



Evolution & Systématique des algues rouges

Line Le Gall

► To cite this version:

Line Le Gall. Evolution & Systématique des algues rouges. Biodiversité. Université Pierre & Marie Curie - Paris 6, 2012. tel-03631355

HAL Id: tel-03631355

<https://mnhn.hal.science/tel-03631355>

Submitted on 5 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Université Pierre et Marie Curie – Paris 6

Spécialité

BIOLOGIE EVOLUTIVE

Line Le Gall

Maître de conférences

MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Département Systématique et évolution

UMR7138 Systématique, Adaptation, Evolution



Évolution et biodiversité des algues rouges (Rhodophyta)

Soutenue le 12 juin 2012 devant le Jury constitué de

Charles-François Boudouresque (rapporteur)

Purificación López García (rapporteur)

Christine Maggs (rapporteur)

Juliet Brodie (examineur)

Christophe Destombe (examineur)

Hervé Le Guyader (examineur)

1. SOMMAIRE

1. SOMMAIRE	3
2. CURRICULUM VITAE	5
3. LISTE DES PUBLICATIONS ET DES COMMUNICATIONS	13
3.1. Publications dans des revues d'audience internationale	14
3.2. Communications lors de congrès	15
4. ACTIVITES DE RECHERCHE	19
4.1. Introduction	22
4.2. Contexte	28
4.3. Présentation des résultats obtenus sur la phylogénie des Florideophyceae, des Corallinophycidae et des Corallinales	29
4.4.1. Phylogénie des Florideophyceae	29
4.4.2. Phylogénie des Corallinophycidae	32
5. PERSPECTIVES DE RECHERCHE	35
5.1. Préambule	36
5.2. Introduction	37
5.3. State of the Art	39
5.4. Objectives	42
5.5. Expected results	43
5.5.1. Task 1: Molecular ecology	43
5.5.2. Task 2: High-throughput morphometric analyses of paleontological, historically important and modern specimens	45
5.5.3. Task 3: Time calibrated phylogenies	46
5.5.4. Task 4: Understanding coralline response to global changes	47
5.5.5. Task 5: Exhibition in the future gallery of botany	48
6. CONCLUSIONS	51
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55
8. REMERCIEMENTS	63

2. CURRICULUM VITAE

SPECIALITES SCIENTIFIQUES : Phycologie - biosystématique des Florideophyceae - phylogénie moléculaire des Rhodophyta - écologie des communautés d'algues, organisation d'expéditions scientifiques.

SCIENTIFIC SKILLS: Phycology - Systematics of the Florideophyceae – Molecular phylogenetics – DNA barcoding - Community ecology of seaweeds – Scientific expedition organization.

ETAT CIVIL

Nom et prénom : **LE GALL Line**

Date et lieu de naissance : **13 avril 1976 à Lisieux, Calvados (36 ans)**

Adresse : **13 rue Désirée, 75020 Paris. Situation familiale : Mariée, un enfant (6 ans)**

PARCOURS (Les chiffres en indice correspondent aux publications référencées en 3 (p. 11)

- **2007-présent Maître de conférences au Muséum national d'histoire naturelle, Paris**

Département : **Systématique et évolution**

Laboratoire : **Equipe Phylogénie, UMR 7138 Systématique, Adaptation et Evolution**

Spécialité : Mes principaux objectifs de recherche sont: i) d'évaluer la biodiversité des macroalgues marines en combinant une approche morpho-anatomique et des outils moléculaires, comme le code barre ADN^{18, 17, 15, 14, 13, 9} ; et ii) d'inférer les relations phylogénétiques au sein des algues rouges^{16, 12, 10}.

- **2003-2007 Stage post-doctoral, University of New Brunswick (Canada)**

Laboratoire : **Centre for Environmental and Molecular Algal Research**

Encadrement : **Professeur Gary Saunders, Canada Research Chair in Molecular Systematics & Biodiversity et Director & Algal Curator du Connell Memorial Herbarium**

Projet "barcode of life", novembre 2005 – avril 2007

Sujet : J'ai activement contribué à la mise au point des protocoles d'amplification des code à barres pour les algues et j'ai généré un jeu de données d'environ 1000 séquences du fragment « barcode » du gène CO1 pour les algues du Canada, plus particulièrement, les Phylloporaceae¹¹ et les Nemaliales¹⁴.

Projet "phylogénie", novembre 2003 – octobre 2005

Sujet : Le principal objectif de cette étude était d'inférer les relations phylogénétiques au sein des algues rouges en combinant des données moléculaires en provenance de trois génomes (nucléaire/mitochondrial/chloroplastique) associées à des observations anatomiques. Dans ce contexte, j'ai développé de nouveaux marqueurs génétiques (actine, EF2, CO1, CO2, et CO3) et pu établir les relations de parenté entre les ordres de la classe des Florideophyceae⁶ et des familles de l'ordre des Rhodymeniales⁸.

- **1999-2002 Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie (France)**

Laboratoire : **Laboratoire de Biologie et Biotechnologies Marines**

Spécialité : **Physiologie, Biologie des organismes, Populations, Interactions**

Encadrement : **Professeur J. Cosson & Docteur Anne-Marie Rusig**

Sujet : **Utilisation de protoplastes et de spores de *Palmaria palmata* pour l'analyse cellulaire des mécanismes de régénération chez les algues rouges²⁻⁵.**

- **1999 DEA d'Océanologie Biologique de l'Université Pierre et Marie CURIE**

Laboratoire : **Laboratoire de Biologie et Biotechnologies Marines de l'Université de Caen**

Encadrement : **Docteur Anne-Marie Rusig**

Sujet : **« Production et régénération de protoplastes de *Palmaria palmata*. Dynamique du cytosquelette chez les protoplastes des Rhodophycées. »¹**

Diplôme ERASMUS de Zoologie marine (Université Paris VI, Université Libre de Bruxelles, Université Catholique de Louvain, Université de Saint Jacques de Compostelle)

COMPETENCES TECHNIQUES

- **Biologie Moléculaire** : extraction d'ADN et d'ARN, PCR et RT PCR, séquençage, Southern blot
- **Analyses phylogéniques** : méthodes de parcimonie, distance et de vraisemblance & analyses bayésiennes
- **Histologie** : coupes à congélation, microscopie optique, microscopie confocale
- **Échantillonnage** : technique des cadrats, échantillonnage et balisage en plongée
- **Langues** : anglais (courant), espagnol (courant), allemand (notions scolaires)
- **Permis** : titulaire du permis de conduire B, titulaire du permis bateau hauturier
- **Plongée** : titulaire du certificat d'aptitude à l'hyperbarie classe 2B, chef de plongée scientifique du CNRS, chef d'opération hyperbare

RESPONSABILITES INTERNATIONALES

Implication dans des instances internationales

- 2008-2012 Membre de l'« implementation board of the Consortium for the Barcode Of Life » (CBOL)
- 2010-2015 Représentante française au sein du « Scientific Steering Committee (SSC) of the International Barcode of Life Initiative »
- 2008-2015 Co-responsable de l'initiative d'étude des macroalgues marines de l'« International Consortium Initiative » de iBOL.
- Depuis 2010 Membre du comité de pilotage du « Global Seaweed Initiative » dont l'objectif est de tisser les liens entre la recherche fondamentale en phycologie, les industriels et des professionnels du marketing.

Responsabilité lors de congrès internationaux

- Organisation d'un atelier sur le choix des marqueurs pour le projet DNA-barcoding lors du 3ème congrès international du barcode, Mexico, 13 Novembre 2009.
- Présidence de la session sur le code à barres des algues et des protistes lors du 3ème congrès international du barcode, Mexico, 15 Novembre 2009.
- Participation à l'organisation du second congrès européen du barcode of life, Braga (Portugal), 1-5 juin 2010.
- Participation à l'organisation du 4ème congrès international du barcode, Adelaide, Novembre 2011.

Participation à des groupes de réflexion et de travail

- J'ai été invitée à participer à un Groupe de travail du réseau d'excellence EDIT (European Distributed Institute of Taxonomy) pour réfléchir sur ce que sera le futur de la taxinomie. Oxford, 3-4 décembre 2007.
- J'ai été convié à prendre part à un groupe de travail pour mettre en place une initiative globale d'étude des algues. Londres, 10-15 janvier 2010.

Responsabilités éditoriales

- **Corédactrice invitée** (avec Gary W. Saunders) de *Cryptogamie, Algologie* pour l'édition d'un numéro spécial sur le code barre ADN des algues (Volume 31, fascicule 4, 2010) qui a réunit 11 articles originaux de recherche (209 pages).
- **Corédactrice en chef** (avec Ian Probert) de *Cryptogamie, Algologie* depuis mars 2011.
- **Arbitre pour les revues internationales**

Algae, Aquaculture, Biological Letters, Botanica Marina, Chinese Journal of Oceanology and Limnology, Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, Cryptogamie Algologie,

European Journal of Phycology, Journal of Eukaryotic Microbiology, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Journal of Phycology, Molecular Biology and Evolution, Molecular Phylogenetics and Evolution, Phycological Research, Proceedings of the Royal Society London (B)

RESPONSABILITES DANS DES INSTANCES NATIONALES

- Co-porteur avec Jean-Yves Rasplus du projet Genoscope intitulé « [Accurate SPECiEs Delimitation and IDentification of Eukaryotic biodiversity using DNA markers](#) » (SPEED-ID) visant à mettre à disposition de la communauté des systématiciens français un accès au séquençage gratuit au Genoscope en 2010 et 2011.
- Membre du comité scientifique du projet « [Bibliothèque du Vivant](#) » dont l'objectif est de caractériser la biodiversité sur le plan moléculaire à toutes les échelles taxinomiques via un accès aux infrastructures du Genoscope grâce à un financement conjoint de l'INEE, de l'INRA et du MNHN, 2011-2013.
- Membre du comité scientifique du [Réseau Thématique Pluridisciplinaire \(RTP\) Génomique Environnementale](#) (GE) initié par l'INEE dont l'objectif est d'anticiper et suivre les évolutions des nouvelles technologies de séquençage (NTS) et leurs applications à la génomique environnementale, depuis 2011.
- Membre nommé du [conseil scientifique du département Santé des Plantes et Environnement](#) de l'INRA, 2012-2016.
- Membre élu du conseil d'administration de la [Société Phycologique de France](#), 2011-2015.

RESPONSABILITES AU SEIN DU MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

- Coresponsable avec Sarah Samadi de l'[ATM « Taxinomie moléculaire, DNA Barcode & gestion durable des collections »](#) depuis janvier 2011.
- Membre du comité de pilotage de l'[ATM « Taxinomie moléculaire, DNA Barcode & gestion durable des collections »](#), 2009-2013.
- Responsable de l'organisation de la plongée scientifique dans le cadre de la campagne « [Mozangascar 2009-2010](#) ».

EXPERIENCES DE TERRAIN ET ORGANISATION D'EXPEDITIONS INTERNATIONALES

Canada (2004-2007): [Bay of Fundy, Notherberland Strait, rivière St Laurent, Terre-Neuve](#); **Australie** (2005): [South Australia, Victoria et Tasmania](#); **New Caledonia** (2007); **Europe** (2007-2011): [Manche \(golfe normano-breton\), Côtes atlantiques \(françaises, espagnoles et portugaises\) et Méditerranéenne \(française, espagnoles, italiennes, croates\)](#); **Madagascar** (2008, 2010) ; **Guadeloupe** (2012) ; **Papouasie** (2012).

Participation à la mise en place de l'expédition « [ATIMO VATAE](#) » organisée conjointement par le Muséum et ProNatura International dans le cadre de « [la planète revisitée](#) » d'avril à juin 2010 et dont l'objectif est d'explorer la faune et la flore marine du grand sud Malgache. Au cours de l'expédition, j'étais chef de mission à bord de l'Antéa, navire de la flotte océanographique de l'IRD.

FINANCEMENTS OBTENUS POUR DES PROJETS DE RECHERCHE

- Plan Pluri Formation (2008) : [Biodiversité des algues du golfe normano-breton](#) (20K€).
- Bonus Qualité Recherche (2008) : [Étude de la diversité des algues marines des côtes françaises](#) (5K€).

- **Barcoding des macroalgues** (2008) attribué par le Parc National de Port-Cros (5K€).
- **Plan Pluri Formation** : (2009) Etude de la diversité moléculaire des algues des côtes atlantiques et méditerranéennes de France (2010) (7K€).
- **Étude spatio-temporelle de la biodiversité des macro algues du Parc naturel marin d'Iroise** : développement d'indices de suivi de la biodiversité attribué par le Parc naturel marin d'Iroise (2011-2012)(34K€)
- **Action Transversale du Muséum** : (2011) Analyse des spécimens provenant de la mission ATIMO VATAE (3K€). (2012) Exploration de la diversité au sein du genre *Porphyridium* (1.5K€). Étude de la diversité des corallines (algues rouges) fossiles et présentes dans le bassin méditerranéen et des côtes Atlantiques adjacentes (5K€), Etude spatio-temporelle de la biodiversité des macroalgues associées aux communautés de *Laminaria digitata* et *Laminaria hyperborea* (2,5K€).

ENCADREMENT ET EVALUATION D'ETUDIANTS ET DE STAGIAIRES POST-DOCTORANTS

Post-doctorants

- **Toni Manghisi** novembre 2010 - novembre 2011. Récipiendaire d'une bourse posdoctorale de la mairie de Paris. "Assessment of Mediterranean Halymeniales and Sebdeniales biodiversity using an integrated taxonomy approach including DNA-barcoding."
- **Viviana Peña - Freire** octobre 2011 - septembre 2013. Récipiendaire d'une bourse posdoctorale du ministère de l'éducation espagnol en co-encadrement avec Olivier De Clerck, Université de Ghent. Phylogénie du genre *Lithophyllum* (Corallinales).

Doctorants

- **Lucie Bittner** octobre 2006 - novembre 2009. "Phylogénie des Corallinales (*Rhodophyta*) et analyse de leur diversité génétique dans le Pacifique Sud" co-encadrement à hauteur de 25% avec Claude Payri (50%) et Bruno de Reviers (25%).
- **Julie Martin-Lescanne** mai 2006 - octobre 2009. "Phylogénie et biogéographie des morphotypes du complexe *Laurencia* (*Ceramiales*, *Rhodophyta*)" co-encadrement à hauteur de 30% avec Claude Payri (15%), Bruno de Reviers (25%) et Florence Rousseau (30%).
- **Alexandre Geoffroy** janvier 2009 - 2012 "Identification des espèces et des souches cultivées d'algues marines et estimation des ressources génétiques par des approches conjointes de barcoding et de génétique des populations. » co-encadrement à hauteur de 50% avec Christophe Destombe (50%).
- **Marine Robuchon** janvier 2011 - 2013 « Etude spatio-temporelle de la diversité des macroalgues marines des côtes françaises atlantiques : développements d'indices de suivi de la biodiversité » co-encadrement administratif avec Bruno de Reviers, co-encadrement scientifique à hauteur de 50% avec Myriam Valero (50%).

Participation à des jurys de thèses

- **Carolina Pena – Martin** 28 avril 2011, Universidad de Alicante. «*El género Dasya (Rhodophyta, Dasyaceae) en la península Ibérica y las islas Baleare*»
- **Dioli Ann Payo** 26 septembre 2011, University of Gent « *The genus Portieria in the Indian Ocean* »

Participation à des comités de thèses

- **Amélie Pichonet** (2007-2011) « Variabilité, Dispersion et Reproduction chez les bryophytes : étude du genre *Dicranum* Hedw. ». Sous la direction de Jacques Bardat.

- **Régis Gallon** (2011-2014) « Les communautés à rhodophytes des habitats rocheux subtidiaux du Golfe Normand Breton : une approche fonctionnelle ». Sous la direction d'Eric Feunteun.
- **Jean-Charles Leclerc** (2011-2014) Etude du réseau trophique associé aux communautés a *Laminaria hyperborea* en conditions naturelles et exploitées, en Bretagne. Sous la direction de Dominique Davout et Pascal Riera.

Encadrement de doctorants étrangers en résidence

- **Carolina Pena–Martin** (Universidad de Alicante, Espagne) 3-28 septembre 2009. Réalisation des séquences d'ADN de 25 spécimens de *Dasya* (Ceramiales) en vue d'effectuer une phylogénie moléculaire pour compléter l'étude morpho-anatomique réalisée dans le cadre de la thèse.
- **Valeria Fiore** (Università de Messina, Italie) 16 février 2010 - 17 juillet 2010. Réalisation d'une phylogénie moléculaire des Rhodymeniales du détroit de Messina.
- **Clara Bertuccio** (Università de Messina, Italie) 16 février 2010 - 17 juillet 2010. Etude de la diversité des algues des lagunes côtières de Sicile par une approche de DNA-barcoding.
- **Maria Machín - Sánchez** (Universidad de La Laguna) 1^{er} septembre – 12 décembre 2011. Etude du complexe *Laurencia* dans l'océan Atlantique par une approche de systématique moléculaire.

Étudiants en stages volontaires

- **Elisabeth Catala** (étudiante de L3 de l'Université de Nice) avril à juillet 2008 stage de formation à la taxinomie moléculaire des algues.
- **Laure-Elise Hochart** (étudiante de L1 de l'Université Pierre et Marie Curie) juin et juillet 2008 stage d'initiation à la taxinomie moléculaire des algues.
- **Elora Paris** (étudiante de L1 de l'Université Pierre et Marie Curie) juillet 2011 stage d'initiation à la taxinomie des algues.

ACCEUIL DE CHERCHEURS EN RESIDENCE

- **Marina Morabito**, Università de Messina, Italie. Étude de la diversité du complexe d'espèce *Bangia* grâce à l'outil barcode (juillet à septembre 2011).
- **Charlene Mayes**, University of New Brunswick, Canada. Étude du complexe d'espèce *Acrosiphonia* dans le cadre d'un congé sabbatique (septembre et octobre 2011).
- **Morgan Vis**, University of Ohio, USA, chercheur invitée MNHN. Étude de la collection de Batrachospermales de la collection Sirodot dans le cadre d'un congé sabbatique (septembre à décembre 2011).

EVALUATION DE PROJETS

- Arbitre d'un projet de recherche déposé pour l'obtention d'une subvention du **National Geographic/Waitt foundation** en 2011.
- Arbitre d'un projet de stage postdoctoral déposé dans le cadre du Programme **BEST (Bourses d'échanges scientifiques et technologiques)** de l'IRD en 2010.
- Arbitre de deux projets pour l'appel à projet 2009 de la **Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité**
- Arbitre d'un projet pour l'appel à projet innovant 2012 de **l'INRA**
- Arbitre de dix projets dans le cadre de l'appel à projets en génomique environnementale (**APEGE**) organisé par **l'INEE, CNRS**.

EVALUATION DE CARRIERE

- Membre expert du jury de [concours de technicien externe CNRS n°353 T BAP A « milieux naturels et ruraux »](#), 2010.
- Membre du jury du [concours de Chargé de Recherche INRA concours n°4 "Systématique et biologie des populations et des communautés"](#), 2012.

ENSEIGNEMENTS

- Co-organisation du tronc commun du Master « [Evolution, héritage naturel et société](#) » (Muséum national d'histoire naturelle, Paris), depuis 2007.
- Organisation et participation au module de l'école doctorale du Muséum national d'histoire naturelle intitulé « [DNA Barcoding](#) ». 6 heures de cours en 2008, 12 heures de cours en 2009, 18 heures de cours en 2010, 12 heures de cours en 2011, 16 heures de cours en 2012.
- Participation à la sortie de terrain en Normandie organisée dans le cadre de l'option « [Systématique, Evolution et Paléontologie](#) » (Master 1 « [Evolution, héritage naturel et société](#) » du Muséum national d'histoire naturelle, Paris) 1 heure de cours et 4 heures d'équivalent TD en 2008, 2009, 2010 et 2012.
- Présentation intitulée « [Le Barcode un nouvel outil d'expertise taxinomique](#) » dans le cadre des cours du Master 2 E2F. 3 heures en 2009, 2010 et 2011.
- Présentation « [des enjeux d'une initiative code-barre pour l'étude de la biodiversité Eucaryotique](#) » dans le cadre du module Microbiodiversité: structure et fonction dans l'écosystème" coordonné par Laurent Palka et qui a eu lieu du 3 au 5 mai 2011, 1,5 heures de cours.
- Présentation des [expéditions scientifiques modernes](#) (Formation des enseignants assurée par le service de formation continue du Muséum national d'histoire naturelle, Paris) 3 heures en 2008, 10 heures en 2009, 4 heures en 2010.
- Enseignement de la [taxinomie et de l'écologie des algues](#) dans le DU de biologie sous-marine organisé dans le cadre de la formation permanente de l'Université Rennes 1) 5 heures de cours et 6 heures d'équivalent TD en 2009, 8 heures de cours et 20 heures d'équivalent TD en 2011.

RESPONSABILITES AU SEIN DES COLLECTIONS DU MUSEUM

- Chargée de la [collection de micro-algues](#) de l'Herbier National.
- Chargée de la mise en place et de la conservation des [collections de tissus et d'ADN d'algues](#).
- Participation à la mise en place d'une [base de données](#) au sein du MNHN pour héberger les [séquences moléculaires](#).

DIFFUSION DES CONNAISSANCES ET COMMUNICATIONS GRAND PUBLIC

Participation à la Fête de la Science

- 2007 Mise en place d'un atelier intitulé «[des algues, des goûts et des couleurs](#)» au Muséum national d'histoire naturelle.
- 2009 Participation aux activités mises en place par l'[UMR7138](#) à l'UPMC.

Diffusion des connaissances

- Contribution à la rédaction d'un article sur le *kelp du Dhofar* pour le mensuel **Plongée** (juin 2009, n° 20, p 80-86).
- Contribution à la rédaction d'un article sur *l'expédition Mozangascar* dans **Sciences et Avenir** (octobre 2010, n° 764, p 66-70).
- Invitée de l'émission **Micromega** (Radio France International) réalisée par Jean-Yves Casgha & Patrick Chompré et diffusée le 19 septembre 2009.
- Invitée à donner une conférence intitulée « *Voyageur naturaliste du Muséum au XXI^e siècle* » dans le cadre de la présentation des **métiers du Muséum**, 30 janvier 2011, Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution.
- Participation aux **journées de découverte et protection du milieu marin en plongée** et présentation de « *Les prairies d'algues rouges et la faune associée* » avec Eric Feunteun et « *Les laminaires et leurs habitants* » avec Isabelle Coulon, 15 et 16 janvier 2011, Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution.
- Participation à l'émission « *les héros de la biodiversité* » diffusée sur **France 2** à partir du 24 juillet 2010, produite et réalisée par Allain Bougrain Dubourg.

Rédaction d'un ouvrage de diffusion des connaissances

Les algues du littoral, Mer du Nord, Manche, Atlantique, Editions Ouest France, collection Découverte nature, 2011, texte de Line Le Gall, Bruno de Reviers et Florence Rousseau, illustrations de Jose Utge, 32 p.

3. LISTE DES PUBLICATIONS ET DES COMMUNICATIONS

PRODUCTION SCIENTIFIQUE : Depuis ma soutenance de thèse (9 ans) : 19 publications dans des revues à comité de lecture ; 34 communications à des congrès dont trois comme invitée.

SCIENTIFIC COMMUNICATIONS: Since my PhD defence (9 years ago); 19 peer reviewed publications; 34 communications at congresses (three as invited speaker)

3.1. Publications dans des revues d'audience internationale

Les noms des étudiants encadrés sont soulignés. [IF= impact factor 2010, nombre de citations d'après Google Scholar]

19 – Adl, S., et al. including **Le Gall, L.**, (2012). The new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. **Journal of Eukaryotic Microbiology**, in press. [IF=2.39, 0]

18 – Geoffroy, A., **Le Gall, L.**, Destombe, C. (2012) (<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquabot.2012.03.002>). Cryptic introduction of the red alga *Polysiphonia morrowii* Harvey (Rhodomelaceae, Rhodophyta) in the North Atlantic Ocean highlighted by a DNA barcoding approach. **Aquatic Botany**, in press. [IF=2.01, 0]

17 - **Le Gall, L.**, Probert, I. (2011). Editorial. **Cryptogamie, Algologie**, 32 (4): 311-312. [IF=0.25, 0]

16 - Bittner, L., Payri, C.E., Maneveldt, G.W., Couloux, A., Cruaud, C., Reviers, B. de, **Le Gall, L.** (2011) ([doi:10.1016/j.ympev.2011.07.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.ympev.2011.07.019)). Evolutionary history of the Corallinales (Corallinophycidae, Rhodophyta) inferred from nuclear, plastidial and mitochondrial genomes. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, 61 (3): 697-713. [IF=3.88, 0]

15 - Saunders, G.W., **Le Gall, L.**, (2010). Editorial. **Cryptogamie, Algologie**, 31 (4): 373-375. [IF=0.25, 3]

14 - **Le Gall, L.**, Saunders, G.W. (2010). Establishment of a DNA-barcode library for the Nematiales (Rhodophyta) from Canada and France uncovers overlooked diversity in the species *Nemalion helminthoides* (Velley) Batters. **Cryptogamie, Algologie**, 31 (4): 403-422. [IF=0.25, 0]

13 - Manghisi, A., Morabito, M., Bertuccio, C., **Le Gall, L.**, Couloux, A., Cruaud, C., Genovese, G. (2010). Is routine DNA barcoding an efficient tool to reveal introduction of alien macroalgae? The case study of *Agardhiella subulata* (Solieriaceae, Rhodophyta) in Cape Peloro lagoon (Sicily, Italy). **Cryptogamie, Algologie**, 31 (4): 423-434. [IF=0.25, 1]

12 - Verbruggen, H., Maggs, C.A., Saunders, G.W., **Le Gall, L.**, Yoon, H.S., De Clerck, O. (2010). Data mining approach identifies research priorities and data requirements for resolving the red algal tree of life. **BMC Evolutionary Biology** 10: 16. (<http://www.biomedcentral.com/1471-2148/10/16>). [IF=5.20, 11]

11 - **Le Gall, L.**, Saunders, G.W. (2010). DNA barcoding is a powerful tool to uncover algal diversity: a case study of the Phylloporaceae (Gigartinales, Rhodophyta) in the Canadian flora. **Journal of Phycology**, 46 (2): 374-389. [IF=2.27, 16]

10 - **Le Gall, L.**, Payri, C., Bittner, L., Saunders, G.W. (2010). Multigene phylogenetic analyses support recognition of the Sporolithales ord. nov. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, 54 (1): 302-305. [IF=3.88, 9]

09 - Martin Lescanne, J., Rousseau, F., Reviers, B. de, Payri, C., Couloux, A., Cruaud, C. **Le Gall, L.** (2010). Phylogenetic analyses of the *Laurencia* complex (Rhodomelaceae, Ceramiales) support recognition of five genera: *Chondrophycus*, *Laurencia*, *Osmundea*, *Palisada*, and *Yuzurua* stat. nov. **European Journal of Phycology** 45 (1): 51-61. [IF=1.90, 6]

- 08 - Le Gall, L., Saunders, G.W. (2008). Phylogenetic analyses of the red algal order Rhodymeniales supports recognition of the Hymenocladaceae *fam. nov.*, Fryellaceae *fam. nov.*, and *Neogastroclonium gen. nov.* **Journal of Phycology**, 44 (6): 1556-1571. [IF=2.27, 15]
- 07 - Le Gall, L., Rousseau, F., 2008- Book review. Einav, R. 2007. Seaweeds of the eastern Mediterranean coast. Dehradun, India: A.R.G. Gantener Verlag K.G. 266 p., hardcover. **Cryptogamie, Algologie**, 29 (1): 65-98. [IF=0.25, 0]
- 06 - Le Gall, L., Saunders, G.W. (2007). A nuclear phylogeny of the Florideophyceae (Rhodophyta) inferred from combined EF2, small subunit and large subunit ribosomal DNA: Establishing the new red algal subclass Corallinophycidae. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, 43 (3): 1118-1130. [IF=3.88, 28]
- 05 - Deniaud, E., Le Gall, L., Lahaye, M. (2006). Initial observations on glycoside deposition in cell walls of *Palmaria palmata* (L.) Kuntze (Rhodophyta) during spore germination. **Botanica Marina**, 49 (3): 266-269. [IF=1.62, ?]
- 04 - Le Gall, L., Lelong, C., Rusig, A.M., Favrel, P. (2005). Characterization of an actin gene family in *Palmaria palmata* and *Porphyra purpurea* (Rhodophyta). **Cahiers de Biologie Marine**, 46 (3): 311-322. [IF=0.45, 3]
- 03 - Le Gall, L., Pien, S., Rusig, A.M. (2004). Cultivation of *Palmaria palmata* (Palmariales, Rhodophyta) from isolated spores in semi-controlled conditions. **Aquaculture**, 229: 181-191. [IF=2.04, 10]
- 02 - Le Gall, L., Rusig, A.M., Cosson, J. (2004). The organisation of the microtubular cytoskeleton in protoplasts from *Palmaria palmata* (Palmariales, Rhodophyta). **Botanica Marina**, 47: 231-237. [IF=1.62, ?]
- 01 - Le Gall, L., Deniaud, E., Rusig, A.M. (2004). Etude de la phénologie de la reproduction de la Rhodophyceae *Palmaria palmata* le long des côtes françaises de la Manche. **Cahiers de Biologie Marine**, 45: 269-275. [IF=0.45, 0]

3.2. Communications lors de congrès

Communications invitées:

- 03 - Le Gall, L., Anderson, R., Bolton, J., Coppejans, E., De Clerck, O., Reviers, B. de, Rousseau, F., Saunders, G.W., Tsarahevitra, J. Floristic survey of the algal diversity in the south of Madagascar during the Atimo Vatae expedition. 4th barcode of life conference. Adelaide, 28th November -3th December **2011**.
- 02 - Le Gall, L. Advantages, limitations and challenges in developing DNA-barcoding for algae. 5th European Phycological Congress, Rhodes Island, Greece, 4th-9th September **2011**.
- 01 - Le Gall, L., Saunders, G.W. Protistan Barcode Marker: Proposal to CBOL, 3rd barcode of life conference. Mexico, 7th-13th November **2009**.

Communications acceptées par un comité d'organisation:

Les noms des étudiants encadrés sont soulignés.

- 32 - Geoffroy, A., Mauger, S., **Le Gall, L.**, Destombe, C. Cytoplasmic incongruence in *Pylaiella littoralis*: a case of horizontal transfer of chloroplast genomes between species? Congrès du Consortium *Ectocarpus*, Roscoff, France, **2012**.
- 31 - Machín-Sánchez, M., **Le Gall, L.**, Neto, A.I., Díaz-Larrea, J., Cassano, V., Senties, A., Fujii, M. and M.C. Gil-Rodríguez, Preliminary study on diversity of the *Laurencia* complex (Rhodophyta, Ceramiales) in the macaronesian region assessed by DNA-barcoding and phylogenetic inferences. ISMS12 International Symposium in Marine Sciences, Cadiz, Spain, 25th-28th January **2012**.
- 30 - M Robuchon, L Couceiro, M Valero, **Le Gall, L.** Role of the engineering species *Laminaria digitata* on the associated algal community. The **British Phycological Society**, 60th winter meeting, Newcastle, UK, 4th-6th January **2012**.
- 29 - Peña, V., Pardo, C., Hernández-Kantún, J., **Le Gall, L.**, Bárbara, I. & Barreiro, R.: BOLD project "MAERL": Assessing biodiversity of these key species in the OSPAR maritime area using DNA barcodes. The **British Phycological Society**, 60th winter meeting, Newcastle, UK, 4th-6th January **2012**.
- 28 - Peña, V., Bárbara, I., Barreiro, R., Pardo, C., De Clerck, O., **Le Gall, L.** Occurrence of *Mesophyllum* sp. along the Atlantic Iberian coast. The **British Phycological Society**, 60th winter meeting, Newcastle, UK, 4th-6th January **2012**.
- 27 - Peña, V., Bárbara, I. , Barreiro, R. Pardo, C., De Clerck, O., **Le Gall, L.** Assessment of the genus *Lithophyllum* in the Atlantic Iberian Peninsula: an ongoing research project supported by the British Phycological Society. The **British Phycological Society**, 60th winter meeting, Newcastle, UK, 4th-6th January **2012**.
- 26 - Robuchon, M., **Le Gall, L.**, Couceiro, L., Valero, M. Studying kelp forests to address fundamental ecological questions. Ecological European Federation Congress, Avila, Espagne, 25th-29th September **2011**.
- 25 - Geoffroy, A., **Le Gall, L.**, Destombe, C. Molecular systematics reveal the cryptic invasive specie: the rhodophyte *Polysiphonia morrowii* Harvey. World Conference on Marine Biodiversity, Aberdeen, UK, 26th-30th September **2011**.
- 24 - Pena, C., **Le Gall, L.**, Crespo, M.B., Gómez-Garreta, A. Revision of *Dasya* C. Agardh (Dasyaceae, Rhodophyta) in the western mediterranean basin. 5th European **Phycological Congress**, Rhodes Island, Greece, 4th-9th September **2011**. (**Award for the best student poster**)
- 23 - Manghisi, A., Ribera, M.A., Gargiulo, G., Morabito, M., **Le Gall, L.** Diversity of the Sebdeniales (Rhodophyta) in the Mediterranean flora assessed by DNA barcoding and phylogenetic inferences: taxonomical implication. 5th European **Phycological Congress**, Rhodes Island, Greece, 4th-9th September **2011**.
- 22 - Bertuccio, C., Armeli Miniante, S., Manghisi, A., Genovese, G., **Le Gall, L.**, Morabito, M. Detection of alien species in two Italian coastal lagoons using the DNA-barcoding tool. 5th European **Phycological Congress**, Rhodes Island, Greece, 4th-9th September **2011**.
- 21 - Morabito, M., **Le Gall, L.**, Manghisi, A., Genovese, G. New insights from DNA-barcoding into the relationships within the *Bangia* complex in Europe. 5th European **Phycological Congress**, Rhodes Island, Greece, 4th-9th September **2011**.

- 20 - Geoffroy, A., **Le Gall, L.**, Destombe, C. First report in the Atlantic of the cryptic invasive species: the Rhodophyta *Polysiphonia morrowii* Harvey. 13th Congress of the European Society for Evolutionary Biology, Tuebingen, Germany, 20th-25th August **2011**.
- 19 - **Le Gall, L.**, Reviers, B. de, Rousseau F. État des lieux du barcode chez les algues. Société Française de Phycologie, Villefranche sur Mer, France, 4-5 avril **2011**.
- 18 - Geoffroy, A., **Le Gall, L.**, Destombe, C. Mise en évidence de l'introduction de l'algue rouge *Polysiphonia morrowii* Harvey, (Rhodomélacées), en Atlantique Nord. Société Française de Phycologie, Villefranche sur Mer, France, 4-5 avril **2011**.
- 17 - Geoffroy, A., Mauger, S., **Le Gall, L.**, Destombe, C. Mise en évidence de l'introduction de l'algue rouge *Polysiphonia morrowii* Harvey, (Rhodomélacées), en Atlantique Nord sur les côtes Bretonnes. Colloque « Ecologie 2010 », premier colloque national d'écologie scientifique, Montpellier, France, 2-4 septembre **2010**.
- 16 - Morabito, M., Manghisi, A., Fiore, V., Bertuccio C., Armeli Minicante, S. **Le Gall, L.** Genovese, G. Exploring macroalgal diversity along Italian coasts: a first approach by DNA-barcoding. European Congress for the Barcode Of Life (ECBOL2), Braga, Portugal, 2nd – 4th June **2010**.
- 15 - **Le Gall, L.** Unraveling algal diversity using the DNA-barcode tool. 3rd barcode of life conference. Mexico city, Mexico, 7th-13th November **2009**.
- 14 - Geoffroy, A., **Le Gall, L.**, Destombe, C. Species delineation of seaweeds using DNA barcoding: a comparison of the species concept in red, green and brown algae. *Poster*. Evolutionary biology 2009: phylogeny, speciation, co-evolution, development, genomes, life histories, plasticity... What is new? University of Rennes-1, Rennes, France, 8th-12th June **2009**.
- 13 - Martin-Lescanne, J., Rousseau, F., Reviers, B. de, Payri, C. & **Le Gall, L.** Phylogenetic analyses of the *Laurencia* complex (Rhodomelaceae, Ceramiales) support recognition of five genera: *Chondrophyucus*, *Laurencia*, *Osmundea*, *Palisada*, and *Yuzurua* stat. nov. *Communication orale*. The British Phycological Society, 57th winter meeting, London, UK, 5th-7th January **2009**.
- 12 - **Le Gall, L.** Unraveling the extent of algal diversity using the DNA-barcode for molecular assisted taxonomy. *Poster*. First DNA barcoding in Europe Meeting, Leiden, Netherland, 3rd-5th October **2007**.
- 11 - **Le Gall, L.**, Saunders, G.W. Barcoding: a powerful molecular tool to uncover diversity among the Nemaliales (Rhodophyta) in the Canadian algal flora. *Communication orale*. 4th European Phycological Congress, Oviedo, Spain, 23rd-27th July **2007**. *Summary published in Programme & Book of abstracts*, p. 73.
- 10 - Martin lescanne, J., Payri, C., Rousseau, F., **Le Gall, L.**, Reviers, B. de Contribution of New Caledonian specimens to the phylogeny of the *Laurencia* complex (Ceramiales, Rhodophyta). *Communication orale*. 4th European Phycological Congress, Oviedo, Spain, 23rd-27th July **2007**. *Summary published in Programme & Book of abstracts*, p. 99.
- 09 - **Le Gall, L.** Unravelling the extent of algal diversity using the DNA-barcode for molecular assisted taxonomy. *Poster*. **MARBEF**, Gdansk, Poland, 13th-17th May **2007**.
- 08 - **Le Gall, L.**, Saunders, G.W. Barcoding: a powerful molecular tool to uncover the diversity

in the Canadian red algal flora. *Communication orale*. 45th NorthEast Algal Symposium. Poughkeepsie, New York, USA, 21st-23rd April **2006**.

07 - Le Gall, L., Saunders, G.W. Evolution of actin genes in red algae. *Communication orale*. International Society for Evolutionary Protistology conference XV. Melbourne, Australia, 30th January – 3rd February **2005**.

06 - Le Gall, L., Saunders, G.W. Molecular systematics of the Florideophyceae using nuclear small and large subunit rDNA revisited within Bayes. *Poster*. 44th NorthEast Algal Symposium. Rockport, Maine, USA, 27th-30th April **2005**.

05 - Le Gall, L., Lelong, C. Characterization of two actin genes in *Palmaria palmata* (Rhodophyta). *Communication orale*. 43rd NorthEast Algal Symposium. University of Connecticut, Avery Point, USA. 23rd-26th April **2004**.

04 - Le Gall, L.; Rusig, A.M. Use of seedstocks from the red macroalga *Palmaria palmata* for the study of developmental processes and for cultivation. *Poster*. 3rd European Phycological Congress, Belfast, UK, 21th-26th July **2003**. *Summary published in Programme & Book of abstracts*, p. 89.

03 - Le Gall, L. Caractérisation et expression de deux gènes d'actine chez la Rhodophyte *Palmaria palmata*. *Communication orale*. Meeting « Algues, Environnement, Production », Société Française de Phycologie. Nantes, France, 28–30 octobre **2002**.

02 - Le Gall, L., Rusig A.M.; Cosson J. Morphogenesis study of the protoplast of *Palmaria palmata* (Rhodophyta): A cytoskeletal approach. *Oral communication*. 7th International Phycological Congress, Thessaloniki, Greece; 18th–25th August 2001 *Summary published in Phycologia Vol 40 (4): 38 Supplement* **2001**.

01 - Le Gall, L. Microtubular cytoskeleton of *Palmaria palmata* (Rhodophyta). *Oral communication*. Journée Phycologique, Société Française de Phycologie. Muséum national d'histoire naturelle. Paris, France, 21-22 décembre **2000**.

4. ACTIVITES DE RECHERCHE

PRINCIPAUX ANGLES D'APPROCHE: Evolution & Systématique des algues rouges

Ce manuscrit d'HDR récapitule dix ans d'étude portant principalement sur la diversité des algues rouges. Mes travaux ont principalement porté sur l'évaluation et la caractérisation de la biodiversité des algues rouges par une approche de systématique intégrative pour inférer les processus évolutifs tant à l'échelle macroévolutive que microévolutive.

Une première étape a consisté au développement de marqueurs nucléaires additionnels pour améliorer la résolution phylogénétique au sein des Florideophyceae et a conduit à la révision de la classification de cette sous-classe. Cette étude phylogénétique à l'échelle des Florideophyceae, a servi de pierre angulaire pour étudier l'histoire évolutive de différents taxons à l'échelle ordinaire ou du genre. Ces différents travaux ont fait l'objet d'un encadrement de trois doctorants et de deux stagiaires post-doctoraux. J'ai en particulier encadré des travaux sur les Sebdeniales et Halymeniales avec un stagiaire post-doctoral, Toni Manghisi, sur le complexe du genre *Laurencia* avec deux doctorantes, Julie Martin Lescanne et María Machín Sánchez, sur les Corallinales avec une doctorante, Lucie Bittner, et une stagiaire en post-doctorat, Viviana Peña Freire.

Parallèlement à ces études phylogénétiques, je contribue, avec mes collègues du « groupe phycologique », Florence Rousseau et Bruno de Reviers, ainsi que dans le cadre du programme « grandes expéditions » du MNHN coordonné par Philippe Bouchet, à des études floristiques à des échelles régionales (côtes européennes atlantiques et méditerranéennes, Pacifique sud, océan Indien). Ces études couplées à l'acquisition de données moléculaires (le fragment utilisé comme code à barres-ADN mais aussi d'autres séquences utilisables aux mêmes fins, complémentaires ou de substitution selon les cas) permettent de mieux appréhender la diversité spécifique des algues. Cette approche s'est révélée fructueuse pour détecter des espèces cryptiques et des complexes d'espèces et elle a récemment permis de mettre en évidence des espèces exogènes. Ainsi, Alexandre Geoffroy, doctorant que je co-encadre avec Christophe Destombe a détecté sur les côtes Bretonne l'introduction de *Polysiphonia morrowii*, une espèce originaire d'Asie.

La densification de l'échantillonnage tant sur le plan taxinomique que géographique et temporel permet, dorénavant, d'aborder les processus qui influencent la spéciation et la distribution des algues. Dans le cadre de la thèse de doctorat de Marine Robuchon que je co-encadre avec Myriam Valero, nous nous interrogeons sur le choix des échelles (principalement taxinomique et spatiales) d'étude de la diversité algale des côtes Atlantiques, avec l'objectif de fournir des outils à des biologistes de la conservation.

Pour la cohérence de ce document, j'ai fait le choix d'exposer mes travaux en commençant par mes recherches sur les relations phylogénétiques des macro-algues rouges puis en suivant un axe allant de la racine vers les rameaux terminaux de l'arbre phylogénétique des algues rouges, je présente mes travaux et ceux des étudiants que j'ai encadrés, sur les corallines, des algues rouges calcifiées.

MAIN INTEREST : Evolution & systematics of red algae

This manuscript of “Habilitation à Diriger des Recherches” recapitulates ten years of study centering on the diversity of red algae. My research focuses on many aspects of red algal evolution and relatedness toward the goal of evaluating and characterizing red algal biodiversity with the contribution of many collaborators. I am particularly interested in using an integrative approach towards systematics to assess evolutionary processes at both macroevolutionary and microevolutionary scales.

A critical first step was to develop untested nuclear markers to improve the phylogenetic resolution among lineages of the Florideophyceae which led to considerable revisions of the classification of this subclass. This phylogenetic study served as a cornerstone to further study the evolutionary history of various taxa at the ordinal or generic level. I have supervised three PhD students and have two post-doctoral trainees working on red algal systematics. I supervised studies on the orders Sebdeniales and Halymeniales with post-doctoral trainee Toni Manghisi, on the *Laurencia* complex with two PhD students Julie Martin Lescanne and María Machín Sánchez and on the Corallinales with PhD student Lucie Bittner and post-doctoral fellow Viviana Peña Freire.

In addition to this phylogenetic approach I contribute to floristic surveys in selected biogeographical regions (Atlantic and Mediterranean European coast, South Pacific, Indian Ocean) with my colleagues of the "phycological group" Florence Rousseau and Bruno de Reviers, as well as within the framework of the program "big expeditions" of the MNHN coordinated by Philippe Bouchet. These floristic studies, coupled with the acquisition and analysis of molecular data (the DNA barcode marker, as well as additional markers where required), allow us to better circumscribe algal species diversity. This approach has proven valuable in detecting cryptic species as well as species complexes and was recently applied to highlight exogenous species. Alexandre Geoffroy, a PhD student that I co-supervise with Christophe Destombe, detected the introduction of *Polysiphonia morrowii*, a species native to Asia, along the Brittany coasts using a DNA barcoding approach.

As the data analysed becomes more comprehensive in terms of taxonomic, geographical and temporal coverage, I have begun tackling questions relating to the processes influencing speciation rates and distribution of marine algae. With the objective to supply tools for conservation biologists, we assess the congruence among scales (mainly taxonomic and spatial) to evaluate and monitor algal biodiversity of the Atlantic Coasts, within the framework of Marine Robuchon's doctoral thesis that I co-supervise with Myriam Valero.

For the coherence of this document, I chose to discuss my research on phylogenetic relationships and species concepts within the red algae in an order from the root to the terminal leaves of the red algal phylogenetic tree. I present my own works and those of the students that I have supervised.

*« Fallait-il qu'elle en ait du courage l'inconnue
sciente cellule neuve et vraiment autochtone
lorsque jeta sa vie à l'assaut de la mort
c'est qu'elle si le fit ne savait pas encor
et lorsqu'elle entreprit la construction fumeuse
d'êtres tout étoffés de sa gloire morveuse
Y en aura des petits y en aura des colosses
y en aura des verts des noirs des bleus et des blancs »*

Raymond Queneau

Petite cosmogonie portative, quatrième chant, l'audace de la première cellule (1950)

4.1. Introduction

Les algues rouges sont pour la plupart marines bien qu'il existe des espèces dulçaquicoles et d'eaux saumâtres. La majorité des espèces sont multicellulaires mais leur taille ne dépasse que très rarement le mètre et il existe quelques taxons d'algues rouges unicellulaires. Les grandes algues marines sont toutes benthiques et fixées, soit à des substrats durs comme la roche, soit épiphytes ou épibiontes ; quelques rares espèces unicellulaires sont planctoniques ; elles occupent de larges surfaces sur le plateau continental depuis les tropiques jusqu'aux pôles. Parmi les eucaryotes, elles se distinguent par leur absence de centriole et de flagelle, des connections particulières entre les cellules, les synapses, ainsi que par leur capacité photosynthétique. Elles contiennent, outre la chlorophylle *a* et des caroténoïdes, des pigments caractéristiques, les phycobiliprotéines (phycocyanine, phycoérythrine, allophycocyanine).

Enfin, les algues rouges ont un intérêt économique et industriel car certaines espèces sont utilisées directement à des fins alimentaires, tandis que pour d'autres les polysaccharides pariétaux sont extraits en vue de leur utilisation comme gélifiant (agars, carraghénanes), en bactériologie, chimie, ou comme additifs dans des produits alimentaires et cosmétiques.

Quels caractères pour la classification des algues rouges ?

La systématique des algues en général et des algues rouges, en particulier, remonte au système moderne de la nomenclature binominale conçu par le naturaliste suédois, Karl Von Linné, et qui fait référence depuis la publication du *Species plantarum* en 1753. En ce temps, les quelques genres d'algues reconnus étaient placés dans la subdivision des algues de la classe des Cryptogames qui rassemblait en outre les fougères, les mousses et les champignons. La classe des Cryptogames juxtaposait les 23 classes de végétaux à cônes et à fleurs au sein du règne des plantes. Les algues étaient réparties sur la base de leurs structures et mode d'organisation morphologique au sein de trois genres : *Fucus*, pour les algues coriaces, *Ulva*, pour celles membraneuses et *Conferva* pour celles d'allure filamenteuse. Cette classification initiale sous-estimait largement la diversité des algues et a, par conséquent, été soumise à de nombreux chamboulements successifs. Un extraordinaire travail de synthèse sur la systématique des algues rouges a été réalisé par deux chercheurs de l'Université de Californie, Berkeley, George Papenfuss (1955) et Paul Silva (1980) et je ne reporte ici que les principaux caractères qui ont servi d'états aux classifications successives. Jean Vincent Félix Lamouroux (1779-1825), professeur d'histoire naturelle à l'Université de Caen, présenta, dans son Essai sur les genres de la famille des Thalassiphytes non articulées (1813), une organisation de la classification des algues basée sur leur couleur verte, brune ou rouge et jeta ainsi les bases pour la distinction des trois grandes lignées d'algues encore reconnues de nos jours. Il proposa le terme floridées pour les algues présentant une : « organisation corolloïdes, couleur pourpre ou rougeâtre, devenant brillante à l'air ». Ce schéma classificatoire reçut l'approbation de Carl Adolph Agardh (1785-1859) qui l'adopta dans son *Synopsis algarum Scandinaviae* (1817) et qui reconnut l'importance des couleurs pour établir un système naturel de classification dans son *Species algarum* (1821). Le

botaniste et médecin, William Henry Harvey (1811-1866), formalisa en 1836, l'utilisation des couleurs pour distinguer les grandes algues marines et proposa les Chlorospermae, Melanospermae, et Rhodosperrmae trois divisions qui correspondent aux subdivisions algues vertes, brunes et rouges telles qu'actuellement reconnues à quelques approximations près. A leur insu, Lamouroux et Harvey ont introduit un caractère biochimique, la nature des pigments photosynthétiques, pour établir leur classification. En 1842 Joseph Decaisne (1807-1882) qui commença au Muséum en tant que jardinier avant de devenir aide naturaliste d'Adrien de Jussieu, puis titulaire de la Chaire de Culture, stipula que la classification des algues devait « avoir pour base la structure des organes reproducteurs ». Il proposa ainsi de regrouper les algues sans se soucier ni de leur forme ni de leur couleur en quatre divisions sur la base de l'anatomie des fructifications (tétrasporocystes). Jacob Georg Agardh (1813-1901), fils de C. A. Agardh et professeur de botanique à l'Université de Lund, proposa des classifications (1851, 1863, 1876) basées à la fois sur des caractères végétatifs mais aussi sur des caractères macroscopiques de l'appareil reproducteur qu'il appréhenda avec de plus en plus de détail à la lumière de ses observations et de celles de ces contemporains. Il s'attacha en particulier au mode de division et à la position des tétrasporocystes ainsi qu'à la structure et à la position des cystocarpes. En 1847, Harvey, observa que les algues rouges ont un double système de fructification et posa ainsi les fondations de la compréhension du cycle de reproduction des algues rouges. Ce cycle sera ultérieurement décrit par Edouard Bornet (1828-1911) et Gustave Thuret (1817-1875) en 1866 à la suite de l'observation de la fécondation. Ils remarquèrent que suite à la fécondation de spermaties (homologues non mobiles de spermatozoïdes) et de carpogonia (oogones facilement repérables, chez la plupart des algues rouges par la présence d'un prolongement, le trichogyne), se développaient les cystocarpes. Friedrich Schmitz (1850-1895), professeur de Botanique et directeur du jardin botanique de l'Université de Greifswald, Allemagne, observa que les événements suivant la fécondation et menant au développement des gonimoblastes étaient divers (Schmitz 1883). Il mit en évidence que certaines algues rouges produisent des filaments gonimoblastiques qui se développent directement à partir du zygote, alors que d'autres présentent des filaments de jonction qui fusionnent avec des cellules auxiliaires du gamétophyte femelle. Les cellules auxiliaires ne développant des gonimoblastes qu'après avoir reçu, par le moyen du filament de jonction, un noyau fils du noyau du zygote. L'occurrence de ces cellules auxiliaires avant ou après la fécondation, et le cas échéant leurs attributs, sont les principaux caractères, toujours observés avec plus de finesse, sur lesquels les classifications ont été établies pendant plus d'un demi-siècle (e.g. Schmitz 1883 ; Oltman 1904 ; Kylin 1925 ; Kylin 1956). Jean Feldmann (1905-1978), professeur à la faculté des sciences de Paris, étudia de nombreux cycles de développement d'algues et mis en évidence des alternances morphologiques de générations ; ainsi il proposa une classification des Florideophyceae basée sur l'évolution des cycles de reproduction (1952). Les progrès de la microscopie électronique permirent d'observer des caractères anatomiques jusqu'alors inaccessibles. Curt Pueschel et Kathleen Cole ont mis en évidence, sur la base de leurs travaux sur l'ultrastructure des bouchons synaptiques, l'importance de ce caractère comme élément de classification phylogénétiquement significatif (Pueschel et Cole 1982)

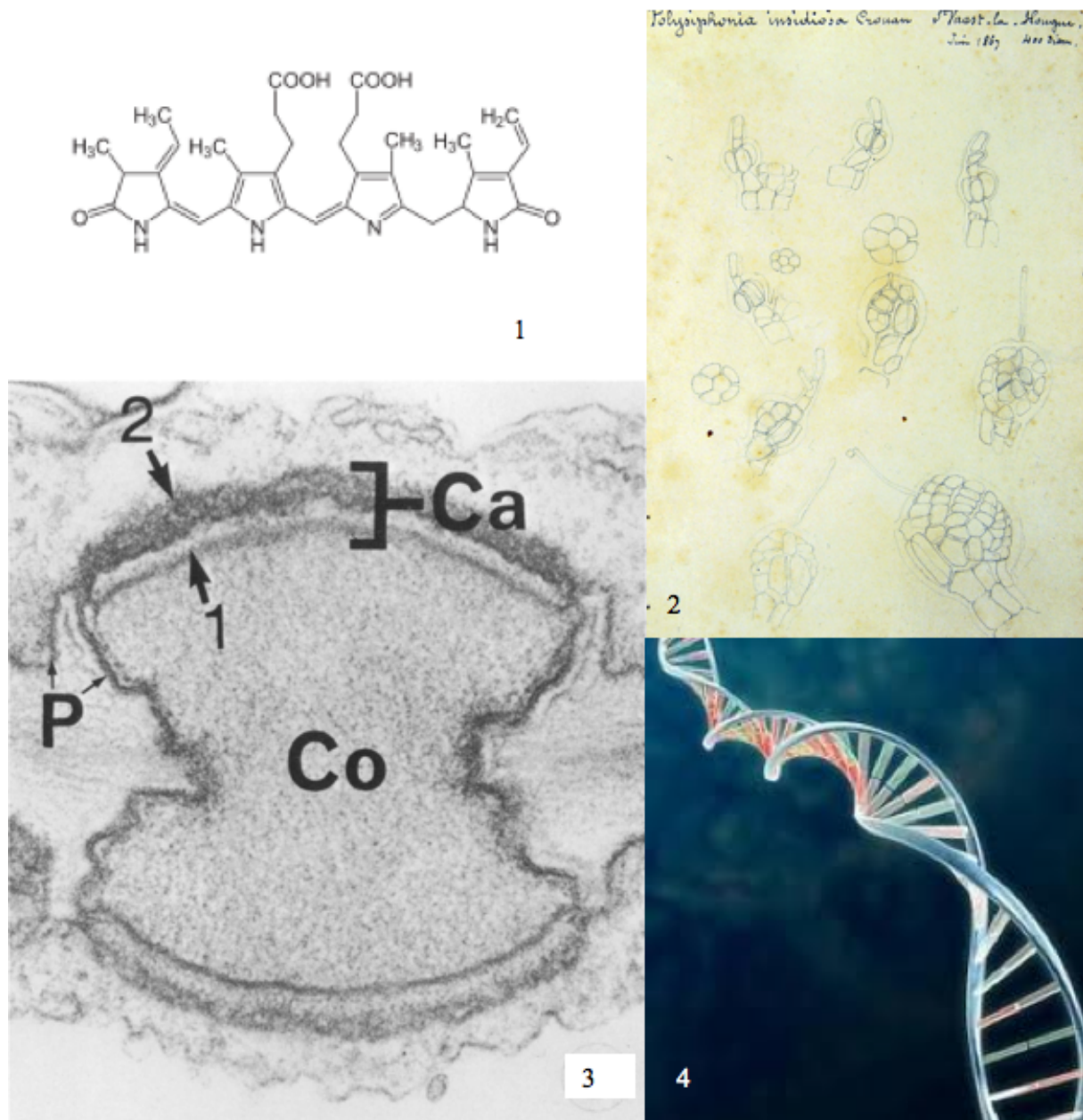


Figure 1-4 : Quels caractères pour la classification des algues rouges ? 1. Formule développée plane de la phycoerythrine, un des pigments à l'origine de la couleur rouge des algues rouges. La couleur des algues est un caractère qui a été proposé par Lamouroux (1813) pour séparer les algues vertes, rouges et brunes. 2. Dessin à la mine de plomb réalisé par Bornet et Thuret illustrant le développement du rameau carpogonial de *Neosiphonia harveyi* (J.W.Bailey) M.-S.Kim, H.-G.Choi, Guiry & G.W.Saunders (comme *Polysiphonia insidiosa* (J.Agardh) P.L.Crouan & H.M.Crouan)). Bornet et Thuret (1866) décrivent le cycle de reproduction des algues rouges. 3. Ultrastructure d'une synapse de *Palmaria palmata* reproduite de la publication de Pueschel et Cole (1982). CA, indique la coiffe avec sa couche interne (1), couche externe (2), P indique la membrane plasmique et Co le cœur du bouchon synaptique. 4. Double hélice d'ADN. À partir des années 1990 les caractères moléculaires, sont de plus en plus fréquemment utilisés pour étudier la systématique des algues rouges.

Which characters for Red algal classification. 1. Structural formula of phycoerythrin, a pigment responsible of the red colour of red algae. Colour was a character proposed by

Lamouroux (1813) to distinguish green, red and brown algae. 2. Drawing realised by Bornet and Thuret showing the development of the carpogonial branch of *Neosiphonia harveyi* (J.W.Bailey) M.-S.Kim, H.-G.Choi, Guiry & G.W.Saunders (as *Polysiphonia insidiosa* (J.Agardh) P.L.Crouan & H.M.Crouan)). Bornet and Thuret (1866) described the life cycle of red algae. 3. Pit plug ultrastructure reproduced from Pueschel and Cole (1982). CA indicates plug cap with inner (1) and outer layer (2), P and Co indicate plasma membrane and the plug core, respectively. 4. DNA double helix. Since the mid 90's molecular characters are more and more frequent to study red algal systematics.

L'avènement de la PCR et du séquençage de l'ADN a permis de disposer de caractères moléculaires dont l'analyse comparative autorise des reconstructions phylogénétiques. Depuis l'aube du 21ème siècle, de nombreux travaux tentent de répondre tant à la question de la place des algues rouges dans l'arbre de la vie (e.g. Moreira et al. 2000 ; Stiller et al. 2001 ; Rodriguez-Ezpeleta et al. 2005) qu'à celle de la délimitation des grandes lignées et de leurs liens de parenté entre elles (e.g. Freshwater et al. 1994 ; Harper et Saunders 2001 ; Yoon et al. 2006 ; Verbruggen et al. 2010), ainsi qu'à l'évaluation de la diversité alpha au sein de ce taxon avec l'essor du projet international du DNA-barcoding (e.g. Saunders 2005). Il est dorénavant admis que les algues rouges forment avec les Chloroplastida Adl (algues vertes et embryophytes) et les Glaucophyceae Skuja une lignée monophylétique appelée Plantae Haeckel ou Archaeplastida Adl (Figure 1) dont la caractéristique commune est de posséder un plaste acquis par endosymbiose primaire.



Figure 5 : Représentation simplifiée de la place des algues (encarts colorés) dans les différentes lignées de l'arbre du vivant. Les encarts gris représentent les groupes contenant des organismes non-photosynthétiques.

Outline of the position of algae among the lineages of the tree of life. Grey leaves represent non photosynthetic taxa.

Les relations phylogénétiques au sein des algues rouges sont encore largement irrésolues ; cependant, les Cyanidiales forment une lignée qui a été la première à diverger tandis que les Bangiales, et leur groupe frère les Florideophyceae, ont divergé plus récemment (Figure 2). Les Rhodellophyceae, les Porphyridiophyceae, les Stylonematales et les Compsopogonales forment une série de radiations dont les relations n'ont pas encore été solidement établies. Les Bangiales et les Florideophyceae regroupent l'immense majorité des algues rouges pluricellulaires possédant des communications entre les cellules via des

synapses au moins dans une génération du cycle biologique. Il se dénombre environ 6000 espèces d'algues rouges appartenant à ces deux taxons alors que seule une centaine d'espèces unicellulaires ou formant des filaments mais sans communication via des synapses ont été décrites à ce jour (Guiry et Guiry 2012). De nombreux phycologues s'accordent sur le point que cette biodiversité alpha ait été sous-évaluée en raison de la difficulté à trouver des caractères fiables pour identifier les algues rouges. Il s'agit d'organismes difficiles à étudier morphologiquement dont les caractères morphologiques ont un déterminisme génétique faible (plasticité phénotypique en réponse à des contraintes environnementales) ; ou sont sujets à une forte homoplasie ; ou dont le cycle biologique est souvent incomplètement connu avec parfois un hétéromorphisme drastique et une phase de petite taille (filaments, croûtes) difficile à échantillonner et peu étudiée.

- **Rhodophyceae** Thuret 1855, Rabenhorst 1863, [Rhodophyta Wettstein 1901, Rhodoplantae Saunders and Hommersand 2004], emend. Adl et al., 2005
 - **Cyanidiales** T. Christensen 1962 [Cyanidiophyceae Merola, Castaldo, De Luca, Gambardella, Musacchio et Taddei 1981, Cyanidiophyceae Merola et al., 1981, Cyanidiophyta Moehn ex Doweld 2001]
 - **Rhodellophyceae** Cavalier-Smith 1998 [Rhodellophytina Cavalier-Smith 1998]
 - **Stylonematales** K. Drew 1956 [Stylonematophyceae H.S. Yoon, K.M. Müller, R.G. Sheath, F.D. Ott et D. Bhattacharya 2006]
 - **Porphyridiophyceae** H. S. Yoon, K. M. Müller, R. G. Sheath, F. D. Ott et D. Bhattacharya 2006
 - **Compsopogonales** Skuja 1939 [Compsopogonophyceae G.W. Saunders et Hommersand 2004]
 - **Bangiales** Nägeli 1847 [Bangiophyceae A. Wettstein 1901]
 - **Florideophycidae**, Cronquist 1960
 - **Hildenbrandiophycidae**, G.W. Saunders et Hommersand 2004
 - **Nemaliophycidae**, Christensen 1978
 - **Corallinophycidae** L. Le Gall et G.W. Saunders 2007
 - **Ahnfeltiophycidae** G.W. Saunders et Hommersand 2004
 - **Rhodymeniophycidae** G.W. Saunders et Hommersand 2004

Figure 6 : Classification des algues rouges selon Adl et al. 2012 qui utilise le rang le plus bas disponible et non les rangs linnéens formels.

Classification of the red algae according to Adl et al. 2012. The lowest taxonomic rank available prevail formal linnean ranks.

4.2. Contexte

C'est dans ce contexte de bouleversement de la compréhension de la diversité des algues rouges et de révisions taxinomiques foisonnantes que j'ai initié mon projet de thèse en 1999 à l'Université de Caen-Basse Normandie sous la direction d'Anne-Marie Rusig et Joseph Cosson. L'objectif de mon projet était alors appliqué. Il s'agissait de mettre au point la culture de *Palmaria palmata* (Linnaeus) Weber & Mohr pour répondre à la demande croissante de cette algue fourrage suivant l'essor de l'aquaculture des ormeaux en Normandie, ces mollusques en étant friands. Pour mener à bien la culture de *Palmaria palmata*, j'ai entrepris une étude monographique sur cette espèce, somme toute assez originale parmi les Florideophyceae. Autrefois nommée *Rhodymenia palmata* (Linnaeus) Greville, un nouveau genre (Guiry 1974), puis une nouvelle famille (Guiry 1974) et enfin un nouvel ordre (Guiry 1978) ont été proposés pour que la classification de ce taxon se rapproche autant que possible de l'ordre naturel des espèces. Cette série de propositions taxinomiques est aujourd'hui considérée comme le point de départ du bouleversement de la classification des Florideophyceae (Saunders et Hommersand 2004) survenu après Kylin (1956).

Par ailleurs, *Palmaria palmata* se distingue parmi les algues rouges, entre autres, par un cycle généralement interprété comme digénétique (alors que les algues rouges ont le plus souvent un cycle considéré comme trigénétique), une composition atypique de la paroi cellulaire (principalement des xylanes), une plasticité phénotypique prononcée, une composition chimique riche en protéines... Autant de singularités qui ont éveillé ma curiosité et dont l'étude m'a permis de disposer d'un bagage solide tant sur le terrain (étude de la phénologie, évaluation des stocks), qu'en biochimie (étude de la régénération de la paroi de protoplastes) et en biologie moléculaire (étude de l'expression des gènes d'actine) pour me risquer à aborder l'étude de la biodiversité des algues rouges.

Après ma thèse, j'ai eu la chance d'obtenir deux contrats postdoctoraux consécutifs au sein du laboratoire « Centre of Environmental & Molecular Algal Research », à l'Université du New Brunswick, Fredericton, Canada dirigé par Gary W. Saunders (Professeur de l'Université du New Brunswick). Mon premier projet de recherche a été de réaliser une phylogénie d'ensemble des Florideophyceae, une tâche qui passait par la mise au point de nouveaux marqueurs moléculaires. Cette étude m'a permis d'identifier les zones d'ombres au sein de l'arbre des algues rouges et je me suis, par la suite, efforcée d'améliorer la résolution phylogénétique dans ces régions en augmentant l'effort d'échantillonnage et / ou le nombre de marqueurs.

Dans le cadre de l'essor du projet du « barcode of life » qui a commencé en 2003 à l'instigation de Paul Hebert ; j'ai initié un second projet de recherche postdoctorale focalisé sur la mise au point du marqueur « Barcode » chez les algues rouges et sur l'étude de la diversité alpha au Canada de plusieurs familles d'algues rouges.

Depuis mon arrivée au Muséum en avril 2007, je poursuis mes recherches sur la diversité des algues rouges en poursuivant, en parallèle, les deux axes thématiques complémentaires « macroevolution/phylogénie » et « microevolution/barcode ». Dans le cadre de grandes expéditions et de collaborations, « le groupe phycologique » a participé à l'exploration de la biodiversité des algues dans l'indo-Pacifique. Par ailleurs, j'ai souhaité impliquer le groupe dans l'étude floristique des algues de France et j'ai initié des projets tant en Atlantique qu'en Méditerranée. Au-delà des études floristiques, ces missions de terrains

nous permettent de renforcer l'effort d'échantillonnage dans le cadre de nos analyses phylogénétiques et vice-versa, les analyses phylogénétiques mettent en exergue les zones d'ombres de l'arbre des Florideophyceae qui mérite une étude systématique plus approfondie (e.g. complexes d'espèces, diversité cryptique, espèces jumelles).

4.3. Présentation des résultats obtenus sur la phylogénie des Florideophyceae, des Corallinophycidae et des Corallinales

Comme je l'ai rappelé ci-dessus, la classification des algues rouges a traditionnellement été basée sur l'organisation de l'appareil végétatif et reproducteur pour culminer avec la classification de Kylin (1956). Ce système, bien que relativement efficace, présente deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, certaines espèces et parfois même certains taxons de rangs supra spécifique ne présentent pas de reproduction sexuée ou celle-ci n'est pas connue. Enfin, cette classification est fondée sur des hypothèses évolutives subjectives qui s'avèrent incorrectes à la lumière des connaissances actuelles. L'avènement de l'utilisation d'outils moléculaires, notamment au cours des deux dernières décennies, a permis la réalisation de phylogénies basées sur la comparaison de séquences d'ADN. Ces caractères moléculaires présentent l'avantage d'être nombreux et généralement ils offrent une gamme de variabilité qui permet d'étudier les relations phylogénétiques entre des organismes relativement distants ou très proches, et de dater leur divergence.

4.4.1. Phylogénie des Florideophyceae

Seuls quelques gènes ont été étudiés pour établir les relations supra-spécifiques des Florideophyceae. Les phylogénies basées sur des caractères moléculaires se sont concentrées sur l'analyse de deux gènes nucléaires [SSU (Ragan et al. 1994) et LSU (Harper et Saunders 2001)] et d'un seul gène chloroplastique [*rbcl* (Freshwater et al. 1994)]. Bien que ces gènes aient permis une grande avancée dans la systématique des algues rouges, ils se sont néanmoins avérés inadéquats pour résoudre certaines relations cruciales au plan évolutif. L'objectif de mon premier stage post-doctoral a donc été de développer l'utilisation de nouveaux gènes pour l'étude de la phylogénie des algues rouges afin de compléter les données existantes. Des gènes mitochondriaux (CO1, CO2 & CO3) et un gène nucléaire codant (EF2) ont été analysés et sélectionnés pour leur signal phylogénétique. L'obtention de nouvelles séquences, d'une grande variété d'organismes disponibles au laboratoire, combinées aux séquences déjà déposées dans GenBank a permis la réalisation d'analyses phylogénétiques originales. Cette étude couplée à l'observation de caractères anatomiques nous a amené à proposer une nouvelle sous-classe au sein des Florideophyceae, les Corallinophycidae (Le Gall et Saunders 2007) pour regrouper les Corallinales et les Rhodogorgonales et ainsi mieux refléter les liens étroits de parenté de ces organismes. En outre, cette première étude très générale a servi de pierre angulaire pour initier une série d'étude sur des taxons floridiens [Rhodymeniales (Le Gall et al. 2008), *Sporolithon* (Le Gall et al. 2010), Corallinales (Bittner et al. 2011), le complexe *Laurencia* (Martin-Lescanne et al. 2010)].

Le jeu de données généré par Le Gall et Saunders (2007) qui incluait au moins un spécimen pour chaque ordre de Floridophyceae (sauf pour les Pihielales, un ordre de parasites) a été complété par Verbruggen et al. (2010) pour inclure des représentants de toutes les familles.

Publication reproduite :

Verbruggen, H., Maggs, C.A., Saunders, G.W., **Le Gall, L.**, Yoon, H.S., De Clerck, O. (2010). Data mining approach identifies research priorities and data requirements for resolving the red algal tree of life. **BMC Evolutionary Biology** 10: 16. (<http://www.biomedcentral.com/1471-2148/10/16>). [IF=5.20]

Cette étude a été initiée dans le contexte du projet international Tree of Life (TOL) dont l'objet est de retracer l'histoire évolutive des organismes. Sur la base des données disponibles dans GenBank, une super matrice de caractères moléculaires incluant 14 gènes nucléaires, chloroplastiques et mitochondriaux (19 799 caractères) a été réalisée pour 98 OTUs correspondant à chaque famille d'algues rouges ainsi qu'à quelques taxons dont les affinités phylogénétiques ne sont pas reflétées par la taxinomie. Les analyses phylogénétiques de cette super matrice, dont la couverture de données représente près de 30 %, ont permis de proposer un cadre phylogénétique pour les algues rouges, qui fait référence depuis lors, tout en évaluant les stratégies les plus opportunes pour améliorer la résolution phylogénétique au sein des Rhodophyta. Cette étude a mis en évidence la présence de cinq nœuds peu résolus dans l'arbre et qui méritent une attention particulière :

- A – Les relations entre les lignées constituant les premières divergences des algues rouges
- B – les relations interfamiliales au sein des Nemaliophycidae
- C – les relations interordinales au sein des Rhodymeniophycidae
- D et E - les relations interfamiliales au sein de deux sous ensembles des Gigartinales.

Il est indéniable que d'avantage de données permettront d'améliorer la résolution des relations phylogénétiques au sein de ces zones d'ombres et que des analyses statistiques permettront de discuter de l'origine du manque de résolution de ces nœuds en fonction de l'âge du nœud, de la densité des radiations et de la quantité de données disponibles. Il s'avère que des données génomiques seront nécessaires pour résoudre le nœud A et, en moindre mesure, pour le nœud B. En revanche, les nœuds C, D, et E devraient pouvoir être résolus en enrichissant simplement le jeu de données de quelques gènes bien ciblés. Outre cette stratégie d'acquisition de données moléculaires, il est complémentaire d'enrichir l'échantillonnage taxinomique en mettant notamment l'accent sur les quelques familles d'algues rouges pour lesquelles il n'y a pas ou peu de données moléculaires.

Cet article, qui constitue une référence en matière de phylogénie des Rhodophyta, ouvre la voie à de futures études et évalue les outils moléculaires qui seront nécessaires à la poursuite de l'acquisition de données dans le cadre du projet TOL. Pour ma part, je m'intéresse, en particulier, à la position phylogénétique du genre *Atractophora*. Ce genre est généralement classé parmi les Bonnemaisoniales sur la base des critères de la classification de Kylin (1956) alors que cette phylogénie le résout taxon frère de toutes les Rhodymeniophycidae. Or, il présente des rameaux carpogoniaux dispersés alors que ceux-ci sont généralement compacts chez les Bonnemaisoniales et ne présente pas de péricarpe tandis que cette structure est présente chez les Bonnemaisoniaceae. Une étude approfondie de la littérature et l'observation de spécimens récemment récoltés devraient permettre de mieux circonscrire les caractères d'*Atractophora* et ceux de *Naccaria*, deux taxons qui ont souvent été confondus par le passé.

4.4.2. Phylogénie des Corallinophycidae

4.4.2.1 Relations supra ordinales

Publication reproduite :

Le Gall, L., Payri, C., **Bittner, L.,** Saunders, G.W. (2010). Multigene phylogenetic analyses support recognition of the Sporolithales *ord. nov.* ***Molecular Phylogenetics and Evolution***, 54 (1): 302-305. [IF=3.88]

Les Corallinophycidae constituent une sous-classe des Florideophyceae que nous avons proposé (Le Gall et Saunders 2007) pour regrouper les taxons marins dont au moins une partie est calcifiée par de la calcite, c'est-à-dire à ce stade, les Rhodogorgonales et les Corallinales.

Cette première phylogénie à l'échelle des Florideophyceae n'incluait pas de représentant de la famille des Sporolithaceae alors que les affinités phylogénétiques de ce taxon avaient été l'objet de nombreux débats (Harvey et al. 2002). Une seconde phylogénie incluant les deux genres de Sporolithaceae, *Heydrichia* et *Sporolithon* a permis de confirmer que les Sporolithaceae joignaient les Rhodogorgonales avec qui ils forment le groupe frère des autres Corallinales. Cette relation initialement mise en évidence par Harvey et al. (2002) avait été reléguée au rang d'artefact de reconstruction phylogénétique en raison de la convergence morphologique des Sporolithaceae et des autres Corallinales. Nos résultats, étayés par une solide phylogénie, nous ont permis de discuter l'évolution des caractères végétatifs et reproductifs au sein des Corallinophycidae et nous ont mené à proposer l'ordre des Sporolithales (Le Gall et al. 2010) qui se caractérise par des tétraspores cruciées produites dans des compartiments calcifiés ainsi qu'à amender l'ordre des Corallinales qui dorénavant ne contient que des taxons présentant des tétraspores zonées.

4.4.2.2 Relations infra ordinales au sein des Corallinales.

Publication reproduite :

Bittner, L., Payri, C.E., Maneveldt, G.W., Couloux, A., Cruaud, C., Reviers, B. de, **Le Gall, L.** (2011). Evolutionary history of the Corallinales (Corallinophycidae, Rhodophyta) inferred from nuclear, plastidial and mitochondrial genomes. ***Molecular Phylogenetics and Evolution***, 61 (3): 697-713 [IF=3.88]

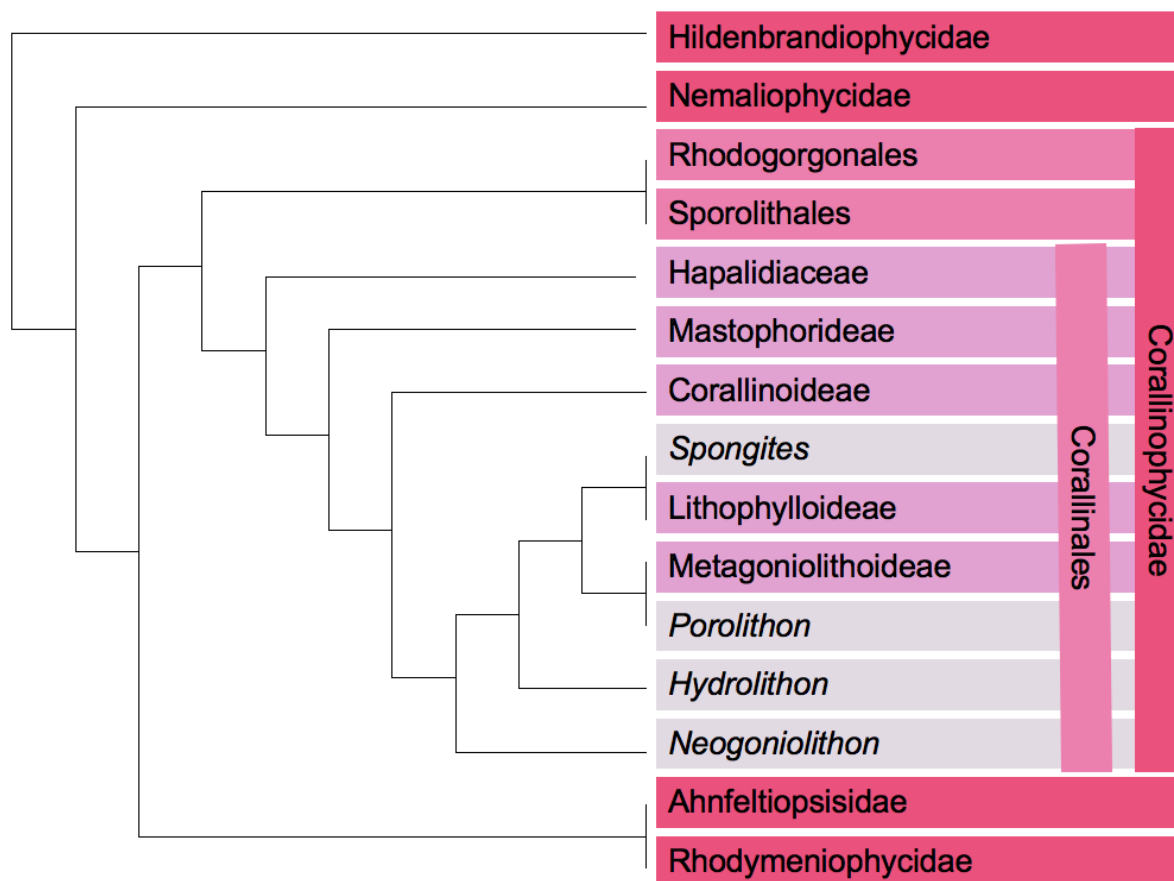


Figure 8 : Phylogramme synthétisant les relations phylogénétiques mises en évidence par nos études successives des Florideophyceae (Le Gall et Saunders 2007, Verbruggen et al. 2010), des Corallinophycidae (Le Gall et al. 2010), et des Corallinales (Bittner et al. 2011).
 Phylogram summarizing the results of our successive phylogenetic studies of the Florideophyceae (Le Gall and Saunders 2007, Verbruggen et al. 2010), Corallinophycidae (Le Gall et al. 2010), and Corallinales (Bittner et al. 2011).

Les Corallinales, même ainsi restreintes, sont, avec environ 600 espèces actuellement reconnues, l'ordre de Rhodophyta le plus divers après les Ceramiales (environ 2500 espèces) et les Gigartinales (environ 750 espèces). Les corallines forment un ordre d'algues rouges (les Corallinales) caractérisées par la présence de parois cellulaires imprégnées de calcite. Selon leur morphologie et le degré de calcification de leur appareil végétatif, ces algues très particulières peuvent avoir une allure allant de celle d'un fragment de roche à celle d'arbuscules relativement souples lorsque des zones non calcifiées s'intercalent entre des articles rigidifiés par la calcite. Les travaux de thèse de Lucie Bittner, que j'ai co-encadrés avec Claude Payri et Bruno de Reviere, ont porté sur la phylogénie des Corallinales (Rhodophyta) et l'analyse de leur diversité génétique dans le Pacifique Sud. La soutenance de la thèse a eu lieu le 1er décembre 2009 au Muséum national d'histoire naturelle. L'une des publications issue de cette thèse consiste en une phylogénie des Corallinales inférée par une analyse combinée des gènes nucléaires (LSU & SSU), chloroplastiques (psbA) et mitochondriaux (CO1) (Bittner et al. 2011). Jusqu'à présent, les études moléculaires de la phylogénie des Corallines s'appuyaient principalement sur l'analyse des séquences de SSU. L'analyse de notre jeu de données combinées a confirmé la monophylie de l'ordre des Corallinales ainsi que celle des deux familles actuellement reconnues au sein de cet ordre,

les Corallinaceae et les Hapalidiaceae. Trois, des quatre sous-familles des Corallinaceae (Corallinoideae, Lithophylloideae, Metagoniolithoideae) se sont aussi avérées monophylétiques à la lumière de nos analyses phylogénétiques tandis que les membres des Mastophoridae se sont trouvés dispersés dans quatre lignées indépendantes. Nous avons par conséquent proposé de restreindre les Mastophoridae aux genres *Mastophora*, *Metamastophora* et possiblement à *Lithoporella* pour rendre cette famille monophylétique. De plus, nos analyses laissent apparaître deux lignées pour le genre *Hydrolithon*. Une de ces lignées contient le généritype *H. reinboldii* alors que la seconde contient *H. onkodes* qui fut le généritype du genre défunt *Porolithon*. Nous avons ainsi ressuscité le genre *Porolithon* pour cette seconde lignée qui se caractérise sur le plan du développement de l'appareil végétatif par une organisation monomère (une apicale) alors que les espèces du genre *Hydrolithon* présentent une organisation dimère (une apicale primaire et une apicale secondaire qui est généralement dans un plan orthogonal à celui de l'apicale primaire). Par ailleurs ces travaux ont mis en évidence la présence de nombreuses espèces cryptiques (ou pseudocryptiques) et ont ainsi confirmé la nécessité de poursuivre l'étude de la diversité des Corallinales.

5. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Biogéographie et macroécologie des algues corallines

Je présente dans le cadre de cette HDR un projet de recherche qui s'appuie sur les résultats exposés précédemment pour aborder des questions de biogéographie et de macroécologie des algues corallines. Ces algues caractérisées par la présence de calcite dans leurs parois cellulaires, présentent l'avantage d'être un modèle étudiable dans le présent comme dans le passé en raison de leur capacité de fossilisation. Je propose ainsi d'étudier les propriétés de la diversité (richesse, distribution, rareté) des corallines actuelles et fossiles et de mettre ces résultats en relation avec des paramètres environnementaux, afin de mieux apprécier les mécanismes à travers lesquels les corallines réagissent aux changements globaux tels que la modification climatique actuelle ou l'acidification de l'océan mondial.

Ce programme de recherche correspond à un projet dont je suis la coordinatrice et qui a été déposé à l'appel à projet « Jeunes Chercheurs – Jeunes Chercheuses 2012 » de l'Agence nationale de la recherche. Il s'intitule « Biodiversité actuelle et passée : les CORallines, des ALgues pour la recherche sur le changement Global » (CORALG).

Biogeography & macroecology of marine red algae

The present research project was submitted to the National Research Funding Agency (ANR). It is an answer to a call for projects entitled "young investigators" and I am the Principal Investigator. The project is entitled "Past and present biodiversity: CORalline ALgae as a resource for Global change research"

5.1. Préambule

Ce projet constitue une approche fondamentale de l'histoire évolutive et de la biologie des corallines (algues rouges calcifiées). La calcification confère aux corallines des rôles écologiques diversifiés et un registre fossile extrêmement bien documenté. Outre leur rôle évident dans le cycle du carbone, elles sont une composante indispensable à l'existence de certains écosystèmes, comme les récifs de corail qu'elles cimentent et consolident. Leur capacité à structurer en trois dimensions des habitats complexes hébergeant des communautés d'une extrême diversité biologique en fait des espèces ingénieurs de milieux actuels et de paléoenvironnements. Ces algues extraordinaires constituent donc un modèle unique sur lequel nous pouvons suivre l'évolution du passé au présent. Elles ont pourtant été largement délaissées par nombre de spécialistes des algues en raison de la difficulté de leur identification et de leur étude nécessitant le plus souvent de longues et difficiles décalcifications. Les avancées récentes de l'écologie moléculaire permettront de délimiter les frontières spécifiques sur la base de séquences moléculaires et d'inférer les processus qui conduisent à la dispersion, spéciation et à l'extinction d'organismes marins. Dans ce projet, nous proposons de renforcer l'échantillonnage dans deux régions du monde contrastées. La flore tempérée de Méditerranée (une mer presque fermée), et celle des côtes Atlantiques adjacentes seront comparées à celle, tropicale, du sud-ouest Pacifique (un Océan ouvert clairsemé d'îles formant un habitat très fragmenté pour les espèces côtières). Huit expéditions sont programmées pour récolter environ 1000 spécimens afin de compléter l'échantillonnage de 1500 spécimens que nous avons déjà réalisé. Tous les spécimens seront séquencés pour la région du barcode (CO1 mitochondrial) et 600bp de la LSU nucléaire. L'avènement du CT Scan (Computed Tomography Scan) pour l'étude des collections d'Histoire Naturelle, une technique non destructive d'analyse morphométrique 3D des structures représentent des outils par lesquels une nouvelle approche de ce groupe à large échelle paraît désormais accessible. Pour cela nous disposons de récoltes récentes mais aussi des collections d'histoire naturelle, y compris fossiles, des muséums du monde entier, dont celle, particulièrement importante, du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). Des phylogénies moléculaires, obtenues à partir des séquences génétiques de taxons actuels et confrontée à des phylogénies basées sur des caractères morphologiques incluant des taxons fossiles, permettront de mettre en place une étude de systématique intégrative et de mieux comprendre l'histoire évolutive de ces algues. Ces résultats, mis en relation avec les données actuelles et fossiles de l'évolution des paramètres environnementaux, devraient nous permettre de mieux apprécier les mécanismes à travers lesquels les corallines réagissent aux changements climatiques tels que le réchauffement ou l'acidification de l'océan mondial. Cette étude transdisciplinaire aplanira les cloisonnements préjudiciables à l'avancée de la connaissance qui existent souvent entre paléontologie, systématique, taxinomie, écologie moléculaire et écologie fonctionnelle. De plus, les retombées de cette étude feront l'objet d'une communication vers le grand public grâce à une exposition permanente qui est prévue dans la Galerie de Botanique du Jardin des plantes, au MNHN, à Paris.

Le projet ayant été initialement rédigé en anglais et par égards pour les membres du jury non francophone, ce projet de recherche sera présenté en anglais.

5.2. Introduction

Understanding the role of algal diversity, as well as the contribution of each species, in marine ecosystems is one of the major challenges in functional ecology. Coralline algae are characterized by the presence of high magnesium calcite in their cell walls. They are either entirely calcified, typically crustose (non-geniculate), or the calcification is interrupted between calcified segments forming geniculate plants. Geniculate and non-geniculate corallines predominantly grow epilithically although may also be found growing as epiphytes or on hard-bodied animals and various artificial substrates. The calcification confers coralline algae the role of ecosystem engineer in most hard bottomed coastal habitats as coralline algae occupy a wide depth range and are distributed from Polar Regions to the tropics.

Among the Rhodophyta, coralline algae are the single group with an extensive fossil record primarily owing to the extensive calcification of their cell walls and thus high preservation potential. Corallines first appear in the early Cretaceous (>140 My) fossil record (Moussavian et al. 1993) and are most common in Early Miocene deposits (more than 23 My) which corresponds to their peak of diversification (Aguirre et al. 2010). Presently, the Corallinales is one of the most diverse red algal orders with 600 recognized species, accounting for 10 % of the red algal species diversity.

In the tropics corallines actively accrete loose sediment and, together with the hard corals, form the basis of communities often referred to as coral reefs (Steneck 1986). Coralline algae cover about 20 % of the Great Barrier Reef (Fabricius and De'ath, 2001) and in some parts of the world can locally contribute up to 39 % of the reef biomass (Littler, 1973). In coral reef environments non-geniculate coralline algae strengthen the reef by reinforcing the carbonate framework, filling cracks and cementing together much of the sand, dead coral and debris, creating a stable substrate and reducing reef erosion (Bosence, 1983; Bjork et al. 1995; Adey, 1998; Payri and Cabioch, 2004; Diaz-Pulido et al. 2007). Moreover, it has recently been shown that crustose coralline can enhance the settlement of coral larvae (Diaz-Pulido et al. 2010). In addition to their role as reef builders, some species of corallines form extensive sub-littoral maerl beds of loose and fragmented nodules, especially in temperate regions.

In both tropical and temperate waters where coralline algae form extensive communities, their intricate shapes create complex three-dimensional structures which create highly variable micro habitats that often accommodate highly diverse faunas and floras. It is partly for this reason that coral reefs, and to a lesser extent maerl beds, are considered hot spots of biodiversity (BIOMAERL team, 1998).

Coralline algae are slow-growing organisms that expand outwardly by 0.1 to 80 mm annually, accumulating calcium carbonate in their tissue while maintaining photosynthetic activity on their dorsal surfaces. This photosynthetic activity is extremely efficient in conditions of low wave energy, allowing coralline algae to be the deepest growing benthic plants known on earth with depth records exceeding 300 m. Despite their slow growth rates, coralline algae are perennial and some plants have been estimated to be up to 700 years old (Frantz et al. 2005); they constitute a long-term reservoir of carbonate in coastal environments.

Coralline algae are thought to be among the first organisms to be impacted by global

changes, particularly the effects of increased CO₂, ocean acidification and warming. Atmospheric CO₂ emitted by human activities and natural processes is absorbed by the ocean (Caldeira, 2003), converting to carbonic acid and lowering the pH of surface waters to levels that will potentially compromise or prevent calcium carbonate accretion by calcifying algae (Anthony et al. 2008).

As stated before, coralline algae play critical roles in coral reefs, and therefore a decline in calcification and health of coralline algae could negatively impact the functioning and structure of coral reefs globally. Further, as coral reefs provide a number of services to humans, a decline of coral reefs can affect human populations and economic growth (e.g. Australia's Great Barrier Reef provides 6 billion dollars per annum to the Australian economy).

In addition to global changes, overfishing and eutrophication are contributing to the large-scale degradation of marine ecosystems. Maerl has traditionally been harvested in Europe by dredging for its use as a soil conditioner or as a treatment for acid drinking water (extraction reached up to 600,000 tonnes per year in the 1970s in France alone). In recent years maerl beds have been the subject of several protection strategies (e.g. Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora, Oskar convention, Grenelle de la mer) and most countries (including France since April 2010) declared a moratorium suspending harvesting of maerl.

Despite being ubiquitous, conspicuous and crucial elements of coastal and oceanic ecosystems, coralline algae have been largely ignored or overlooked by ecologists, and even by numerous phycologists. At generic and species levels, their identification is largely hampered by phenotypic plasticity rendering identification on the basis of growth form and external appearance rarely possible. Many species vary morphologically with age, habitat and environmental factors (Steneck and Adey, 1976; Woelkerling et al. 1993a; Maneveldt and Keats, 2008). To make matters worse, recent studies using molecular tools to assess phylogenetic relationships and species diversity have consistently revealed the presence of cryptic species of coralline algae (Broom et al. 2008; Bittner et al. 2011).

Research is urgently needed on all aspects of evolutionary biology of coralline algae. Without an understanding of the evolutionary history of the Corallinales over geological time, the current diversity of species and their genuine distributions, measurement of change and understanding species-specific responses will not be possible.

Such a challenging task cannot be achieved outside of a collaborative framework. A global seaweed strategy coordinated by Juliet Brodie, Natural History Museum, London, was launched in January 2010 with one of its main objectives to improve the current knowledge on systematics of coralline algae. Toward this goal, recommendations were made for the standardization of molecular markers. Molecular data will contribute to the project of the International Barcode of Life (iBOL) and will be publicly accessible in the web database BOLD (<http://www.boldsystems.org/views/login.php>). Four leading labs, including the phycological group at the MNHN, were identified to start this initiative and to further coordinate the project, with additional labs welcome to join. Floristic surveys of coralline algae are ongoing under the iBOL banner in Canada, Korea and Antarctica. The Spanish Government funded a project entitled Molecular Ecology of maerl which aims to study the genetic diversity and structure of maerl forming species in Spain by developing microsatellite markers. The

CORALG project will directly benefit from the exposure of the international initiative as well as the synergy of collaborative works.

The MNHN holds one of the three major Natural History collections in the world, together with the Natural History Museum, London (UK) and the Smithsonian Institution, Washington (USA). The exceptional collection of Corallinales in the Paris Museum (PC) include both historically important specimens encompassing more than 350 type specimens as well as 1,500 specimens collected over the past four years that were subsampled to constitute a tissue collection to be used in molecular studies.

5.3. State of the Art

In 1986 Robert S. Steneck wrote a review entitled « The Ecology of Coralline Algal Crusts: Convergent Patterns and Adaptative Strategies » which stressed that coralline algae have largely been ignored or overlooked in ecological studies due to their convoluted taxonomy and their difficult identification. More recently Wendy Nelson (2009) re-evaluated the situation in a manuscript entitled: "Calcified macroalgae – critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: a review" and argued the urgent need of studies for "all aspects of the taxonomy, biology and functional ecology of calcifying macroalgae".

The taxonomic study of coralline algae took off in the nineteenth century and was strongly anchored in France, either in province or at the Paris Museum (Woelkerling and Lamy 1998) and continues to be developed there today. Lucie Bittner defended a PhD in 2009 on "Phylogeny of the Corallinales and study of their diversity in the South Pacific" which was co-supervised by Bruno de Reviers, Claude Payri and Line Le Gall. Presently, Viviana Peña Freire has been awarded a postdoctoral fellowship from the Spanish Government to study evolutionary history of the non geniculate coralline algae of the European coasts under the supervision of Line Le Gall. Bruno de Reviers thoroughly studied historical collections of coralline algae and contributed to the Atlas of non-geniculate coralline red algae from the Paris Museum (Woelkerling and Lamy, 1998); together with William Woelkerling, a second volume on geniculate coralline algae is prepared.

A search on the web of science reveals that research on coralline algae over the last decade is led world-wide by only a handful of laboratories. Searches for the keywords "Corallinales" + "evolution" or "Corallinales" + "ecology" returned 14 and 10 entries respectively, whereas the combination of the three keywords "Corallinales" + "evolution" + "ecology" only returned a single entry highlighting the lack of integration between these fields. A more thorough bibliographical search nevertheless reveals recent advances in several fields of coralline algal evolution. Until the mid 1990's fossil Corallinales were predominantly studied from a geological perspective whereas the systematics of present day Corallinales was approached from an evolutionary perspective with an emphasis on either vegetative (Cabioch, 1972) or reproductive characters (Woelkerling, 1988). After this time, the advent of molecular phylogenies confirmed the evolutionary significance of morpho-anatomical vegetative features. At the same time, paleontologists realized that a large number of the taxonomic criteria used in the identification of recent coralline algae could also be applied to the classification of their fossil counterparts (Braga et al. 1993). Conveniently, the vegetative characters that are most informative from an evolutionary perspective are also the best fossilized features allowing the inclusion of both recent and

fossil Corallinales in phylogenies inferred from anatomical traits (Braga, 2003). Moreover, a dated evolutionary history of the coralline algae was inferred by combining data from an SSU phylogeny of present Corallinales and chronostratigraphic data from fossil corallines to calibrate the molecular clock (Aguirre et al. 2010). Calculated ages were congruent with those observed in the stratigraphic record indicating a very complete fossil record. This study paved the way to extend the calibration of the molecular clock deeper in the red algal tree for which thorough phylogenies (Verbruggen et al. 2010) are available but the timing of key events is unknown. In 2008, Hughey et al. conducted the first molecular paleontological study on coralline algae and recovered fragments of DNA from sub-recent corallines and even fossils from Pleistocene that were included in a phylogeny. This pioneering manuscript on molecular paleontology of coralline algae allowed the genuine measurement of evolutionary rates over time, however it suffers from the limited data included in the analyses (only 15 fossil taxa and mostly less than 200 bp of SSU).

At the same time, the resolution of the phylogenetic relationships among coralline algae, which have for a long time been inferred from SSU sequence data analyses, were improved by developing new molecular markers [EF2 (Le Gall and Saunders, 2007), psbA (Broom et al. 2008), LSU (Bittner et al. 2011)] and including key taxa. Successive studies led to a redefinition of the taxonomic structure of red algal lineages at the subclass, ordinal, familial and subfamilial level. The Corallinales and Rhodogorgonales were resolved (Le Gall and Saunders, 2007) and confirmed (Verbruggen et al. 2010) as strong allies within a lineage distinct from the remaining florideophycean lineages, sister to a lineage allying the Ahnfeltiophycidae and the Rhodymeniophycidae. The Corallinales and Rhodogorgonales were thus assigned to a new subclass, the Corallinophycidae, whose members are characterized both by primary pit plugs with two cap layers and the presence of calcite (Le Gall and Saunders, 2007). The inclusion of *Sporolithon*, a genus regarded as a member of the Corallinales revealed its alliance with the Rhodogorgonales rather than the Corallinales (Le Gall et al. 2010). Phylogenetic relationships within the Corallinales were inferred concomitantly by Kato et al. (2011) and Bittner et al. (2011). Both studies revealed the Mastophoridae to be a polyphyletic lineage and proposed the restriction of the Mastophoroideae to the genera *Mastophora* and *Metamastophora* in the aim of rendering this subfamily monophyletic. Kato et al. (2011) also proposed the establishment of three new subfamilies in the Corallinaceae: Hydrolithoideae, Porolithoideae and Neogoniolithoideae. Taxon sampling in these two phylogenies was dominated by Pacific specimens and further studies with a broader sampling of taxa, including specimens from around the world, are now needed. Many species of Corallinales were described from specimens collected in Europe (Atlantic and Mediterranean coasts) and the inclusion of taxa from type localities is needed to resolve taxonomic issues.

Floristic surveys in the UK (Robba et al. 2006), Europe (Walker et al. 2009), New Zealand (Broom et al. 2008), Canada (Hind et al. subm.) and Spain (Peña-Freire, 2011), as well as phylogenetic analyses (Bittner et al. 2011; Kato et al. 2011), revealed the presence of cryptic diversity in several taxa, highlighting the need for further studies to better circumscribe species boundaries within the Corallinales (for instance in the genera *Mesophyllum*, *Neogoniolithon*, *Pneophyllum* and *Spongites*). Moreover, Gabrielson (2011) warned of the difficulty in assigning a species name based on a type specimen to a cluster of specimens delineated on molecular basis and argued that gaining molecular data from type specimens is the most accurate way to link species name and genetic clusters.

Natural History collections provide a valuable resource to the study of evolutionary history of the coralline algae, however both anatomical observation and the acquisition of molecular data involve the partial or complete destruction of specimens. New imaging methods using computed tomography scanning allows the visualization of internal structures without physical dissection of material (Kenneth et al. 2011). To the best of our knowledge, computed tomography scan has not been performed yet on coralline algae. It has, however, proved useful in the study of Scleractinian corals (Kruszyński, 2007) and revealed declined skeletal growth in the massive coral *Diploastrea heliopora* since 1998 (Cantin et al. 2010) which was correlated with an increase of sea surface temperature. The MNHN has recently acquired a CT-scanner, accessible as the AST-RX platform for systematic biological research, and we shall therefore have access to this advanced technology.

In the last couple of years, studies on the interactions of coralline algae with tropical corals emerged and have shed light on the pivotal roles this group of algae play in coral reef ecosystems. Coralline algae display both positive and negative interactions with the corals. For instance, crustose coralline algae facilitate coral larvae recruitment (Diaz-Pulido et al. 2010), but significant competition for space has been seen between crustose algae and corals (Benzoni et al. 2011). As coral larvae actively search for suitable coralline algal substrata for settlement, these algae are important for the resilience of coral reefs. Despite the obvious importance of coralline algae for tropical and temperate reefs, little is known about the taxonomy and phylogenetic relationships of the species involved.

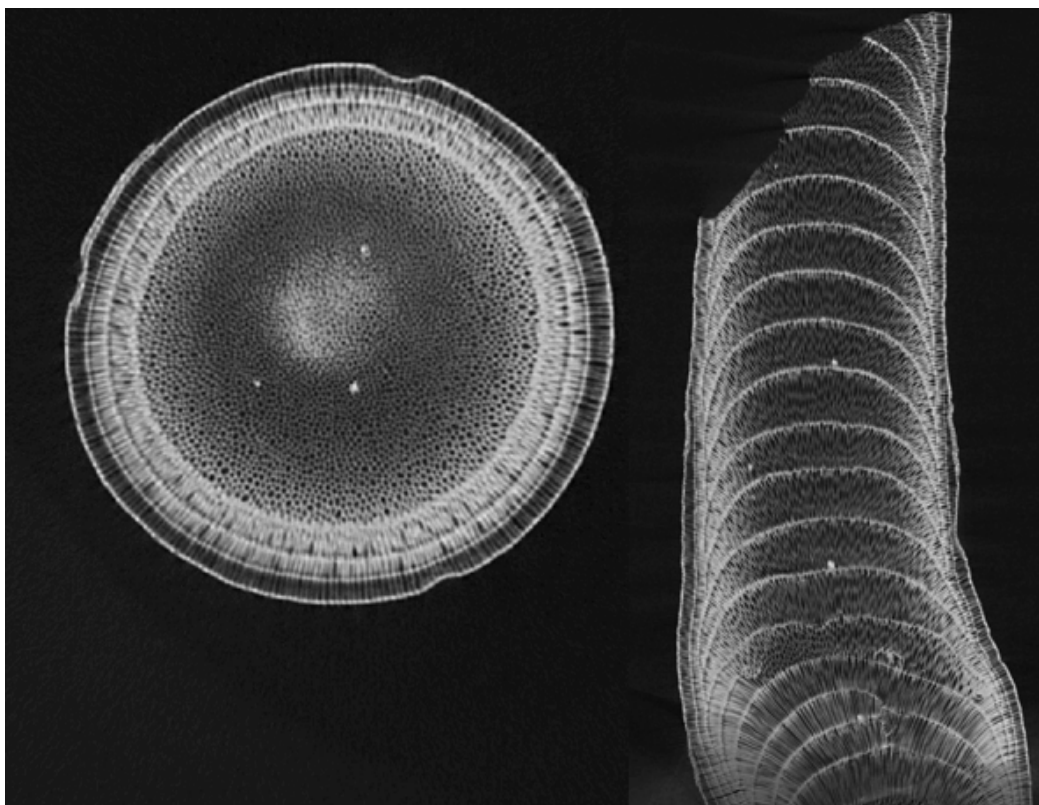


Figure 9 : Observation d'un fragment du type *Titanoderma trochanter* (Bory de Saint-Vincent) Benhissoune, Boudouresque, Perret-Boudouresque & Verlaque en coupe transversale et en coupe longitudinale obtenue sur le CT-scan de la plateforme AST-RX.

Observation of a fragment from the type of *Titanoderma trochanter* (Bory de Saint-Vincent) Benhissoune, Boudouresque, Perret-Boudouresque & Verlaque obtained by CT scan (AST-RX platform). Transversal and longitudinal views.

5.4. Objectives

Until now, our team has developed molecular systematic approaches to infer relationships among organisms either at the macro or micro evolutionary scale. Although swift and reliable, methods of molecular systematics have failed to include an adequate sampling of fossil and ancient type specimens. Compartmentalization in science has been identified as a major impediment for the progress of knowledge although it often results from the incapability of study techniques. The challenge of the present project is to take advantage of the recent methodological advances that now allow high-throughput data acquisition for both morphometric and molecular data to analyse, using identical tools, paleontological specimens, specimens from Natural History collections as well as contemporary collections. This study will allow us to bridge gaps between several disciplinary fields (i.e. paleontology, systematics, ecology). In this project, the integration of data usually studied in distinct fields will allow us to:

- Develop a robust phylogenetic framework which will contribute to a comprehensive taxonomic revision of the coralline algae and provide the basis for interpreting key innovations during their evolution, especially morpho-anatomical characters including developmental features (such as ontogeny).
- Gather the long-term data required to reconstruct scenarios through which members of the Corallinales responded to global changes (e.g. ocean acidification, climate warming) in the past and evaluate the incidence of ongoing anthropogenic changes on coralline algal communities.

To accomplish the aims of the CORALG project, we propose to do the following:

- Employ molecular ecology techniques on 2,500 specimens (of which a 1,000 have to be collected in the course of the project). This will constitute a comprehensive and reliable library of specimens and associated sequences of CO1 (DNA-barcode) and LSU for coralline algae from the Mediterranean Sea, the northeast Atlantic and the South West Pacific. These data will be used to delineate Corallinales species and to assess their diversity and distribution with the aim of inferring their dispersal ability and the mechanisms that underlie their speciation.

Specimens will be stored at PC (French National Herbarium) and will be accessible for loan upon request. Molecular data generated in this study will be freely available via release to BOLD.

- Acquire morphometric data using non destructive computed tomography scanning methods on 50 paleontological relevant specimens, 50 historical (e.g. type) specimens and 50 present coralline algae samples to build a robust matrix of morphological characters that will be used to infer a phylogeny.

Three-Dimensional images will be stored on the MNHN server and will be available upon request and low resolution data will be publicly available via the online Herbarium database Sonnerat.

- Reconstruct a robust phylogeny including key taxa that represent the phylogenetic (e.g., family- and genus-level) breadth of the Corallinales species using a concatenated dataset of three nuclear, one plastid and one mitochondrial encoded gene

markers; use extensive fossil Corallinales to calibrate the molecular clock to build a time tree of the Corallinales and extend it to the Florideophyceae; study their rate of diversification / extinction in light of paleoclimatical data.

Molecular data generated in this study will be freely available via release to GenBank

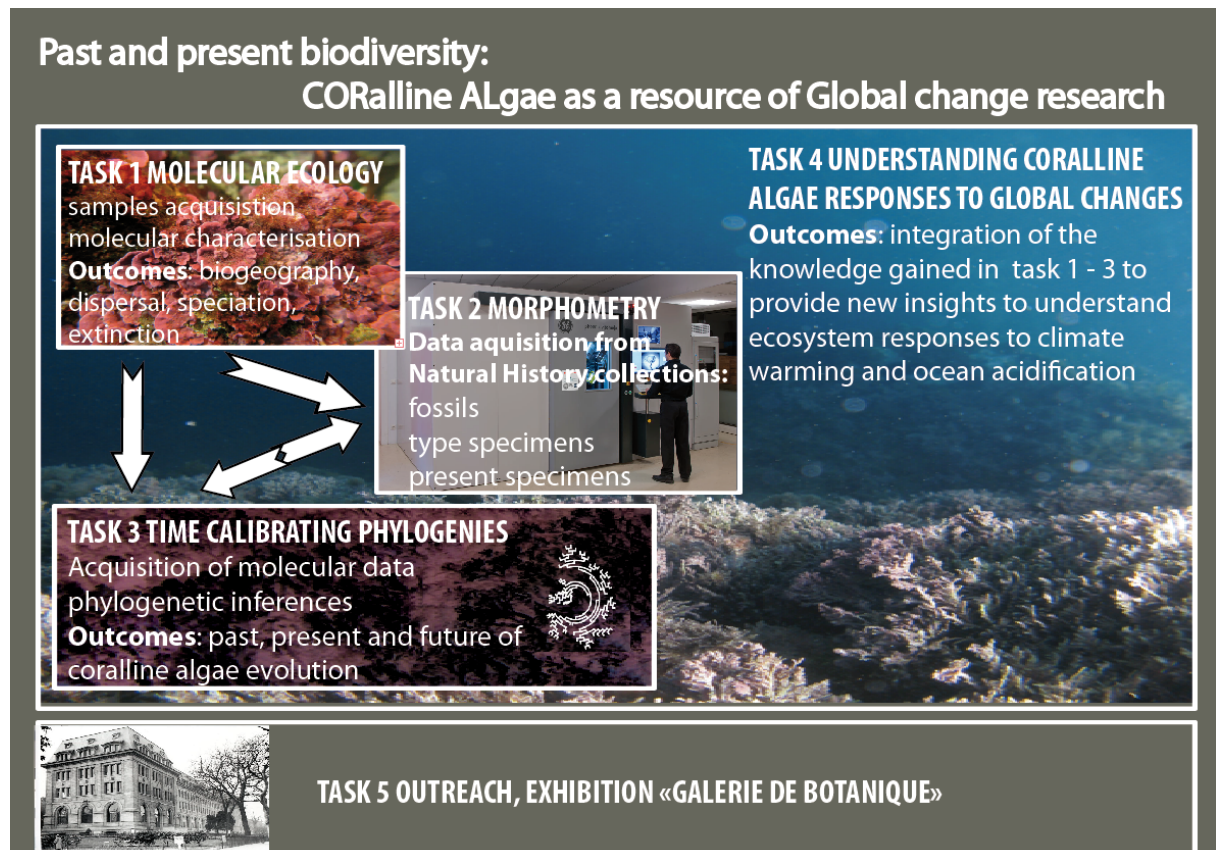


Figure 10 : Organigramme des tâches mettant en évidence les relations entre les trois premières tâches de recherche et leur intégration au sein de la dernière tâche de recherche. La cinquième tâche concerne la diffusion des connaissances.

Project structure highlighting the relationships among the three first research tasks and their integration into the last research task. The task 5 is dedicated to outreach.

5.5. Expected results

5.5.1. Task 1: Molecular ecology

Most basic aspects of the molecular ecology of coralline algae have been largely ignored so far. The first task in this project is dedicated to gather specimens needed to have a comprehensive view of Corallinales evolution. The originality of this project is to include three kinds of specimens, paleontological specimens with stratigraphic record, specimens from Natural History collection including types and historically important specimens and specimens of present Corallinales to infer their potential to face future environmental changes.

Paleontological and type specimens were already identified in the MNHN collection. Coralline algae are often disregarded in algal survey as their gathering require special tools

such as hammer and chisel. In this project they will be actively collected either at low tide or by SCUBA diving. We will record data on the habitat of every collected specimen by taking in situ photography. Each specimen will be sub-sampled to preserve in silica, tissue that will be subsequently used for DNA analysis and the remaining of the specimens will be air-dried and store for morpho-anatomical observations and morphometric analysis. Collection information including GPS coordinates, description of the habitat, in situ photography description of the living plant and subsequent field identification will be consigned in JACIM, the MNHN database available online

(<http://coldb.mnhn.fr/colweb/form.do?model=SONNERAT.wwwsonnerat.wwwsonnerat.wwwsonnerat>). Vouchers will be preserved in the National Herbarium, MNHN, Paris (PC).

Present Corallinales sampling will be performed extensively in ecological, geographical and temporal scales to provide data on distribution and phenology of species. In order to broadly sample the algal diversity we will collect in diverse habitats (e.g. Seagrass beds, Fucal meadows, "sidewalks", coralligenous, cave entrance...) using either quadrates of 625 cm² or transect lines. In the course of previous campaign, ca. 1500 specimens were already collected along the coasts of Europe (Normandy & Brittany (French Atlantic), Galicia, Asturias & Cantabria (Spanish Atlantic), Menorca & Costa Brava (Spanish Mediterranean), Rousillon, Provence, Corse (French Mediterranean), Venetia & Sicily (Italy), Karmates (Croatia)), and in the Indo-Pacific oceans (mainly New Caledonia, Vanuatu and Madagascar). Two campaigns organized jointly by the MNHN and an NGO, Pro Natura International, under the flag « revisited planet » are planned in Guadeloupe (May 2012) and Papua New Guinea (upon funding). Moreover, we plan to apply to the next Assemblée call (A EU FP7 research infrastructure initiative which provides access to marine research stations) to collect in Algarve (Portugal).

In the aim of having a more comprehensive sampling, key geographical areas will be intensively studied to complete this previous sampling. We will, in particular, focus on the two highly contrasted systems which are both hotspots of biodiversity. Firstly, we will study the coralline flora of the almost closed Mediterranean Sea and its relationships with the adjacent Atlantic coasts (temperate waters) which both have continuous coastlines. Secondly, we will study the South Western Pacific (tropical waters) flora which is spread around many islands (more or less far from each other) which constitute a highly fragmented habitat for coastal species. The study of the Mediterranean Sea and the north eastern Atlantic may also reveal longitudinal and latitudinal gradients, respectively, in species distribution. The comparison of patterns observed in these two case studies will provide comprehensive data to infer the processes that drive dispersal, speciation and extinction of marine organisms.

For each specimen, two markers (the CO1 barcode sequence and partial LSU) will be generated within four months following its gathering and the data will be uploaded and made publicly available in the Barcode of life database (BOLD). This database will constitute a reliable library which will be of great value for many stakeholders involved in conservation and impact studies. Acquisition of barcode sequences from coralline algae already yields more than 75% of positive results; however in the course of this project we will try to improve our success rate by optimizing DNA extraction and PCR procedures.

Table 1: Proposed sampling schedule of the height field trips.

	2012	2013	2014	2015	TOTAL
Localities	Banyuls (F), GBR (Au)	Villefranche (F), Tanger (M), Annaba (Al)	Naples (I), Iceland	TBD	
# specimens	300	500	150	50	1000

Al: Algeria, Au: Australia, F: France, GBR: Great Barrier Reef, I: Italy, M: Maroc, TBD: to be determined.

In the course of systematic studies we often realize after analysing the data that key geographical areas or key taxa are missing for a comprehensive study, we therefore planed two collecting trips with no predetermined destination, in the last two years of this project, in order to gather those key specimens in light of the results we will have gained by then.

Field trips are at high risk for various contingent reasons such as weather and political instability. We have taken into account in this proposal the average number of collected samples in previous expedition where we had to face such unforeseeable events. If a trip have to be cancelled we will do our best to either reschedule it or to relocate it.

Table 2: Involvement of each participant (in months) into the task 1

	L. Le Gall	F. Rousseau	B. de Reviers	V. Peña-Freire	Postdoc/IR	Total
Task 1	10	10	2	6	12	40

With the collaboration of Olivier de Clerck, University of Ghent, Belgium ; and Guillermo Diaz-Pulido, Griffith University, Australia.

Line Le Gall and Florence Rousseau will organize expeditions and apply for collecting permits (a task for which they have previous successful experiences). In the field, they will coordinate and supervise the sampling. They are both certified divers (Certificat d'Aptitude à l'Hyperbarie). Bruno de Reviers, Viviana Peña-Freire and the postdoc fellow will participate to the expeditions. Foreign collaborators will facilitate permit applications and our venue to their local marine stations.

Postdoc fellow will extract DNA, PCR the barcode genes (CO1, psbA, LSU). Sequencing will be performed externally.

Results will be analysed collectively.

5.5.2. Task 2: High-throughput morphometric analyses of paleontological, historically important and modern specimens

Acquisition of anatomical data from Natural History collection is often hampered by the necessity to damage the specimens prior to observation. The computed tomography scan allow bypassing this issue and constitute a non invasive method to provide three-dimensional characterisation of morpho-anatomical features. The second task of this project will be dedicated to the acquisition of morphometric data for taxa selected for their significance. We aim to digitalise ca. 50 fossil records from Lemoine's collection associated with stratigraphic records dating from the Cretaceous to subpresent, 50 types specimens and 50 current Corallinales for which we have extensive molecular data. We will generate a

matrix of morpho - anatomical features.

Table 3: Involvement of each participant (in months) into the task 2

	L. Le Gall	F. Rousseau	B. de Reviers	V. Peña-Freire	postdoc/IR	Total
Task 2	6	0	1	3	12	22

Results will be analysed collectively with the collaboration of Daniela Basso University Bicocca, Italy.

Line Le Gall and Bruno de Reviers will sort the specimens for computed tomography scan from the PC collection and will gather key specimens from other collection such as the British Museum and Tromso Museum (Foslie collection). Line Le Gall and the postdoc fellow will prepare the support to hold the specimens during the scanning and assist the operator of the AST-RX platform to acquire the data. They will also take care of post-treatment (image analyses, measures, segmentation, three-dimensional modelling) in the aim to generate a matrix of morpho – anatomical characters. Bruno de Reviers will provide insights in the interpretation of morpho – anatomical structures with a particular emphasis on the ontology of structure development.

5.5.3. Task 3: Time calibrated phylogenies

To date one of most important challenge in the field of evolution is to provide a reliable evolutionary time tree. Calibrated phylogeny is the necessary condition to link biological and geological events. A better understanding of the effect on biodiversity of past global changes will allow being more effective to analyze and predict the impact of present and future changes. Coralline algae constitute an ideal group for this attempt because of their excellent continuous fossil record (Aguirre et al., 2010). An integrated approach combining morphological and molecular data on present and fossil specimens will be achieved to accurately reconstruct evolutionary history of this group.

An extensive acquisition of molecular data will be done on selected new collected specimens (ca. 100 specimens, task 1) in order to complete data that we already generated (ca. 100 specimens, Bittner et al., 2011). The four markers (LSU, SSU, psbA and CO1) already used in Bittner et al. (2011) will be sequenced. In addition, the EF2 nuclear marker which has shown adapted sequences variability for other red algal group (Verbruggen et al., 2010) will also be sequenced for all specimens included in analyses.

Mitochondrial, plastid and nuclear multi-markers phylogenies will be built from combined loci alignments (representing ca. 9300pb for 200 taxa) using maximum likelihood and bayesian methods. Evolutionary history of non-molecular characters will be investigated by two approaches: either by comparing phylogeny inferred through morphological characters with molecular ones, or by maximum likelihood inference of trait evolution mapped on molecular topologies. We will use a relaxed molecular clock method to infer a time-calibrated phylogeny of Corallinales. Constrained nodes will be based on the extensive knowledge from the fossil records (including our results from task 2) and will most certainly enable the reconstruction of a reliable time tree.

This third task of the project should not be an issue since the team has a long experience in corallinales phylogenies and time tree reconstruction (Bittner et al., 2011, Silberfeld et al., 2010). However the elaboration of this huge data set will require time to

obtained sequences and performed analyses as well as to test their congruency and consistency.

Moreover, to improve accuracy of calibrated phylogenies as well as to facilitate systematics revision of Corallinales, we will try to include in molecular data set sequences from both fossils and type collection specimens. The MNHN herbarium (PC) contains numerous type specimens dating of 50 years to 250 years. Ancient DNA studies are characterized by low quality DNA. This places limits on what analyses can be achieved. To avoid results stemming from sample or extract contamination, as opposed to authentic extracted DNA we will include extensive negative control at each step of the DNA extraction procedure by sampling all the reagent and including them in the PCR.

Table 4: Involvement of each participant (in months) into the task 3

	L. Le Gall	F. Rousseau	B. de Reviers	V. Peña-Freire	postdoc/IR	Total
Task 3	8	10	2	3	12	35

Results will be analysed collectively with the collaboration of Olivier de Clerck, University of Ghent, Belgium ; Daniela Basso University Bicocca, Italy.

5.5.4. Task 4: Understanding coralline response to global changes

The final objective of this project is to integrate the results from the fields of molecular ecology together with those of paleontology to analyze in an evolutionary framework the biotic response to global and anthropogenic changes. This approach has proved useful to study changes in coral community (Roche et al., 2011) through geological time and to reveal recent (ca. 10 years) response of a scleratinian coral taxa to anthropogenic changes (Cantin 2010).

Toward this last research task we will put our Natural History collections to good use and mine data from JACIM (http://jacim.mnhn.fr/wiki/Wiki.jsp?page=Jacim_Documentation) a database developed with *Oracle RDBMS* (Oracle corporation) at the MNHN for Natural History collection. Specimens of corallines algae are registered in the Herbarium database (Sonnerat) which currently includes 2,500 specimens and will be completed by an additional 1,000 specimens that we plan to collect in task 1. The first step of this task will consist in the homogenization of historical data spanning 250 years for collection details such as taxonomical names, collection dates, stratigraphic records associate to fossil specimens, geo referencing (latitude, longitude, depth), ecological and phenological data. The second steps will consist in linking new data generated in the three first tasks of this project in relational database. Molecular data will be store in the “Moléculaire” database; however, Sonnerat will have to be extended to store morphometrics data. The third step will consist of the observation of morpho-anatomical features of as many specimens as possible from the Est Atlantic, Mediterranean and South West Pacific with the aim of accurately identifying them in light of the results obtained in task 1 and 3. We will as well gain phenological data.

Fossil data will be analyzed in light of geological events including paleoclimate data to evaluate the successfulness (in term of speciation or extinction) of the phylogenetic lineages to past global changes.

Specimens from PC collected over the past 250 years will be analysed with a Geographic Information System to study recent changes in the flora in response to anthropological induced changes. This approach should detect changes in the community

composition and biodiversity through time and space. This will enable to detect species extinction as well as the introduction of exogenous species and the shift in distribution which could be correlated with changes in environmental conditions. Time series of hydroclimatic parameters will be accessible via the “Service d’Observation du Milieu Littoral” (SOMLIT) for both the Mediterranean and the Atlantic coasts of France. Combining our data with climate and ocean acidification model simulations, we will most likely be able to predict the response of coral reefs and maerl beds to anthropogenic changes.

Moreover, seasonal and interannual variations in climate often induced phenological shifts. Our updated database will be mined to highlight sensitive taxa to seasonal variations. In addition, we will investigate putative ecotypic variations in morph such as plant size in nodule coralline algae, cell size and thickness of calcified cell wall. The study of the density of calcification in fossils specimens with stratigraphic records may constitute an indicator to assess concentration of carbonates in marine environments through time.

Species displaying phenotypic or ecotypic variations will be excellent indicators of anthropogenic induced changes. Unfortunately, time series in Natural History collections are at best fragmentary to monitor global changes and the establishment of new time series is needed. Toward this goal, our results will provide a comprehensive scientific background to select relevant taxa for monitoring studies.

Finally, the integrative analysis of the data generated in this study should enable the identification of axes for future research using Corallinales as a model to study global changes. Ecophysiological response of coralline algae to ocean acidification is one of the foreseen perspectives.

Table 5: Involvement of each participant (in months) into the task4

	L. Le Gall	F. Rousseau	B. de Reviers	V. Peña-Freire	postdoc/IR	Total
Task 4	10	8	2	0	12	32

Results will be analysed collectively with the collaboration of Olivier de Clerck, University of Ghent, Belgium ; Daniela Basso, University Bicocca, Italy, Guillermo Diaz-Pulido, Griffith University, Australia

5.5.5. Task 5: Exhibition in the future gallery of botany

In 2006, the Muséum national d’histoire naturelle (MNHN) launched a renovation project for the National Herbarium. Work began in August 2009 and will continue through mid-2012. The renovation of the botanical collections encompasses the renovation of the building and a new design of the storage facility (mobile units) with the aim to increase storage space, the digitalization and the databasing of the collection and a the re-opening of a gallery dedicated to the public. The exhibition will constitute the last corner stone of the renovation project and the inauguration is scheduled in 2014. It will display the Museum's botanical collections from a new and dynamic angle, the evolution of life. Within this project it is our aim to present a permanent exhibition on the collection of coralline algae and its relationships with the investigators that used to work at the MNHN. We will also emphasize the contribution of historical collections of Natural Sciences to the various concepts that were developed in the last 250 years as well as its present significance to nowadays research.

In this exhibition, Corallines algae will contribute to illustrate what used to be called « cryptogams ». If this « group » is no longer tenable (polyphyletic) in light of the eukaryotic tree of life, it still reflects the history of the discipline and in a lesser extent the new distribution of the collections in the renewed building. Most of the other specimens that will be presented in this exhibition will be higher plants pressed on herbarium sheets. For Corallinales we will present unusual voucher specimens which look more like stone than plants. We will present both specimens that presently occur and paleontological taxa in show windows insisting on the fact that Corallinales is the single red algal order with extensive fossil records. We will highlight the use of Natural History collections by displaying the three-dimensional images gained with the CT scan on an interactive computer based display. We will explain the research activities and show results and a classification of the Corallinales on posters. The publications dealing with the Corallinales of the Muséum national d'histoire naturelle will also be displayed. Lately, the contribution of the great expedition organized by the Muséum national d'histoire naturelle to enrich the Herbarium collection will be stressed and a movie on the Santo expedition will be displayed.

Each year, two million of people visit the « Jardin des plantes » ensuring a high visitation of the various galleries. The renovation of the Herbarium is the object of a web documentary and two five minutes web-based presentations will be recorded to present the research activities performed by the « phycological group » of the MNHN and the new gallery of botany. It is likely that those short sequences will expand the reach of this exhibition. In addition, the Direction de la diffusion, de la communication, de l'accueil et des partenariats (DICAP) will ensure the announcement of the opening of the gallery on national and regional press as well as on TV based media.

Table 6: Involvement of each participant (in months) into the task 5

	L. Le Gall	F. Rousseau	B. de Reviers	V. Peña-Freire	postdoc/IR	Total
Task 5	2	0	1	0	0	3

With the collaboration of Denis Lamy, Research ingeener CNRS, historian specialist of science history, director of the botany librairy of the MNHN.

In coordination with the « department des galleries » and the « Direction de la diffusion, de la communication, de l'accueil et des partenariats (DICAP) » Line Le Gall and Bruno de Reviers will prepare the material for the exhibition.

6. CONCLUSIONS

L'ensemble des travaux de recherche que j'ai conduit et que j'ai supervisé m'a permis d'acquérir la maîtrise des techniques d'échantillonnage et d'analyses statistiques, de culture, de biochimie, de biologie moléculaire et d'analyses phylogénétiques. Mes travaux de thèse m'ont permis d'approfondir mes connaissances sur l'écologie, la biologie et la physiologie d'un organisme tandis que mon expérience post-doctorale s'est concentrée sur l'étude de la diversité de l'ensemble des algues rouges par des approches de systématique intégrative dans le cadre conceptuel de la théorie de l'évolution. Depuis ma prise de fonction en avril 2007 en tant que maître de conférences du Muséum national d'histoire naturelle, mes objectifs sont centrés sur les collections d'histoire naturelle. Dans ce contexte, j'ai développé et encadré des travaux de recherche visant à étudier l'histoire évolutive des algues rouges sur la base de leur phylogénie et à documenter les propriétés de la diversité des espèces d'algues rouges (richesse, distribution, rareté), afin de mieux appréhender la diversité des mécanismes qui en sont à l'origine. Depuis ma prise de fonction au Muséum, j'ai encadré quatre doctorants et deux post-doctorants dont les travaux ont conduit à la publication de cinq publications dans des revues d'audience internationale. Afin d'alimenter les collections de l'herbier national du MNHN et d'augmenter l'échantillonnage de mes études phylogénétiques j'ai aussi organisé de nombreuses missions de terrain en Europe (Atlantique et Méditerranée) et participé à l'organisation de grandes expéditions naturalistes (Madagascar, Guadeloupe, Papouasie). Ainsi près de 6000 spécimens ont enrichi les collections et contribuent à la production de données d'alpha-taxonomie et de barcode (accessibles à travers les bases de données internationales telles que BOLD, EOL etc.). L'ensemble des données acquises permet, à présent, d'aborder des questions de macroécologie telles que l'évaluation des facteurs qui influencent le taux de spéciation et la distribution des algues (thèse en cours) ainsi que l'impact des changements globaux sur ces organismes (projet déposé à l'ANR JC - JC). Au-delà de mes propres travaux, j'ai exposé ma vision des perspectives de recherche en phycologie dans un éditorial cosigné avec Ian Probert quand, tous deux, avons pris la responsabilité éditoriale de *Cryptogamie, Algologie*.

The studies that I have conducted so far, as well as those that I have supervised, provide me with strong skills in sampling strategies, statistical analyses, seaweed cultivation, biochemistry, molecular biology and phylogenetic analyses. My PhD study provides me with basic knowledge on ecology, biology and physiology of a single species of red algae, whereas, my postdoctoral training focused on the study of red algal biodiversity in the conceptual framework of evolutionary theory. Since I have been appointed as an assistant professor (maître de conférences) at the Muséum national d'histoire naturelle, in April 2007, my research has focussed on the study of natural history collections. In this context, I carried on and supervised studies aiming at inferring evolutionary history of red algae from phylogenetic reconstructions as well as researching attributes of red algal species diversity (richness, distribution, rarity) in order to better attribute the various processes that drive this diversity. I have advised four PhD students and two postdoctoral fellows whose work led

to the publication of five manuscripts in peer-reviewed journals. In the aim of enhancing the museum collection and improving taxon sampling in phylogenetic studies, I have organized numerous fieldwork trips in Europe (Atlantic and Mediterranean Sea). Moreover, I have participated to the organization of All Taxa Biodiversity Inventories (Madagascar, Guadeloupe, Papua New Guinea). Almost 6,000 specimens have been collected and currently contribute to taxonomic and barcoding projects (data are publicly available via international databases such as BOLD, EOL, GenBank, etc.) This comprehensive dataset enables us to contribute to the field of macro ecology by investigating factors influencing speciation rate or organism distributions (ongoing PhD project) as well as the impact of global changes on these organisms (research proposal submitted to the national funding agency). Beyond my own research focus, I have outlined my views on future research in phycology in an editorial co-authored with Ian Probert, and together we have taken the editorship of *Cryptogamie, Algologie*.

Le Gall, L., Probert, I., 2011. Editorial. *Cryptogamie-Algologie*, 32 (4): 311-312.

Little doubt remains that the Earth is currently faced with exceptional, anthropogenically-induced global changes including climate warming and ocean acidification. As a consequence of these major perturbations, the planet is enduring increasing loss of species, with algae not spared from this "6th extinction". Increasing transportation of marine organisms, associated notably with commercial shipping, is resulting in repetitive introduction of species into non-native ecosystems, and, algae, as primary producers, are often prone to rapid proliferation that can seriously affect native flora. Blooms of algal species that are toxic or otherwise harmful to other components of ecosystems are an ongoing cause for major economic concern in many regions of the world. Recently, algae have also become the subject of intense interest in a variety of biotechnological fields, notably for the promise they hold for exploitation for the production of biofuels.

Like many biological research fields, phycology has embraced the -omics era in recent years through the increasingly accessible use of high-throughput techniques for studying cellular or ecosystem components. Tidal waves of data will soon be washing over phycological communities, with bioinformatic analysis becoming increasingly central to most biological research. In these rapidly evolving environmental, socio-economic, technological and conceptual contexts, we would like to stress that there is currently a more urgent need than ever before to foster studies on algal taxonomy, ecology and evolution in order to provide the essential foundation for state-of-the-art research ranging from environmental monitoring to bio-prospecting. Without the existence of a high-quality, comprehensive reference taxonomic framework linked to robust understanding of evolutionary relationships between taxa, it will clearly not be possible to optimally exploit the vast majority of "next generation" data.

Taxonomy and systematics are viewed in many quarters as outdated sciences (or even not as "real" science), but paradoxically the fact that description of diversity represents a major bottleneck for biological research has been recognized for some time. There are signs that the situation is starting to evolve. During the last International Botanical Congress which was held in Melbourne in July 2011, the International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (ICN) committed to facilitating the description of newly discovered taxa, notably by allowing diagnosis in either latin or english, as well as by accepting electronic publication as a valid means of describing new species (Knapp *et al.* 2011). We fully support these measures and we intend to ensure that *Cryptogamie, Algologie* provides the means to swiftly publish studies on algal diversity, without compromising on control of the quality of submissions. We believe that the introduction of standardised and streamlined practices and global initiatives will contribute to promoting modernisation in systematics and we intend to encourage communication and debate on the current and future roles of systematics in modern phycology.

We have the great pleasure and the challenging task of taking on the editorship of *Cryptogamie, Algologie* at this crucial period and with the help of the dedicated team of associate editors, and, of course, of the scientific contributors, we wish to continue the tradition of the journal of publishing high-quality taxonomic research, but also to provide a dynamic forum for placing descriptive work in ecological and evolutionary contexts in order to better understand algal biodiversity both in its benthic and planktonic, as well as marine and freshwater components.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les publications reproduites apparaissent sur fond vert.

Publications for which reprints are available are highlighted on a green background.

- Adey, W.H., 1998. Coral reefs: Algal structured and mediated ecosystems in shallow, turbulent, alkaline waters. *Journal of Phycology* 34: 393-406.
- Adl, S., et al., 2012. The new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. *Journal of Eukaryotic Microbiology* in press.
- Agardh, C.A., 1817. *Synopsis algarum Scandinaviae*, adjecta dispositione universali algarum. Lund, 135 p.
- Agardh, J.G., 1851. *Species genera et ordines algarum*, seu descriptiones succinctae specierum, generum et ordinum, quibus algarum regnum constituitur. Volumen secundum: alga florideas complectens. Lund, 351 p.
- Agardh, J.G., 1863. *Species genera et ordines algarum*, seu descriptiones succinctae specierum, generum et ordinum, quibus algarum regnum constituitur. Volumen secundum: alga florideas complectens. Lund, 1291 p.
- Agardh, J.G., 1876. *Species genera et ordines algarum*, seu descriptiones succinctae specierum, generum et ordinum, quibus algarum regnum constituitur. Volumen tertium: de Florideis curae posteriores. Leipzig, 724 p.
- Aguirre, J., Perfectti, F., Braga, J.C., 2010. Integrating phylogeny, molecular clocks, and the fossil record in the evolution of coralline algae (Corallinales and Sporolithales, Rhodophyta). *Paleobiology* 36: 519-533.
- Anthony, K.R.N., Kline, D.I., Diaz-Pulido, G., Dove, S., Hoegh-Guldberg O., 2008. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 17442-17446.
- Benzoni, F., Basso, D., Caragnano, A., Rodondi, G., 2011. *Hydrolithon* spp. (Rhodophyta, Corallinales) overgrow live corals (Cnidaria, Scleractinia) in Yemen. *Marine Biology* 158: 2419-2428.
- BIOMAERL team, 1998. Maerl grounds: habitats of high diversity in European seas. In third European Marine Science and Technology conference, Project synopses Vol.1 : marine systems. Lisbon, European Commission, pp. 170-178.
- Bittner, L., Payri, C.E., Maneveldt, G.W., Couloux, A., Cruaud, C., Reviers, B. de, Le Gall, L., 2011. Evolutionary History of the Corallinales (Corallinophycidae, Rhodophyta) inferred from nuclear, plastidial and mitochondrial genomes. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 61 (3): 697-713.
- Bjork, M., Mohammed, S., Bjorkland, M., Sems, A., 1995. Coralline algae, important coral reef builders threatened by pollution. *Ambio* 24 (7-8): 502-505.
- Bosence, D.W.J., 1983. Coralline algal reef frameworks. *Journal of the Geological Society* 140: 365-376.
- Braga, J.C., 2003. Application of botanical taxonomy to fossil coralline algae (Corallinales, Rhodophyta). *Acta Micropaleontologica Sinica* 20 (3-4): 47-56.
- Braga, J.C., Bosence, D.W.J., Steneck, R.S., 1993. New anatomical characters in fossil coralline algae and their taxonomic implications. *Palaeontology* 36 (3): 535-547.

- Broom, J.E.S., Hart, D.R., Farr, T.J., Nelson, W.A., Neill, K.F., Harvey, A.S., Woelkerling, W.J., 2008. Utility of psbA and nSSU for phylogenetic reconstruction in the Corallinales based on New Zealand taxa. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 46 (3): 958-973.
- Cabioch, J., 1972. Etude sur les Corallinacées. II. La morphogénèse: conséquences systématiques et phylogénétiques. *Cahiers de Biologie Marine* 13: 137-288.
- Caldeira, K., Wickett, M.E., 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425:365.
- Cantin, N.E., Cohen, A.L., Karnauskas, K.B., Tarrant, A.M., McCorkle, D.C., 2010. Ocean warming slows coral growth in the central Red Sea. *Science* 329 (5989): 322-325.
- Cavalier-Smith, T., 1998. A revised six-kingdom system of life. *Biological Reviews* 73 (3): 203-66.
- Christensen, T., 1962. Alger. In: Böcher, T.W., Lange, M., Sørensen, T. (Eds), *Botanik*. Bind II. Systematisk botanik Nr. 2. Copenhagen, Denmark I Kommission hos Munksgaard, pp. 1-178.
- Christensen, T., 1978. Annotations to a textbook of phycology. *Botanisk Tidsskrift* 73: 65-70.
- Cronquist, A., 1960. The divisions and classes of plants. *Botanical Reviews* 26 (4): 425-482.
- Decaisne, J., 1842. Essais sur une classification des algues et des polypiers calcifères de Lamouroux. *Annales des Sciences Naturelles, Botanique*, 2^e série, 17: 297-380.
- Diaz-Pulido, G., Harii S., McCook, L.J., Hoegh-Guldberg O., 2010. The impact of benthic algae on the settlement of a reef-building coral. *Coral Reefs* 29 (1): 203-208.
- Diaz-Pulido, G., McCook, L.J., Larkum, A.W.D., Lotze, H.K., Raven, J.A., et al. 2007. Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change. In: Johnson, J., Marshall, P. (Eds), *Climate change and the Great Barrier Reef: a vulnerability assessment*. Townsville, pp. 151-192.
- Doweld, A., 2001. *Prosyllabus tracheophytorum*. Moscow, USSR.
- Drew, K.M., 1956. *Conferva ceramicola* Lyngbye. *Botanisk Tidsskrift* 53: 67-74.
- Fabrizius, K., De'ath, G., 2001. Environmental factors associated with the spatial distribution of crustose coralline algae on the Great Barrier Reef. *Coral reefs* 19 (4): 303-309.
- Feldmann, J., 1952. Les cycles de reproduction des Algues et leurs rapports avec la phylogenie. *Revue de Cytologie et de la Biologie Végétale* 13(1/2): 4-44.
- Frantz, B.R., Foster, M.S., Riosmena-Rodríguez, R., 2005. *Clathromorphum nereostratum* (Corallinales, Rhodophyta): the oldest alga? *Journal of Phycology* 41 (4): 770-773.
- Freshwater, D.W., Fredericq, S., Butler, B.S., Hommersand, M.H., Chase, M.W., 1994. A gene phylogeny of the red algae (Rhodophyta) based on plastid rbcL. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91 (15): 7281-7285.
- Gabrielson, P.W., 2011. Macroalgal species diversity assessed, but what is my scientific name? 4th barcode of life conference. Adelaide, 28th November -3th December 2011.
- Guiry, M.D., 1974. A preliminary consideration of the taxonomic position of *Palmaria palmata* (Linnaeus) Stackhouse = *Rhodymenia palmata* (Linnaeus) Greville. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 54 (3): 509-528.
- Guiry, M.D., 1978. The importance of sporangia in the classification of the Florideophycidae.

- In: Irvine, D.E.G., Price, J.H., (Eds), *Modern approaches to the taxonomy of red and brown algae*. London, Academic Press, pp. 111-144.
- Guiry, M.D., Guiry, G.M., 2012. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 30 March 2012.
- Harper, J.T., Saunders, G.W., 2001. Molecular systematics of the Florideophyceae (Rhodophyta) using nuclear large and small subunit rDNA sequence data. *Journal of Phycology* 37 (6), 1073-1082.
- Harvey, A.S., Woelkerling, W.J., Millar, A.J.K., 2002. The Sporolithaceae (Corallinales, Rhodophyta) in south-eastern Australia: taxonomy and 18S rRNA phylogeny. *Phycologia* 41 (4): 207-227.
- Harvey, W.H., 1836. Algae. In: Mackay, J.T. (Ed.) *Flora hibernica* comprising the Flowering Plants Ferns Characeae Musci Hepaticae Lichenes and Algae of Ireland arranged according to the natural system with a synopsis of the genera according to the Linnaean system. Dublin, London & Edinburgh: William Curry Jun and Company; Simpkin Marshall and Co; Fraser & Co., pp. 157-254.
- Harvey, W.H., 1847. *Phycologia britannica*, or, a history of British sea-weeds: containing coloured figures, generic and specific characters, synonymes, and descriptions of all the species of algae inhabiting the shores of the British Islands. London, 144 p.
- Hind, K. R., Saunders, G.W., *Submitted*. A molecular phylogenetic study of the tribe Corallineae (Corallinales, Rhodophyta) with an assessment of genus-level taxonomic features and descriptions of novel genera. *Journal of Phycology*.
- Hughey, J.R., Braga, J.C., Aguirre, J., Woelkerling, W.J., Webster, J.M., 2008. Analysis of ancient DNA from fossil corallines (Corallinales, Rhodophyta). *Journal of Phycology* 44 (2): 374-383.
- Johnson, K.G., Brooks, S.J., Fenberg, P.B., Glover, A.G., James, K.E., Lister, A.M., Michel, E., Spencer, M., Todd, J.A., Valsami-Jones, E., Young, J.R., Stewart, J.R., 2011. Climate change and biosphere response: unlocking the collections vault. *BioScience* 61 (2): 147-153.
- Kato, A., Baba, M., Suda, S., 2011. Revision of the Mastophoroidae (Corallinales, Rhodophyta) and polyphyly in nongeniculate species widely distributes on Pacific coral reefs. *Journal of Phycology* 47 (3): 662-672.
- Knapp S., McNeill J., Turland N.J., 2011. Changes to publication requirements made at the XVIII International Botanical Congress in Melbourne - what does e-publication mean for you? *PhytoKeys* 6: 5-11.
- Kruszyński, K.J., Kaandorp, J.A., Liere, J.A.R., 2007. A computational method for quantifying morphological variation in scleractinian corals. *Coral reefs* 26 (4): 831-840.
- Kylin, H., 1925. The marine red algae in the vicinity of of the Biological Station at Friday Harbor, Wash. *Lunds Universitets Årsskrift, Ny Följd, Andra Afdelningen* 21 (9): 1-87, 47 figs.
- Kylin, H., 1956. *Die Gattungen der Rhodophyceen*. C.W.K. Gleerups, Lund, 673 p.
- Lamouroux, J.V.F., 1813. Essai sur les genres de la famille des thalassiphytes non articulées. *Annales du Muséum d'Histoire Naturelle, Paris* 20: 21-47, 115-139, 267-293

Le Gall, L., Payri, C., Bittner, L., Saunders, G.W., 2010. Multigene phylogenetic analyses support recognition of the Sporolithales *ord. nov.* *Molecular Phylogenetics and Evolution* 54 (1): 302-305.

Le Gall, L., Probert, I., 2011. Editorial. *Cryptogamie, Algologie*, 32 (4): 311-312.

Le Gall, L., Saunders, G.W., 2007. A nuclear phylogeny of the Florideophyceae (Rhodophyta) inferred from combined EF2, small subunit and large subunit ribosomal DNA: establishing the Corallinophycidae subclassis *nov.* *Molecular Phylogenetics and Evolution* 43 (3): 1118-1130.

Le Gall, L., Saunders, G.W., 2008. Phylogenetic analyses of the red algal order Rhodymeniales support recognition of the Hymenocladaceae *fam. nov.*, Fryeellaceae *fam. nov.*, and *Neogastroclonium gen. nov.* *Journal of Phycology* 46 (6): 1556-1571.

Le Gall, L., Saunders, G.W., 2010. DNA barcoding is a powerful tool to uncover algal diversity: a case study of the Phyllophoraceae (Gigartinales, Rhodophyta) in the Canadian flora. *Journal of Phycology* 46 (2): 374-389.

Littler, M.M., 1973. The population and community structure of Hawaiian fringing reef crustose Corallinaceae (Rhodophyta, Cryptonemiales). *Journal of experimental Marine Biology and Ecology* 11 (2): 103-20.

Maneveltdt, G.W., Keats, D.W., 2008. Effects of herbivore grazing on the physiognomy of the coralline alga *Spongites yendoii* and on associated competitive interactions. *African Journal of Marine Science* 30: 581-593.

Martin Lescanne, J., Rousseau, F., Reviers, B. de, Payri, C., Couloux, A., Cruaud, C., Le Gall, L., 2010. Phylogenetic analyses of the *Laurencia* complex (Rhodomelaceae, Ceramiales) support recognition of five genera: *Chondrophycus*, *Laurencia*, *Osmundea*, *Palisada*, and *Yuzurua* *stat. nov.* *European Journal of Phycology* 45 (1): 51-61.

Merola, A., Castaldo, R., Deluca, P., Gambardella, R., Musacchio, A., Taddei, R., 1981. Revision of *Cyanidium caldarium*. Three species of acidophilic algae. *Giornale Botanico Italiano* 115: 189-195.

Moreira, D., Le Guyader, H., Philippe, H., 2000. The origin of red algae and the evolution of chloroplasts. *Nature* 405: 69-72.

Moussavian, E., Salas, R., Martin-Closas, C., 1993. Evidence of modern red algae (Corallinaceae, Peyssonneliaceae) in the pre-Barremian Cretaceous. *Second regional symposium of the International Fossil Algae Association, "Alpine Algae,"*. Munich, Abstracts, p. 42.

Nägeli, C., 1847. Die neuern Algensysteme und Versuch zur Begründung eines eigenen Systems der Algae und Florideen. Zurich, Switzerland, 275 p.

Nelson, W., 2009. Calcified macroalgae - critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: a review. *Marine and Freshwater Research* 60 (8): 787-801.

Oltmanns, F., 1904. Morphologie und biologie der algen. Jena, 733 p.

Papenfuss, G.F., 1955. Classification of the algae. In: *A century of progress in the natural sciences, 1853-1953*. San Francisco, California Academy of Sciences, pp. 115-224.

Payri, C.E., Cabioch, G., 2003. The systematics and significance of coralline red algae in the

- rhodolith sequence of the Amédée 4 drill core (South-West New-Caledonia). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* (3-4) 204: 187-208.
- Peña, V., Adey, W.H., Riosmena-Rodríguez, R., Jung, M.Y., Afonso-Carrillo, J., Choi, H.G., Bárbara, I., 2011. *Mesophyllum sphaericum* sp. nov. (Corallinales, Rhodophyta): a new maërl-forming species from the NE Atlantic. *Journal of Phycology* 47 (4): 911-927.
- Pueschel, C.M., Cole, K.M., 1982. Ultrastructure of pit plugs: a new character for the taxonomy of red algae. *British Phycological Journal* 17 (5): 238.
- Ragan M.A., Bird C.J., Rice E.L., Gutell R.R., Murphy C.A., Singh R.K., 1994. A molecular phylogeny of the marine red algae (Rhodophyta) based on the nuclear small-subunit rRNA gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91 (15): 7276-7280.
- Robba, L., Russell, S.J., Barker, G.L., Brodie, J., 2006. Assessing the use of the mitochondrial *cox1* marker for use in DNA barcoding of red algae (Rhodophyta). *American Journal of Botany* 93: 1101-1108.
- Roche, R.C., Perry, C.T., Johnson, K.G., Sultana, K., Smithers, S.G., Thompson, A.A., 2011. Mid-Holocene coral community data as baselines for understanding contemporary reef ecological states. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 299 (1-2): 159-167.
- Rodriguez-Ezpeleta, N., Brinkmann, H., Burey, S.C., Roure, B., Burger, G., L  velhardt, W., Bohnert, H.J., Philippe, H., Lang, B.F., 2005. Monophyly of primary photosynthetic eukaryotes: green plants, red algae, and glaucophytes. *Current Biology* 15 (14), 1325-1330.
- Saunders G. W., 2005. Applying DNA barcoding to red macroalgae: a preliminary appraisal holds promise for future applications. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences* 360 (1462): 1879-88.
- Saunders, G. W., Hommersand, M. H., 2004. Assessing red algal supraordinal diversity and taxonomy in the context of contemporary systematic data. *American Journal of Botany* 91 (10): 1494-507.
- Saunders, G.W., 2004. A chronicle of the convoluted systematics of the red algal orders *Palmariales* and *Rhodymeniales* (Floriideophyceae, Rhodophyta) Published online 16.xi.2004; *CEMAR Occasional Notes in Phycology*.
- Schmitz, F., 1883. Untersuchungen   ber die Befruchtung der Florideen. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 10 : 215-258.
- Silberfeld, T., Bittner, L., Fernández-García, C., Cruaud, C., Reviers, B. de, Rousseau, F., Payri, C.E., De Clerck, O., *Submitted*. Phylogeny, species diversity and large scale biogeographical patterns of the genus *Padina* (Phaeophyceae, Dictyotales). *Journal of Phycology*.
- Silberfeld, T., Leigh, J.W., Verbruggen, H., Cruaud, C., Reviers, de B., Rousseau F., 2010. A multi-locus time-calibrated phylogeny of the brown algae (Heterokonta, Ochrophyta, Phaeophyceae): Investigating the evolutionary nature of the ‘‘brown algal crown radiation’’. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 56 (2): 659-674.
- Silva, P.C., 1980. Remarks on algal nomenclature. VI. *Taxon* 29 (5): 121-145.
- Skuja, H., 1939. Versuch einer systematischen Einteilung der Bangioideen oder

- Protoflorideen. *Acta Horti Botanici Universitatis Latviensis* 11/12: 23-38.
- Steneck, R.S., 1986. The ecology of coralline algal crusts: convergent patterns and adaptive strategies. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17: 273-303.
- Steneck, R.S., Adey, W.H., 1976. The role of environment control of morphology in *Lithophyllum congestum*, a Caribbean algal ridge builder. *Botanica Marina* 19 (4): 197-215.
- Stiller, J.W., Riley, J., Hall, B.D., 2001. Are red algae plants? A critical evaluation of three key molecular data sets. *Journal of Molecular Evolution* 52, 527-539.
- Verbruggen, H., Maggs, C.A., Saunders, G.W., Le Gall, L., Yoon, H.S., De Clerck, O., 2010. Data mining approach identifies research priorities and data requirements for resolving the red algal tree of life. *BMC Evolutionary Biology* 10: 1-16.
- Walker, R.H., Brodie, J., Russell, S., Irvine, L.M., Orfanidis, S., 2009. Biodiversity of Coralline algae in the north-eastern Atlantic including *Corallina caespitosa* sp. nov. (Corallinoideae, Rhodophyta). *Journal of Phycology* 45 (1): 287-297.
- Wettstein, A., 1901. Handbuch der systematischen Botanik. Leipzig, Vienna, Austria, 201 p.
- Woelkerling, W.J., 1988. *The Coralline Red Algae* : An Analysis of the genera and subfamilies of nongeniculate Corallinaceae. London and Oxford, 268 p.
- Woelkerling, W.J., Irvine, L.M., Harvey, A.S., 1993. Growth-forms in non-geniculate coralline red algae (Corallinales, Rhodophyta). *Australian Systematic Biology* 6 (4): 277-293.
- Woelkerling, W.J., Lamy, D., 1998. *Non-geniculate Coralline red algae and the Paris Muséum*. Paris, 767 p.
- Yoon, H. S., Müller, K. M., Sheath, R. G., Ott F. D., Bhattacharya, D., 2006. Defining the major lineages of red algae (Rhodophyta). *Journal of Phycology* 42 (2): 482-492.

8. REMERCIEMENTS

A mon sens, la recherche est un travail d'équipe et l'ensemble de ces projets n'aurait pu être développé sans les conseils de nombreux collègues, des supports techniques tant humain que matériel, des moyens financiers, ainsi que le soutien de mes proches et de mes amis.

In my mind, my current research results from a collaborative effort and the projects that I have carried out so far would not have been successful without the advice of numerous colleagues, technical support, state of the art facilities, funding, as well as the warm support of my family and friends.

Je remercie très particulièrement les rapporteurs, Charles-François Boudouresque, Purificación García López et Christine Maggs ainsi que les membres examinateurs du jury, Juliet Brodie, Christophe Destombe et Hervé Le Guyader pour d'avoir accepté de participer à l'évaluation de cette Habilitation à Diriger les Recherches.

Merci à Hervé Le Guyader et à Guillaume Lecointre pour leur accueil au sein, respectivement, de l'UMR7138 et de l'équipe « Phylogénie ».

Je tiens à remercier Bruno de Reviers et Florence Rousseau, membres permanents du «groupe phycologique» qui ont été les instigateurs de l'ouverture du poste sur lequel j'ai été recruté, sans eux je serai sans doute, à l'heure qu'il est, résidente permanente au Canada. A partager quotidiennement avec eux les joies mais aussi les aléas de la recherche, il s'est rapidement tissé un lien, et c'est avec un plaisir toujours renouvelé que je travaille en leur compagnie dans la complémentarité et dans une ambiance amicale.

Je remercie les étudiants et les stagiaires post-doctorants que j'ai, de près ou de loin, encadrés en espérant que l'expérience ait été aussi enrichissante pour eux que pour moi. Merci donc à Alexandre Geoffroy, Carolina Pena Martin, Clara Bertuccio, Julie Martin-Lescanne, Lucie Bittner, María Machín Sánchez, Marine Robuchon, Toni Manghisi, Valeria Fiore et Viviana Peña Freire. L'encadrement des doctorants n'aurait pas été possible sans la complicité de Bruno de Reviers, Claude Payri, Christophe Destombe, et Myriam Valero auprès desquels j'ai beaucoup appris sur l'art de superviser des étudiants.

Je remercie vivement tous les membres du Service de Systématique Moléculaire pour l'accueil qui m'a été réservé. Le SSM est un lieu remarquable où règne dans une ambiance conviviale, une atmosphère de partage des connaissances et des compétences. C'est pour moi une expérience très enrichissante que de me rendre au laboratoire à l'autre extrémité du jardin des plantes. Je tiens ici à rendre hommage à Annie Tillier qui nous a quitté fin septembre 2011. Elle a insufflé à ce service à la pointe du progrès technique, un dynamisme et une nature humaine qui, j'en suis convaincue, perdureront. Je souhaite sincèrement exprimer ma reconnaissance à Marie-Catherine Boisselier pour son dévouement pour la communauté, son esprit d'à propos et la justesse de ces jugements ; ses conseils me sont précieux. J'adresse ma gratitude à Céline Bonillo, qui depuis fin 2009 m'apporte une aide efficace en réalisant bonne part des manipulations et en effectuant un relais au niveau de l'encadrement des étudiants au laboratoire. Je souhaite bonne chance et surtout bon courage à Delphine Gey qui assure dorénavant cette tâche.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont assisté dans les tâches de gestions administratives de la recherche pour leur patience et surtout pour leur efficacité. Je pense notamment à Anne-Marie Mediani, Danielle Merckled, Isabelle Borges, Ludivine Longou, Marie Claude Rossignol, Philippe Leballeur et Vanessa Demanoff.

Étudier la diversité des algues rouges nécessite en premier lieu de récolter des spécimens. Je remercie donc vivement toutes les institutions (Institut de Recherche et Développement, Institut des Sciences de l'Univers, Parc National Marin d'Iroise, Parc National de Port-Cros, Station biologique de Dinard, Station biologique de Roscoff, Laboratoire Arago, Syndicat Mixte de l'Équipement du Littoral) et tous ceux qui, individuellement, ont facilité cette tâche (Antoine Besnier, Bruno Hesse, Claude Payri, Eric Feunteun, Florence Rousseau, Jean-Claude Roca, Jean-Louis Blin, Jean-Louis Menou, Jose Utge, Kyatt Dixon, Laurent Lévêque, Marina Morabito, Mathieu Camusat, Olivier Basuyaux,

Pierre Laboute, Régis Gallon, Sébastien Bregeon, Sebastien Pien, Stephanie Petinay, Toni Garcia Fuente, Toni Manghisi, Yann Fontana, Yannis Turpin). Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Philippe Bouchet pour la confiance qu'il m'a accordée quand il m'a confié la tâche d'effectuer la mission de reconnaissance, d'assumer la coordination scientifique et la responsabilité de la mise en oeuvre des plongées lors de l'expédition 'Atimo Vatae' à Madagascar. L'ensemble de ces expériences m'ont beaucoup appris tant sur les méthodologies d'échantillonnage, que sur les relations humaines et beaucoup plus largement sur la relation entre l'homme et la nature.

Les collections d'Histoire Naturelle étant au cœur des activités du Muséum, je suis chargée de la collection de microalgues. Je remercie Denis Lamy et Bruno Denetière pour prendre le temps de me transmettre leurs connaissances des collections et partager leur goût pour l'histoire de la phycologie.

Je tiens ici à remercier Gary Saunders qui m'a tant appris lors de mon séjour postdoctoral dans son laboratoire et à qui je voue mon amitié. Mes remerciements vont aussi à de nombreux collègues avec lesquels j'ai partagé des échanges fructueux et/ou des moments amicaux, parmi eux je nommerai : Alba Verges, Alexandre Carpentier, Amelia Gomez, Benoît Véron, Charlene Mayes, Corinne Sarthou, Daniella Basso, Dominique Davoult, Eric Coppejans, Eric Feunteun, Frédéric Ysnel, Frédéric Mineur, Frederik Leliaert, Heroen Verbruggen, Ian Probert, Ignacio Barbara, Jean-Yves Dubuisson, Jean-Yves Rasplus, Laly Gil Rodríguez, Laure Corbari, Marie-Claude Noailles, Marina Morabito, Morgan Vis, Nathalie Simon, Oli De Clerck, Olivier Le Gall, Pascal Riera, Paul Gabrielson, Pierre-Henri Gouyon, Rodolphe Lemée, Sarah Samadi, Simon Tillier, Tom Schils, Tonia Ribera. Je souhaite aussi rendre hommage à Jean-Noël Labat qui nous a quitté en janvier 2011. Outre ses inestimables mérites sur le plan scientifique et humain, j'ai sincèrement apprécié l'enthousiasme avec lequel Jean-Noël accordait une place aux plus jeunes d'entre nous.

Enfin, je remercie ma famille et en particulier mes parents pour leur patience envers un dégât des eaux professionnel. J'adresse à Jose Utge Buil un immense merci à plus d'un titre. C'est avec lui que je partage ma vie depuis que je me suis lancée dans l'aventure de la recherche. Il a accepté de partager cette vie nomade et a toujours accueilli la nouvelle de mes pérégrinations de jeune chercheuse avec enthousiasme. Au SSM, il me conseille dans mes manips et assure une veille technologique qui me permet de rester à la pointe des développements méthodologiques. Bien souvent je fais aussi appel à ses compétences de plongeur et de photographe. Merci à Adrian Utge Le Gall pour son indulgence envers une maman trop souvent à l'autre bout du monde et parfois débordée.