & Garrett, 2001; Lavelle & Mohn, 2010).

White et al. (2007) summarise the role of physical processes on seamount productivity:

- When a Taylor column develops around the top of a shallow-summit seamount, it increases the upwelling of deep-water masses rich in nutrients, eventually up to the euphotic zone (where light is available for primary production). The Taylor column also results in the establishment of a

La génération de tourbillons de mésoéchelle (environ 100 km) et les processus à submésoéchelle associés (environ 10 km) – provoquent en général des flux verticaux (upwelling) et le transport des nutriments à la surface de la mer, ce qui entraîne une amélioration de la production primaire (Lévy, 2008 ; Capet et al., 2008).

Parmi les processus physiques découlant de l'interaction avec des structures topographiques figure la génération de vagues océaniques (ondes topographiques de Rossby – Chapman, 1989 ; Brink, 1990 – ou vagues internes – Nikurashin et Ferrari, 2010) qui participent à la génération de structures dynamiques (les tourbillons comme cellules de rétention, l'upwelling pour le transport vertical) associées aux monts sous-marins, au transport de l'eau et de propriétés importantes sur le plan biologique (nutriments, chlorophylle

– White et Mohn, 2002) ainsi qu'au mélange vertical au sein de la colonne d'eau (Saint-Laurent et Garrett, 2001 ; Lavelle et Mohn, 2010).

White et al. (2007) résument le rôle des processus physiques sur la productivité des monts sous-marins :

- Lorsqu'une colonne de Taylor se développe autour du sommet d'un mont sous-marin dont le sommet est peu profond, elle augmente l'upwelling des masses d'eau profondes riches en nutriments, finalement jusqu'à la zone euphotique (où la lumière est disponible pour la production primaire). La colonne de Taylor provoque également l'établissement d'une cellule de circulation autour du sommet, responsable de la rétention des organismes à la dérive (plancton), qui accroît globalement la biomasse du compartiment trophique inférieur. Il convient de noter toutefois que le développement complet d'un tel scénario a rarement été observé lors d'études de terrain (Genin et Dower, 2007). Les auteurs supposent que cela pourrait s'expliquer

circulation cell around the summit, responsible for the retention of drifting organisms (plankton) which globally increases the biomass in the lower tropic compartment. It should be noted, however, that the full development of such a scenario has rarely been observed in field studies (Genin & Dower, 2007). The authors hypothesise that this might be due to the variability of oceanic forces that does not give this theoretical process time to fully develop and maintain.

- Upwelling around a seamount increases the nutrient load in the surface layer. It also increases the vertical stratification which facilitates the trapping of nutrients and drifting organisms in the surface layer.
- Improved vertical mixing may increase the current strength (tidal current or mean circulation) and the friction of the current at the bottom. This may result in the remobilisation of sediments and associated nutrients which are then available for primary production. Exchanges along the slope of the seamount are also enhanced, which may impact the spatial distribution of benthic species.
- The advection of nutrients and biological material coming from high seas due to the specific circulation around a seamount also contributes to the enhancement of the biological productivity around the seamount.

## Impact of seamounts on low trophic levels

### Phytoplankton and primary production

Vertical fluxes at the seamounts (linked to the Taylor column and along the peak slope by interaction of flow and topography) drive nutrients within the euphotic layer and enhance the primary production. This effect has been evidenced at some seamounts (Genin & Boehlert, 1985; Dower et al., 1992; Mouriño et al., 2001), but this is not always the norm. Genin & Boehlert (1985), for instance, measured chlorophyll enhancement at the Minami-Kasuga seamount (in the North-West Pacific) at only one of three surveys conducted on site. Indeed, the biological response to physical processes at seamounts also depends on the variability of the ocean currents. Retention at the seamount by the (anticyclonic) circulation cell of the Taylor column is the second mechanism involved in the increase of low trophic organisms at seamounts as predicted by theoretical (modelling) studies (Sansóna & Provenzale, 2009). This is unlikely, however, to have a well-developed and persistent Taylor column

par la variabilité des forces océaniques, laquelle ne laisse pas le temps à ce processus théorique de se développer pleinement et de se maintenir.

- L'upwelling autour d'un mont sous-marin accroît la charge en nutriments de la couche de surface. Elle augmente également la stratification verticale, qui facilite le piégeage des nutriments et des organismes à la dérive dans la couche de surface.
- L'amélioration du mélange vertical peut renforcer la force du courant (courant de marée, circulation moyenne) et la friction du courant au fond. Cela provoque la remobilisation des sédiments et des nutriments associés, qui sont alors disponibles pour la production primaire. Les échanges le long de la pente du mont sous-marin sont alors améliorés, ce qui peut influencer sur la répartition spatiale des espèces benthiques.
- L'advection des nutriments et de la matière biologique provenant de la haute mer du fait de la circulation spécifique autour d'un mont sous-marin contribue également à l'amélioration de la productivité biologique autour de celui-ci.

## Impact des monts sous-marins sur les faibles niveaux trophiques

### Phytoplancton et la production primaire

Les flux verticaux sur les monts sous-marins (liés à la colonne de Taylor et le long de la pente abrupte par interaction entre le courant / la topographie) dirigent les nutriments dans la couche euphotique et améliorent la production primaire. Cet effet a été mis en évidence sur certains monts sous-marins (Genin et Boehlert, 1985 ; Dower et al., 1992 ; Mouriño et al., 2001), mais cela n'est pas toujours la norme. Ce n'est que dans une seule des trois enquêtes menées sur site que Genin et Boehlert (1985) par exemple, ont mesuré l'enrichissement en chlorophylle sur le mont sous-marin Minami-Kasuga (dans le Pacifique Nord-Ouest). En effet, la réponse biologique aux processus physiques en jeu sur les monts sous-marins dépend également de la variabilité des courants océaniques. La rétention sur le mont sous-marin due à la cellule de circulation (anticyclonique) de la colonne de Taylor constitue le deuxième mécanisme impliqué dans l'augmentation des organismes des niveaux trophiques inférieurs dans les monts sous-marins conformément aux prévisions des études (de modélisation) théoriques (Sansóna et Provenzale, 2009). Il y a peu de chances toutefois d'avoir une colonne de Taylor bien développée et persistante qui contribue clairement à l'enrichissement de la chaîne trophique (White et al., 2007).

that clearly supports food-web enhancement (White et al., 2007).

In general, seamounts support highly productive ecosystems. According to Genin & Dower (2007), the trophic enhancement over seamounts is first supported by external (allochthonous) inputs in terms of zooplankton trapped against the slopes of the structure and the horizontal fluxes of suspended food (due to accelerated water flow, enhanced vertical mixing by internal waves and magnified tides, etc.; see White et al., 2007). Recent studies on trophic fluxes using stable isotopes and fatty acid analyses confirm the role of pelagic organisms as a food supply for seamount-visiting fauna (Hirsch & Christiansen, 2010).

### Zooplankton and micronekton

Physical processes (upwelling, retention) have the potential to increase the primary production and initiate bottom-up transfer of energy (Dower & Mackas, 1996). This scenario implies that the processes involved are stable enough for an effective transfer to the upper trophic levels, for instance around one month for the transfer to zooplankton (Rowden et al., 2010), although this has never been observed at any sampling site (Genin & Dower, 2007). Other processes have to be invoked to explain the observed distribution at upper trophic compartments.

Alternatively to the bottom-up theory, the increase of planktonic population on seamounts could result from the advection of organisms from high seas by ocean currents (Hirsch & Christiansen, 2010). The presence of the seamount provides favourable resting conditions (such as weak flow and shelter sites) for these organisms (Genin, 2004). Abundance and specific composition on planktonic and nektonic communities are thus modified downstream of the seamount.

Seamounts contribute to the general patchiness of zooplankton distribution. Indeed, topographic features have a direct impact on the zooplankton diel migration preventing the organisms from reaching their deeper habitat during the day (at least for seamounts reaching the depth of vertical migration of zooplankton, at around 300 m (Genin & Dower, 2007)). Zooplankton transported by the oceanic flow avoid the shallowest part of the seamount when possible or remain blocked at the top of the structure where they are consumed by predators, in particular for large zooplankton such as euphausiacea (Genin, 2004). A patchy distribution of zooplankton is frequently observed downstream of shallow seamounts (Genin & Dower, 2007). Haury et al. (2000) identified the

En général, les monts sous-marins contribuent à des écosystèmes hautement productifs. D'après Genin et Dower (2007), l'enrichissement trophique au-dessus du mont sous-marin est d'abord favorisé par des apports (allochtones) externes en termes de zooplancton piégé le long des pentes de la structure et des flux horizontaux d'aliments en suspension (en raison d'un courant d'eau accéléré, d'un mélange vertical enrichi par des vagues internes et des marées amplifiées, etc. – voir White et al., 2007). Des études récentes des flux trophiques à l'aide d'analyses des isotopes stables et des acides gras confirment le rôle des organismes pélagiques dans l'approvisionnement alimentaire de la faune visitant les monts sous-marins (Hirsch et Christiansen, 2010).

### Zooplankton et micronekton

Les processus physiques (upwelling, rétention) ont le potentiel d'accroître la production primaire et de mettre en route le transfert ascendant de l'énergie (Dower et Mackas, 1996). Ce scénario implique que les processus en jeu soient suffisamment stables pour un transfert efficace vers les niveaux trophiques supérieurs – par ex. ~un mois pour le transfert vers le zooplancton (Rowden et al., 2010), ce qui n'a jamais été observé sur aucun site d'échantillonnage (Genin et Dower, 2007). D'autres processus doivent être invoqués pour expliquer la répartition observée dans les compartiments trophiques supérieurs.

A l'inverse de la théorie ascendante, l'augmentation de la population planctonique sur les monts sous-marins pourrait résulter de l'advection des organismes de la haute mer par les courants océaniques (Hirsch et Christiansen, 2010). La présence du mont sous-marin offre des conditions de repos favorables (faible flux, sites d'abri) à ces organismes (Genin, 2004). L'abondance et la composition spécifique des communautés planctoniques et nectoniques sont par conséquent modifiées en aval du mont sous-marin.

Les monts sous-marins contribuent à la fragmentation générale de la répartition du zooplancton. En effet, les formations topographiques ont un impact direct sur la migration journalière du zooplancton : elles empêchent les organismes d'atteindre leur habitat plus profond le jour (au moins pour les monts sous-marins atteignant la profondeur de la migration verticale du zooplancton, soit ~300 m – Genin et Dower, 2007). Le zooplancton transporté par le courant océanique évite, le cas échéant, la partie la moins profonde du mont sous-marin ou reste bloqué en haut de la structure, où il est consommé par des prédateurs, en particulier pour les grands organismes zooplanctoniques,

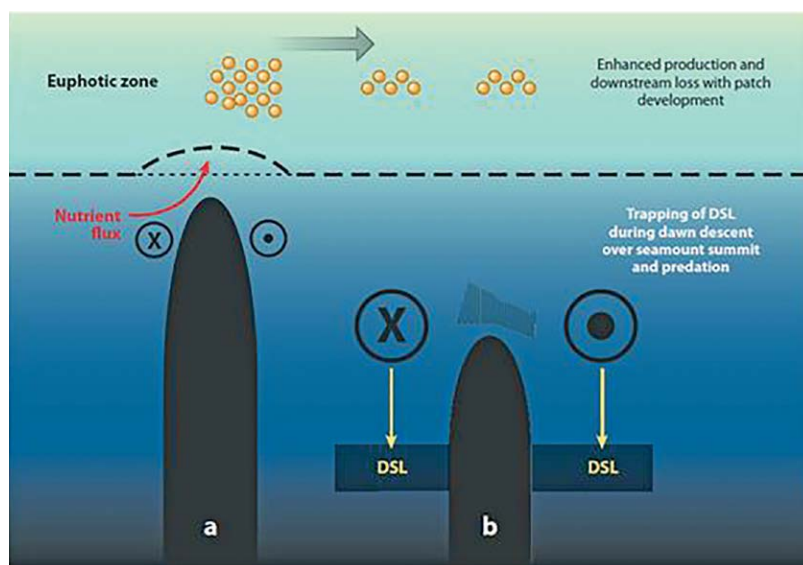
presence of copepod carcasses resulting from their grazing by predators at the top of seamounts in the North-East Pacific, which was related to the patchiness of zooplankton distribution downstream.

The micronekton consists of organisms (crustaceans, fishes and cephalopods) between 2 and 20 cm in size and provides the trophic link between primary and secondary producers and the pelagic predators (Brodeur & Yamamura, 2005). Micronekton undergoes diel vertical migration between the surface layer, where it can feed at night, and the deeper layer, where it avoids predators during the day. This vertical migration might be prevented by topographic features like seamounts. Micronekton is presumed to benefit from the enhancement of trophic production

comme les euphausiacés (Genin, 2004). On observe fréquemment une répartition fragmentée du zooplancton en aval des monts sous-marins situés à peu de profondeur (Genin et Dower, 2007). Haury et al. (2000) ont recensé la présence de carcasses de copépodes mangés par des prédateurs au sommet des monts sous-marins dans le Pacifique Nord-Est, laquelle était liée à la répartition fragmentée du zooplancton en aval.

Le micronekton comprend des organismes (crustacés, poissons et céphalopodes) mesurant entre 2 et 20 cm. Il constitue le maillon dans le réseau trophique entre les producteurs primaires et secondaires et les prédateurs pélagiques (Brodeur et Yamamura, 2005). Le micronekton subit une migration verticale journalière entre la couche de surface où il peut se nourrir

la nuit et la couche plus profonde où il évite les prédateurs le jour. Des formations topographiques comme les monts sous-marins pourraient empêcher cette migration verticale. Le micronekton est censé profiter de l'enrichissement de la production trophique (phyto et zooplancton) sur les monts sous-marins, mais, comme cela a déjà été mentionné, il est peu probable que cet enrichissement soit assez persistant pour bénéficier aux niveaux trophiques supérieurs. D'autre part, il est bien connu (voir ci-dessous) que certains monts sous-marins constituent des sites de pêche riches, soutenus par un approvisionnement considérable en alimentation (du micronekton en particulier) pour les prédateurs supérieurs. Malgré ces données, l'abondance et la composition du micronekton au-dessus et aux abords des monts sous-marins sont méconnues. De Forest et Drazen (2009) ont étudié ce phénomène sur le mont sous-marin Cross à Hawaï. Ils ont constaté une abondance moindre du micronekton sur le sommet, qu'ils ont attribuée essentiellement au fait que le micronekton évite le mont sous-marin. Ils ont également remarqué des différences de composition taxonomique du micronekton au-dessus de la formation topographique et en aval de celle-ci (De Forest et Drazen, 2009). Cependant, les



**Figure 5:** Schematic diagram showing the processes contributing to organic matter fluxes at (a) shallow and (b) intermediate and deep seamounts (Clark et al., 2010).

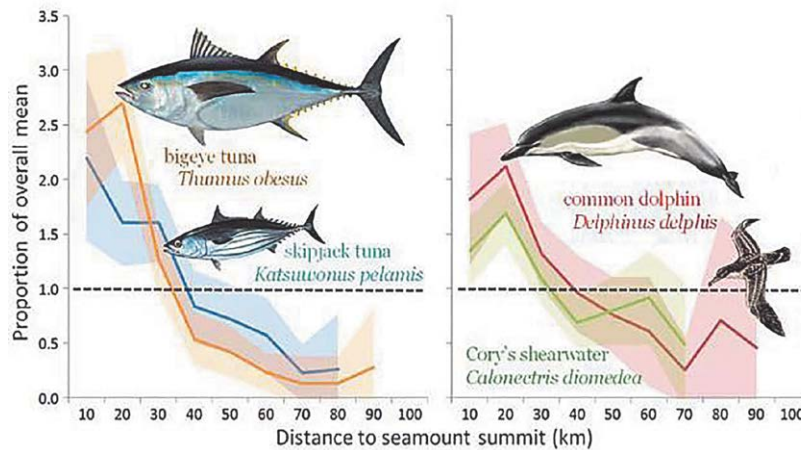
a: Vertical nutrient fluxes promote surface primary productivity which is lost due to weak retention over the seamount.

b: Seamount-trapped vertically migrating zoo-plankton is preyed on by higher trophic levels (DSL: deep scattering layer; circled X and black dot represent flow direction into and out of the plane of the page, respectively).

**Figure 5 :** Schéma des processus contribuant aux flux de matière organique dans les (a) monts sous-marins situés à une faible profondeur et (b) à une profondeur intermédiaire/importante. (Clark et al., 2010)

a : les flux verticaux de nutriments favorisent la production primaire dans les eaux de surface, laquelle est perdue en raison de la faible rétention au-dessus du mont sous-marin

b: le zooplancton à migration verticale piégé sur le mont sous-marin est la proie des niveaux trophiques supérieurs (DSL : deep scattering layer ; la croix et le point noir entourés représentent la direction du courant de part et d'autre du plan de la page, s'éloignant et se rapprochant du lecteur respectivement).



**Figure 6:** Relationships between the abundance of 'visitor' species and the distance to the closest of four seamounts around the Azores (Morato et al., 2008).

**Figure 6 :** Relations entre l'abondance des espèces « visiteurs » et la distance au mont sous-marin le plus proche sur les quatre monts sous-marins des Açores. (Morato et al., 2008)

(phyto- and zooplankton) on seamounts but, as already mentioned, it is unlikely that this enhancement is persistent enough to benefit the upper trophic levels. On the other hand, it is well known (see below) that some seamounts are rich fishing grounds supported by substantial food supply (micronekton in particular) for top predators. Despite this evidence, little is known about the abundance and composition of micronekton above and around seamounts. De Forest and Drazen (2009) investigated this on the Hawaiian Cross seamount. They found lower abundance of micronekton at the summit, which they attributed mostly to the avoidance of the seamount by micronekton. They also noticed differences in the taxonomic composition of micronekton over and away from the topographic feature (De Forest & Drazen, 2009). But the mechanisms behind these impacts are still under debate (for example, Hirsch & Christiansen, 2010).

## Marine apex predators

'Seamount visitors' have been identified by Morato et al. (2008) around the Azores seamounts, including pelagic fish such as skipjack (*Katsuwonus pelamis*) and bigeye tuna (*Thunnus obesus*), marine mammals (such as dolphin *Delphinus delphis*) and seabirds. This not ubiquitous behaviour, however, as they failed to reach a similar conclusion for other species focused upon in their study. Shallow seamounts (summit depth of less than 400 m) would be particularly attractive for top predators due to prey concentration.

mécanismes à l'origine de ces impacts font encore l'objet de débats (par exemple Hirsch et Christiansen, 2010).

## Prédateurs supérieurs marins

Morato et al. (2008) ont recensé les « visiteurs des monts sous-marins » présents autour des monts sous-marins des Açores, à savoir des poissons pélagiques comme la bonite à ventre rayé (*Katsuwonus pelamis*) et le thon obèse à gros œil (*Thunnus obesus*), des mammifères marins (dont le dauphin *Delphinus delphis*) et des oiseaux de mer. Il ne s'agit

toutefois pas d'un comportement ubiquiste, car ils ne sont pas parvenus à la même conclusion pour d'autres espèces sur lesquelles portait leur étude. Les monts sous-marins culminant à faible profondeur (profondeur du sommet <400 m) pourraient être particulièrement attractants pour les prédateurs supérieurs en raison de la concentration de proies. À l'aide d'un modèle biogéochimique et physique couplé, Lehodey et al. (1998) ont évalué que, dans le Pacifique tropical, le délai entre la production de phytoplancton dans une zone d'upwelling et de faune fourrage favorisant la concentration des prédateurs supérieurs est d'environ 90 jours. Une telle persistance est très peu probable dans les écosystèmes de monts sous-marins (Genin, 2004). Néanmoins, comme il a été mentionné précédemment, la concentration de zooplankton et de micronekton sur les monts sous-marins peut également résulter de processus d'advection et peut être suffisante pour contribuer à la concentration des prédateurs supérieurs. Les monts sous-marins ont également une signature magnétique qui pourrait servir à certaines espèces pélagiques lors de leur migration transocéanique (Fréon et Dagorn, 2000 ; Holland et Grubbs, 2007).

## Mammifères marins

Les monts sous-marins sont supposément des lieux de concentration occasionnelle de mammifères marins, même si très peu d'observations directes corroborent cette hypothèse. La concentration des proies

Using a coupled physical biogeochemical model, Lehodey et al. (1998) assessed that, in the tropical Pacific, the delay between phytoplankton production in an upwelling area and forage fauna supporting the concentration of top predators is about 90 days. Such persistence is very unlikely in seamounts ecosystems (Genin, 2004). But, as previously mentioned, concentration in zooplankton and micronekton at seamounts may also result from advection processes and be sufficient to support the concentration of top predators. Seamounts also have a magnetic signature that could be used by some pelagic species during their trans-oceanic migration (Fréon & Dagorn, 2000; Holland & Grubbs, 2007).

## Marine mammals

Marine mammals are expected to concentrate occasionally at seamounts but very few observations confirm this hypothesis. Prey concentration and steep bathymetric gradient are favourable to their presence around seamounts (Kaschner, 2007) but, in fact, direct observations are rare. High catches of toothed whales were reported south of Madagascar in the late 19th and early 20th centuries (Townsend, 1935). But, to the best of our knowledge, no dedicated study has been published recently. Whale movements with ARGOS tags have been reported under the MIROMEN programme (<https://www.globice.org/espace-scientifique/programme-de-recherche/miromen/>) and seem to highlight the attractiveness of the seamounts south of Madagascar for these marine mammals.

## Seabirds

Seabirds lie at the interface between terrestrial and marine domains and closely depend on surface marine top predators to feed within high-seas ecosystems (Hebshi et al., 2008). Studies have demonstrated the close association between some seabird species and pelagic fish or marine mammals such as dolphins (Jaquemet et al., 2004; Hebshi et al., 2008). These predators concentrate near the surface where they become available to seabirds. This is particularly the case for some tropical seabirds (Au & Pitman, 1996).

Few direct observations exist to support the hypothesis of association between seabirds and seamounts (Thompson, 2007). Using data collected between 1996 and 2002 off the California coast, Yen et al. (2004) demonstrated that for one of four species

ainsi que la forte pente sont favorables à leur présence aux abords des monts sous-marins (Kaschner, 2007). On a constaté un nombre élevé de prises de cétacés à dents au sud de Madagascar à la fin du 19<sup>e</sup> / au début du 20<sup>e</sup> siècle (Townsend, 1935), mais, à notre connaissance, aucune étude dédiée à ce sujet n'a été publiée récemment. Des déplacements de baleines équipées de balises ARGOS ont été étudiés dans le cadre du programme MIROMEN (<https://www.globice.org/espace-scientifique/programme-de-recherche/miromen/>) et semblent mettre en évidence l'attractivité des monts sous-marins de la région pour ces mammifères marins.

## Oiseaux de mer

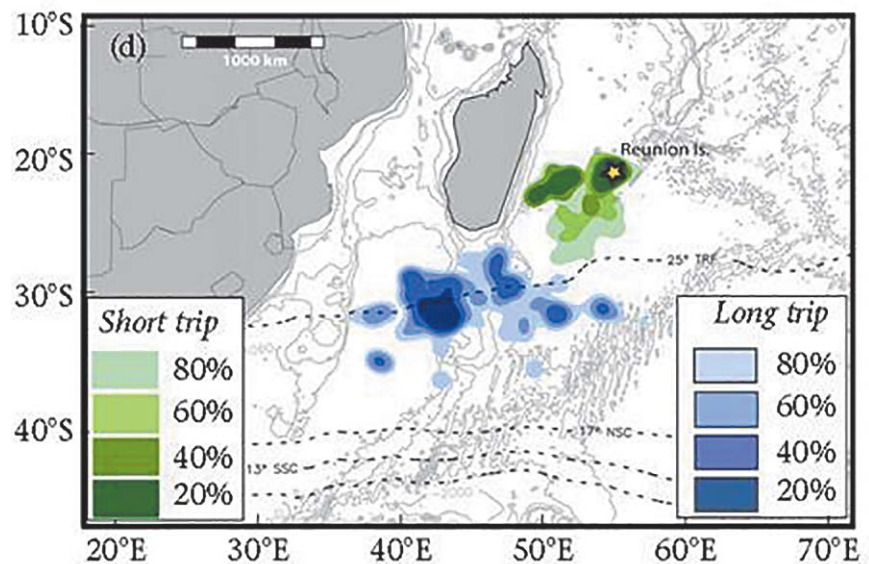
Les oiseaux de mer se trouvent à l'interface entre les domaines terrestres et marins. Ils dépendent étroitement des prédateurs supérieurs marins de surface pour se nourrir en haute mer (Hebshi et al., 2008). Des études ont démontré le lien étroit entre certaines espèces d'oiseaux de mer et les poissons pélagiques ou les mammifères marins tels que les dauphins (Jaquemet et al., 2004 ; Hebshi et al., 2008). Ces prédateurs se concentrent près de la surface où ils deviennent disponibles pour les oiseaux de mer. C'est en particulier le cas pour certains oiseaux de mer tropicaux (Au et Pitman 1996).

Il existe peu d'observations directes pour corroborer l'hypothèse de l'association entre les oiseaux de mer et les monts sous-marins (Thompson, 2007). À l'aide des données collectées entre 1996 et 2002 au large des côtes californiennes, Yen et al. (2004) ont démontré que la répartition d'une seule espèce (sur les quatre étudiées) était liée à l'emplacement des monts sous-marins. Dans le canal de Mozambique, Weimerskirch et al. (2005) ont constaté que les fous à pieds rouges suivis par GPS ne montraient aucune préférence pour les monts sous-marins avoisinants. Les auteurs ont remarqué que la productivité biologique liée à l'activité des tourbillons dans le canal du Mozambique pouvait expliquer ce manque de corrélation.

L'île de la Réunion est située dans le point chaud de biodiversité « Madagascar et îles de l'océan Indien occidental ». Deux oiseaux de mer endémiques de la Réunion, le pétrel de Barau (*Pterodroma barau*) et le pétrel de Bourbon (*Pseudobulweria aterrima*), sont des espèces en danger et nécessitent des mesures de conservation. La télémétrie a été employée pour le suivi du pétrel de Barau pendant l'hivernage (Pinet et al., 2011) et la période de reproduction (Pinet et al., 2012). En hiver, les adultes occupent une vaste région

studied, distribution was related to the location of seamounts. In the Mozambique Channel, GPS-tracked red-footed boobies showed no preference for the neighbouring seamounts (Weimerskirch et al., 2005). The authors noted that biological productivity related to the eddy activity in the Mozambique Channel could explain this lack of correlation.

The island of Reunion is located within the Madagascar and West Indian Ocean islands biodiversity hotspot. Two of the island's endemic seabirds – Barau's petrel (*Pterodroma baraui*) and Black Bourbon's petrel (*Pseudobulweria aterrima*) – are endangered species and need conservation measures. Telemetry has been used to track Barau's petrels when wintering (Pinet et al., 2011) and during the breeding season (Pinet et al., 2012). In winter, adults occupy a vast area of the central Indian Ocean, 5,000 km away from Reunion. During the breeding season, however, they forage in specific areas, between the east coast of Africa and south Madagascar (including the Madagascar Ridge), and between Reunion and the east coast of Madagascar. Isotopic ratios measured on feathers indicate that Black Bourbon's petrels feed at the Fort Dauphin upwelling (south Madagascar coast) and further south on the Madagascar Ridge (Jaquemmet, unpublished data). Other tropical (Le Corre et al., 2012) and subantarctic (Cherel et al., 2013) species (some of which are endangered) also concentrate at the Madagascar Ridge at some point in their yearly life cycle.



**Figure 7:** Density distribution of Barau's petrels during the breeding season: long trips (in blue) versus short trips (in green) of 10 birds (Pinet et al., 2012).

**Figure 7 :** Répartition de la densité des pétrels de Barau pendant la période de reproduction : longs trajets contre trajets courts de 10 oiseaux (Pinet et al., 2012)

de l'océan Indien central, 5 000 km au large de la Réunion. Au contraire, pendant la période de reproduction, ils recherchent de la nourriture dans des zones spécifiques, entre la côte Est de l'Afrique et le sud de Madagascar (y compris la ride de Madagascar) et entre la Réunion et la côte Est de Madagascar. Les rapports isotopiques mesurés sur les plumes indiquent que les pétrels de Bourbon se nourrissent dans le courant ascendant de Fort Dauphin (côte Sud de Madagascar) et plus loin, au sud sur la ride de Madagascar (Jaquemmet, données non publiées). D'autres espèces tropicales (Le Corre et al., 2012) et subantarctiques (Cherel et al., 2013) (dont certaines sont en danger) se concentrent également sur la ride de Madagascar à certaines périodes de leur cycle de vie annuel.

## 4. Special focus: South-West Indian Ocean

The Indian Ocean has a surface area of 74 by 106 square km and is characterised by a system of three active spreading mid-oceanic ridges (MOR): the Central Indian Ridge (CIR), the South-West Indian Ridge (SWIR) and the South-East Indian Ridge (SEIR) (Das et al., 2005).

### Geological and oceanographic characteristics of the SWIO

The South-West Indian Ocean region corresponds to the western Indian marine ecoregion which includes an island, Madagascar, and several islet archipelagos such as Comoros, Mascarenes and Seychelles, each with different origins and ages (Spalding et al., 2007). The continental land mass of Africa, the micro-continent Madagascar and the North Seychelles Bank are fragments of the supercontinent Gondwana, dating from pre-Cambrian times, more than 650 million years ago (mya) and which started to break up 180 mya (Peng & Mahoney, 1995).

The SWIR is a slowly spreading ridge system separating the African, Australian and Antarctic tectonic plates and has a unique geological structure. It extends from north-east to south-west in the west of the Indian Ocean basin, extending over 1,800 km and varies from 300 to 450 km in width (Romanov, 2003).

Compared with the East Pacific Rise and Mid-Atlantic Ridge, the region of the SWIO has been less studied. Recently, the SWIR's ultra-slow and oblique spreading characteristics have attracted increasing international attention (Dick et al., 2003) and revealed that, rather than being formed of volcanic rock, parts of the ridge comprise large areas where mantle has been extruded onto the seafloor (Rogers & Taylor, 2012). Oceanographically, the SWIR is influenced by several fronts with the combined effect of the retroflexion of the Agulhas Current (Lutjeharms, 2007) and the Subantarctic Front creating one of the most productive areas in the ocean (Read et al., 2000). It is also known that the SWIO area is characterised by substantial sea surface temperature (SST) variations (Annamalai & Murtugudde, 2004).

## 4. Région ciblée : le Sud-Ouest de l'océan Indien

L'océan Indien avec une superficie de 74 × 106 km<sup>2</sup> se caractérise par un système de trois rides médio-océaniques (mid-oceanic ridges ou MOR) d'accrétion active, la ride centrale indienne (Central Indian Ridge ou CIR), la ride Sud-Ouest indienne (Southwest Indian Ridge ou SWIR) et la ride Sud-Est indienne (Southeast Indian Ridge ou SEIR) (Das et al, 2005).

### Caractéristiques géologiques et océanographiques de la région du SWIO

La région du Sud-Ouest de l'océan Indien (South West Indian Ocean - SWIO) correspond à l'écorégion marine de l'océan Indien occidental qui inclut principalement une île, Madagascar, et plusieurs archipels comme les Comores, les Mascareignes et les Seychelles, chacun avec des origines et des âges différents (Spalding et al., 2007). La masse de terre continentale d'Afrique, le microcontinent Madagascar et le banc nord des Seychelles sont des fragments du supercontinent Gondwana, datant de l'époque précambrienne, il y a plus de 650 millions d'années et qui a commencé à se détacher il y a 180 millions d'années (Peng et Mahoney, 1995).

La ride Sud-Ouest indienne (SWIR) forme un système de rides océaniques lentes qui sépare les plaques tectoniques africaine, australienne et antarctique et présente une structure géologique unique ; elle s'étend du nord-est au sud-ouest à l'ouest du bassin de l'océan Indien, sur plus de 1 800 km et varie de 300 à 450 km en largeur (Romanov, 2003).

Par rapport à la ride Est-Pacifique et à la ride médio-atlantique, la région du Sud-Ouest de l'océan Indien a fait l'objet de moins d'études. Récemment, une attention croissante a été accordée sur le plan international aux caractéristiques d'accrétion ultra-lente et oblique de la SWIR (Dick et al., 2003). Celle-ci a révélé qu'au lieu d'être formées de roche volcanique, certaines portions comprennent de larges zones où le manteau a été extrudé sur le plancher océanique (Rogers et Taylor, 2012). Sur le plan océanographique, la ride SWIR est influencée par plusieurs fronts avec l'effet combiné de la rétroflexion du courant des Aiguilles

## Biology of seamounts and hydrothermal vents in the SWIO

### Resources associated with seamount ecosystems

The SWIO region hosts an extraordinary proportion of endemic species and is highly threatened by human activities, hence its classification as a marine biodiversity hotspot (Roberts et al., 2002; Bellard et al., 2013; Gopal et al., 2006). Seamounts in the SWIO have been exploited for nearly 40 years. The Soviet fleet, and associated research institutions, began exploratory fishing in the SWIR, the Mozambique Ridge and the Madagascar Ridge in the 1970s with commercial trawling beginning in the early 1980s (Romanov, 2003; Clark et al., 2007). As previously described by Rogers and collaborators (2009), fisheries activities in the SWIO targeted redbait (*Emmelichthys nitidus*) and rubyfish (*Plagiogeneion rubiginosus*) with catches peaking in about 1980 and then decreasing to the mid-1980s (Clark et al., 2007). Afterwards, fishing switched to alfoncino (*Beryx splendens*) in the 1990s as new seamounts were exploited. Some exploratory trawling was also carried out on the Madagascar Ridge and the SWIR by French vessels in the 1970s and 1980s, particularly targeting the Walters Shoal and Sapmer Bank (Collette & Paring, 1991). In the late 1990s, a new fishery developed on SWIR with trawlers targeting deep-water species such as orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*), black cardinal fish (*Epigonus telescopus*), southern boarfish (*Pseudopentaceros richardsoni*), oreo (*Oreosomatidae*) and alfoncino (Clark et al., 2007). It is known that the reproduction rate for these species is generally low and they form breeding aggregations on seamounts, making them particularly susceptible to overexploitation (Koslow et al., 2000). In particular, the orange roughy is described as having a low resilience and high vulnerability to fishing (Branch, 2001). In the late 1980s, an estimated annual catch of more than 10,000 tonnes led to the subsequent rapid collapse of the population.

The Walters Shoal has been targeted by deep-sea lobster fishing (*Palinurus barbarae* and *Palinurus delagoa*) (Rogers & Gianni, 2010). The potential productivity of green prawns (*Palinurus delagoa*) in this area was estimated at 1,000 tonnes per year (Andrianavoa et al., 1992; Gopal et al., 2006). Exploitation of these stocks, as well as new targets such as the spiny lobster (*Palinurus barbarae*) recently discovered on the Walters Shoal (Groeneveld et al., 2006), continues (Bensch et al., 2008). In 2006, some players in the fishing industry (bottom trawlers) voluntarily closed a

(Lutjeharms, 2007) et du front subantarctique, créant l'une des zones les plus productives de l'Océan (Read et al., 2000). De surcroît, on sait que la région du SWIO se caractérise par des variations considérables de la température de surface de la mer (SST) (Annamalai et Murtugudde, 2004)

## Biologie des monts sous-marins et des sources hydrothermales dans la région du SWIO

### Ressources associées aux écosystèmes de monts sous-marins

Cette région particulière (SWIO) abrite une proportion extraordinaire d'espèces endémiques, d'où sa classification comme point chaud de la biodiversité marine (Roberts et al., 2002 ; Bellard et al., 2013). Les monts sous-marins du SWIO sont exploités depuis près de quarante ans. La flotte soviétique et les instituts de recherche associés ont commencé à pratiquer la pêche expérimentale sur la ride Sud-Ouest indienne (SWIR), la ride du Mozambique et la ride de Madagascar dans les années 1970, la pêche commerciale au chalut de fond débutant, quant à elle, au début des années 1980 (Romanov, 2003 ; Clark et al., 2007).

Comme Rogers et ses collaborateurs l'ont décrit précédemment (2009), les activités de pêche dans le SWIO ont ciblé l'andorre du Cap (*Emmelichthys nitidus*) et le *Plagiogeneion rubiginosus*, dont les prises ont culminé vers 1980 pour décroître au milieu des années 1980 (Clark et al., 2007). Par la suite, la pêche est passée au beryx allongé (*Beryx splendens*) dans les années 1990 avec l'exploitation de nouveaux monts sous-marins. Dans les années 1970 et 1980, des navires français ont également mené de la pêche expérimentale au chalut de fond sur la ride de Madagascar et la ride Sud-Ouest indienne (SWIR), ciblant en particulier le banc Walters et le banc Sapmer (Collette et Paring, 1991). À la fin des années 1990, une nouvelle activité de pêche s'est développée sur la ride SWIR. Des palangriers ciblaient les espèces pélagiques comme l'hoplostète orange (*Hoplostethus atlanticus*), le poisson cardinal (*Epigonus telescopus*), la tête casquée pélagique (*Pseudopentaceros richardsoni*), l'oreo (*Oreosomatidae*) et le beryx allongé (Clark et al., 2007). On sait que le taux de reproduction des espèces mentionnées est généralement faible et qu'elles forment des agrégations de reproduction sur les monts sous-marins, ce qui les rend particulièrement exposées à la surexploitation (Koslow et al., 2000).

small portion of the bank for conservation purposes (Coyle et al., 2007).

### Resources associated with hydrothermal vent ecosystems

Indirect evidence of vent plumes was first identified along the SWIR in 1997 (German et al., 1998) but the first vent was only discovered using an autonomous underwater vehicle in 2007 (Tao et al., 2007). Two distinct sites have recently been discovered in the SWIR (Rogers et al., 2012; Tao et al., 2012).

Tao et al. (2012) discovered for the first time an active venting on the SWIR, providing strong support for the hypothesis that high-temperature hydrothermal circulation is widespread along all ultra-slow spreading ridges (German et al., 1998; Baker et al., 2004). In fact, four hydrothermal sites and two hydrothermal anomalies are found in the section of the SWIR between 49°E and 52°E (Tao et al., 2012). During an expedition in 2007, ABE (Autonomous Benthic Explorer) identified several organisms, including mussels, scaly footed gastropods, stalked barnacles and sea anemones. The scaly footed gastropod is so far known only from vents on the CIR (Hashimoto et al., 2001; Van Dover et al., 2001). Moreover, the apparent absence of shrimp, which dominate vents investigated on the Mid-Atlantic Ridge and the CIR, would suggest that the full suite of biomass-dominant taxa have not yet been seen at this site. The presence of the large gastropod species (*Alviniconcha* spp., *Ifremeria* spp.), commonly observed in vents of back-arc basins of the south-west Pacific Ocean and characteristic of CIR hydrothermal vent communities (Desbruyeres et al., 2006), was also not recorded.

Surprisingly, this observation would suggest that the special vent fauna found in the SWIO appear to indicate some complex affinity to those on the CIR, southern Mid-Atlantic Ridge and the south-west Pacific Ocean (Rogers et al., 2012; Tao et al., 2012).

### The Madagascar Ridge and the Walters Shoal

The Madagascar Ridge consists of a massive elevation of the seafloor, extending between the micro-continent of Madagascar and the SWIR for a distance of almost 1,130 km. The ridge crest is wide and has depths ranging from 1,000 to 2,500 m (at the positions of seamounts up to 567 m). The minimum depth falls on the Walters Shoal to less than 20 m.

En particulier, l'hoplostète orange est décrit comme ayant une faible résilience et une haute vulnérabilité à la pêche (Branch, 2001). À la fin des années 1980, la prise annuelle était estimée à plus de 10 000 tonnes ce qui a amené la population à rapidement chuter.

Le banc Walters a été ciblé pour la pêche au homard en eau profonde (*Palinurus barbarae* et *Palinurus delagoa*) (Rogers et Gianni, 2010). La productivité potentielle des langoustes du Natal (*Palinurus delagoa*) dans cette zone était estimée à 1 000 tonnes/an (Andrianaivojaona et al., 1992). De surcroît, l'exploitation de ces stocks et de nouvelles cibles, comme la langouste rouge (*Palinurus barbarae*) récemment découverte (Groeneveld et al., 2006) sur le banc Walters, se poursuit (Bensch et al., 2008). En 2006, certains acteurs de l'industrie de la pêche (chalut de fond) ont fermé volontairement une petite portion du banc à des fins de conservation (Coyle et al., 2007).

### Ressources associées aux écosystèmes de sources hydrothermales

On a recensé pour la première fois des panaches hydrothermaux (preuves indirectes) le long de la ride Sud-Ouest indienne (SWIR) en 1997 (German et al., 1998), mais la première source n'a été découverte qu'au moyen d'un véhicule sous-marin autonome en 2007 (Tao et al., 2007). Deux sites distincts ont été découverts récemment dans la SWIR (Rogers et al., 2012 ; Tao et al. 2012).

Tao et al. (2012) ont découvert pour la première fois une source active sur la ride SWIR, ce qui corrobore fortement l'hypothèse selon laquelle une circulation hydrothermale à haute température est répandue le long de toutes les rides océaniques ultralentes (German et al., 1998 ; Baker et al., 2004). En effet, on a repéré quatre sites hydrothermaux et deux anomalies hydrothermales dans la section de la SWIR située entre 49°E et 52°E (Tao et al., 2012). Au cours d'une expédition en 2007, l'ABE (Autonomous Benthic Explorer) a recensé plusieurs organismes, notamment des moules, des *Chrysomallon squamiferum*, des pédonculés et des anémones de mer. Le *Chrysomallon squamiferum* n'est pour le moment connu que dans les sources hydrothermales sur la ride centrale indienne (CIR) (Hashimoto et al., 2001 ; Van Dover et al., 2001). En outre, l'absence apparente de crevettes, qui dominent les sources étudiées sur la ride médio-atlantique (MOR) et la ride centrale indienne (CIR), laisserait penser que la suite complète des taxons dominant la biomasse présente sur ce site n'a pas été observée. La présence d'espèces de gros gastropodes (*Alviniconcha* spp., *Ifremeria* spp.), communément

The shoal was discovered in 1963 by the South African Hydrographic Frigate *SAS Natal* and named after its captain.

To date, more studies have been undertaken on the Walters Shoal than other seamounts, probably because it is closer to land than other areas and because of commercial fisheries interests in the region. The shoal was sampled during the 1964 Indian Ocean expedition by the research vessel *Anton Bruun* and subsequently by the *Vityaz* (Rogers, 2012). This report refers to Rogers (2012) and Rogers and Taylor (2012) for a complete list of Walters Shoal endemic species. Additionally, the research article published by Vereshchaka (1995) lists a large number of taxa as occurring on the Walters Shoal and summarised several investigations on the macroplankton occurring on slopes and seamounts in the Indian Ocean.

Walters Shoal is a group of seamounts located near the southern end of the Madagascar Ridge and consists of a large number of knolls, seamounts and ridges. It is distinctive because the shallow areas of the seamount reach 18 m below the surface and it is characterised by high biodiversity.

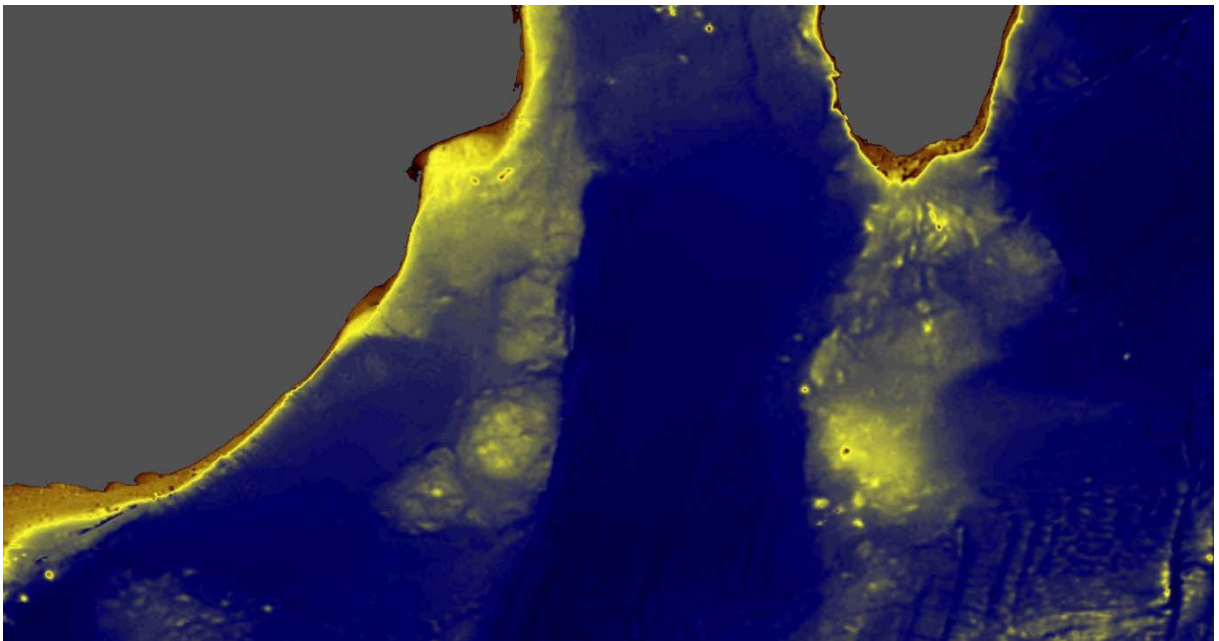
As previously mentioned, seamounts, underwater mountains of volcanic and tectonic origin, are considered hotspots of biodiversity (Postaire et al., 2014) and

observées dans les sources des bassins arrière-arc de l'océan Pacifique du Sud-Ouest, et caractérisant les communautés hydrothermales de la CIR pour ce qui est d'*Alviniconcha* spp. (Desbruyeres et al., 2006), n'a pas été constatée.

Étonnamment, cette observation porterait à croire que la faune spécifique de la source hydrothermale trouvée dans la région du SWIO indique une affinité complexe à celle de la ride centrale indienne (CIR), de la ride médio-atlantique Sud et du Sud-Ouest de l'océan Pacifique (Rogers et al., 2012 ; Tao et al., 2012).

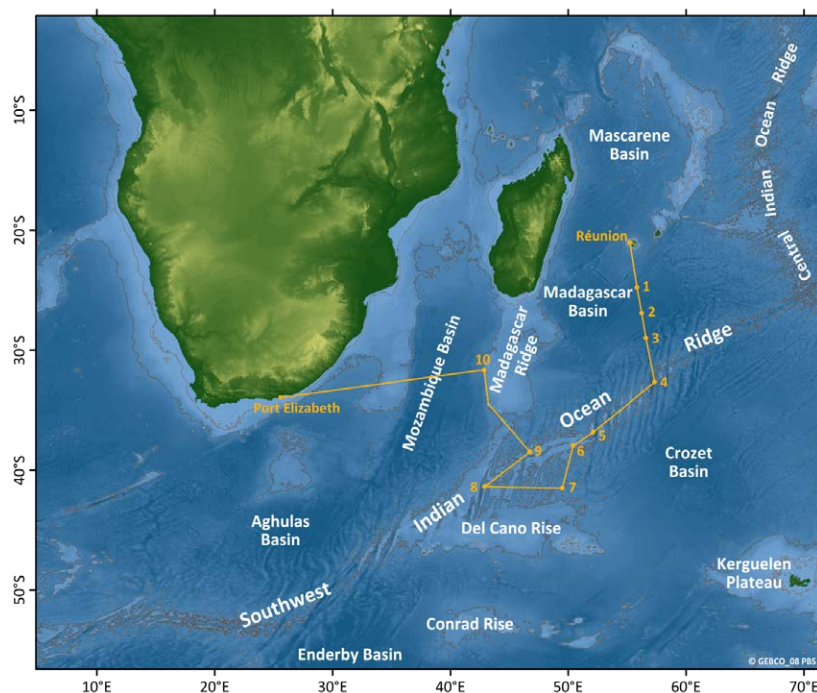
## La ride de Madagascar et le banc Walters

La ride de Madagascar comprend une élévation massive du fond, qui s'étend entre le microcontinent de l'île de Madagascar et la SWIR pour une distance de près de 700 miles. La crête de la ride océanique est large et affiche des profondeurs de 1 000 à 2 500 m (jusqu'à 567 m aux emplacements des monts sous-marins). La profondeur minimale se situe sur le banc Walters (moins de 20 m). Le banc a été découvert en 1963 par la frégate hydrographique sud-africaine *SAS Natal*, et porte le nom de son commandant.



**Figure 8:** The Walters Shoal is located on the Madagascar Ridge, 450 nautical miles (nm) south of Madagascar and 700nm east of South Africa, *Bathymetry in m*. © IRD Sète, Hervé Demarcq. ETOPO1 (one min of arc MOA resolution). Log scale for depth.

**Figure 8 :** Le banc Walters est situé sur la ride de Madagascar, 450 nm au sud de Madagascar et à 700 nm à l'est de l'Afrique du Sud, *Bathymetry in m*. © IRD Sète, Hervé Demarcq. ETOPO1 (résolution d'une minute d'arc). Échelle logarithmique pour la profondeur.



**Figure 9:** South-West Indian Ocean Seamounts Cruise; cruise route and stations: 1. CTD station. 2. Off Ridge Station. 3. CTD Station. 4. Atlantis Bank. 5. Sapmer Bank. 6. Middle of What Seamount. 7. Off-Ridge cold-water station. 8. Coral Seamount. 9. Melville Bank. 10. Un-named Seamount Walters Shoal. (Source: Cruise report *Dr. Fridtjof Nansen*, Southern Indian Ocean Seamounts, 12 November–19 December 2009.)

**Figure 9 :** Campagne sur les monts sous-marins du Sud-Ouest de l’océan Indien ; itinéraire et stations de la campagne : 1. Station CTD. 2. Station au large de la ride océanique. 3. Station CTD. 4. Atlantis Bank. 5. Banc Sapmer. 6. Mont sous-marin Middle of What. 7. Station en eau froide au large de la ride océanique. 8. Mont sous-marin Corail. 9. Banc de Melville. 10. Mont sous-marin sans dénomination, banc Walters. (Source: Rapport de campagne *Dr. Fridtjof Nansen* – Southern Indian Ocean Seamounts. 12 novembre-19 décembre 2009).

attract a range of oceanic predators, including seabirds, whales and sharks. They also attract deep-water fisheries, as they host many species of commercial interest, most of which are very vulnerable to over-exploitation. In 2009 (Figure 9) and 2011 (Figure 10), IUCN and its partners organised scientific surveys to improve knowledge of seamounts across the SWIR.

In the first expedition, the Norwegian research vessel *Dr. Fridtjof Nansen* left on 12 November 2009 from Reunion island and travelled more than 9,600 km in 40 days to study five seamounts on the SWIR and Walters Shoal.

During the expedition, nearly 7,000 specimens were collected and labelled, from fish two metres long to tiny crustacean larvae. They include a remarkable variety of fish, shrimps, squids and gelatinous marine creatures. Many more microscopic species of

Par le passé, davantage d’études ont été consacrées au banc Walters qu’à d’autres monts sous-marins, probablement en raison de la proximité de la région avec la terre et de l’intérêt pour la pêche commerciale dans la région. Le banc a fait l’objet d’un échantillonnage lors de l’expédition dans l’océan Indien menée en 1964 par le *R/V Anton Bruun* et par la suite par le *Vityaz* (Rogers, 2012). Le présent rapport renvoie à Rogers (2012) et Rogers et Taylor (2012) pour une liste complète des espèces endémiques du banc Walters. Par ailleurs, l’article scientifique publié par Vereshchaka (1995) répertorie un grand nombre de taxons présents sur le banc Walters et résumait plusieurs études consacrées au macroplancton présent sur les pentes et les monts sous-marins de l’océan Indien.

Le banc Walters désigne un groupe de monts sous-marins situés à proximité de l’extrémité sud de la ride de Madagascar. Ce banc compte un grand nombre de dômes, de monts sous-marins et de rides océaniques, et se distingue

par des zones peu profondes qui atteignent 18 m sous la surface ainsi que par sa forte biodiversité.

Comme il a été mentionné précédemment, les monts sous-marins, des montagnes sous-marines d’origine volcanique et tectonique, sont considérés comme des points chauds de la biodiversité (Postaire et al., 2014) et attirent toutes sortes de prédateurs océaniques, dont des oiseaux de mer, des baleines et des requins. Ils attirent également la pêche en eau profonde, car ils abritent de nombreuses espèces présentant un intérêt commercial, la plupart très vulnérables à la surexploitation. En 2009 (Figure 9) et 2011 (Figure 10), l’UICN et ses partenaires ont organisé des campagnes scientifiques en mer afin de mieux connaître les monts sous-marins de la ride Sud-Ouest indienne (SWIR).

phytoplankton and zooplankton, representing the base of the food chain in the ocean, were also collected. The two seabird and marine mammal observers recorded thousands of seabirds from as many as 36 species and 26 marine mammals.

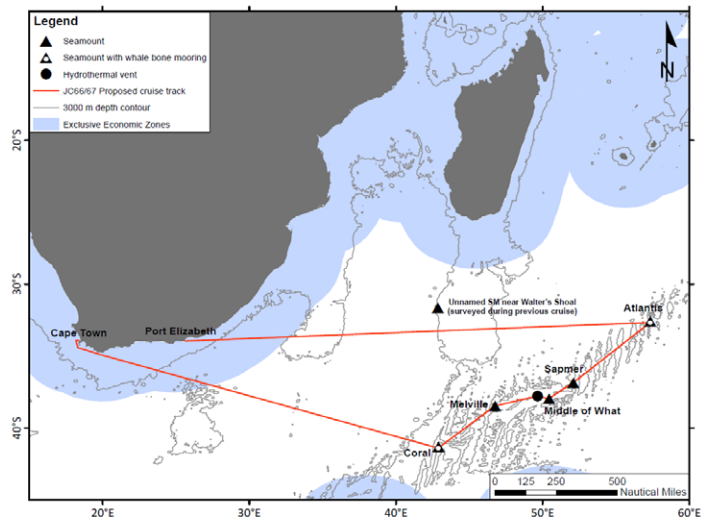
The results of this and other scientific expeditions have not only a scientific interest, but are helping to improve conservation and management of Indian Ocean marine resources (Rogers & Taylor, 2012).

## Remote sensing monitoring of environmental patterns in the SWIO

This section presents some features of the physical and biogeochemical environment in the South-West Indian Ocean derived from the analysis of satellite data on sea surface properties: temperature (SST), colour (SSC; a proxy for sea-surface chlorophyll), sea-level anomaly (SLA) and the derived Eddy Kinetic Energy (EKE) used to characterise the geostrophic circulation and wind at sea surface. A compilation of the available data at different spatial and temporal scales and from different platforms, as well as the definition of new indicators pertinent for this area, has been assembled for a Master's thesis at IRD (Institut de Recherche pour le Développement, France) as part of the FFEM-SWIO programme (Ravokatra, 2014). The study area extended between 25°S-25°S and 40°W-50°W.

Seamounts are considered productive areas for fishing resources (Hubbs, 1959; Genin et al., 1988; Fonteneau, 1991; Clark, 1999; Clark et al., 2006; Rogers, 2012) but little data are available to understand the mechanisms supporting this biological productivity. According to the Intergovernmental Oceanographic Commission, 'seamounts' represent any topographic structure higher than 1,000 m above the seafloor and whose shape is conical. Pitcher et al. (2008) assessed the presence of 1,070 seamounts in the SWIO, 656 of which are found in areas under national jurisdiction.

The principal bathymetric features in the West Indian Ocean are shown in Figure 11, together with the 200 nautical mile (nm) exclusive economic zone (EEZ) boundaries as well as the 350 nm limit considered for EEZ extension. Of particular interest in the SWIO is the Madagascar Ridge, south of Madagascar island, including several seamounts including the Walters Shoal whose summit (located at 32°30'S / 44°E)



**Figure 10:** Map of 2011 cruise on board RSS *James Cook*, 2011. Expeditions JC066 and JC067. © NERC/IUCN.

**Figure 10 :** Carte de la campagne 2011 à bord du RSS *James Cook* 2011. Expéditions JC066 et JC067. © NERC/IUCN.

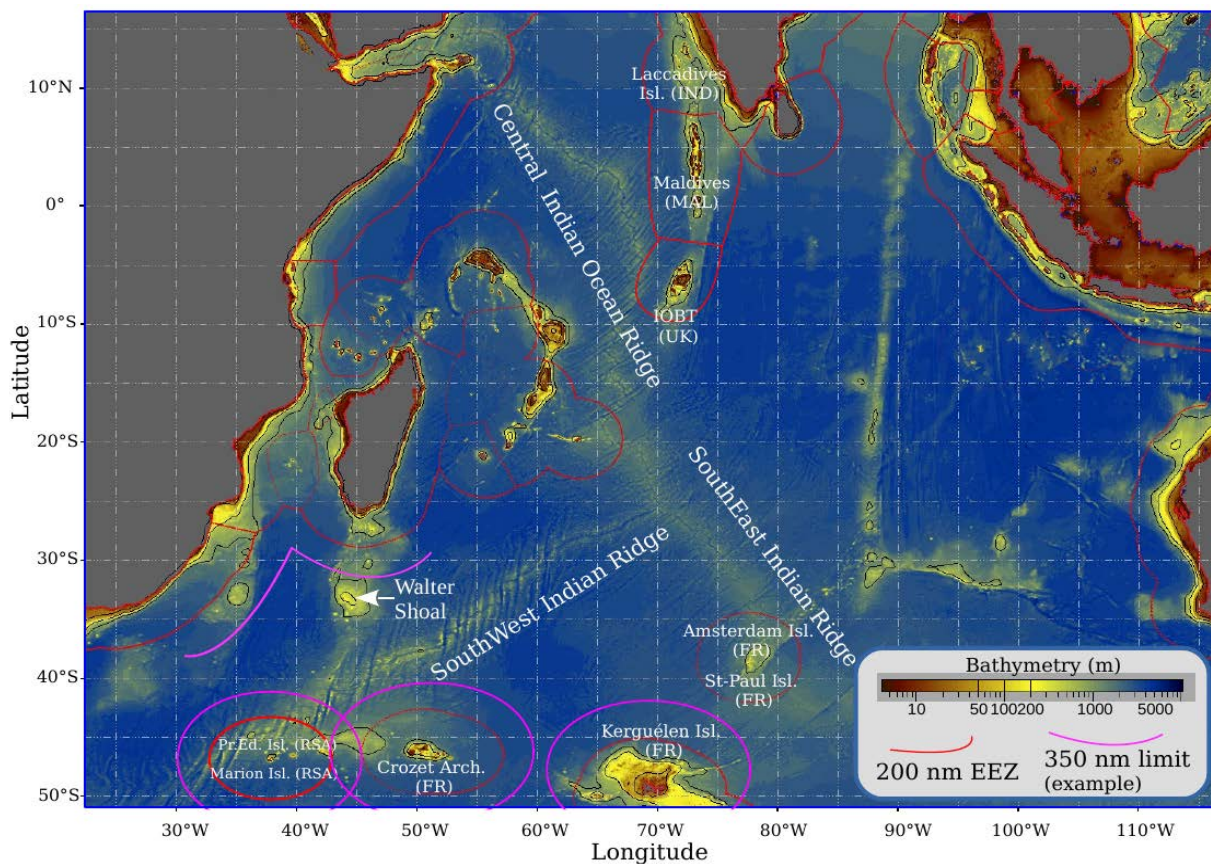
Lors de la première expédition, le navire de recherche norvégien Dr. *Fridtjof Nansen* a levé l'ancre le 12 novembre 2009 à l'île de la Réunion et a parcouru 9600 km en 40 jours pour étudier cinq monts sous-marins sur la ride Sud-Ouest indienne (SWIR) et le banc Walters.

Pendant l'expédition, près de 7 000 spécimens ont été collectés et étiquetés, allant de poissons de deux mètres de long à de minuscules larves de crustacés. Parmi eux figurent des poissons, crevettes, calmars et créatures marines gélatineuses d'une remarquable diversité. Bien d'autres espèces microscopiques de phytoplankton et de zooplankton, représentant la base de la chaîne alimentaire dans l'océan, ont également été collectées. Les deux observateurs d'oiseaux de mer et de mammifères marins ont observé des milliers d'oiseaux de mer et recensé pas moins de 36 espèces d'oiseaux et 26 mammifères marins.

Les résultats de cette expédition et d'autres expéditions scientifiques non seulement présentent un intérêt scientifique, mais contribuent à améliorer la conservation et la gestion des ressources marines de l'océan Indien (Rogers et Taylor, 2012).

## La surveillance continue des modèles environnementaux par télédétection dans la région du SWIO

Cette section présente certaines des caractéristiques de l'environnement physique et biogéochimique du Sud-Ouest de l'océan Indien (South-West Indian Ocean ou SWIO) dérivées de l'analyse des données



**Figure 11:** Bathymetry and exclusive economic zone boundaries in the West Indian Ocean.

Source: ETOPO1 bathymetry, from H. Demarcq IRD (UMR MARBEC, 2014), in Galletti and Leroy (2015).

**Figure 11 :** Bathymétrie et frontières de la zone économique exclusive de l'océan Indien occidental.

Source : ETOPO1 bathymetry, from H. Demarcq IRD (UMR MARBEC, 2014), in Galletti and Leroy (2015).

culminates at 18 m below sea surface. Walters Shoal is a remarkably high and isolated bathymetric structure and lies outside actual (and potentially extended) EEZ. Both these characteristics are important as regards the physical and biogeochemical processes occurring at seamounts (Clark et al., 2006), in terms of biological connectivity and biodiversity.

The Madagascar Ridge seamount was harvested by Ukrainian research cruises from the end of the 1970s to the end of the 1990s (Romanov, 2003), but very little data were digitalised. In the 2000s, longliners from Reunion island developed tuna fisheries south of Madagascar. Longline fishing efforts increased in the SWIO during the following years (Figure 12).

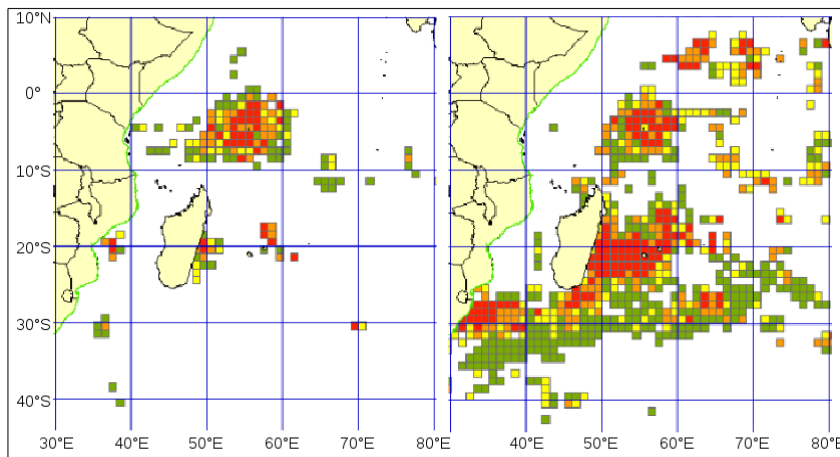
## Main hydrographic features

The investigated region presents different oceanographic characteristics (Figure 13):

- To the west: the Mozambique Channel, where mesoscale eddies (both cyclones and

satellites sur les propriétés de la surface de la mer : la température (Sea Surface Temperature ou SST), la couleur (Sea Surface Colour ou SSC, approximée par la mesure de la chlorophylle de surface de la mer), l'anomalie de hauteur de mer (Sea Level Anomaly ou SLA) et l'énergie cinétique turbulente (Eddy Kinetic Energy ou EKE) dérivée employée pour caractériser la circulation géostrophique et le vent à la surface de la mer. Une thèse de Master à l'Institut de Recherche pour le Développement dans le cadre du programme FFEM-SWIO ont permis d'obtenir une compilation des données disponibles à différentes échelles spatiales et temporelles provenant de différentes plateformes, ainsi que la définition de nouveaux indicateurs pertinents pour cette région (Ravokatra, 2014). La zone d'étude s'étendait entre 25° S-25°S et 40° O-50°O.

Les monts sous-marins sont considérés comme des zones productives pour les ressources halieutiques (Hubbs, 1959 ; Genin et al., 1988 ; Fonteneau, 1991 ; Clark, 1999 ; Clark et al., 2006 ; Rogers, 2012), mais l'on dispose de peu de données pour comprendre les mécanismes contribuant à cette productivité biologique. Selon la Commission océanographique inter-gouvernementale, les « monts sous-marins » désignent



**Figure 12:** Total catches by longline fishery in the SWIO, 1991–2000 (left) and 2001–2010 (<http://www.iotc.org>).

**Figure 12 :** total des prises par la pêche à la palangre dans le SWIO de 1991 à 2000 (à gauche) et 2001 à 2010 (<http://www.iotc.org>).

anticyclones) form and migrate continuously (mostly southward along the Mozambican coast, but also northward along the Madagascar coast).

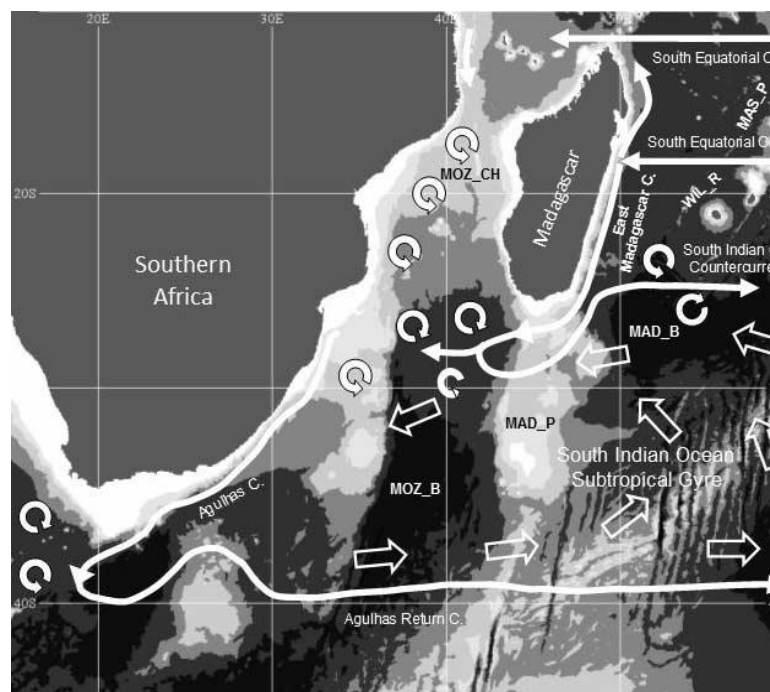
- East of Madagascar: large-scale mechanisms (such as the El Niño Southern Oscillation) are prominent. Locally, heavy rainfall (tropical cyclones) increases coastal erosion and loads the East Madagascar Current (EMC) with nutrients, contributing to the phytoplankton bloom that occurs in January–March each year with variable intensity (Raj et al., 2010; Srokosz & Quartly, 2013).
- South of Madagascar, the shallow (about 1,000 m) Madagascar Ridge lies between the deep (around 5,000 m) Madagascar and Mozambique basins, and comprises several seamounts between the south Madagascar continental shelf and the shallow Walters Shoal (peaks at 18 m below sea surface).
- To the south, the region is bounded by large-scale features, namely the eastward undulating Agulhas Current Retroflexion (at about 40°S), the Sub-Tropical Front (around 43°S) and the Polar Front (about 50°S).

Main oceanic currents in this area are the EMC which moves southward along the east coast of Madagascar and its (partial) retroflexion just south of Madagascar to feed the South Indian Counter Current (Siedler et al., 2009) and the Agulhas Current along the east coast of southern Africa, a

que la limite à 350 NM envisagée pour l'extension de la zone économique exclusive. La ride de Madagascar, au sud de l'île de Madagascar, présente un intérêt particulier dans le SWIO. Il s'agit de plusieurs monts sous-marins, notamment le banc Walters, dont le sommet (situé à 32°30'S / 44°E) culmine à 18 m sous la surface de la mer. Structure isolée et remarquablement élevée, le banc Walters se trouve en dehors de la zone économique exclusive actuelle (et potentiellement étendue). Ces deux caractéristiques revêtent de l'importance

n'importe quelle structure topographique de plus de 1 000 m (minimum) au-dessus du plancher océanique, dont la forme est conique. Pitcher et al. (2008) ont évalué la présence de 1 070 monts sous-marins dans le Sud-Ouest de l'océan Indien, dont 656 se trouvent dans des zones relevant des juridictions nationales.

Les principales caractéristiques bathymétriques de l'océan Indien occidental sont présentées sur la Figure 11 avec les frontières de la zone économique exclusive à 200 milles nautiques (NM) ainsi



**Figure 13:** Schematic of the surface circulation in the South-West Indian Ocean (Siedler et al., 2009).

**Figure 13 :** Schéma de la circulation océanique de surface dans le sud-ouest de l'océan Indien (Siedler et al., 2009).

**Table 1:** Satellite environmental data used for South-West Indian Ocean study (Ravokatra, 2014).

| Parameter                     | Product                  | Spatial resolution | Time resolution |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|
| Bathymetry                    | SRTM30-Smith et Sandwell | 1'                 |                 |
| Sea Level Anomaly (SLA)       | SLA-Aviso/CNES           | 1/3°               | 1 week          |
| Eddy Kinetic Energy (EKE)     | EKE-Aviso/CNES           | 1/3°               | 1 week          |
| Sea Surface Temperature (SST) | MODIS-OBPG               | 4 km               | 1 week          |
| Sea Surface Colour (SSC)      | MODIS-OBPG               | 4 km               | 1 day, 1 week   |
| Wind (speed and direction)    | CCMP-PODAAC              | 1/4°               | 1 month         |

**Tableau 1 :** Données environnementales satellitaires pour l'étude du Sud-Ouest de l'océan Indien (Ravokatra, 2014).

| Paramètre                                | Produit                  | Résolution spatiale | Résolution temporelle |
|------------------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| Bathymétrie                              | SRTM30-Smith et Sandwell | 1'                  |                       |
| Anomalie de hauteur de mer (SLA)         | SLA-Aviso/CNES           | 1/3°                | 1 semaine             |
| Énergie cinétique turbulente (EKE)       | EKE-Aviso/CNES           | 1/3°                | 1 semaine             |
| Température à la surface de la mer (SST) | MODIS-OBPG               | 4 km                | 1 semaine             |
| Couleur à la surface de la mer (SSC)     | MODIS-OBPG               | 4 km                | 1 jour, 1 semaine     |
| Vent (vent et direction)                 | CCMP-PODAAC              | 1/4°                | 1 mois                |

major component of the world's ocean circulation for its role in water mass exchanges between the Indian and Atlantic Oceans and its retroflexion to the east, at about 40°S. Figure 13 also shows the dominance of the mesoscale eddies in the Mozambique Channel.

Table 1 shows the satellite environmental data used for this study.

Regionally speaking, environmental conditions vary from subtropical in the north of the area to temperate in the south. This is visible in the seasonal variability in wind, SST and SSC distribution shown in Figure 14 (monthly mean distribution calculated from 10-year time series of daily or weekly products, except for wind: 20 years of monthly means) for the months of February (austral summer) and August (austral winter).

The seasonality in environmental conditions is moderate, typical for a transition area (from tropical to temperate). Primary productivity at the surface (proxy SSC) is moderate overall within the area of interest, with the seasonality characteristics of a temperate regime. Taxonomy of phytoplankton is roughly assessed from satellite data (Alvain et al., 2008), as well as its functional role in the ecology of the area studied. Field studies are necessary to investigate the details of the ecological role of phytoplankton. From the data available, however, it can be considered that the SWIO experiences a high diversity of ecosystems with elevated SST in the north and east (leading to a global dominance of cyanobacteria at the surface) contrasting with subpolar communities (diatoms and flagellates) in the south.

The Walters Shoal area is very specific in terms of ocean dynamics. Indeed, it is bounded to the north by an eddy corridor just south of Madagascar and to

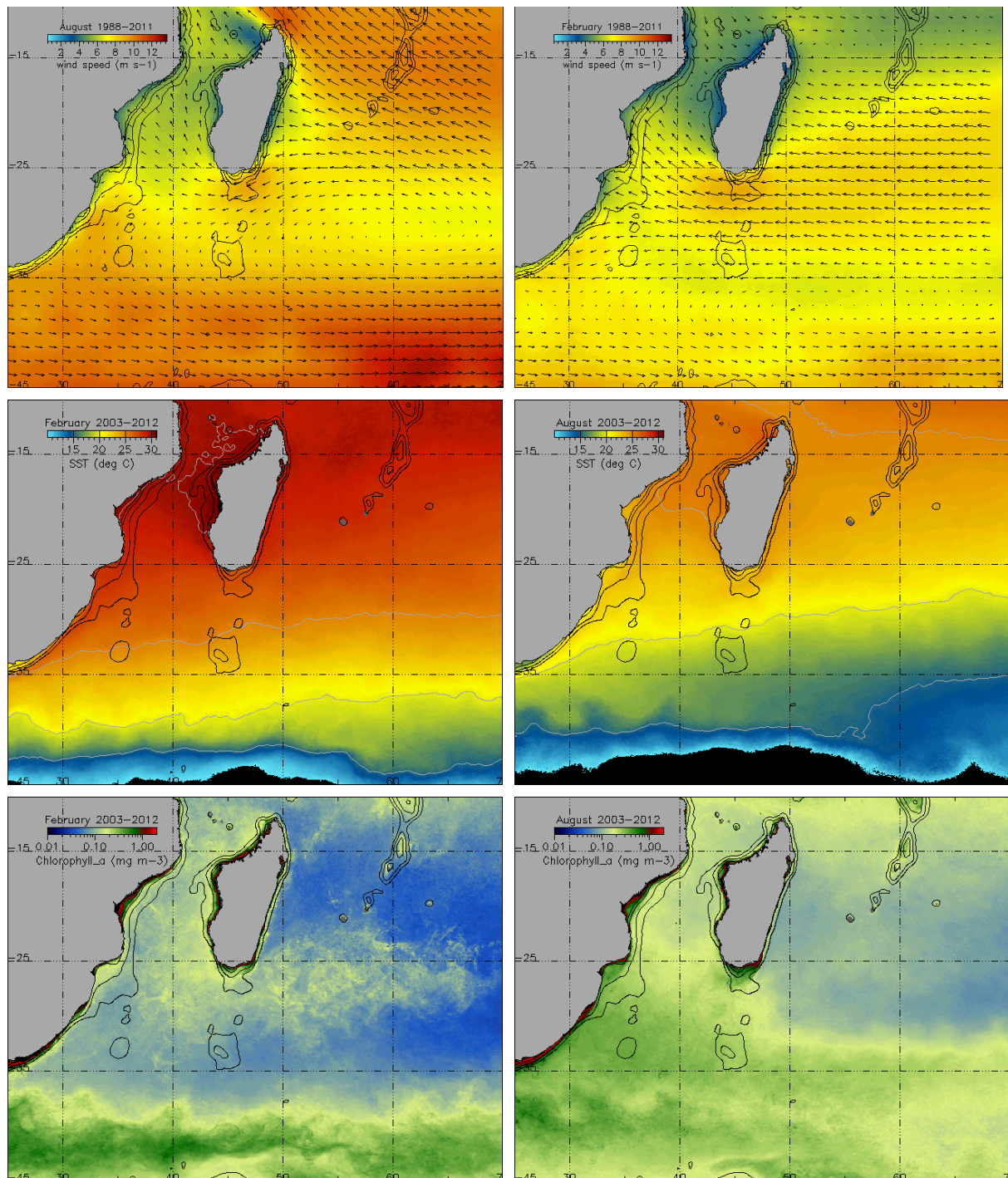
pour les processus physiques et biogéochimiques survenant dans les monts sous-marins (Clark et al., 2006), en termes de connectivité biologique et de biodiversité.

De la fin des années 1973 à la fin des années 1990, des campagnes de recherche ukrainiennes ont fait la récolte du mont sous-marin dans la ride de Madagascar (Romanov, 2003), mais très peu de données ont été numérisées. Dans les années 2000, des palangriers de l'île de la Réunion ont développé la pêche aux thonidés au sud de Madagascar. Les années qui ont suivi, les efforts ont redoublé pour la pêche à la palangre dans la région du SWIO (Figure 12).

## Les principales caractéristiques hydrographiques

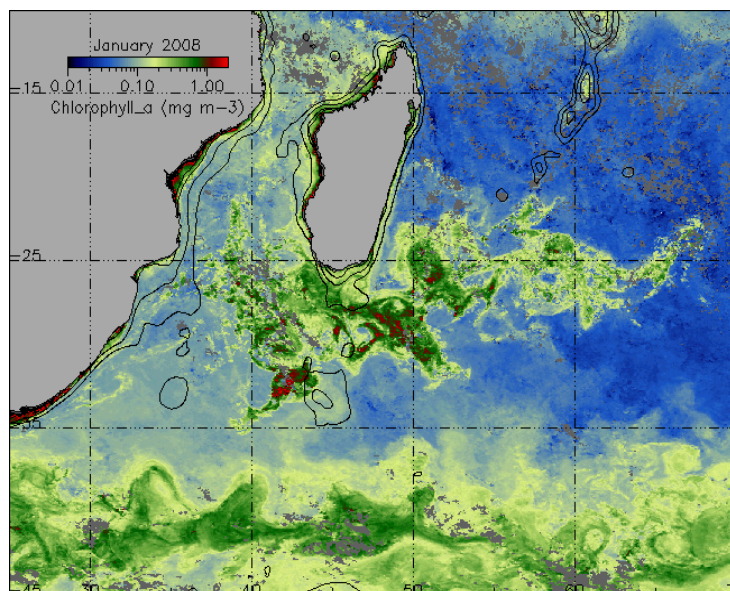
La région étudiée présente différentes caractéristiques océanographiques (Figure 13) :

- À l'ouest : le canal du Mozambique où des tourbillons de mésoéchelle (des cyclones comme des anticyclones) se forment et migrent continuellement (la plupart du temps vers le sud, le long de la côte mozambicaine, mais également vers le nord, le long de la côte malgache)
- À l'est de Madagascar : des mécanismes à grande échelle (comme El Niño Southern Oscillation) sont proéminents. Localement, de fortes précipitations (cyclones tropicaux) intensifient l'érosion côtière et chargent le courant Est malgache en nutriments, ce qui contribue au bloom phytoplanctonique de janvier à mars tous les ans avec une intensité variable (Raj et al, 2010 ; Srokosz et Quartly, 2013).
- Au sud de Madagascar, les hauts fonds de la ride de Madagascar (~1000 m) sont situés entre les



**Figure 14:** Monthly mean distribution of wind speed (m s<sup>-1</sup>) from CCMP data (top); sea surface temperature (°C) (middle); and sea surface chlorophyll (mg m<sup>-3</sup>) (bottom) from MODIS data for, respectively, February (left) and August (right). Bathymetry (50, 200, 1,000 and 2,000 m) is also presented (ETOPO1 data) (Ravokatra, 2014).

**Figure 14 :** Répartition moyenne mensuelle de la vitesse du vent (m s<sup>-1</sup>) à partir des données CCMP (en haut) température à la surface de la mer SST (°C) (au milieu) chlorophylle à la surface de la mer SSC (mg m<sup>-3</sup>) (en bas) à partir des données MODIS, respectivement, pour février (à gauche) et août (à droite). La bathymétrie (50, 200, 1 000 et 2 000 m) est également présentée (données ETOPO1) – (Ravokatra, 2014).



**Figure 15:** Algal bloom of an exceptional amplitude and extent at the south, east and west of Madagascar in January 2008 (from MODIS SSC time series) (Ravokatra, 2014).

**Figure 15 :** Le banc Walters est situé sur la ride de Madagascar, 450 nm au sud de Madagascar et à 700 nm à l'est de l'Afrique du Sud, *Bathymetry in m. Copyright IRD Sète, Hervé Demarcq. ETOPO1 (résolution d'une minute d'arc). Échelle logarithmique pour la profondeur.*

bas-fonds des bassins de Madagascar et du Mozambique (~5000 m) et comprennent plusieurs monts sous-marins, qui se trouvent entre le plateau continental au sud de Madagascar et les hauts fonds du banc Walters (culminant à 18 m sous la surface de la mer).

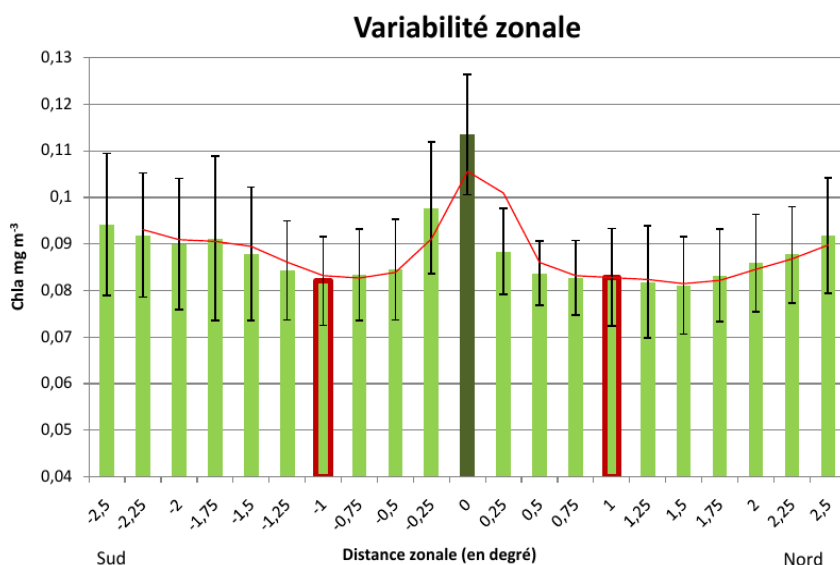
- Au sud, la région est bordée par des formations de grande échelle, à savoir la Rétroflexion du courant des Aiguilles (ACR, à ~40°S) ondulant vers l'est, le Front subtropical (~43°S – Dencausse et al., 2011) et le Front polaire (~50°S – Sparrow et al., 1996).

Les principaux courants océaniques de cette zone sont : l'EMC qui s'écoule en direction du sud le long de la côte Est de Madagascar et sa rétroflexion (partielle) juste au sud de Madagascar qui alimente le Contre-courant subtropical indien (SICC) - (Siedler et al., 2009), et le Courant des Aiguilles le long de la côte Est de l'Afrique du Sud, une composante majeure de la circulation océanique mondiale pour son rôle dans les échanges de masses d'eau entre l'océan Indien et l'océan Atlantique et

sa rétroflexion vers l'est, à environ 40°S. La Figure 13 illustre également la dominance des tourbillons de mésoéchelle dans le canal du Mozambique.

Le tableau 1 présente les données satellites suivantes sur l'environnement ont servi à cette étude.

Régionalement parlant, les conditions environnementales varient de subtropicales au nord de la zone à tempérées au sud. Ceci est visible dans la variabilité saisonnière du vent, de la SST et de la SSC illustrée à la Figure 14 (répartition moyenne mensuelle calculée à partir de séries temporelles sur 10 ans de produits quotidiens/hebdomadaires – excepté pour le vent : 20 ans de moyennes mensuelles) pour les mois de février (été austral) et août (hiver austral).



**Figure 16:** Anomaly of the zonal variability of the sea surface chlorophyll (MODIS data) over the Walters Shoal (for months December to April, 2002–2013). Red lines show the distance from the seamount (about 100 km) where an influence of the peak on the chlorophyll is visible (Ravokatra, 2014).

**Figure 16 :** Anomalie de la variabilité zonale de la chlorophylle à la surface de la mer (données MODIS) sur le banc Walters (pour les mois de décembre à avril, 2002-2013). Les lignes rouges montrent la distance au mont sous-marin (environ 100 km) où une influence du sommet sur la chlorophylle est visible (Ravokatra, 2014).

the south by the turbulent Agulhas Current Retroflexion. In between, the Walters Shoal lies in an area of very low EKE, which means quite stable circulation that should favour structured and persistent biophysical interactions at the seamount (see Physical processes resulting from current-topography interaction above).

Extreme events such as the abnormally high phytoplankton bloom at the south and east of Madagascar in January 2008 (Figure 15) show the inherent inter-annual variability of the environmental conditions in an area located at the confluence of water masses with different origins and seasonality, especially in the zonal band 20°–35°S.

The observation of environmental conditions by satellites makes it possible to observe the sea surface at a spatial scale (0.25°) comparable to the scale of the biophysical processes occurring at seamounts (see previous paragraphs). Figure 16 shows the mean monthly SSC chlorophyll measured along a south-north crossing the Walters Shoal (distance = 0) with 0.25° (about 25 km) resolution, for the months of December to April and the years 2002 to 2013. The figure shows a persistent chlorophyll maximum at the top of the seamount that could be linked to processes occurring at the summit of the Walters Shoal (to be confirmed by in-situ measurements).

Les fluctuations saisonnières des conditions environnementales sont modérées, caractéristique d'une zone de transition (de tropicale à tempérée). La production primaire dans les eaux océaniques de surface, approximée par la mesure de la chlorophylle de surface (SSC), est modérée dans l'ensemble de la zone d'intérêt, avec une saisonnalité caractéristique d'un régime tempéré. La taxonomie du phytoplancton est évaluée approximativement à partir des données satellites (Alvain et al., 2008) ainsi que de son rôle fonctionnel dans l'écologie de la zone étudiée. Les études de terrain sont nécessaires pour examiner les détails du rôle écologique du phytoplancton. Au vu des données disponibles, on peut toutefois remarquer que le SWIO présente une forte diversité d'écosystèmes avec une SST élevée dans le nord et l'est (entraînant une dominance mondiale des cyanobactéries à la surface) qui contraste avec les communautés subpolaires (diatomées et flagellés) dans le sud.

La région du banc Walters présente une grande spécificité en termes de dynamique océanique. En effet, elle est bordée au nord par un corridor de tourbillons juste au sud de Madagascar et au sud par la Rétroflexion du Courant des Aiguilles turbulente. Entre les deux, le banc Walters se trouve dans une zone d'énergie cinétique turbulente (EKE) très faible, ce qui signifie une circulation assez stable qui devrait favoriser les interactions biophysiques structurées et persistantes sur le mont sous-marin (voir § ci-dessus : Processus physiques résultant de l'interaction entre le courant et la topographie).

Des événements extrêmes comme le bloom phytoplanctonique anormalement élevée au sud et à l'est de Madagascar en janvier 2008 (Figure 15) montrent la variabilité interannuelle inhérente des conditions environnementales dans une région située à la confluence de masses d'eau de différentes origines et saisonnalité, surtout dans la bande zonale 20° - 35°S.

L'observation des conditions environnementales par satellite permet d'observer la surface de la mer à une échelle spatiale (0,25°) comparable à l'échelle des processus biophysiques qui se produisent sur les monts sous-marins (voir paragraphes précédents). La Figure 16 montre la moyenne mensuelle de chlorophylle SSC mesurée le long d'un axe nord-sud sur le banc Walters (distance = 0) avec une résolution de 0,25° (environ 25 km), pour les mois de décembre à avril et les années 2002 à 2013. La figure montre un maximum de chlorophylle persistante au sommet du mont sous-marin qui pourrait être lié aux processus se produisant au sommet du banc Walters (à confirmer par des mesures in situ).

## 5. Knowledge gaps

---

As already emphasised by Rogers (2012), our knowledge of seamount and hydrothermal vent distribution and associated communities remains poor; in particular sampling on seamounts at equatorial latitudes is lacking. Previous surveys mainly focused on a few geographic areas (such as the North Atlantic and South-West Pacific), while little data exist for seamounts in other regions such as the Indian and the Southern Oceans. Consequently, the biological communities of tropical seamounts are poorly documented for large parts of the oceans. Most biological surveys on seamounts have been relatively shallow (for example, mostly less than 1,500 m) and thus the great majority of deeper seamounts remain largely unexplored. As a result, the seafloor of the oceans is not mapped to a sufficient resolution to determine the position, size and shape of the majority of the seamounts, particularly those of less than 1,000 m in elevation.

In spite of a series of intensive efforts in the 1960s (Zeitzschel, 1973), the basin-scale ecology and the fauna inhabiting seamounts of the Indian Ocean and the SWIR are poorly known, in part because of the ocean's remoteness to nations with large-scale historical oceanographic research programmes. However, there is now an urgent need to explore these ecosystems to complete the picture of the biodiversity and productivity associated with the Indian Ocean (Demopoulos et al., 2003).

Deep-sea studies on the SWIR are limited to a series of geological surveys of the Atlantis Bank (Dick, 1998) and to the hydrothermal vents in the vicinity of Melville Banks (Tao et al., 2007).

Studies of seamount and hydrothermal vents geology and physical oceanography are as a consequence limited. In addition, available biological data mainly originate from the deep-sea fishing industry or from national fisheries research programmes prospecting for exploitable fish stocks (FAO, 2002; Romanov, 2003). Until recently, the most detailed bathymetric charts of seamounts in the Indian Ocean and SWIO were those generated by fishing companies (Shotton, 2006). Thus, the two major international scientific databases of seamount information held predicted bathymetries for only three seamounts in this region and few biological records (Seamounts Catalog: [www.seamounts.org](http://www.seamounts.org)).

## 5. Lacunes des connaissances

---

Comme l'a déjà souligné Rogers (2012), notre connaissance de la répartition des monts sous-marins et des sources hydrothermales demeure médiocre ; un manque d'échantillonnage sur les monts sous-marins à des latitudes équatoriales est surtout à déplorer. En effet, les précédentes études portaient principalement sur quelques régions géographiques (Atlantique Nord, Sud-Ouest du Pacifique), alors qu'il existe peu de données pour les monts sous-marins d'autres régions comme l'océan Indien et l'océan Austral ; par conséquent, les communautés biologiques des monts sous-marins tropicaux de larges portions des océans sont encore mal documentées. La plupart des études biologiques sur les monts sous-marins sont restées à des profondeurs relativement faibles (moins de 1 500 m pour la plupart) si bien que la grande majorité des monts sous-marins plus profonds demeurent largement inexplorés. Par conséquent, le plancher océanique n'est pas cartographié à une résolution suffisante pour déterminer la position, la taille et la forme de la majorité des monts sous-marins, en particulier ceux de 1 000 m de hauteur.

Malgré des efforts déployés dans les années 1960 (Zeitzschel, 1973), l'écologie à l'échelle du bassin et la faune peuplant les monts sous-marins de l'océan Indien et de la ride SWIR sont méconnues, en partie du fait de l'éloignement de l'océan pour les nations disposant de programmes de recherche océanographiques notoires et à grande échelle. Cependant, il est urgent maintenant d'explorer ces écosystèmes pour disposer d'une vision complète de la biodiversité et de la productivité associées à l'océan Indien (Demopoulos et al., 2003).

Les études en eau profonde sur la ride SWIR sont limitées à une série de relevés géologiques de l'Atlantis Bank (Dick, 1998) et des sources hydrothermales à proximité du banc Melville (Tao et al., 2007).

La géologie et l'océanographie physique des monts sous-marins et des sources hydrothermales ont fait l'objet d'études limitées. D'autre part, les données biologiques disponibles trouvent principalement leur origine dans la pêche hauturière menée par des programmes de recherche sur la pêche nationale en vue de la prospection des stocks de poissons exploitables (FAO, 2002 ; Romanov, 2003). Jusqu'à récemment, les cartes bathymétriques les plus détaillées de l'océan Indien et de la région du SWIO étaient celles générées

[earthref.org/databases/SC/main.htm](http://earthref.org/databases/SC/main.htm); Seamounts Online: via <http://www.iobis.org/>).

Seamounts have an impact on circulation of the water masses (White et al., 2007) and their correct position is also necessary to forecast tsunami propagation accurately (Mofjeld et al., 2001). In this respect, a detailed list of seamounts, with their position and summit depth, can be invaluable for fisheries management (Fonteneau, 1991; Rogers, 1994), of particular interest for conservation, ideal candidates for offshore and high-seas marine-protected areas (Roberts, 2002; Alder & Wood, 2004; Schmidt & Christiansen, 2004; Davies et al., 2007) and to implement the tsunami hazard mitigation programme. An accurate inventory of seamounts is necessary at both national and regional scales.

The growth of the research effort beyond national programmes, together with the ability to plan and carry out research at broader geographic scales, has considerably improved understanding over the last few decades of how seamounts and hydrothermal vents are structured, how they function as ecosystems and to what extent human activity has impacted them (Woodall et al., 2015; Serpetti et al., 2016). This scientific progress is evident in different fields, such as oceanography, geology, biology, ecology taxonomy, conservation and fisheries.

The lack of knowledge about the location of seamounts and hydrothermal vents (described in chapter 1) is, however, affecting a series of functional aspects, such as understanding of habitat and community heterogeneity and complexity (for example, species composition, distribution and growth rates), connectivity and faunal dispersal, the impact of human activities (long-term biomonitoring, species recovery, assessment of trawling impacts, etc.), conservation and management strategies and the institution of marine protected areas.

In particular, and as Rogers (2012) has to a certain extent already stated, scientists, conservation actors and managers should focus on the following aspects to further our understanding:

- Food-chain architecture (such as seamount associated fish and prey populations, benthic-pelagic coupling).
- Factors influencing the seamount-scale distribution of benthic organisms.
- Role of upwelling, vertical mixing, retention and re-suspension on primary production.
- Life histories of seamount species (use of genetic studies).

par les compagnies de pêche (Shotton, 2006). Par conséquent, les deux principales bases de données scientifiques internationales d'informations sur les monts sous-marins contenaient les bathymétries de seulement trois monts sous-marins dans cette région et peu de données biologiques (Seamounts Catalog : [www.earthref.org/databases/SC/main.htm](http://www.earthref.org/databases/SC/main.htm) ; Seamounts Online : via [www.iobis.org](http://www.iobis.org/)).

Les monts sous-marins ont un impact sur la circulation des masses d'eau (White et al., 2007) et leur position correcte s'avère également nécessaire pour prévoir correctement la propagation des tsunamis (Mofjeld et al., 2001). À cet égard, la liste détaillée des monts sous-marins, caractérisés par leur position et la profondeur du sommet, peut être précieuse pour la gestion de la pêche (Fonteneau, 1991 ; Rogers, 1994) et revêt un intérêt particulier pour la conservation. Elle répertorie les candidats idéaux pour devenir des aires marines protégées en haute mer (Roberts, 2002 ; Alder et Wood, 2004 ; Schmidt et Christiansen, 2004 ; Davies et al., 2007) et pour la mise en œuvre du programme d'atténuation des risques des tsunamis. Dans ce contexte, un inventaire précis des monts sous-marins est nécessaire à l'échelle tant nationale que régionale.

Ces dernières décennies, le redoublement des efforts de recherche au-delà des programmes nationaux, associé à la capacité de planifier et de mener des recherches à des échelles géographiques plus larges, a considérablement amélioré notre compréhension de la structuration des monts sous-marins et des sources hydrothermales, de leur mode de fonctionnement en tant qu'écosystèmes et de l'effet que l'activité humaine a eu sur eux. Cette avancée scientifique est manifeste dans différents domaines, comme, par exemple, l'océanographie, la géologie, la biologie, la taxonomie, l'écologie, la conservation et la pêche.

Néanmoins, le manque de connaissances sur l'emplacement des monts sous-marins et des sources hydrothermales (décrit au chapitre 1) affecte une série d'aspects fonctionnels, à savoir : notre compréhension de l'hétérogénéité et de la complexité des habitats/communautés (par ex. : la composition, la répartition, les taux de croissance des espèces), de la connectivité et de la dispersion de la faune, de l'impact des activités humaines (par ex. : la surveillance biologique à long terme, la restauration des espèces, l'évaluation des impacts de la pêche au palangrier, etc.), les stratégies de conservation et/ou de gestion et l'instauration d'aires marines protégées.

En particulier, comme Rogers (2012) l'a déjà partiellement noté, afin d'améliorer notre compréhension, les futurs scientifiques, acteurs de la conservation et

- Long-term implications of climate change and threats (for example, fisheries, pollution, seabed mining, ocean acidification and presence of alien species) to seamount and hydrothermal vent communities (introduction of database for habitat loss and degradation).
- Seamount microbial communities (substantially underestimated at present).
- Linkages of the bottom fauna with the water column.
- Comparative study, in order to compare fauna of seamounts and plumes with that of other bathyal bottoms at equivalent depths.
- Measurable conservation objectives that are relevant to current policies and sensitive to meaningful thresholds in order to establish meaningful indicators and monitoring protocols (Failing & Gregory, 2003).
- Creation of EBSAs and MPAs.
- Identification of potential and new stressors (debris, noise, traffic vessels, tourism, etc.).
- Creation of a list of endangered species (for both types of ecosystem).
- Improving access to data from seabed mining and high-seas fisheries activities, which is dramatically affecting scientific understanding and potential conservation measures.
- Identification of meaningful indicators, monitoring protocols and strategies to assess whether an MPA is achieving the established conservation and management objectives is a key component of overall management planning and implementation.

Overall knowledge of high-seas ecosystems remains limited due to insufficient funding for exploring and studying seamounts and hydrothermal vents.

To meet these challenges, advanced and field programmes are required. However, standardised sampling methods and taxonomic resolution (inter-calibration assessment studies) should be introduced as different collecting instruments have different performances and data comparison may be biased to a certain degree.

In the near future it will be particularly important to enhance collaboration among scientific communities of numerous countries and multiple disciplines. In addition, a minimum set of standardised seamount sampling protocols should be embraced as widely as possible by countries endorsing seamount and hydrothermal vents sampling programmes.

Additionally, to strengthen conservation and management of areas beyond national jurisdiction such as

gestionnaires devront se concentrer sur les aspects suivants :

- L'architecture de la chaîne alimentaire (par ex. : mont sous-marin associé à des populations de poissons et de proies, couplage benthopélagique)
- Les facteurs influençant la répartition des organismes benthiques à l'échelle du mont sous-marin
- Le rôle de l'upwelling, du mélange vertical, de la rétention et de la resuspension sur la production primaire
- Les histoires de vie des espèces des monts sous-marins (utilisation d'études génétiques)
- Les implications à long terme du changement climatique et des menaces (pêche, pollution, exploration minière du sol marin, acidification des océans, présence d'espèces allogènes) sur les communautés des monts sous-marins et des sources hydrothermales (introduction d'une base de données des pertes et dégradations de l'habitat)
- Les communautés microbiennes des monts sous-marins (pour le moment considérablement sous-estimées)
- Les liens entre la faune benthique et la colonne d'eau
- Une étude comparative de la faune des monts sous-marins et des sites hydrothermaux avec celle d'autres fonds bathyaux situés à des profondeurs équivalentes
- Pour établir des indicateurs et des protocoles de surveillance significatifs, il est impératif que les objectifs de conservation soient quantifiables, adaptés aux politiques actuelles et sensibles aux seuils significatifs (Failing et Gregory 2003).
- La création de ZBEI et d'AMP
- L'identification des facteurs de stress potentiels et nouveaux (par ex. : déchets, bruit, trafic maritime, tourisme, etc.)
- La création de liste de liste d'espèces en danger (pour les deux types d'écosystème)
- L'amélioration de l'accès aux données sur l'exploitation minière du fond marin et la pêche en haute mer, qui affecte considérablement la compréhension scientifique et les mesures de conservation potentielles
- L'identification d'indicateurs significatifs, de protocoles de surveillance et de stratégies visant à évaluer si une AMP satisfait aux objectifs de conservation et de gestion fixés est une composante clé de la planification et de la mise en œuvre globales de la gestion.

Faute de financement suffisant pour l'exploration et l'étude des monts sous-marins et des sources hydrothermales, les connaissances générales sur ces écosystèmes de haute mer demeurent limitées.

seamounts and hydrothermal vents, marine resources and ecosystems, molecular tools need to be introduced and applied in all field programmes in order to:

- reveal evolutionary histories of marine species;
- discriminate between cryptic species (increasing information concerning existing biodiversity and associated distribution patterns);
- track effects of climate change (von der Heyden et al., 2010);
- identify marine invasive alien species (Darling & Tepolt, 2008);
- identify potentially suspicious labelled seafood (von der Heyden et al., 2010).

Furthermore, genetic studies might demonstrate whether fragile and unique biota, such as seamount and vent ecosystems, are at an appropriate scale for protection, or whether they should be carefully protected (UNEP, 2006). Finally, as mentioned in the UNEP report (2006), availability of data regarding seamounts represents a problem.

For many seamount studies, only summary data are publicly available, analysis of species distribution patterns and studies on assemblage composition across different seamounts and regions are not aggregated and often contained in the 'grey literature' reports, such as unpublished fisheries research, trawler and commercial catch records (Tracey et al., 2011), thus not always readily accessible.

The conservation and management of marine biodiversity based on precautionary and ecosystem approaches are consequently hampered by the lack of fundamental scientific knowledge and understanding of these areas and their relationship with benthic and pelagic fish species of commercial interest.

Furthermore, many seamounts are located in international waters, so the control of human activities that might adversely impact oceanic features (fishing, seabed mining activities, etc.) is a major challenge.

To address these issues, appropriate mechanisms that bridge science and policy making must be established.

The knowledge gaps mentioned above need to be addressed and discussed internationally in order to create solid scientific evidence that might enable institutions, local communities and, in particular, scientists, to interpret the causes and impacts of present and future environmental changes and threats and consequently to integrate seamount and hydrothermal vent ecosystems into conservation strategies.

Afin de relever ces défis, des programmes de terrain avancés sont nécessaires. Cependant, des méthodes d'échantillonnage normalisées et une résolution taxonomique (études d'évaluation de l'étalonnage croisé) doivent être introduites. En effet, étant donné la disparité des performances des différents instruments de collecte, les données de comparaison risquent d'être, dans une certaine mesure, biaisées.

En particulier, dans un avenir proche, il sera extrêmement important d'améliorer la collaboration entre les communautés scientifiques de nombreux pays regroupant de multiples disciplines. Les pays qui appuient les programmes d'échantillonnage des monts sous-marins et des sources hydrothermales devront englober à l'échelle internationale, aussi large que possible, un ensemble minimal de protocoles d'échantillonnage standardisés des monts sous-marins.

Par ailleurs, afin de renforcer la conservation et la gestion des Zones Au-delà des Juridictions Nationales (ZAJN), telles que les monts sous-marins et les sources hydrothermales, les ressources et les écosystèmes marins, il est nécessaire d'introduire l'application d'outils moléculaires dans tous les programmes de terrain afin de :

- révéler les histoires évolutives des espèces marines ;
- discriminer les espèces cryptiques (augmenter l'information concernant la biodiversité existante et les schémas de répartition associés) ;
- suivre les effets du changement climatique (von der Heyden et al. 2010) ;
- répertorier les espèces marines étrangères invasives (Darling et Tepolt, 2008) ;
- recenser les fruits de mer étiquetés comme suspects (von der Heyden et al. 2010).

En outre, des études génétiques pourraient démontrer si les biotes fragiles et uniques, tels que les écosystèmes des monts sous-marins et des sources hydrothermales, sont ou non à une échelle appropriée pour la protection, ou s'ils doivent ou non être protégés avec soin (PNUE, 2006). Finalement, comme il est mentionné dans le rapport du PNUE (2006), la disponibilité des données sur les monts sous-marins pose un problème.

En effet, pour de nombreuses études sur les monts sous-marins, seules des données synthétiques sont disponibles publiquement. L'analyse des schémas de répartition des espèces et les études sur la composition d'assemblage de différents monts sous-marins et régions ne sont pas compilées et figurent souvent

dans les rapports de « littérature grise ». Les chiffres obtenus dans le cadre de recherches sur la pêche à la palangre et la pêche commerciale par prise ne sont pas publiés (Tracey et al., 2011), donc pas toujours facilement consultables.

Par conséquent, la conservation et la gestion de la biodiversité marine fondées sur le principe de précaution et l'approche écosystémique sont entravées par un manque de connaissances scientifiques fondamentales et de compréhension de ces régions et de leur relation avec des espèces de poissons benthiques et pélagiques présentant un intérêt commercial.

De surcroît, de nombreux monts sous-marins sont situés dans des eaux internationales, si bien que le contrôle des activités humaines susceptibles de nuire aux caractéristiques océaniques (pêche, exploitation minière du fond marin) représente un défi majeur. Dans les Zones Au-delà des Juridictions Nationales (ZAJN), la pêche menée dans le Sud-Ouest de l'océan Indien, qui s'est effondrée au bout de quatre ans seulement à la fin des années 1990 (FAO, 2002 ; Lack et al., 2003) en offre un remarquable exemple.

Pour remédier à ces problèmes, il convient d'instaurer des mécanismes appropriés qui rapprochent la science de la prise de décisions.

Sur le plan international, il s'agit de combler les lacunes répertoriées ci-dessus et d'en discuter afin de créer de solides preuves scientifiques qui permettraient aux institutions, aux communautés locales et, en particulier, aux scientifiques d'interpréter les causes et les impacts des menaces et des changements environnementaux présents et futurs et donc d'intégrer la stratégie de conservation des écosystèmes des monts sous-marins.

## 6. Conclusion

---

Scientists have only recently been able to study seamount and hydrothermal vent ecosystems, as a result of new technologies. As well as being a repository of scientific knowledge on seamounts and hydrothermal vents, the present work confirms that much remains to be learnt to contribute effectively to strengthening international ocean governance for biodiversity conservation in areas beyond national jurisdiction.

It would, of course, be unreasonable to wait until everything is known about these special ecosystems to take conservation and management measures to preserve them. However, it is essential that decisions are based on a better knowledge of their global and specific functioning characteristics and dynamics, which can only be achieved by providing support to the scientific community for the further acquisition of scientific and technological knowledge and by developing international databases.

In 2017, as part of the IUCN FFEM–SWIO project, a multidisciplinary scientific expedition (MD208 - Walters Shoal, R/V *Marion Dufresne*) was carried out on the Walters Shoal, a group of submarine mountains located in the international waters of the South-West Indian Ocean 700 km south of Madagascar, thanks to the support of the French Global Environment Facility and the French Polar Institute Paul-Emile Victor. Once analysed, the data collected during the expedition by the two scientific teams of the French National Natural History Museum and the Institute of Research for Development, partners of IUCN in the framework of the FFEM-SWIO Project, will complement the information presented in this report.

## 6. Conclusion

---

Les scientifiques n'ont pu étudier que récemment les écosystèmes des monts sous-marins et de sources hydrothermales, grâce aux nouvelles technologies. En plus d'être un recueil de connaissances scientifiques sur les monts sous-marins et les sources hydrothermales, le présent travail confirme qu'il reste beaucoup à apprendre pour contribuer efficacement au renforcement de la gouvernance internationale des océans pour la conservation de la biodiversité dans les zones situées au-delà des juridictions nationales.

Il serait évidemment déraisonnable d'attendre que tout soit connu sur ces écosystèmes particuliers pour prendre des mesures de conservation et de gestion afin de les préserver. Cependant, il est essentiel que les décisions reposent sur une meilleure connaissance de leurs caractéristiques et de leurs dynamiques de fonctionnement globales et spécifiques, ce qui ne peut être obtenu qu'en apportant un soutien à la communauté scientifique pour l'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques et en développant des bases de données internationales.

En 2017, dans le cadre du projet UICN FFEM-SWIO, une expédition scientifique pluridisciplinaire (MD208 - Walters Shoal, R/V *Marion Dufresne*) a été menée sur le banc Walters, un groupe de monts sous-marins situés dans les eaux internationales du sud-ouest de l'océan Indien à 700 km au sud de Madagascar, grâce au soutien du Fonds Français pour l'Environnement Mondial et de l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor. Une fois analysées, les données collectées lors de l'expédition par les deux équipes scientifiques du Muséum National D'Histoire Naturelle et de l'Institut de Recherche pour le Développement, partenaires de l'UICN dans le cadre du projet FFEM-SWIO, compléteront les informations présentées dans ce rapport.

## Annex: Observation of the world's oceans by autonomous Argos floats

The widescale global diffusion of floats that profile temperature and salinity, known as Argos, has already become a major component of the ocean observation system. Argos is a standard to which other systems being developed to observe the oceans can look to. For example, Argos offers ideas on various topics such as how to collaborate internationally, how to develop a data management system and how to change the way scientists think about collecting data. Deployment began in 2000 and continues today at the rate of about 800 per year (see map below for the location of floats at sea on 19 June 2015).

Argos is a major contributor to the CLIVAR (Climate Variability and Predictability Experiment) project of the WCRP (World Climate Research Programme) and to the GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) project. Argos is part of the Global Climate Observing System and Global Ocean Observing System (GCOS/GOOS).

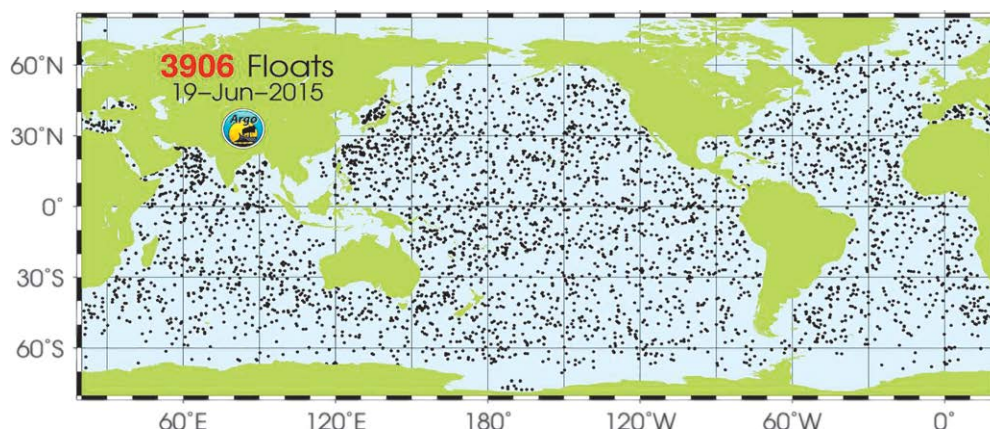
Argos floats are autonomous profiling floats deployed during sea cruises in order to get dense global coverage of the world's oceans. Once at sea, the float dives to its 'parking depth' where it is transported by the current. It surfaces regularly, where it transmits the data collected both vertically (descending and ascending profiles) and horizontally (at parking depths). Data consist of hydrographic data (temperature and salinity). Some floats, for example, the BIO Argo, are equipped with biological sensors (chlorophyll and optical sensors) (Claustre, 2010).

## Annexe : Observation de l'océan mondial par des flotteurs autonomes Argos

Le système mondial à large échelle de flotteurs-profileurs de température/salinité, appelé Argos, s'est déjà imposé comme une composante majeure du système d'observation de l'océan. Argos est une norme dont d'autres systèmes d'observation de l'océan en développement peuvent s'inspirer. Par exemple, Argos répond à diverses problématiques comme la coopération internationale, le développement d'un système de gestion des données et les moyens pour faire changer d'avis les scientifiques sur la collecte de données. Commencés en 2000, les déploiements se poursuivent aujourd'hui au taux d'environ 800 par an (voir la carte ci-dessous pour l'emplacement des flotteurs en mer le 19/06/2015).

Argos contribue grandement au projet CLIVAR (Climate Variability and Predictability Experiment) du PMRC (Programme mondial de recherche sur le climat) et au projet GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment). Le système Argos fait partie du Système mondial d'observation du climat /Système mondial d'observation de l'océan (SMOC/GOOS).

Les flotteurs Argos sont des flotteurs-profileurs autonomes déployés pendant les campagnes en mer afin d'obtenir une couverture dense de l'océan mondial. Une fois en mer, le flotteur plonge jusqu'à sa « profondeur de stationnement » où il est transporté par le courant. Il fait régulièrement surface, là où il transmet les données collectées à la fois verticalement (profils descendant et ascendant) et horizontalement (aux profondeurs de stationnement). Il s'agit de données hydrographiques (température et salinité). Certains flotteurs, le BIO-Argo, sont équipés de capteurs biologiques (capteurs de chlorophylle et optiques) – (Claustre, 2010).



**Figure 17:** Map of Argo float locations reporting on 19 June 2015. Source: <http://www-hrx.ucsd.edu/www-argo/statusbig.gif>

**Figure 17:** Carte de répartition des flotteurs Argos le 19 juin 2015. Source: <http://www-hrx.ucsd.edu/www-argo/statusbig.gif>

## References / Références

- Andrianaivojaona C., Kasprzyk Z. and Dasylla D. (1992). *Malagasy Fisheries and Aquaculture, a diagnostic assessment*. Project report. Rome, Italy: FAO.
- Alder, J. and Wood, L. (2004). 'Managing and protecting seamounts ecosystems'. *Fisheries Centre Research Reports* 12(5):67–73.
- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y. and Loisel, H. (2008). 'Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view'. *Global Biogeochemical Cycles* 22(3):GB3001. <https://doi.org/10.1029/2007GB003154>
- Annamalai, H. and Murtugudde, R. (2004). *Role of the Indian Ocean in regional climate variability. Earth's climate: the ocean-atmosphere interaction*. Geophysical Monograph Series 47. Washington DC, USA: American Geophysical Union.
- Au, D.W.K. and Pitman, R.L. (1986). 'Seabird interactions with dolphins and tuna in the eastern tropical Pacific'. *The Condor* 88:304–317. <https://doi.org/10.2307/1368877>
- Arhan, M., Mercier, H. and Lutjeharms, J.R.E. (1999). 'The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean'. *Journal of Geophysical Research* 104(C9):20987–21005. <https://doi.org/10.1029/1998JC900047>
- Bach, P., Romanov, E., Rabearisoa, N., Akbaraly, A. and Sharp, A. (2011). *Report for 2010 exhaustive data collected by observers on board largest pelagic long-liners based in La Reunion*. IOTC–2011–WPEB07–INF29.
- Baker, E.T. and German, C.R. (2004). 'On the global distribution of mid-ocean ridge hydrothermal fields'. In: C.R. German, J. Lin and L.M. Parson (eds) *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and the Ocean*, pp.245–266. Geophysical Monograph Series 148. Washington DC, USA: American Geophysical Union.
- Bellard, C., Leclerc, C. and Courchamp, F. (2013). 'Impact of sea level rise on the 10 insular biodiversity hotspots'. *Global Ecology and Biogeography* 23:203–212. <https://doi.org/10.1111/geb.12093>
- Bensch, A., Gianni, M., Grébroval, D., Sanders, J.S. and Hjort, A. (2008). *Worldwide review of bottom fisheries in the high seas*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 522. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Biscoito, M., Segonzac, M., Almeida, A.J., Desbruyères, D., Geistdoerfer, P., Turnipseed, M. and Van Dover, C. (2002). 'Fishes from the hydrothermal vents and cold seeps—an update'. *Cahiers de Biologie Marine* 43:359–362.
- Branch, T.A. (2001). 'A review of orange roughy *Hoplostethus atlanticus* fisheries, estimation methods, biology and stock structure'. In: A.I.L. Payne, S.C. Pillar and R.J.M. Crawford (eds) *A Decade of Namibian Fisheries Science*. *South African Journal of Marine Science* 23:181–203.
- Brewin, P.E., Stocks, K.I., Haidvogel, D.B. (2009). 'Effects of oceanographic retention on decapod and gastropod community diversity on seamounts'. *Marine Ecology Progress Series* 383:225–237. <https://doi.org/10.3354/meps07987>
- Brink, K.H. (1990). 'On the generation of seamount-trapped waves'. *Deep-Sea Research I* 37(10):1569–1582. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90062-Z](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90062-Z)
- Brodeur, R.D. and Yamamura, O. (2005). *Micronekton of the North Pacific*. PICES Science report no. 30. Sydney, Canada: North Pacific Marine Science Organization.
- Capet, X., McWilliams, J.C., Molemaker, M.J. and Shchepetkin, A.S. (2008). 'Mesoscale to submesoscale transition in the California Current System. Part I: Flow structure, eddy flux, and observational tests'. *Journal of Physical Oceanography* 38:29–43. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3672.1>; <https://doi.org/10.1175/2007JPO3671.1>; <https://doi.org/10.1175/2008JPO3810.1>
- Cavanaugh, C.M. (1983). 'Symbiotic chemoautotrophic bacteria in marine invertebrates from sulphiderich habitats'. *Nature* 302:58–61. <https://doi.org/10.1038/302058a0>
- Chapman, D.C. (1989). 'Enhanced subinertial diurnal tides over isolated topographic features'. *Deep-Sea Research I* 36(6):815–824. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(89\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90030-7)
- Cherel, Y., Jaeger, A., Alderman, R., Jaquemet, S., Richard, P., Wanless, R.M., Phillips, R.A. and Thompson, D.R. (2013). 'A comprehensive isotopic investigation of habitat preferences in nonbreeding albatrosses from the Southern Ocean'. *Ecography* 36:277–286. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07466.x>

- Childress, J.J. and Fisher, C.R. (1992). In: M. Barnes, A.D. Ansell and R.N. Gibson (eds) *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, pp.337–441. London, UK: UCL Press Limited.
- Clark, M. (1999). 'Fisheries for orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*) on seamounts in New Zealand'. *Oceanologica Acta*. 22:593–602. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)88950-1](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)88950-1)
- Clark, M.R., Tittensor, D., Rogers, A.D., Brewin, P., Schlacher, T., Rowden, A., Stocks, K. and Consalvey, M. (2006). *Seamounts, deep-sea corals and fisheries*. UNEP-WCMC Biodiversity Series.
- Clark, M.R., Vinnichenko, V.I., Gordon, J.D.M., Beck-Bulat, G.Z., Kukharev, N.N. and Kakora, A.F. (2007). 'Large-scale distant-water trawl fisheries on seamounts'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.361–399. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch17>
- Clark, M.R., Rowden, A.A., Schlacher, T. (2010). 'The ecology of seamounts: Structure, function and human impacts'. *Annual Review of Marine Science* 2:253–278. <https://doi.org/10.1890/09-0548.1>; <https://doi.org/10.1890/09-1268.1>
- Clark, M.R., Schlacher, T., Rowden, A.A., Stocks, K.I., and Consalvey, M. (2012). 'Science Priorities for Seamounts: Research Links to Conservation and Management'. *PLoS ONE* 7:e29232. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029232>
- Claustre, H. (2010). 'Bio-optical profiling floats as new observational tools for biogeochemical and ecosystem studies: potential synergies with ocean color remote sensing'. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Collette, B.B. and Paring, N.V. (1991). 'Shallow-water fishes of Walters Shoals, Madagascar Ridge'. *Bulletin of Marine Science* 48:1–22. <https://doi.org/10.5270/OceanObs09.cwp.17>
- Consalvey, M., Clark, M.R., Rowden, A.A. and Stocks, K.I. (2010). 'Life on Seamounts'. In: A.D. McIntyre (ed.) *Life in the World's Oceans: diversity, distribution, and abundance*, pp.123–138. Oxford, UK: Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444325508.ch7>
- Corliss, J.B., Dymond, J., Gordon, L.I., Edmond, J.M., von Herzen, R.P., Ballard, R., Green, K., Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K. and van Andel, T.H. (1979). 'Submarine thermal springs on the Galapagos Rift'. *Science* 203:1073–1083. <https://doi.org/10.1126/science.203.4385.1073>
- Costello, M.J., Cheung, A. and De Hauwere, N. (2010). 'The surface area, and the seabed area, volume, depth, slope, and topographic variation for the world's seas, oceans and countries'. *Environ Sci Technol*. 44:8821–8828. <https://doi.org/10.1021/es1012752>
- Coyle, K., Konar, B., Blanchard, A., Highsmith, R., Carroll, J., Carroll, M., Denisenko, S. and Sirenko, B. (2007). 'Potential effects of temperature on the benthic infaunal community on the southeastern Bering Sea shelf: Possible impacts of climate change'. *Deep-Sea Research II* 54:2885–2905. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.08.025>
- Darling J.A. and Tepolt C.K. (2008). 'Highly sensitive detection of invasive shore crab (*Carcinus maenas* and *Carcinus aestuarii*) larvae in mixed plankton samples using polymerase chain reaction and restriction fragment length polymorphisms (PCR-RFLP)'. *Aquatic Invasions* 3(2):141–152. <https://doi.org/10.3391/ai.2008.3.2.4>
- Das, P., Iyer, S.D., Kodagali, V.N. and Krishna, K.S. (2005). 'A new insight into the distribution and origin of seamounts in the Central Indian Ocean Basin'. *Mar. Geod.* 28:259–269. <https://doi.org/10.1080/014904010500204637>
- Davies, A.J., Roberts, J.M. and Hall-Spencer, J. (2007). 'Preserving deep-sea natural heritage: emerging issues in offshore conservation and management'. *Biological Conservation* 138(3–4):299–312. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.05.011>
- De Forest, L. and Drazen, J. (2009). 'The influence of a Hawaiian seamount on mesopelagic micronekton'. *Deep-Sea Research I* 56(2):232–250. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.09.007>
- Demopoulos, A.W.J., Smith C.R. and Tyler, P.A. (2003). 'Ecology of the deep Indian Ocean floor'. In: P.A. Tyler (ed.) *Ecosystems of the World Volume 28: Ecosystems of the Deep Ocean*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- De Ruijter, W.M.P., van Aken, H.M., Beier, E.J., Lutjeharms, J.R.E., Matano, R.P. and Schouten, W.M. (2004). 'Eddies and dipoles around South Madagascar: formation, pathways and large-scale impact'. *Deep-Sea Research I* 51:383–400. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.10.011>
- Desbruyères, D., Segonzac, M. and Bright, M. (eds) (2006). *Handbook of Deep-Sea Hydrothermal Vent Fauna*. 2nd Edition. Linz, Austria: State Museum of Upper Austria.
- Devey, C.W., Fisher, C.R. and Scott, S. (2007). 'Responsible science at hydrothermal vents'. *Oceanography* 20:162–171. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.90>
- Dick, H. (1998). 'Indian Ocean's Atlantic Bank yields deep-Earth insight'. *Oceanus* 41.
- Dick, H.J.B., Lin, J. and Schouten, H. (2003). 'Ultra-Slow Spreading—A New Class of Ocean Ridge'. *Nature* 426:405–412. <https://doi.org/10.1038/nature02128>

- Dower, J., Freeland, H. and Juniper, K. (1992). 'A strong biological response to oceanic flow past Cobb seamount'. *Deep-Sea Research I* 39:1139–1145. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(92\)90061-W](https://doi.org/10.1016/0198-0149(92)90061-W)
- Dower, J.F. and Mackas, D.L. (1996). "'Seamount effects" in the zooplankton community near Cobb Seamount'. *Deep-Sea Research I* 43:837–858. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(96\)00040-4](https://doi.org/10.1016/0967-0637(96)00040-4)
- Dubilier, N., Bergin, C. and Lott, C. (2008). 'Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis'. *Nat. Rev. Microbiol.* 6:725–740. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1992>
- Etnoyer, P., Wood, J. and Shirley, T. (2010). 'How large is the seamount biome?' *Oceanography* 23:206–209. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.96>
- Failing, L. and Gregory, R. (2003). 'Ten common mistakes in designing biodiversity indicators for forest policy'. *Journal of Environmental Management* 68(2):121–132. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00014-8)
- Fonteneau, A. (1991). 'Monts sous-marins et thons dans l'Atlantique tropical est'. *Aquatic Living Resources* 4(1):13–25. <https://doi.org/10.1051/alr:1991001>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2002). *Report of the Second Ad Hoc Meeting on Management of Deepwater Fisheries Resources of the Southern Indian Ocean*. FAO Fisheries Report No. 677. Rome, Italy: FAO.
- Fréon, P. and Dagorn, L. (2000). 'Review of fish associative behaviour: Toward a generalisation of the meeting point hypothesis'. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 10:183–207. <https://doi.org/10.1023/A:1016666108540>
- Fryer, P. (1992). 'Mud volcanoes of the Marianas'. *Scientific American* 266:46–52. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0292-46>
- Gage, J.D. and Tyler, P.A. (1991). *Deep-Sea Biology: a Natural History of Organisms at the Deep-Sea Floor*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139163637>
- Galletti, F. and Leroy, A. (2015). *Revue du cadre de gouvernance de l'océan Indien occidental*. Rapport de recherche IRD - activité 212 Gouvernance, Projet FFEM/UICN Conservation et exploitation durable des écosystèmes de monts sous-marins et sources hydrothermales du sud-ouest de l'océan Indien au-delà des zones de juridiction nationale (2014-2016). Gland, Switzerland: IUCN.
- Genin, A. (2004). 'Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies'. *Journal of Marine Systems* 50:3–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.10.008>
- Genin, A. and Boehlert, G.W. (1985). 'Dynamics of temperature and chlorophyll structures above a seamount: an oceanic experiment'. *Journal of Marine Research* 43:907–924. <https://doi.org/10.1357/002224085788453868>
- Genin, A., Haury, L. and Greenblatt, P. (1988). 'Interactions of migrating zooplankton with shallow topography: predation by rockfishes and intensification of patchiness'. *Deep Sea Research I* 35(2):151–175. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90034-9)
- Genin, A. and Dower, J.F. (2007). 'Seamount plankton dynamics'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.84–100. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch5>
- German, C.R., Baker, E.T., Mével, C., Tamaki, K. and the FUJI scientific team. (1998). 'Hydrothermal activity along the South West Indian Ridge'. *Nature* 395:490–493. <https://doi.org/10.1038/26730>
- Glowka, L. (2003). 'Putting marine scientific research on a sustainable footing at hydrothermal vents'. *Marine Policy* 27:303–312. [https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(03\)00042-3](https://doi.org/10.1016/S0308-597X(03)00042-3)
- Gopal, K., Tolley, K.A., Groeneveld, J.C. and Matthee, C.A. (2006). 'Mitochondrial DNA variation in spiny lobster *Palinurus delagoae* suggests genetically structured populations in the southwestern Indian Ocean'. *Marine Ecology Progress Series* 319:191–198. <https://doi.org/10.3354/meps319191>
- Groeneveld, J.C., Griffiths, C.L. and Van Dalsen, A.P. (2006). 'A new species of spiny lobster, *Panulirus barbarae* (Decapoda, Palinuridae) from Walters Shoals on the Madagascar Ridge'. *Crustaceana* 79(7):821–833. <https://doi.org/10.1163/156854006778008177>
- Gubbay S. (2002). *Offshore Directory: Review of a selection of habitats, communities and species of the North-East Atlantic*. WWF-UK North-East Atlantic Programme. London, UK: World Wildlife Fund (WWF)-UK.
- Gubbay, S. (2003). *Seamounts of the North-East Atlantic*. Hamburg and Frankfurt am Main, Germany: OASIS and World Wildlife Fund (WWF)-Germany.
- Hashimoto, J., Ohta, S., Gamo, T., Chiba, H., Yamaguchi, T., Tsuchida, S., Okudaira, T., Watabe, H., Yanamaka, T. and Kitazawa, M. (2001). 'First hydrothermal vent communities from the Indian Ocean discovered'. *Zoological Science* 5:717–721. <https://doi.org/10.2108/zsj.18.717>
- Haury, L., Fey, C., Newland, C. and Genin, A. (2000). 'Zooplankton distribution around four eastern North Pacific seamounts'. *Progress in Oceanography* 45:69–105. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00051-8)

- Hebshi, A.J., Duffy, D.C. and Hyrenbach, K.D. (2008). 'Associations between seabirds and subsurface predators around Oahu, Hawaii'. *Aquatic Biology* 4:89–98. <https://doi.org/10.3354/ab00098>
- Herbette, S., Morel, Y. and Arhan, M. (2003). 'Erosion of a surface vortex by a seamount'. *Journal of Physical Oceanography* 33:1664–1679. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<1664:EOASVB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<1664:EOASVB>2.0.CO;2); <https://doi.org/10.1175/2382.1>
- Herbette, S., Morel, Y. and Arhan, M. (2005). 'Erosion of a surface vortex by a seamount on the beta plane'. *Journal of Physical Oceanography* 35:2012–2030. <https://doi.org/10.1175/JPO2809.1>
- Hirsch, S. and Christiansen, B. (2010). 'The trophic blockage hypothesis is not supported by the diets of fishes on Seine Seamount'. *Marine ecology* 31(Suppl. 1):107–120. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2010.00366.x>
- Holland, K.N. and Grubbs, R.D. (2007). 'Fish visitors to seamounts: Tunas and billfish at seamounts'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.189–201. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch10a>
- Hubbs, C.L. (1959). 'Initial Discoveries of Fish Faunas on Seamounts and Offshore Banks in the Eastern Pacific'. *Pacific Science* 8:311–316.
- Huppert, H. (1975). 'Some remarks on the initiation of inertial Taylor columns'. *Journal of Fluid Mechanics* 67:397–412. <https://doi.org/10.1017/S0022112075000377>
- Huppert, H. and Bryan, K. (1976). 'Topographically generated eddies'. *Deep-Sea Research Part I* 23:655–679. [https://doi.org/10.1016/S0011-7471\(76\)80013-7](https://doi.org/10.1016/S0011-7471(76)80013-7)
- Jannasch, H.V. (1984). 'Chemosynthesis: The nutritional basis for life at deep-sea vents'. *Oceanus* 27:73–78.
- Jaquemet, S., Le Corre, M. and Weimerskirch, H. (2004). 'Seabird community structure in a coastal tropical environment: importance of natural factors and fish aggregating devices (FADs)'. *Marine Ecology Progress Series* 268:281–292. <https://doi.org/10.3354/meps268281>
- Kaiser, M. et al. (2005). *Marine ecology: Processes, systems and impacts*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Kaschner, K. (2007). 'Air-breathing visitors to seamounts: Marine mammals'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.230–238. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch12a>
- Kim, S.-S. and Wessel, P. (2011). 'New global seamount census from altimetry-derived gravity data'. *Geophys. J. Int.* 186:615–631. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05076.x>
- Kitchingman, A. and Lai, S. (2004). 'Inferences of potential seamount locations from mid-resolution bathymetric data'. In: T. Morato and D. Pauly (eds) *Seamounts: Biodiversity and Fisheries*, pp.7–12. Fisheries Centre Research Report 12(5).
- Koslow, J.A., Boehlert, G., Gordon, J., Lorange, P. and Parin, N. (2000). 'Continental slope and deep-sea fisheries: implications for a fragile ecosystem'. *ICES Journal of Marine Science* 57:548–557. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0722>
- Lack, M., Short, K. and Willock, A. (2003). *Managing risk and uncertainty in deep-sea fisheries: lessons from Orange Roughy*. TRAFFIC Oceania and WWF Endangered Seas Programme. WWF.
- Lavelle, J.W. and Mohn, C. (2010). 'Motion, commotion and biophysical connections at deep ocean seamounts'. *Oceanography* 23(1):90–103. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.64>
- Le Corre, M., Jaeger, A., Pinet, P., Kappes, M.A., Weimerskirch, H., Catry, T., Ramos, J.M., Russell, J.C., Shah, N. and Jaquemet, S. (2012). 'Tracking seabirds to identify potential marine protected areas in the tropical western Indian Ocean'. *Biological Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.biocom.2011.11.015>
- Lehodey, P., Andre, J.M., Bretingnac, M., Hampton, J., Stoens, A., Menkes, C., Memery, L. and Grima, N. (1998). 'Predicting skipjack forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical bio-geochemical model'. *Fisheries Oceanography* 7:317–325. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.1998.00063.x>
- Lévy, M. (2008). 'The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence'. *Lecture Notes in Physics* 744:219–261. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-75215-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75215-8_9)
- Lutjeharms, J.R.E. (2007). 'Three decades of research on the greater Agulhas Current'. *Ocean Sci.* 3:129–147. <https://doi.org/10.5194/os-3-129-2007>
- Machu, E., Lutjeharms, J.R.E., Webb, A.M. and Van Aken, H.M. (2002). 'First hydrographic evidence of the southeast Madagascar upwelling cell'. *Geophysical Research Letters* 29:21. <https://doi.org/10.1029/2002GL015381>
- Martin, W., Baross, J., Kelley, D. and Russell, M.J. (2008). 'Hydrothermal vents and the origin of life'. *Nature Reviews, Microbiology* 6:805–814. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1991>

- McClain, C.R., Lundsten, L., Ream, M., , Barry J, DeVogelaere A. (2009). 'Endemicity, biogeography, composition and community structure on a northeast Pacific seamount'. *PLoS ONE* 4(1):e4141. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004141>
- Menard, H.W. (1964). *Marine Geology of the Pacific*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Moffeld, H.O., Titov, V.V., Gonzalez, F.I. and Newman, J.C. (2001). 'Tsunami scattering provinces in the Pacific Ocean'. *Geophysical Research Letters* 28(2):335–337. <https://doi.org/10.1029/2000GL011710>
- Morato, T. and Clark, M.R. (2007). 'Seamount fishes: ecology and life histories'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.170–188. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch9>
- Morato, T., Varkey, D.A., Damaso, C., Machete, M., Santos, M., Prieto, R., Santos, R.S. and Pitcher, T.J. (2008). 'Evidence of a seamount effect on aggregating visitors'. *Marine Ecology Progress Series* 357:23–32. <https://doi.org/10.3354/meps07269>
- Morato, T., Kvile, K.Ø., Taranto, G.H., Tempera, F., Narayanaswamy, B.E., Hebbeln, D., Menezes, G.M., C. Wienberg, C., Santos, R.S. and Pitcher, T.J. (2013). 'Seamount physiography and biology in the north-east Atlantic and Mediterranean Sea'. *Biogeosciences* 10:3039–3054. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3039-2013>
- Mouriño, B., Fernandez, E., Serret, P., Harbour, D., Sinha, B. and Pingree, R. (2001). 'Variability and seasonality of physical and biological fields at the great Meteor Tablemount (subtropical NE Atlantic)'. *Oceanologica Acta*. 24(2):1–20.
- Nakajima, R., Yamamoto, H., Kawagucci, S., Takaya, Y., Nozaki, T., Chen, C., Fujikura, K., Miwa, T. and Takai, K. (2015). 'Post-drilling changes in seabed landscape and megabenthos in a deep-sea hydrothermal system, the Iheya North field, Okinawa Trough'. *PLoS ONE* 10(4):e0123095. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123095>
- Nikurashin, M. and Ferrari, R. (2010). 'Radiation and dissipation of internal waves generated by geostrophic motions impinging on small-scale topography: theory'. *Journal of Physical Oceanography* 40(5):1055–1074. <https://doi.org/10.1175/2009jpo4199.1>
- Peng, Z.X. and Mahoney, J.J. (1995). 'Drillhole lavas from the northwestern Deccan Traps, and the evolution of Reunion hotspot mantle'. *Earth Planet. Sci. Lett.* 134(1–2):169–185.
- Pinet, P., Jaquemet, S., Pinaud, D., Weimerskirch, H., Phillips, R.A. and Le Corre, M. (2011). 'Migration, wintering distribution and habitat use of an endangered tropical seabird, Barau's Petrel *Pterodroma barau*'. *Marine Ecology Progress Series* 423:291–302. <https://doi.org/10.3354/meps08971>
- Pinet, P., Jaquemet, S., Phillips, R.A. and Le Corre, M. (2012). 'Sex specific foraging strategy throughout the breeding season in a tropical, sexually monomorphic small petrel'. *Animal Behaviour* 83:979–989. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2012.01.19>
- Pitcher, T.J., Morato, T., Hart, P.J.B., Clark, M.R., Haggan, N. and Santos, R.S. (eds) (2007) 'Preface'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.fmatter>
- Pitcher, T.J., Morato, T., Hart, P.J.B., Clark, M.R., Haggan, N. and Santos, R.S. (2008). *Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation*. New York, USA: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470691953>
- Postaire, B., Bruggemann, J.H., Magalon, H. and Faure, B. (2014). 'Evolutionary Dynamics in the Southwest Indian Ocean Marine Biodiversity Hotspot: A Perspective from the Rocky Shore Gastropod Genus *Nerita*'. *PLoS ONE* 9(4):e95040. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095040>
- Raj, R.P.N., Peter, B.N. and Pushadas, D. (2010). 'Oceanic and atmospheric influences on the variability of phytoplankton bloom in the Southwestern Indian Ocean'. *Journal of Marine Systems* 82(4): 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.05.009>
- Ramirez-Llodra, E., Shank, T.M. and German, C.R. (2007). 'Biodiversity and Biogeography of Hydrothermal Vent Species: Thirty Years of Discovery and Investigations'. *Oceanography* 20(1):30–41. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.78>
- Ravokatra, T. (2014). 'Conditions environnementales dans le Sud-ouest de l'Océan Indien: entre processus régionaux et mécanisme local'. Master's thesis. Reunion and Antananarivo, Madagascar: Reunion and Antananarivo Universities.
- Read, J.F., Lucas, M.I., Holley, S.E. and Pollard R.T. (2000). 'Phytoplankton, nutrients and hydrography in the frontal zone between the Southwest Indian Subtropical gyre and the Southern Ocean'. *Deep Sea Research Part I* 47(12):2341–2368. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(00\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00021-2)
- Richer De Forges, B., Koslow, J.A. and Poore, G.C.B. (2000). 'Diversity and endemism of the benthic seamount fauna in the south-west Pacific'. *Nature* 405:944–947. <https://doi.org/10.1038/35016066>

- Roberts, C.M., McClean, C.J., Veron, J.E.N., Hawkins, J.P., Allen, G.R. (2002) 'Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs'. *Science* 295:1280–1284. <https://doi.org/10.1126/science.1067728>
- Rogers, A.D. (1994). 'The biology of seamounts'. *Advances in Marine Biology* 13:305–350.
- Rogers A.D. (2004). 'The biology, ecology and vulnerability of seamount communities'. Report for the World Conservation Union for the 7th Convention of Parties, Convention for Biodiversity, Kuala Lumpur, 8–19 February.
- Rogers, A.D. (2012). *An ecosystem approach to management of seamounts in the Southern Indian Ocean: volume 1: overview of seamount ecosystems and biodiversity*. Gland, Switzerland: IUCN.
- Rogers, A.D., Baco, A., Griffiths, H. (2007). 'Corals on seamounts'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.141–169. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch8>
- Rogers, A., Alvheim, O., Bemanaja, E., Benivary, D., Boersch-Supan, P., Bornman, T., Cedras, R., Plessis, N.D., Gotheil, S., Høines, Å., Kemp, K., Kristiansen, J., Letessier, T., Mangar, V., Mazungula, N., Mørk, T., Pinet, P., Read, J. and Sonnekus, T. (2009). 'Preliminary Cruise Report "Dr. Fritjof Nansen", Southern Indian Ocean Seamounts'. IUCN/UNDP/ASCLME/NERC/EAF Nansen Project 2009 Cruise 410, 12 November–19 December.
- Rogers, A.D. and Gianni, M. (2010). 'The Implementation of UNGA Resolutions 61/105 and 64/72 in the Management of Deep-Sea Fisheries on the High Seas'. Report prepared for the Deep-Sea Conservation Coalition. London, UK: International Programme on State of the Ocean.
- Rogers, A.D. and Taylor, M.L. (2012). 'Benthic biodiversity of seamounts in the southwest Indian Ocean Cruise report'. R/V James Cook 066 Southwest Indian Ocean Seamounts expedition, 7 November–21 December 2011.
- Rogers, A.D., Tyler, P.A., Connelly, D.P., Copley, J.T., James, R., Larter, R.D., Linse, K., Mills, R.A., Naveira-Garabato, A., Pancost, R.D., Pearce, D.A., Polunin, N.V.C., German, C.R., Shank, T., Boersch-Supan, P.H., Alker, B., Aquilina, A., Bennett, S.A., Clarke, A., Dinley, R.J.J., Graham, A.G.C., Green, D., Hawkes, J.A., Hepburn, L., Hilario, A., Huvenne, V.A.I., Marsh, L., Ramirez-Llodra, E., Reid, W.D.K., Roterman, C.N., Sweeting, C.J., Thatje, S. and Zwirgmaier, K. (2012). 'The discovery of new deep-sea hydrothermal vent communities in the Southern Ocean and implications for biogeography'. *PLoS Biology* 10(1):e1001234. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001234>
- Romanov, E.V. (2003). *Summary and review of Soviet and Ukrainian scientific and commercial fishing operations on the deepwater ridges of the southern Indian Ocean*. FAO Fisheries Circular 991. Rome, Italy: FAO.
- Rowden, A.A., Dower, J.F., Schlacher, T.A., Consalvey, M. and Clark, M.R. (2010). 'Paradigms in seamount ecology: fact, fiction, and future'. *Mar Ecol* 31(suppl 1):226–239.
- Samadi, S., Bottan, L., Macpherson, E. (2006) 'Seamount endemism questioned by the geographical distribution and population genetic structure of marine invertebrates'. *Marine Biology* 149: 1463–1475. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0306-4>
- Sansón, L.Z. and Provenza, A. (2009). 'The effects of abrupt topography on plankton dynamics'. *Theoretical Population Biology* 76:258–265.
- Santos, R.S., Christiansen, S., Christiansen, B. and Gubbay, S. (2009). 'Toward the conservation and management of Sedlo Seamount: A case study'. *Deep-Sea Research Part II* 56:2720–2730. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.031>
- Schmidt, R. and Schmincke, H.-U. (2000). 'Seamounts and Island Building'. In: H. Sigurdsson (ed.). *Encyclopedia of Volcanoes*, pp.383–402. San Diego, USA: Academic Press.
- Schmidt, S. and Christiansen, S. (2004). *The Offshore MPA Toolbox: Implementing Marine Protected Areas in the North-east Atlantic Offshore: Seamounts—A Case Study*. Hamburg and Frankfurt am Main, Germany: OASIS and WWF Germany.
- Serpetti, N., Taylor, M.L., Brennan, D., Green, D.H., Rogers, A.D., Paterson, G.L.J. and Narayanaswamy, B.E. (2016). 'Ecological adaptations and commensal evolution of the Polynoidae (Polychaeta) in the Southwest Indian Ocean Ridge: A phylogenetic approach'. *Deep Sea Research Part II* 137: 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.06.004>
- Shank, T.M. (2004). 'The evolutionary puzzle of seafloor life'. *Oceanus* 42(2):78–85.
- Shotton, R. (2006). *Management of demersal fisheries resources of the Southern Indian Ocean*. Rome, Italy: FAO.
- Siedler, G., Rouault, M., Biastoch, A., Backeberg, B., Reason, C. and Lutjeharms, J.R.E. (2009). 'Modes of the southern extension of the East Madagascar Current'. *Journal of Geophysical Research* 114:C01005. <https://doi.org/10.1029/2008JC004921>
- Spalding, M.F., Fox, H.E., Allen, G.R., Davidson, N., Ferdaña, Z.A., Finlayson, M., Halpern, B.S., Jorge, M.A., Lombana, A., Lourie, S.A., Martin, K.D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, C.A. and Robertson, J. (2007). 'Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas'. *Bioscience* 57(7):573–583. <https://doi.org/10.1641/B570707>

- Srokosz, M. A., Quartly, G.D. and Buck, J.J.H. (2004). 'A possible plankton wave in the Indian Ocean'. *Geophysical Research Letter* 31:L13301. <https://doi.org/10.1029/2004GL109738>
- Srokosz, M.A. and Quartly, G.D. (2013). 'The Madagascar Bloom: A serendipitous study'. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118:14-25. <https://doi.org/10.1029/2012JC008339>
- St. Laurent, L. and Garrett, C. (2002). 'The role of internal tides in mixing the deep ocean'. *Journal of Physical Oceanography* 32:2882-2899. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<2882:TROI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<2882:TROI>2.0.CO;2)
- Staudigel, H. and Clague, D.A. (2010). 'The geological history of deep-sea volcanoes: Biosphere, hydrosphere, and lithosphere interactions'. *Oceanography* 23(1):58-71. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.62>
- Stocks, K.I. and Hart, P.J.B. (2007). 'Biogeography and biodiversity of seamounts'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.252-281. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch13>
- Stocks, K.I. (2009). SeamountsOnline: an online information system for seamount biology. Version 2009-1. Available at: <http://seamounts.sdsc.edu>
- Tao, C., Lin, J., Guo, S., Chen, Y.J., Han, G.W.X., German, C.R., Yoerger, D.R., Zhu, J., Zhou, N., Su, X., Baker, E.T. and DY115-19 Science Party. (2007). 'First discovery and investigation of a high-temperature hydrothermal vent field on the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge'. *EOS Trans AGU, Fall Meet Suppl: Abstract T52B-07*.
- Tao, C. et al. (2012). 'First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge'. *Geology* 40:47-50. <https://doi.org/10.1130/G32389.1>
- Thompson, D.R. (2007). 'Air-breathing visitors to seamounts: Importance of seamounts to seabirds'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.245-251. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch12c>
- Townsend, C.H. (1935). 'The distribution of certain whales as shown by logbook records of American whaleships'. *Zoologica* 19(1):1-50.
- Tracey, D., Rowden, A., Mackay, K. and Compton, T. (2011). 'Habitat-forming coldwater corals show affinity for seamounts in the New Zealand region'. *Marine Ecology Progress Series* 430:1-22. <https://doi.org/10.3354/meps09164>
- UNCLOS, art. 256, (1982). UN General Assembly, *Convention on the Law of the Sea*, 10 December 1982. Available at: <http://www.refworld.org/docid/3dd8fd1b4.html>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2006). *Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas*. UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 178. Nairobi, Kenya and Gland, Switzerland: UNEP and IUCN.
- Von der Heyden, S., Lipinski, M.R. and Matthee, C.A. (2010). 'Remarkably low mtDNA control region diversity in an abundant demersal fish'. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 55:1183-1188. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.09.018>
- Van Dover, C.L., German, C.R., Speer, K.G., Parson, L.M. and Vrijenhoek, R.C. (2002). 'Evolution and biogeography of deep-sea vent and seep invertebrates'. *Science* 295:1253-1257. <https://doi.org/10.1126/science.1067361>
- Van Dover, C.L., Humphris, S.E., Fornari, D., Cavanaugh, C.M., Collier, R., Goffredi, S.K., Hashimoto, J., Lilley, M.D., Reysenbach, A.L., Shank, T.M., Von Damm, K.L., Banta, A., Gallant, R.M., Götz, D., Green, D., Hall, J., Harmer, T.L., Hurtado, L.A., Johnson, P., McKiness, Z.P., Meredith, C., Olson, E., Pan, I.L., Turnipseed, M., Won, Y., Young III, C.R. and Vrijenhoek, R.C. (2001). 'Biogeography and ecological setting of Indian Ocean hydrothermal vents'. *Science* 294:818-823.
- Van Dover, C.L. (2012) 'Hydrothermal vent ecosystems and conservation'. *Oceanography* 25:313-316. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.36>
- Vereshchaka, A.L. (1995). 'Macroplankton in the near-bottom layer of continental slopes and seamounts'. *Deep-Sea Research Part I* 42:1639-1668. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00065-E](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00065-E)
- Verron, J. and Le Provost, C. (1985). 'A numerical study of quasigeostrophic flow over topography'. *Journal of Fluid Mechanics* 154:231-252. <https://doi.org/10.1017/S0022112085001501>
- Weimerskirch, H., Le Corre, M., Jaquemet, S. and Marsac, F. (2005). 'Foraging strategy of a tropical seabird, the red-footed booby, in a dynamic marine environment'. *Marine Ecology Progress Series* 288:251-261. <https://doi.org/10.3354/meps288251>
- Wessel, P. (2007) 'Seamount characteristics'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.3-40. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch1>
- Wessel, P., Sandwell, D.T. and Kim, S.-S. (2010). 'The global seamount census'. *Oceanography* 23:24-33. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.60>

- White, M. and Mohn, C. (2002). 'Seamounts: a review of physical processes and their influence on the seamount ecosystem'. In: OASIS *Oceanic Seamounts: An Integrated Study* Contract No. EVK3-CT-2002-00073-OASIS. Hamburg, Germany: OASIS.
- White, M., Bashmachnikov, I., Aristegui, J. and Martins, A. (2007). 'Physical processes and seamount productivity'. In: T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos (eds) *Seamounts: ecology, fisheries and conservation*, pp.65–84. Oxford, UK: Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch4>
- Woodall, L.C., Robinson, L.F., Rogers, A.D., Narayanaswamy, B.E. and Paterson, G.L.J. (2015). 'Deep-sea litter: a comparison of seamounts, banks and a ridge in the Atlantic and Indian Oceans reveals both environmental and anthropogenic factors impact accumulation and composition'. *Frontiers in Marine Science* 2. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00003>
- Yen, P.P.W., Sydeman, W.J. and Hyrenbach, K.D. (2004). 'Marine bird and cetacean associations with bathymetric habitats and shallow-water topographies: implications for trophic transfer and conservation'. *Journal of Marine Systems* 50:79–99. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.09.015>
- Yesson, C., Clark, M.R., Taylor, M. and Rogers, A.D. (2011). 'The global distribution of seamounts based on 30-second bathymetry data'. *Deep Sea Research Part I* 58:442–453. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.02.004>
- Zeitzschel, B. (ed.) (1973). *The biology of the Indian Ocean. Ecological studies* 3. New York, Heidelberg and Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-65468-8>









INTERNATIONAL UNION  
FOR CONSERVATION OF NATURE

GLOBAL MARINE & POLAR PROGRAMME  
Rue Mauverney 28  
1196 Gland  
Switzerland  
Tel. +41 22 999 0299  
Fax +41 22 999 0002  
[www.iucn.org](http://www.iucn.org)

