

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

FLUX DE CO₂, DYNAMIQUE DU CARBONE ET INFLUENCE DES VARIABLES
ENVIRONNEMENTALES DANS LA MANGROVE ; UNE ÉTUDE DE CAS BASÉE
DANS LE DELTA DU FLEUVE ROUGE (PARC NATIONAL DE XUAN THUY,
DISTRICT DE GIAO THUY, VIETNAM)

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
PIERRE TAILLARDAT

DÉCEMBRE 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Merci tout d'abord à Yann Roche, mon directeur de recherche, de m'avoir offert cette opportunité unique. Merci pour la totale confiance que tu m'auras accordée, tout au long de ce projet ainsi que pour la contribution financière. Le défi était de taille, les inconnues nombreuses et les moments de doutes nombreux, mais quelle aventure excitante!

Un immense merci à l'ensemble de l'équipe de recherche ICARGC et particulièrement au Professeur Cu pour l'accueil et le soutien reçu. Je tiens à remercier sincèrement Hang et Huong pour les beaux moments partagés ainsi que pour l'écoute et l'attention que vous m'avez portée en tout temps.

Merci également à l'IAE de m'avoir accueilli aussi spontanément dans le laboratoire. Merci à Thiet d'avoir facilité cette collaboration. Merci à Miss Ha et à ses étudiants pour leur aide dans mes analyses et pour la découverte des nombreux fruits tropicaux.

Je tiens à témoigner de mes sincères amitiés aux responsables du site du Parc de Xuan Thuy et en particulier à Miss Hien, Mr. Chieu et Mr. Phuong. Je n'oublierai jamais les couchers de soleil bouillants ou les orages surnois qui faisaient de chaque soirée un spectacle magnifique. Je n'oublierai pas non plus les nombreux matchs de football, les baignades, les soirées karaoké et la cuisine excellente que nous partageons.

Remerciement spécial pour Serge Paquet. Ton aide s'est avérée extrêmement précieuse pour l'aboutissement de ce projet. Merci pour ton temps dévoué à ma recherche et pour l'enseignement de cette discipline bien particulière que sont les statistiques.

Enfin, je tiens à saluer tous mes amis et colocataires d'Hanoï et de Montréal qui m'ont côtoyé tout au long de ces deux années. Nul doute que chacun d'entre eux connaît maintenant la signification des mots mangrove et bia hoi! Merci à deux amis en particulier : Mathieu pour m'avoir accompagné dans la mangrove pendant quelques jours et enfin à Armand, qui aura été mon plus grand conseiller, tant pour mon projet de recherche que pour mes réflexions personnelles.

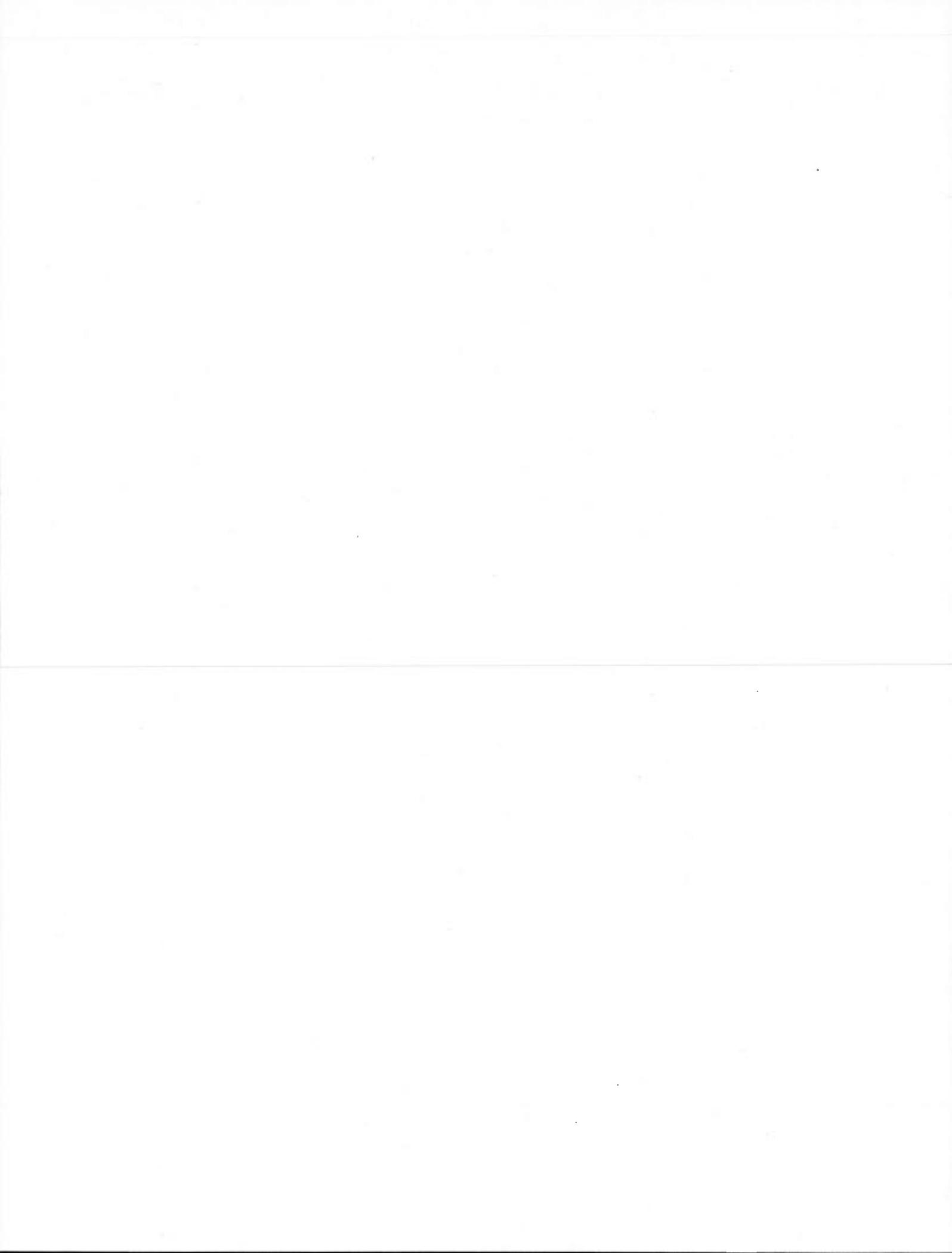
Voici l'aboutissement d'un projet qui m'aura amené à découvrir une nouvelle partie du monde et aussi, une partie de moi-même.

TABLES DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	xiii
RÉSUMÉ	xv
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
1.1. Les mangroves, généralités	1
1.1.1. Définition	1
1.1.2. Répartition géographique des mangroves	1
1.1.3. Propriétés et adaptation du milieu.....	4
1.1.4. Variables environnementales présentes dans l'écosystème	7
1.2. Bienfaits du milieu	8
1.2.1. Actions et fonctions de la mangrove, au profit de son environnement et de ses habitants	9
1.2.2. Actions et fonctions de la mangrove, son implication vis-à-vis des écosystèmes adjacents	10
1.2.3. Actions et fonctions de la mangrove, utilisations et exploitations par les populations locales.....	11
1.3. Menaces actuelles et futures sur les mangroves.....	12
1.3.1. Actions anthropiques.....	13
1.3.2. Changements climatiques	14
1.4. Valorisation économique de l'écosystème	15
1.5. Le rôle des mangroves dans le cycle du carbone	16
1.5.1. Le cycle du carbone global	16
1.5.2. Cycle du carbone et milieux humides	19

1.5.3.	Mangrove, biomasse et productivité	23
1.6.	Approches, région d'étude et objectifs de recherche.....	31
1.6.1.	Considération et cadre de recherche.....	31
1.6.2.	Région d'étude	32
1.6.3.	Hypothèses de recherche	37
1.6.4.	Objectif général de recherche.....	38
1.6.5.	Objectifs spécifiques de recherche	38
CHAPITRE II		
MÉTHODES DE COLLECTES ET D'ANALYSES D'ÉCHANTILLONS.....		39
2.1.	Site d'étude.....	39
2.2.	Mesure du flux de CO ₂	40
2.3.	Caractérisation des paramètres climatiques et tidaux.....	43
2.4.	Caractérisation des sédiments	43
2.5.	Traitement statistique	44
CHAPITRE III		
RÉSULTATS		47
3.1.	Flux de CO ₂ à l'interface sédiment air	47
3.1.1.	Hiérarchisation des variations de valeurs.....	47
3.1.2.	Variations temporelles.....	48
3.1.3.	Variations spatio-temporelles.....	49
3.2.	Flux de CO ₂ et paramètres environnementaux	52
3.1.1.	Analyse par régression multiple.....	52
3.2.1.	Matrice de corrélation par paire	54
3.3.	Caractéristiques des sols entre les sites de Xuan Thuy	57
3.3.1.	Profils de sol.....	57
3.3.2.	Propriétés édaphiques et flux de CO ₂	65

CHAPITRE IV	
DISCUSSION	67
4.1. Flux de CO ₂ à l'interface sédiment-air.....	67
4.2. Flux de CO ₂ et influence des paramètres biologiques et environnementaux	69
4.3. Flux de CO ₂ et propriétés édaphiques	74
CHAPITRE V	
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	77
5.1. Synthèse des résultats de l'étude.....	77
5.2. Limites de l'étude.....	78
5.3. Ouverture pour travaux futurs	79
5.4. Les mangroves, un écosystème aussi précieux que menacé	80
ANNEXE A	
DESCRIPTION DES COLLECTES ET ANALYSES EFFECTUÉES AU COURS DE L'ÉTUDE.....	83
ANNEXE B	
VALEURS MOYENNES DE FLUX DE CO ₂ (mmol.m ⁻² .j ⁻¹), ÉCART TYPE ET NOMBRE n D'ÉCHANTILLONS.....	85
ANNEXE C	
MATRICE DE CORRÉLATION PAR PAIRES DES VARIABLES CLIMATIQUES ET DU FLUX DE CO ₂ EN CONDITION NON PARAMÉTRIQUE, À PARTIR DU TEST DE SPEARMAN	87
ANNEXE D	
VALEURS MOYENNES (n=3) DES NEUF PARAMÈTRES ÉDAPHIQUES MESURÉS, PAR SITE ET PAR PROFONDEUR.....	89
BIBLIOGRAPHIE.....	91



LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Répartition spatiale des mangroves dans le monde et selon leurs origines génétiques.....	2
1.2 Répartition de la biomasse des mangroves (tonnes sèches par hectare) en fonction de la latitude.....	3
1.3 Illustrations des différents types de racines existant dans l'écosystème mangrove.....	6
1.4 Schéma synthétique du cycle du carbone global.....	17
1.5 Estimation de la quantité de carbone transféré, séquestré et réémis vers l'atmosphère depuis les rivières, lacs et milieux humides.....	21
1.6 Estimation des échanges de carbone dans l'écosystème global.....	26
1.7 Estimation du devenir du carbone produit dans l'écosystème mangrove.....	29
1.8 Localisation du Vietnam et de l'estuaire de Ba Lat dans le delta du fleuve Rouge.....	33
2.1 Site de Xuan Thuy.....	41
2.2 Schéma du choix de la méthode d'échantillonnage.....	43
3.1 Flux de CO ₂ mensuels moyens (mmol.m ⁻² .j ⁻¹) à la surface des sédiments des quatre sites d'échantillonnage de la mangrove de Xuan Thuy pour le mois de mai (n=61), juin (n=52) et juillet 2012 (n=70).....	49
3.2 Flux de CO ₂ mensuels moyens par site (mmol.m ⁻² .j ⁻¹) à la surface des sédiments de la mangrove de Xuan Thuy pour le mois de mai, juin et juillet 2012.....	51
3.3 Analyse par régression multiple des variables climatiques, tidales et biogéomorphologiques par rapport aux flux de CO ₂	53
3.4 Profils de sols décrivant l'évolution du pH par sites et par profondeurs.....	59
3.5 Profils de sols décrivant l'évolution de la conductivité (μS) par sites et par profondeurs.....	60

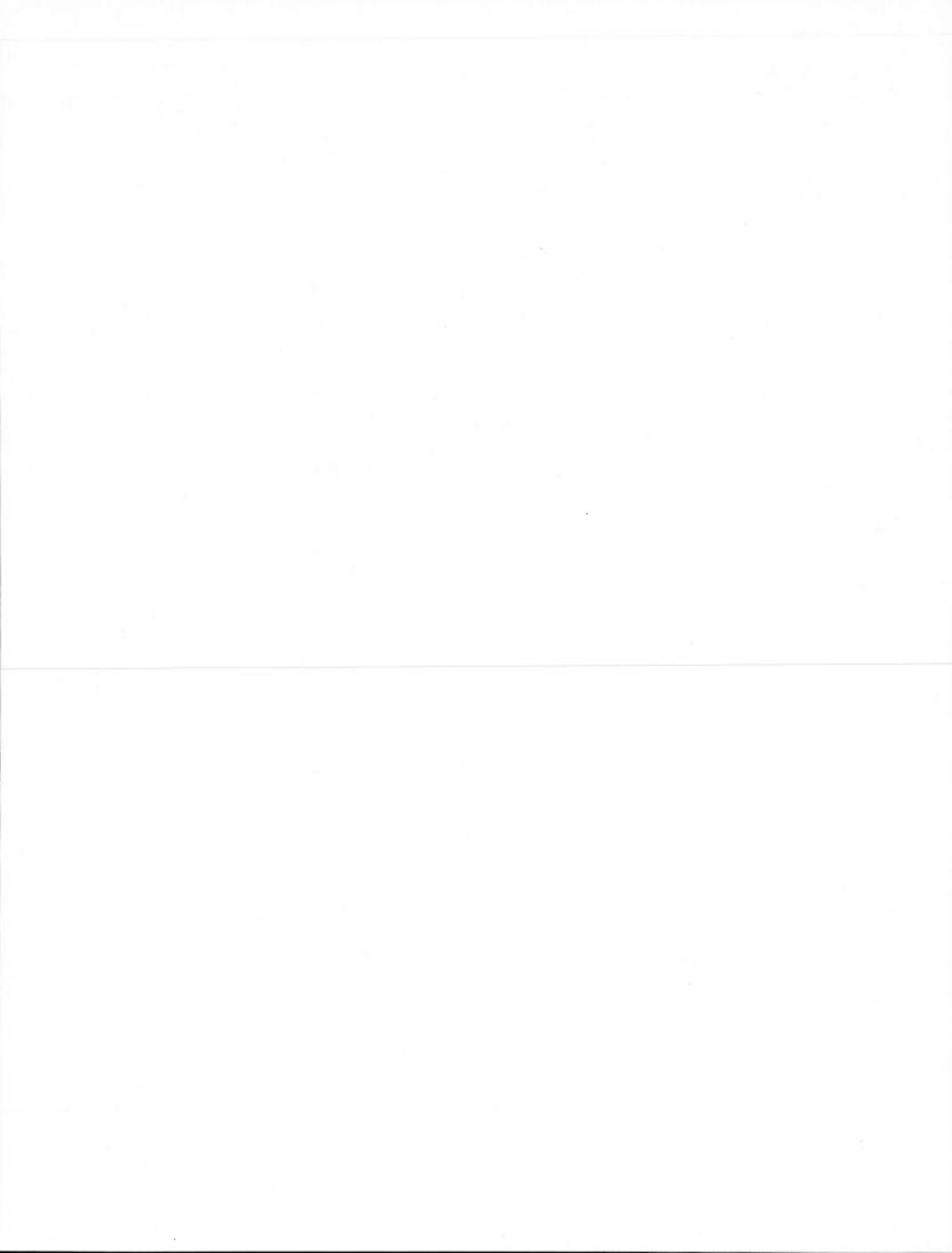
3.6	Profils de sols décrivant l'évolution de la résistivité (ohm) par sites et par profondeurs.....	60
3.7	Profils de sols décrivant l'évolution des solides dissous totaux (TDS) (ppm) par sites et par profondeurs.....	61
3.8	Profils de sols décrivant l'évolution de la salinité par sites et par profondeurs.....	61
3.9	Profils de sols décrivant l'évolution du carbone organique total (TOC) par sites et par profondeurs.....	62
3.10	Profils de sols décrivant l'évolution du carbone total (C) (%) par sites et par profondeurs.....	63
3.11	Profils de sols décrivant l'évolution du carbone l'azote total (N) (%) par sites et par profondeurs.....	63
3.12	Profils de sols décrivant l'évolution du carbone le rapport C/N par sites et par profondeurs.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Surface des mangroves en 2001, total des pertes connues, et pourcentage des pertes comparées à la valeur initiale pour l'Asie, l'Afrique, l'Australie et les Amériques ainsi que pour le total mondial.....	12
1.2	Contribution globale des mangroves et des autres milieux côtiers dans la séquestration du carbone.....	31
1.3	Évolution de la production aquacole au Vietnam.....	33
2.1	Description des parcelles d'études selon la biomasse (TSec.ha-1), l'altitude (m) et les espèces dominantes.....	40
3.1	Résultat du test d'estimation du composant de la variance de vraisemblance.....	47
3.2	Synthèse des résultats obtenus pour chaque variable dans le test de régression multiple par rapport aux flux de CO ₂	54
3.3	Matrice de corrélation par paires en condition paramétrique à partir du test de Pearson.....	56
3.4	F value du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du sol sur l'ensemble du profil (horizons A (0-5cm), B (15-20cm) et C (30-40cm)).....	58

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANOVA	Analyse de variance
C	Carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CSC	Chambre statique close
DIC	Carbone inorganique dissous
GPP	Production primaire brute (<i>Gross Primary production</i>)
IAE	<i>Institute of Agricultural Environment</i>
ICARGC	<i>International Centre for Advanced Research on Global Change</i>
JMP	Logiciel d'application d'analyse statistique
MO	Matière organique
N	Azote
NPP	Production primaire nette
PgC	Pètagramme de carbone (10 ¹⁵ gramme)
P	Probabilité statistique que la distribution soit dans l'intervalle de confiance à 95 %
POC	Carbone organique particulaire
PNXT	Parc national de Xuan Thuy
REML	Test d'estimation du composant de la variance de vraisemblance restreint
S	Salinité
TDS	Solides dissous totaux
TOC	Carbone organique total



RÉSUMÉ

L'écosystème mangrove est un milieu multifonctionnel unique et hautement productif ayant subi une réduction considérable de ses surfaces initiales. Les bénéfices que fournit ce milieu humide tropical sont pourtant précieux pour le maintien de l'équilibre écosystémique, socio-économique et climatique, tant à l'échelle locale que globale.

Situé à l'interface continent - océan, ce milieu boisé halophyte a su développer des mécanismes particuliers et originaux pour supporter, s'adapter et tirer profit des influences et pressions qui s'effectuent sur les littoraux de basses latitudes. Les apports nutritifs divers et les conditions climatiques tropicales favorisent la production primaire, au point que la biomasse des mangroves est comparable à celles des forêts tropicales humides. À l'inverse, les conditions physico-chimiques intertidales limitent l'activité microbienne nécessaire à la décomposition et à la réémission du carbone organique vers l'atmosphère. En d'autres termes, l'importante assimilation du carbone atmosphérique par la végétation et la faible dégradation de la matière organique permettent de considérer l'écosystème mangrove comme un puits de carbone efficace. Toutefois, la dynamique, le devenir et les mécanismes influençant l'évolution du carbone dans les mangroves demeurent encore incertains.

Notre objectif était de mesurer le flux de carbone quotidien à l'interface sédiment - atmosphère dans la mangrove de Xuan Thuy (Giao Thuy district, Vietnam) et de comprendre le degré d'influence des variables environnementales sur l'évolution spatio-temporelle des valeurs. Vingt-quatre chambres statiques ont été disposées à l'intérieur de quatre parcelles aux biomasses différentes, afin de mesurer le flux de CO₂ dans des zones contrastées d'un même milieu. En complément, un ensemble de données climatiques, tidales, biogéomorphologiques et édaphiques ont été collectées pour la période d'échantillonnage étalée sur trois mois consécutifs en saison humide (mai, juin et juillet 2012). En fonction des parcelles et des mois de mesures, les valeurs de flux de CO₂ obtenu varient entre $1,31 \pm 7,88$ mmol.m⁻².j⁻¹ et $23,52 \pm 11,61$ mmol.m⁻².j⁻¹ avec une valeur moyenne totale de $10,53 \pm 11,62$ mmol.m⁻².j⁻¹. Notre étude suggère que la durée d'exposition des sédiments avec l'atmosphère, dans cette zone intertidale, serait le principal élément affectant l'émission de CO₂. En effet, les variations de la marée au cours du cycle lunaire et la différence d'élévation des sites d'échantillonnages dans la zone intertidale se révèlent avoir un impact significatif sur les valeurs de CO₂. Les paramètres climatiques tels que la température atmosphérique et l'humidité semblent également influencer la production de CO₂ à l'interface sédiment - atmosphère dans la mangrove de Xuan Thuy.

MOTS-CLÉS : Mangrove, Cycle du carbone, Biomasse, Flux de CO₂, Gradient intertidal, Sols

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Les mangroves, généralités

1.1.1. Définition

L'origine du mot « mangrove » proviendrait du malais « manggi-manggi » signifiant « au-dessus du sol » (Kathiresan et Bingham, 2001). Le terme décrit l'essentiel des milieux humides côtiers subtropicaux composés d'organismes végétaux uniques adaptés à des conditions de vie intertidale particulières. Les symboles de ce milieu sont les arbres halophytes ayant développé des propriétés physiologiques et des mécanismes physiques d'adaptation, tels que la présence de racines aériennes. Le nom « mangrove » est par ailleurs souvent utilisé au pluriel quand il s'agit de décrire le milieu à large échelle. Cela témoigne de l'étendue et de la diversité d'espèces et de stature qui existent à travers le monde, mais également dans une même région, pour ce même écosystème.

1.1.2. Répartition géographique des mangroves

La surface totale des mangroves à l'échelle mondiale se chiffre entre 137 000 et 181 000 km² (Alongi, 2002 ; Giri *et al.*, 2011 ; Spalding *et al.*, 2010). Cela ne représente que 0,4 % de la surface totale des forêts mondiales (FAO, 2007). Malgré cette faible extension spatiale, l'écosystème demeure un acteur majeur aux rôles multiples et fondamentaux, puisqu'il se retrouve à l'interface continent-océan. En zone intertropicale, les mangroves constituent le milieu naturel côtier le plus répandu (Figure 1.1) (Leopold *et al.*, 2013).

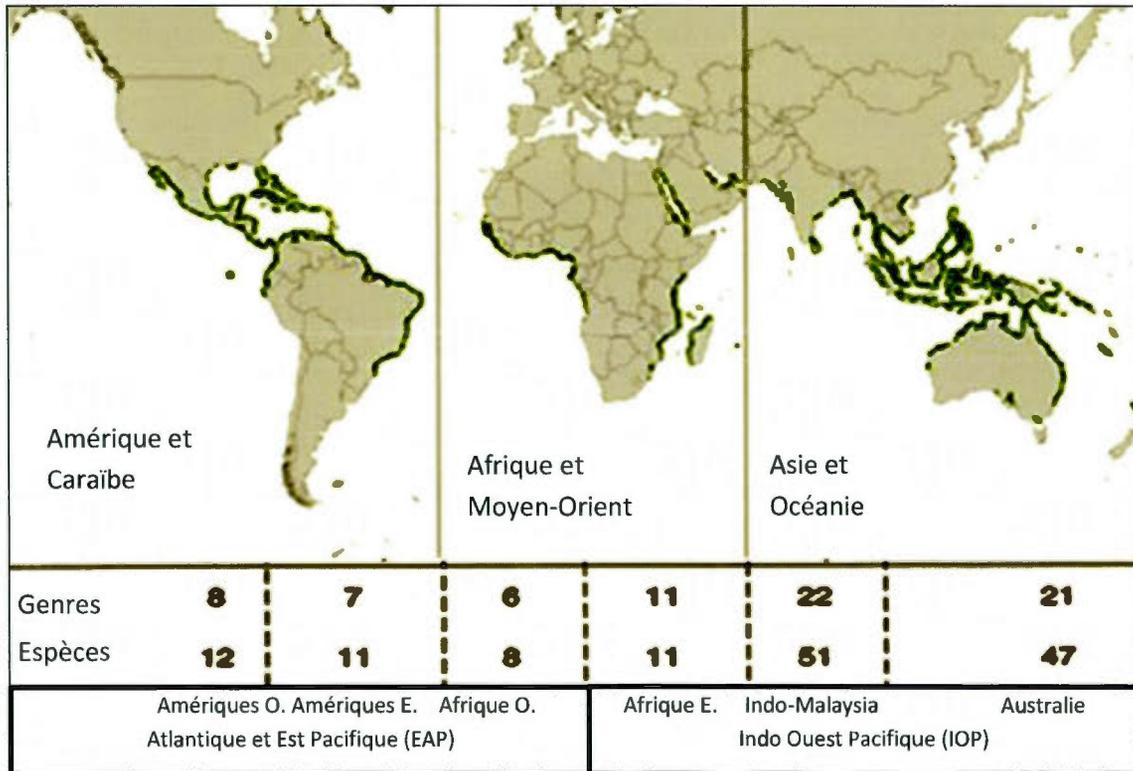


Figure 1.1 Répartition spatiale des mangroves dans le monde et selon leurs origines génétiques (Alongi, 2002 ; Giri *et al.*, 2011)

Deltas, estuaires et lagons de basses latitudes sont les territoires privilégiés des mangroves (Spalding *et al.*, 2010). Dans ces zones se retrouvent en effet à la fois un apport d'eau douce continentale et une influence tidale. Les paramètres essentiels favorisant la productivité de l'écosystème sont la disponibilité en éléments nutritifs, l'humidité et la température atmosphérique. Une relation a été établie entre la productivité de l'écosystème et sa position latitudinale (Figure 1.2) (Alongi, 2009). C'est à proximité de l'équateur que se retrouvent les plus fortes biomasses. Quand on remonte vers les hautes latitudes, la présence de mangroves se fait de plus en plus rare et on en retrouve peu au-delà des tropiques. Seules l'Australie et la Nouvelle-Zélande peuvent se vanter de posséder des mangroves en climat tempéré (Spalding *et al.*, 2010).

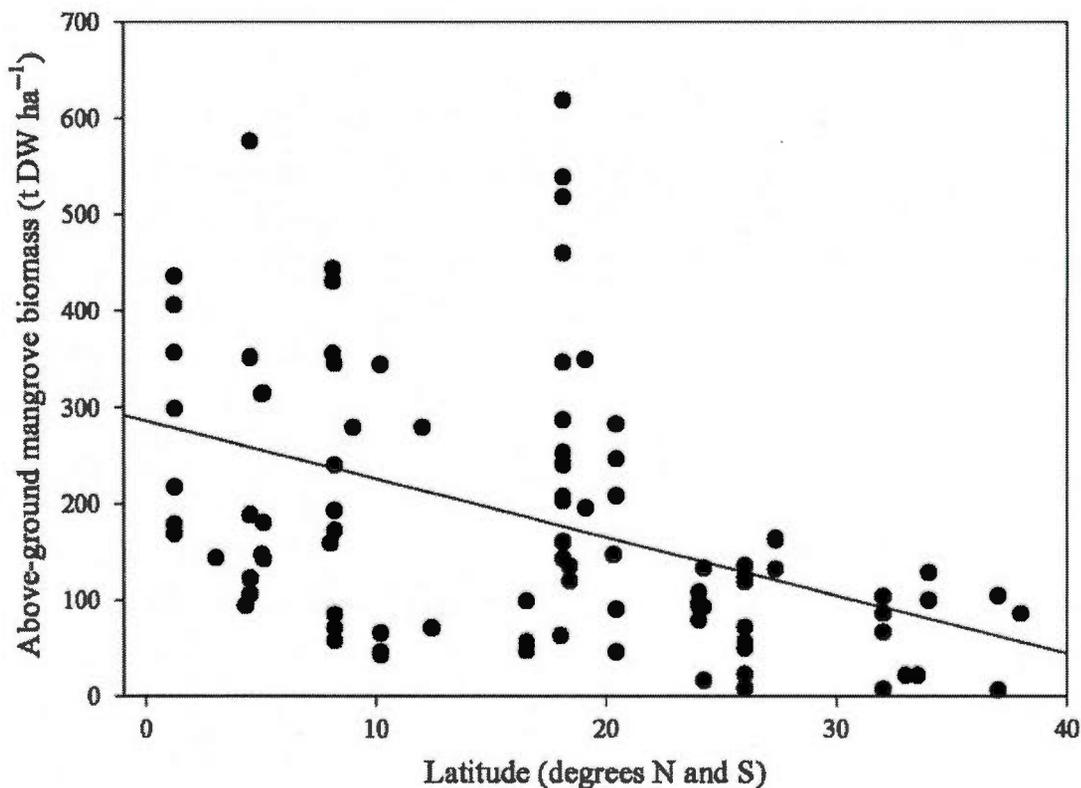


Figure 1.2 Répartition de la biomasse des mangroves (tonnes sèches par hectare) en fonction de la latitude (Alongi, 2009)

Des pollens d'espèces propres à l'écosystème mangrove, datant du début du Tertiaire (60 millions d'années), témoignent des plus anciennes traces de mangroves jamais recensées. Les espèces pionnières ayant colonisé ce milieu côtier seraient issues des genres *Avicenna* et *Rhizophora* (Ellison *et al.*, 1999). Au fil du temps, les espèces ont su évoluer afin de s'approprier le milieu à travers les fluctuations climatiques.

La carte contemporaine de la répartition des mangroves permet d'identifier deux entités distinctes et génétiquement différentes : Indo Ouest Pacifique (IOP) et Atlantique Est Pacifique (AEP) (Figure 1.1). IOP est la plus importante, tant en proportion qu'en diversité : 62 des 73 espèces spécifiques aux mangroves sont présentes dans cette zone. La seconde région, AEP, ne rassemble quant à elle que douze espèces. Une seule espèce se retrouve dans les deux domaines *Acrostichum aureum L.*, (Duke *et al.*, 1998 ; Spalding *et al.*, 2010). Au sein même de ces domaines, on identifie des sous unités régionales.

L'Asie du Sud-est, sous-ensemble du groupe IOP, détient un tiers des mangroves mondiales. Ses importantes surfaces côtières, les conditions météorologiques optimales ainsi que la stabilité climatique à long terme ont permis de fournir un équilibre favorisant l'implantation et l'ancrage des espèces (FAO, 2007). C'est dans cette région que l'on retrouve la plus grande forêt de mangroves au monde : les Sundarbans, dans la baie du Bengale. Ce territoire qui s'étend sur 9 630 km², abrite une faune et une flore abondante, symbolisant l'originalité et la richesse de l'écosystème (Mitra *et al.*, 2011).

1.1.3. Propriétés et adaptation du milieu

Pour bénéficier de ses multiples bienfaits et résister aux différentes nuisances présentes le long des bandes côtières intertropicales, un certain nombre d'adaptations successives se sont opérées au cours de l'évolution des espèces végétales. Si, contrairement aux forêts tropicales, le nombre d'espèces présent dans les mangroves reste limité, elles n'en sont pas moins extrêmement sophistiquées sur les plans morphologique et physiologique (Duke *et al.*, 1998 ; Kathiresan et Bingham, 2001).

- Les racines aériennes

Les racines aériennes témoignent de cette originalité et de cette efficacité d'adaptation. Multifonctionnelles, ces racines jouent un double rôle de fixation. Le premier, au sens physique du terme, permet l'ancrage et l'implantation d'organismes massifs dans des sédiments meubles et mouvants. En effet, les pressions et flux venant tant du continent (débit des cours d'eau, variable selon la saison) que du milieu marin (marée quotidienne et cyclique, tempêtes) soumettent le milieu à des forces et à des courants arrachant et mobilisant les éléments particuliers et dissous (Kristensen *et al.*, 2008). Le fait que ce milieu soit quotidiennement inondé limite la stabilisation des sols. La répartition de la masse des végétaux en réseau racinaire dense et étalé sur une large surface est donc un moyen pratique d'adaptation à ce milieu contraignant.

Le second rôle de fixation est un avantage au sens chimique. Les sols hydromorphes de la mangrove, en plus d'être imbibés d'eau salée, ont une teneur en dioxygène faible. Grâce aux

pores disposés le long des souches, les racines aériennes fixent et assimilent le dioxygène atmosphérique nécessaire à la respiration de l'organisme (Spalding *et al.*, 2010). Ces racines sont toutefois submergées au fil des marées, les vacuoles possèdent donc la faculté de se refermer lorsque le niveau d'eau remonte.

En fonction des conditions climatiques et géomorphologiques, le type de racine (et donc les espèces) varie. On en recense quatre différents types (Figure 1.3) :

- Les racines **en échasses**, dans les zones les plus productives, et qui sont les véritables symboles de l'écosystème. Les espèces possédant cette caractéristique sont *Rhizophora*, *Bruguiera* et *Ceriops*.
- Les **pneumatophores**, qui sont un faible soutien physique en comparaison aux échasses, mais un important acteur d'échanges gazeux à l'interface atmosphère-biosphère. Il s'agit en fait d'une excroissance des racines souterraines vers la surface. On y retrouve les espèces *Avicennia* et *Sonneratia*
- Les racines **en genou**, mécanisme comparable aux pneumatophores, mais de moindres envergures. On y retrouve les espèces *Bruguiera* et *Ceriops*
- Les racines **de contrefort**, en opposition aux pneumatophores et à celles en genou, sont avant tout un support structurel. Ces racines sont essentielles pour la stabilisation dans les sédiments plutôt que pour la fixation du dioxygène atmosphérique. *Xylocarpus* et *Heritiera* possèdent ces qualités (Spalding, *et al.*, 2010).

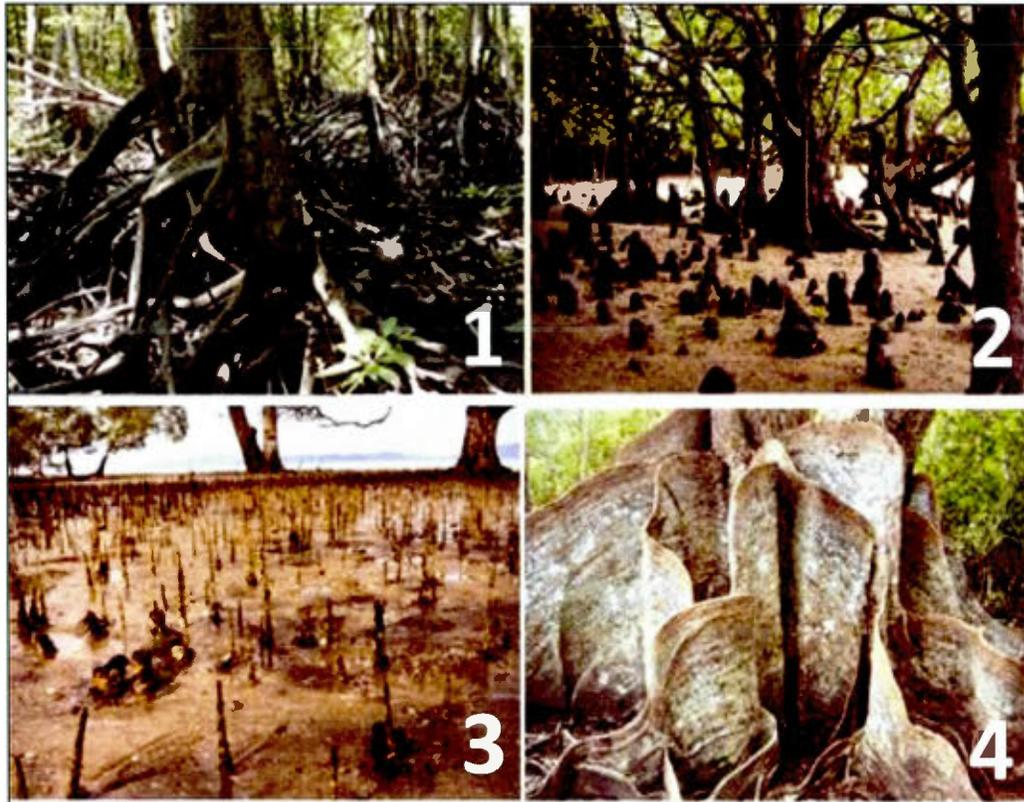


Figure 1.3 Illustrations des différents types de racines existant dans l'écosystème mangrove 1 : en échasse (*Rhizophora*) ; 2 : pneumatophore (*Sonneratia*) ; 3 : en genou (*Bruguiera*) ; 4 : en contrefort (*Heritiera*) (Spalding *et al.*, 2010)

En plus de la disposition des racines aériennes, de multiples fonctions d'adaptation s'observent dans l'écosystème, par exemple l'acclimatation au milieu salin, le système de reproduction vivipare ou encore les mécanismes de rétention de nutriments.

- Adaptation à la salinité

L'écosystème mangrove est le seul à posséder des organismes boisés halophytes (Alongi, 2002). Tout comme les différents types de racines existants, les mécanismes d'adaptation varient, même si la finalité demeure la même : s'adapter aux conditions salines du milieu. Pour faire face à cette contrainte environnementale, certains organismes filtrent naturellement l'eau à l'aide de leurs tissus internes, alors que d'autres développent des mécanismes de sécrétion à partir de leur xylème ou bien de glandes présentes dans les feuilles. Plus simplement, certaines concentrent le sel dans leurs feuilles qui vont, au cours des saisons,

croître puis se détacher de l'arbre, emportant avec elles le sel accumulé (Spalding *et al.*, 2010).

- Reproduction vivipare

Pour contrer les effets de la marée et la mobilité des sédiments, les organismes ont également dû développer des stratégies de reproduction originales. Si la pollinisation existe, certaines espèces possèdent des mécanismes de reproduction vivipares. Avant de se décrocher de la plante mère, la plante en devenir va croître tout en y restant attachée. Une fois désagrégée et après avoir déjà atteint un stade de maturation suffisant, la plante devra se fixer au sol mobile par le biais d'une aiguille longue et rugueuse qui pourra s'enfoncer durablement dans le sol. Des capacités de flottaison, de résistance à la salinité et de conservation existent également. Si ces mécanismes permettent une propagation étendue dans l'espace et dans le temps, la majorité des organismes se développent à une distance relativement proche de leurs parents, où les conditions sont optimales pour leur développement (Duke *et al.*, 1998).

1.1.4. Variables environnementales présentes dans l'écosystème

La zone côtière tropicale étant influencée par différents milieux, même au sein de cette unité biogéographique, on y note une forte hétérogénéité à faible distance (salinité, précipitation, température). Les organismes ont développé des adaptations face aux exigences de ce milieu, mais chaque tolérance a un seuil. En effet, certaines espèces acceptent plus facilement les variations de la marée tandis que d'autres se développent préférentiellement en milieu plus aride.

Duke *et al.* (1998) proposent une typologie des communautés de mangroves en fonction de gradients environnementaux. Il identifie quatre échelles spatiales de distribution (globale, régionale, en amont et intertidale) au sein desquelles une organisation s'opère entre les espèces, selon les variables environnementales.

Que ce soit le long du gradient global ou bien intertidal, ce sont essentiellement les mêmes variables environnementales qui influencent la répartition des espèces :

- les paramètres **climatiques** : température, précipitations et événements climatiques extrêmes;
- les paramètres **hydrologiques** : marée, courants et niveau moyen des océans;
- les paramètres **géomorphologiques** : types et tailles des sédiments, pente et altitude de la côte;
- les paramètres **chimiques** de l'eau : salinité, nutriment, oxygène et pH.

Nous pouvons en effet comprendre et expliquer les variations de ces paramètres selon différentes échelles spatiales. Ces différents espaces sont la position latitudinale, l'organisation géomorphologique, la localisation au sein même d'un estuaire et enfin sa situation (distance et altitude) par rapport à l'influence de la marée.

Au niveau d'une même forêt de mangrove, un gradient de répartition par espèces s'observe le long d'un transect depuis le rivage vers l'arrière-pays. Le degré d'influence de chaque variable citée demeure flou et plus d'études sont nécessaires pour comprendre plus précisément les relations qui existent à faible échelle entre les facteurs environnementaux et la dynamique des mangroves, tant du point de vue biologique que biogéochimique (Duke, *et al.*, 1998). La présente étude s'intègre dans ce contexte de recherche.

1.2. Bienfaits du milieu

L'écosystème mangrove est extrêmement dynamique. Il ne doit pas être considéré comme une entité inerte, mais au contraire, comme un espace interactif possédant des ressources qu'il utilise au sein de son territoire et au-delà. Les populations locales ont traditionnellement su tirer profit des ressources disponibles dans la mangrove. Au cours du dernier siècle, cette exploitation s'est toutefois intensifiée, au point de causer le recul de ce milieu pourtant si précieux, en regard des nombreux services écosystémiques qu'il fournit (Duke *et al.*, 2007).

La description des atouts du milieu peut être hiérarchisée de différentes manières (Barbier *et al.*, 2011 ; Walters *et al.*, 2008). Dans le cadre du présent travail, nous identifions et classons les biens selon les bénéficiaires. Nous décrivons ici les bénéfices fournis pour trois

catégories, soit (1) au sein de l'écosystème (2) envers les écosystèmes adjacents et enfin (3) selon une perspective anthropocentrique.

1.2.1. Actions et fonctions de la mangrove, au profit de son environnement et de ses habitants

Les forêts de mangrove constituent un lieu paisible, atténuant les actions extérieures grâce à leur support végétal. L'implantation de réseaux racinaires denses et aériens permet en effet d'amortir les forces externes s'exerçant sur le milieu. Cela en fait un refuge privilégié pour les espèces recherchant tranquillité, stabilité et approvisionnement (Alongi, 2002).

- Une ressource nutritive

L'action de la marée et l'apport des cours d'eau dans les estuaires engendrent souvent des modifications du flux hydrique et de dépôt d'éléments. L'élargissement des berges ainsi que les influences tidales nouvelles modifient le courant, favorisant la décantation d'éléments particuliers et dissous. Les mangroves facilitent et bénéficient de ces dépôts. Ces éléments nutritifs allochtones (azote, phosphore, carbone organique) sont essentiels pour la croissance des végétaux (Alongi, 2009 ; Thatoi *et al.*, 2013)

- Une ressource protectrice et stabilisatrice

Parallèlement au dépôt de nutriments, les sédiments se déposent aussi, offrant ainsi un substrat d'ancrage pour les végétaux. Cet apport sédimentaire, jumelé à la fixation végétale, limite l'érosion et favorise l'accrétion des berges (Bandaranayake, 1998). La stabilité et la biomasse importante des végétaux représentent un bouclier naturel efficace face aux événements extrêmes survenant le long des côtes (fluctuations de la marée, inondations, tempêtes, tsunamis). L'efficacité d'atténuation des forces extérieures dépend toutefois des propriétés physiques de l'écosystème (hauteur, largeur, profondeur, densité des troncs et branches, pentes et bathymétrie du milieu) et de l'intensité de l'évènement extrême (Alongi, 2008).

- Une ressource de biodiversité

La litière, en tant que source nutritive issue de l'importante productivité primaire et de la stabilité de la zone, dans une région pourtant agitée, favorise le développement d'une chaîne trophique abondante et diversifiée. La zone est souvent qualifiée de pépinière puisqu'elle abrite un nombre important d'organismes, essentiellement invertébrés (Thatoi *et al.*, 2013). Cette faune (crabes, mollusques, crustacés et poissons sont abondants dans la zone), une fois devenue mature, migre vers les milieux marins. C'est également un lieu de nidification privilégié pour les oiseaux (Nagelkerken *et al.*, 2008).

- Une ressource impliquée dans le cycle du carbone

Grâce aux conditions climatiques favorables et aux apports nutritifs abondants, l'écosystème mangrove est un des plus productifs de la planète (Duarte et Cebrian, 1996). À l'inverse, l'activité microbienne du sol, nécessaire pour décomposer la matière organique produite, est limitée par les propriétés du sol, anoxiques et salines. Ainsi, le carbone organique produit dans les mangroves est en bonne partie piégé dans les sédiments de la mangrove ou des océans¹ (Bouillon, 2011).

Les différentes fonctions énumérées ici témoignent du rôle précieux que jouent les mangroves pour maintenir et stabiliser leur territoire. Leurs influences vont au-delà du milieu tant à l'échelle régionale (pépinière pour espèces marines) que globale (place particulière dans le cycle du carbone).

1.2.2. Actions et fonctions de la mangrove, son implication vis-à-vis des écosystèmes adjacents

La mangrove est un milieu privilégié pour un nombre considérable d'organismes halieutiques bien que, pour une majorité, leur présence n'y soit que temporaire. En effet, une bonne partie

¹ La partie 1.5 du travail décrit cet aspect en détail.

d'entre eux prendront le large une fois leur stade larvaire ou juvénile dépassé (Walters *et al.*, 2008). Tel est le cas pour les poissons que l'on retrouve dans les récifs coralliens à proximité des mangroves (Moberg et Rönnbäck, 2003).

Cet échange témoigne des interactions et associations multiples qui existent entre les milieux côtiers tropicaux que sont les mangroves, marais, marécages, hautes herbes marines, prés-salés et coraux. Leurs fonctions respectives influencent et facilitent le développement des autres milieux : le pouvoir de filtration des mangroves, des nutriments et également des polluants limite le risque de dégradation des coraux, lesquels sont très sensibles aux variations chimiques. Inversement, la présence des récifs coralliens atténue la force des courants et des marées (Alongi, 2002 ; Moberg et Rönnbäck, 2003).

Bon nombre d'interactions physiques, biologiques et biogéochimiques s'effectuent entre marais salants, mangroves et coraux. Moberg *et al.* (2003), en les définissant tous comme membres du « *seascape* », les considère comme une entité indissociable. Cela signifie aussi que la dégradation d'un de ces milieux engendre des répercussions néfastes envers ces autres environnements interdépendants.

1.2.3. Actions et fonctions de la mangrove, utilisations et exploitations par les populations locales

Des relations ancestrales et harmonieuses existent entre les populations locales et les mangroves dans de nombreuses régions du globe. Les communautés locales sont même qualifiées d'éléments contribuant au maintien de l'écosystème (Walters *et al.*, 2008). Les ressources alimentaires (poissons, crustacés, coquillages, gibiers, fruits) et ligneuses (bois pour la construction ainsi que comme source d'énergie ou encore comme médicaments) constituent les principaux prélèvements effectués par les communautés (Bandaranayake, 1998 ; Barbier *et al.*, 2011). Le rôle protecteur que jouent les mangroves face aux catastrophes et à l'érosion permet par ailleurs le maintien des habitations dans l'arrière-pays.

La relation entre l'humain et les mangroves, autrefois pérenne, s'est malheureusement détériorée durant les dernières décennies. L'exploitation intensive du milieu et la colonisation des milieux naturels causent la perte du milieu (Walters *et al.*, 2008).

1.3. Menaces actuelles et futures sur les mangroves

La zone d'occupation des mangroves, le long des côtes, est également une zone de forte densité de population : 55 % de l'humanité habite à proximité du littoral (Adeel et Pomeroy, 2002). L'Asie du Sud-est est représentative de cette cohabitation devenue difficile. Cette compétitivité territoriale s'opère au détriment du milieu naturel et puis, de manière indirecte, de la population locale (du fait de l'amenuisement des ressources naturelles).

Entre les années 1980 et 2000, ce sont entre 20 % et 35 % de la superficie initiale des mangroves qui ont été détruits. (Valiela *et al.*, 2001). Par rapport aux surfaces initiales et à l'échelle mondiale, c'est plus de 50 % de la surface qui aurait disparu (Tableau 1.1) Si la dégradation s'est ralentie depuis les années 2000, la tendance est toujours à la perte de l'écosystème. La réduction de surface est actuellement évaluée entre 1 % et 2 % de pertes annuelles par rapport à la surface totale. La situation est si préoccupante que certains scientifiques prédisent la disparition totale du milieu d'ici 2100 (Duke *et al.*, 2007).

Tableau 1.1

Surface des mangroves en 2001, total des pertes connues, et pourcentage des pertes comparées à la valeur initiale pour l'Asie, l'Afrique, l'Australie et les Amériques ainsi que pour le total mondial (Valiela *et al.* 2001)

Région	Surface de mangrove en 2001 (km ²)	Surface de mangrove par pays possédant des données actualisées annuellement		Pourcentage de perte de surface de mangroves	Taux de perte annuel (km ² .y ⁻¹)	Pourcentage de la surface initiale perdue par an
		Surface en 2001	Surface initiale			
Asie	77 169	26 193	41 208	34	36	1,52
Afrique	36 259	14 903	21 847	41	32	1,25
Australie	19 287	10 000	11 617	97	14	1,99
Amériques	43 161	38 472	62 242	89	38	3,62
Total mondial	166 876	89 568	136 914	54	35	2,07

1.3.1. Actions anthropiques

Bien que de nature résiliente, l'écosystème mangrove est, en proportion, le milieu naturel le plus dégradé de la planète (Adeel et Pomeroy, 2002 ; Spalding *et al.*, 2010). L'humain est le principal responsable de cette perte, comme il l'est également pour la détérioration de bon nombre d'autres milieux naturels et notamment marins (Halpern *et al.*, 2008). La dégradation des mangroves n'est pas homogène le long des côtes. Plus que la densité de population, c'est surtout le niveau de richesse des communautés locales qui semble influencer de manière inversement proportionnelle sur le degré de dégradation du milieu (Gilman *et al.*, 2008).

- L'aquaculture, responsable de la majorité des pertes

Essentiellement produite en Asie du Sud-est, mais généralisée sur bon nombre de côtes mondiales occupées par les mangroves, la culture extensive des crevettes est responsable de 38 % des pertes de mangroves. L'aquaculture, de manière plus large, compte pour 52 % du recul total (Walters *et al.*, 2008). Cette exploitation implique la construction de bassins d'élevage sur le littoral. Une importante quantité de fertilisants et d'antibiotiques est alors déversé dans les parcelles, à tel point que ces zones de production ne demeurent utilisables que pendant quelques années. Pour perdurer, les entreprises doivent coloniser de nouveaux territoires vierges, empiétant de plus en plus sur les mangroves avoisinantes (Valiela *et al.*, 2001 ; Walters *et al.*, 2008).

- Autres sources de dégradation

Si la production intensive de crevettes demeure la principale cause de dégradation, d'autres facteurs contribuent à la perte des mangroves. L'exploitation sylvicole, le prélèvement des eaux de rivières et enfin l'étalement urbain et agricole complètent le portrait (Walters *et al.*, 2008).

- Retombées des pressions sur le milieu

En plus de dégrader physiquement l'écosystème, tous les paramètres précédemment mentionnés causent des déséquilibres physico-chimiques. Des polluants issus de la production agricole, aquacole ou des rejets urbains introduisent, en forte proportion, de

nouveaux éléments chimiques. Il faut ajouter à cela une modification du régime hydrique, sédimentaire et également de la disposition géomorphologique. L'équilibre du milieu face à ces pressions multiples devient alors précaire. Les premières victimes de cette dégradation ne sont autres que les populations locales elles-mêmes. En voyant la surface des mangroves diminuer (Tableau 1.1), c'est également la quantité des biens et services qu'elles sont à même de tirer de cette ressource et des environnements adjacents qui se réduisent (Doney, 2010).

Un autre paramètre potentiellement néfaste pour le devenir des mangroves, relié aux activités anthropiques, pourrait voir son influence s'accroître dans les prochaines années, à savoir les changements climatiques.

1.3.2. Changements climatiques

- L'eau monte, la mangrove répond ?

L'élévation du niveau des océans s'observe déjà dans certaines régions du monde (Alongi, 2008). À l'échelle des temps géologiques, les traces d'anciennes rivières en amont ou en aval des actuelles mangroves témoignent de la capacité d'adaptation de l'écosystème face aux variations de la marée, à long terme (Field, 1999). Cette tolérance dépend en fait de plusieurs éléments. La vitesse d'élévation du niveau de l'eau ainsi que les paramètres environnementaux sont alors fondamentaux. Les stress simultanés ou les changements soudains d'une composante limiteraient la capacité de survie du milieu. En cas d'élévation du niveau moyen des océans, une surface colonisable doit être disponible dans l'arrière-pays pour permettre aux communautés végétales de s'y implanter. Les constructions ou les pentes trop abruptes limiteraient cette évolution. Les sédiments disponibles et leur composition permettront, ou non de favoriser la subsidence et d'élever naturellement la zone. Le type de végétation au sein de la mangrove est également important, puisque la résilience des espèces est variable (Gilman *et al.*, 2008 ; McLeod et Salm, 2006).

- Autres mécanismes pouvant influencer l'évolution de la mangrove, reliés aux changements climatiques

Les changements climatiques entraînent un nombre important de variations atmosphériques (température, précipitation, concentration de CO₂, vent) et physico-chimiques (montée du niveau des océans, acidification des océans) ayant un impact potentiel sur l'état des mangroves (Gilman *et al.*, 2008). Certains pourraient toutefois favoriser l'expansion de mangroves telles que les précipitations et températures. Leurs augmentations significatives pourraient permettre une extension latitudinale des zones de tolérance de la mangrove (Alongi, 2008).

Alors que le sort des coraux ou des forêts tropicales humides est souvent mis en avant pour dénoncer l'impact de l'humain sur l'environnement, la situation des mangroves est tout aussi dramatique (Duke *et al.*, 2007). Longtemps méprisée ou ignorée des pouvoirs publics, l'exploitation des ressources et des surfaces côtières entraîne une dégradation du milieu. Une prise de conscience semble toutefois émerger, avec l'accroissement de zones protégées et de programmes de replantation. Un moyen efficace de protéger l'écosystème serait la valorisation économique de la ressource naturelle.

1.4. Valorisation économique de l'écosystème

Les bienfaits pour les populations locales et les contributions du maintien de l'équilibre naturel des mangroves sont nombreux. Malgré ses atouts multiples indéniables, la mangrove demeure pourtant un écosystème extrêmement menacé. Pour contrer cette tendance et sensibiliser les acteurs décisionnels, la quantification économique des services écosystémiques issus de la mangrove apparaît comme une piste de solution, en dépit de plusieurs défis éthiques et méthodologiques.

La volonté de monétariser les milieux naturels en fonction de leurs bienfaits relève d'un jugement anthropocentrique fort, séparant encore un peu plus l'humain et (son) environnement. Cela représente toutefois un outil argumentaire percutant à l'égard des acteurs politiques et des entreprises exploitantes, principaux acteurs du devenir des

mangroves. L'exploitation et la commercialisation de ressources (telles que les crevettes ou la sylviculture) sont une forme de valorisation monétaire du milieu. L'ensemble des bienfaits présents dans les mangroves n'est toutefois pas toujours aussi aisément quantifiable. L'objectif de quantification monétaire d'un milieu et de ses ressources est en fait un exercice permettant de mettre sur un pied d'égalité tous les bienfaits du milieu. Évaluer économiquement les milieux naturels permet de comparer et quantifier les bienfaits de chaque écosystème et d'évaluer les conséquences qu'engendrent l'exploitation et la dégradation de ces milieux. À l'échelle mondiale la valeur totale des forêts de mangroves est évaluée à 180 895 923 000 US\$ (Alongi, 2002 ; Costanza *et al.*, 1997)

Les méthodes et les résultats des recherches sont très divers, mais les conclusions restent les mêmes : la valeur produite par l'écosystème mangrove en tant que milieu naturel est supérieure aux utilisations et à l'exploitation commerciales actuelles (Balmford *et al.*, 2002 ; Costanza *et al.*, 1997 ; Sathirathai et Barbier, 2001). Pour parvenir à cette conclusion, les études tentent, de manière la plus exhaustive possible, de quantifier le revenu total de la vente de produit ligneux et non ligneux issu d'une surface de mangrove pour ensuite le comparer à la valeur écosystémique que représente cette même surface de mangrove (Barbier, 2007).

Parmi les principaux services écosystémiques que fournissent les mangroves, leur rôle dans le cycle du carbone global est considérable et valorisable.

1.5. Le rôle des mangroves dans le cycle du carbone

Les mangroves, en tant que milieu humide tropical côtier, jouent un rôle prépondérant dans le cycle du carbone global. Dans un contexte de changement climatique, l'intérêt de cet habitat s'accroît, mais son influence s'amenuise.

1.5.1. Le cycle du carbone global

L'élément carbone est présent en quantité variable dans les différents réservoirs du globe (atmosphère, biosphère, lithosphère, hydrosphère). Comme pour bien d'autres éléments

biogéochimiques, ce sont les mécanismes biologiques, physiques et chimiques qui permettent l'échange et le transfert d'éléments entre les différents réservoirs. Le rôle du carbone est particulier puisqu'il est l'élément de base présent dans toute forme de vie et que sa concentration dans l'atmosphère (sous forme de CO_2) contrôle l'importance de l'effet de serre et de ses répercussions sur le climat (Pachauri et Reisinger, 2008). Le carbone est étroitement lié à un autre élément clef : l'oxygène (Schlesinger et Bernhardt, 2013). Historiquement, le cycle du carbone se faisait en identifiant trois milieux distincts interagissant entre eux : continental, océanique et atmosphérique. Cette vision quelque peu simpliste permet toutefois de mettre en avant les mécanismes principaux. De récentes découvertes ont permis de préciser ce cycle dynamique, notamment en incluant et en valorisant les milieux humides. Malgré leur faible répartition spatiale, ces derniers jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone.

- Le cycle du carbone actuel

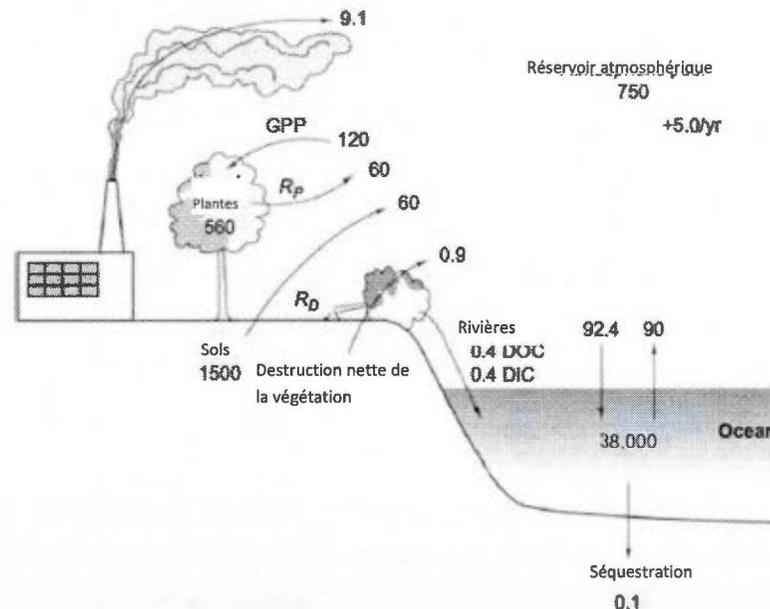


Figure 1.4 Schéma synthétique du cycle du carbone global en PgC (Schlesinger et Bernhardt, 2013)

Sur Terre, le flux de carbone le plus important s'opère à l'interface atmosphère-biosphère. Les organismes autotrophes sont les acteurs de ce processus de production primaire. Ils assimilent le carbone atmosphérique comme source d'énergie et de croissance grâce au mécanisme de photosynthèse qui varie en fonction des saisons et de la latitude. À l'échelle du globe, ce processus de photosynthèse se chiffre à 120 PgC.an^{-1} ($10^{15} \text{ gC.an}^{-1}$) (Figure 1.4, GPP). Les organismes autotrophes produisent une réaction de photosynthèse seulement lorsque luminosité, température et humidité sont disponibles. Ces paramètres sont parfois limités, contraignant les organismes pourtant autotrophes à respirer et réémettre du CO_2 vers l'atmosphère, à hauteur de 60 PgC.an^{-1} (Figure 1.4, Rp) (Schlesinger et Bernhardt, 2013).

Durant le cycle de croissance des organismes et le long des saisons, une partie de cette matière organique produite va se déposer au sol. Ces résidus organiques (branches, feuilles, fruits, fleurs) sont alors qualifiés de litières. Celle-ci va être (1) piégée dans les sols et sédiments avant d'être (2) dégradée par l'action microbienne présente dans le sol (Figure 1.4, Rd), entraînant une réémission du carbone sous sa forme gazeuse (CO_2) ou bien (3) drainée vers le milieu océanique (Figure 1.4, Rivières DOC et DIC).

En milieu océanique, deux processus d'interactions biogéochimiques avec l'atmosphère sont essentiels, le premier captant le carbone atmosphérique, et le second l'émettant. L'océan jouerait le rôle d'un puits de carbone, captant une quantité supérieure (92.4 PgC.an^{-1}) à la quantité émise (90 PgC.an^{-1}) (Figure 1.4). Ce déséquilibre budgétaire serait lié à l'augmentation récente de la concentration du carbone atmosphérique (Watson *et al.*, 2009). Dans les profondeurs de l'océan se déposent la matière organique et les résidus calcaires qui vont se sédimenter au cours du processus de diagenèse² (Schlesinger et Bernhardt, 2013).

Ainsi le cycle historique du carbone est refermé. Nous avons en effet décrit les mécanismes bilatéraux à l'interface continent-atmosphère, continent-océan, et océan-atmosphère. Toutefois, ce cycle complexe demeure imparfait et changeant. La quantification précise des

² Pour compléter cette brève description du cycle du carbone, il est important de mentionner que les sédiments carbonatés formés dans les profondeurs océaniques sont réémis dans l'atmosphère au cours des événements volcaniques sur une période d'environ 200 millions d'années (Müller *et al.*, «Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust»)

échanges est très incertaine et une nouvelle force influence et modifie significativement ce cycle depuis plusieurs décennies : le facteur anthropique.

Depuis sa sédentarisation, l'être humain a modifié son environnement afin de tirer profit des ressources disponibles et ainsi développer son niveau de vie. Le changement des modes d'occupation du territoire (déforestation, agriculture et urbanisation) et l'augmentation de la concentration de carbone atmosphérique (liée à consommation des ressources fossiles) sont les conséquences de ces activités anthropiques. Ces actions ont profondément modifié les équilibres naturels à la surface du globe (Vitousek *et al.*, 1997).

- Cycle du carbone et changements climatiques

Le cycle du carbone a connu au cours des périodes géologiques des variations de concentration dans ses différents réservoirs. À partir des archives, une corrélation a été établie entre l'augmentation de la concentration en carbone atmosphérique et l'augmentation de la température atmosphérique (Pachauri et Reisinger, 2008). L'augmentation du carbone atmosphérique des dernières décennies est toutefois sans précédent du fait de son origine (anthropique), mais également de sa rapidité (Schlesinger et Bernhardt, 2013). Cette modification de l'équilibre global entraîne de multiples conséquences. La survie de nombreuses espèces et de nombreux milieux naturels est menacée. Des phénomènes de rétroaction positive pourraient également se mettre en place, accélérant encore un peu plus le réchauffement climatique et ses conséquences (Chmura *et al.*, 2003 ; Raich et Schlesinger, 1992 ; Watson *et al.*, 2009).

1.5.2. Cycle du carbone et milieux humides

Les milieux humides occupent une place prépondérante dans le cycle du carbone global. Longtemps négligés, ils seraient en fait la pièce manquante du puzzle. L'élaboration du budget total et complet du carbone dans les écosystèmes demeure un défi de taille pour les scientifiques. L'intérêt et les enjeux liés aux émissions de carbone et son influence sur le climat ont induit la nécessité de comprendre et de chiffrer ce cycle naturel. Pour parvenir à dresser le bilan le plus complet possible, des termes théoriques ont été mis au point (Chapin

III *et al.*, 2006). Toutefois la complexité et la multitude d'échanges et de variables entrant en jeu dans ce cycle rendent problématique une analyse précise.

- Le puits de carbone manquant : Rivières, eaux continentales et milieux humides dans le cycle du carbone global

Les incertitudes concernant les échanges de carbone ont mené à développer la théorie du « puits de carbone manquant » (*the missing carbon sink*) (Mcleod *et al.*, 2011 ; Schimel, 1995). Une partie significative du carbone devant être stocké en milieu continental est longtemps demeurée introuvable (Schlesinger et Bernhardt, 2013). L'explication privilégiée à cette énigme a été de considérer l'influence des exports latéraux d'éléments au sein du continent. Autrement dit, les échanges existant à travers les rivières, les eaux intérieures et milieux humides pourraient être la clef du problème (Cole *et al.*, 2007).

Ces réseaux hydrographiques sont à l'origine du prélèvement d'éléments organiques et inorganiques des milieux continentaux par érosion mécanique, altération chimique et lessivage. Les eaux chargées en éléments multiples, dont le carbone (sous différentes formes), sont soumises aux mécanismes régissant ces milieux dynamiques : dépôts et séquestration, respiration et interactions avec les organismes, échanges avec l'atmosphère ou encore déversement dans l'océan. Le prélèvement initial serait chiffré à $2.7\text{PgC}\cdot\text{an}^{-1}$ pour un déversement océanique de $0.9\text{PgC}\cdot\text{an}^{-1}$. La différence de $1.8\text{PgC}\cdot\text{an}^{-1}$ de ce bilan s'expliquerait par les réactions s'opérant le long de ces rivières, eaux continentales et milieux humides soit par réémission vers l'atmosphère ($1.2\text{PgC}\cdot\text{an}^{-1}$) ou par stockage dans les sols, les sédiments et la biomasse ($0.6\text{PgC}\cdot\text{an}^{-1}$) (Aufdenkampe *et al.*, 2011). La Figure 1.5 résume ces échanges et teneurs.

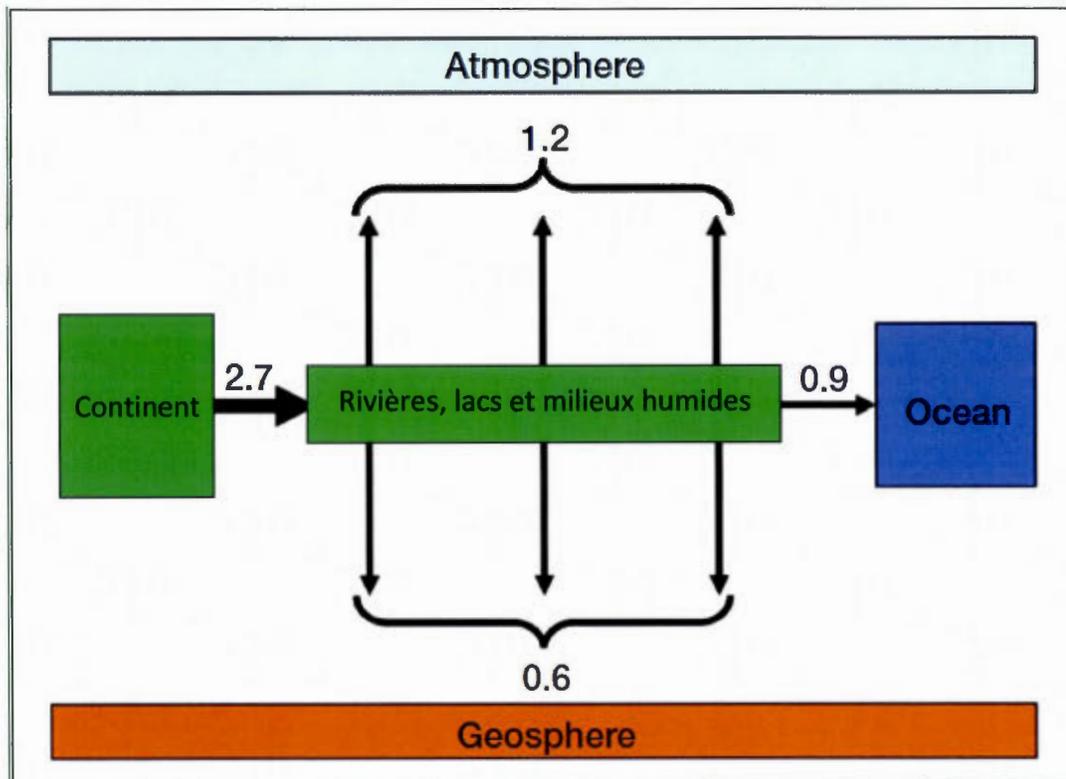


Figure 1.5 Estimation de la quantité de carbone transféré, séquestré et réémis vers l'atmosphère depuis les rivières, lacs et milieux humides (Aufdenkampe *et al.*, 2011)

Les études et l'emphase accrue portant sur le rôle et sur les mécanismes existants au sein des milieux humides, cours d'eau et lacs sont justifiées par le fait qu'elles sembleraient résoudre le mystère du « puits de carbone manquant ».

- Le carbone bleu : milieux humides côtiers dans le cycle du carbone

Les milieux humides côtiers jouent un rôle essentiel dans le cycle : ils accumulent, transforment, produisent, stockent et émettent du carbone sous différentes formes. Le carbone présent dans ces milieux humides a deux origines distinctes. Une partie du carbone qu'on y retrouve piégé dans les sédiments provient du milieu continental (allochtone) tandis qu'une autre proportion provient de la productivité des organismes du milieu même (autochtone), souvent très actif (Chmura *et al.*, 2003). Une première partie du carbone est stockée dans le sol et les sédiments, une deuxième est réémise vers l'atmosphère sous forme de CO₂ par décomposition de la matière organique. Enfin, une troisième partie est envoyée vers le milieu océanique sous l'action de la marée. Les milieux humides côtiers sont un carrefour

d'échanges, d'émissions et de stockage de carbone. Le terme « carbone bleu » (*Blue Carbon*) désigne le carbone sous toutes ses formes ayant transité dans les milieux humides côtiers (McLeod *et al.*, 2011).

Ce terme regroupe les marais salants, les hautes herbes marines (*seagrass bed*) et les mangroves. Ces milieux humides possèdent des similarités :

- **géographiques**, du fait de leur localisation le long des côtes;
- **biologiques**, d'adaptation aux milieux salés;
- **physico-chimiques**, par rapport aux réactions anaérobiques s'opérant dans leurs sols.

Les paramètres climatiques et météorologiques influencent fortement la dynamique de l'écosystème. Cette notion de dépendance des variations climatiques est d'autant plus importante dans le contexte des changements climatiques. En effet, les écosystèmes peuvent rapidement passer du statut de puits de carbone à celui de source (Chmura *et al.*, 2003). La variation des précipitations, des températures, l'apport de polluants ou encore le degré de déforestation modifient l'équilibre du milieu. Concernant les mécanismes édaphiques, l'augmentation des températures favoriserait la décomposition de la matière organique (MO) au point de limiter sa portée en tant que puits de carbone (Chmura *et al.*, 2003). Si l'augmentation des températures signifie également une augmentation de la productivité primaire, il semblerait que les mécanismes de dégradation seraient plus réactifs que ceux de la photosynthèse (Kirwan et Blum, 2011). Une augmentation rapide des températures entraînerait avant tout un stress supplémentaire pour les organismes autotrophes, devant faire face au même moment à l'augmentation du niveau moyen des océans (McLeod *et al.*, 2011). Dans un contexte de changement climatique, il apparaît donc précieux de conserver et également de comprendre précisément les mécanismes impliqués. Pourtant, les milieux humides, et les mangroves plus particulièrement, demeurent extrêmement menacés.

Les dynamiques du carbone dans ces milieux sont bien identifiées, mais la quantification précise de tous ces mécanismes demeure incertaine. Afin de parvenir à dresser des estimations précises et rigoureuses, il convient de diviser ces milieux humides selon leur morphologie : marais salants, hautes herbes marines et mangroves. Dans le cadre de la présente recherche, ce sont les mangroves qui sont étudiées plus en détail. Elles constituent

par ailleurs le milieu humide côtier le plus productif et donc le plus important par rapport au cycle du carbone (Donato *et al.*, 2011).

1.5.3. Mangrove, biomasse et productivité

Historiquement, l'écosystème mangrove est le milieu naturel le plus présent le long des côtes tropicales et subtropicales (Mitra *et al.*, 2003). Dans ces régions chaudes et humides, la productivité végétale y est la plus importante au monde. En tant que milieu humide, elles possèdent une forte capacité à stocker le carbone dans leur biomasse et dans leurs sols. De ce fait, et tel que mentionné précédemment, malgré sa faible occupation spatiale, l'écosystème mangrove est un acteur majeur dans le cycle du carbone (Bouillon *et al.*, 2008b). Toutefois, une partie de la quantification et des mécanismes du carbone dans cet écosystème demeure encore incomprise.

- Productivité de la mangrove

La biomasse est un indicateur important dans la description d'un écosystème. Elle est directement liée à la productivité primaire et à la densité de végétation qui existe dans le milieu. Sa quantification se fait en général par subdivision entre la biomasse au-dessus du sol et souterraine (*aboveground biomass* et *belowground biomass*). Dans les mangroves, même si le principe demeure le même, une composante habituellement essentielle pour la biomasse souterraine joue un rôle important dans les valeurs de biomasse au-dessus du sol, et par la même occasion de la biomasse totale : les racines aériennes.

- Biomasse et gradient latitudinal

La biomasse au-dessus du sol serait constituée par ordre d'importance (1) des branches et des troncs d'arbres (2) des racines aériennes et enfin pour une plus petite partie (3) des feuilles. Étant donné l'étendue des mangroves sur le globe et la diversité des milieux et des organismes qui existent au sein de cette unité, les valeurs et hauteurs de la biomasse sont extrêmement variables (Alongi, 2009). Cette variabilité dépend à l'échelle régionale de l'âge des forêts, des espèces végétales, et de variables environnementales multiples (texture du sol, disponibilité des nutriments, précipitation, salinité, influence de la marée) (Mitra *et al.*,

2011). Un facteur majeur explique quant à lui, la différence de biomasse des mangroves à l'échelle globale : la position latitudinale de la forêt (Figure 1.2). Plus le milieu est proche de l'équateur et plus la biomasse sera importante, dense et donc significative (Saenger et Snedaker, 1993). En Papouasie-Nouvelle-Guinée, où se retrouvent de nombreuses mangroves tropicales foisonnantes, les valeurs de biomasse peuvent atteindre 680 Tsec.ha^{-1} (tonnes sèches par hectare) pour des forêts composées des espèces *Rhizophora* et *Bruguiera*, dans le delta de la rivière Fly (Alongi, 2009). Si on compare les valeurs moyennes de biomasse par unité de surface, entre les forêts tropicales humides et les forêts de mangroves, le résultat est comparable : respectivement 246 Tsec.ha^{-1} contre 247 Tsec.ha^{-1} (Alongi, 2009). Cette valeur ne prend toutefois pas en compte la biomasse souterraine, complexe à mesurer.

- Méthodes de mesures de la biomasse

Les méthodes de quantification de la biomasse au-dessus du sol sont de plus en plus précises et fournissent également des estimations à grande échelle. Les données satellitaires et les formules allométriques sont les principaux outils d'analyse. La structure de la canopée peut être évaluée directement à partir d'images satellites PolSAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar), de manière indirecte par rapport aux textures d'image VHR (Very High Resolution) ou bien LiDAR (Ligh Detection And Ranging) (Heumann, 2011). Ces analyses d'imagerie sont parfois couplées à un travail de mesures sur le terrain pour calibrer les données.

La méthode allométrique consiste de manière non destructive à estimer la biomasse totale à partir de mesures simples (diamètre du tronc, hauteur de l'arbre, densité du bois). Celles-ci sont ensuite exploitées et extrapolées grâce aux formules allométriques. La précision de ces formules demeure toutefois limitée puisqu'elles sont souvent représentatives des sites ou des espèces spécifiques (Komiya *et al.*, 2008). Des équations allométriques ont tout de même été élaborées pour les mangroves dans leur ensemble (Chave *et al.*, 2005 ; Komiya, *et al.*, 2005). Concernant les méthodes de mesure de la biomasse souterraine, l'efficacité des données satellitaires est limitée. La méthode allométrique, à partir de relevés sur le terrain a été appliquée avec un succès mitigé (Comley et McGuinness, 2005). En effet l'estimation de la teneur en racines dans un sol hydromorphe est complexe et non exhaustive.

La biomasse souterraine se compose essentiellement de racines. Bien que difficilement quantifiable, il est admis qu'elle joue un rôle considérable dans la biomasse totale des mangroves et qu'elle possède des teneurs supérieures à celles des forêts tropicales humides (Donato *et al.*, 2011). Le ratio qui divise la biomasse au-dessus du sol par la biomasse du sous-sol en est la preuve, puisqu'il semblerait que cette valeur oscille entre 2 et 3 alors que dans des forêts humides tropicales, elle se situe plutôt aux environs de 4 (Komiyama *et al.*, 2008).

La biomasse est le produit de la croissance des organismes autotrophes. C'est également la richesse des forêts de mangroves puisqu'elles se situent, grâce à cela, parmi les écosystèmes les plus productifs de la planète (Donato *et al.*, 2011). Un sous-produit de cette production primaire va également contribuer à la productivité de l'écosystème : la litière.

- Litière et sources nutritives

La litière regroupe l'ensemble de la matière organique (MO) se déposant à la surface du sol. On y retrouve essentiellement les feuilles, tiges, propagules et branches. La valeur des litières dans les mangroves est étroitement liée à la latitude et à la productivité de l'écosystème (Saenger et Snedaker, 1993). Une partie significative des dépôts se retrouvant sur les sols des mangroves a une origine extérieure à l'écosystème. Son origine est terrestre (déposée par les cours d'eau) ou bien marine (déposée par l'action de la marée) (Bouillon *et al.*, 2008b). Ces apports multiples représentent une ressource énergétique et nutritive pour tous les organismes présents à la surface du sol des mangroves et également dans les écosystèmes adjacents.

Si la biomasse d'un milieu est un élément descriptif fort, c'est aussi un premier indicateur de productivité. La biomasse est en fait le produit accumulé du carbone fixé par les organismes autotrophes. Une seconde portion du carbone assimilé va, au cours des saisons, se désagréger de l'arbre vers le sol : il s'agit de la litière. Le carbone va alors devenir disponible comme source énergétique et nutritive pour d'autres organismes. Cela contribue au transfert de carbone entre les différents réservoirs (atmosphère-biosphère). Cet échange s'appelle la production primaire nette (NPP). Ce terme représente en fait la somme de la croissance de la biomasse et de la production de litière (Komiyama *et al.*, 2008). C'est en quelque sorte la quantité de carbone assimilé par l'écosystème, essentiellement d'origine atmosphérique. Ce

carbone produit va ensuite subir différents processus. Dans les mangroves, trois de ces processus sont identifiés : (1) la séquestration dans le sol, (2) la décomposition et transformation par les bactéries aérobies et anaérobies et enfin (3) le transport latéral vers le milieu marin (Figure 1.6).

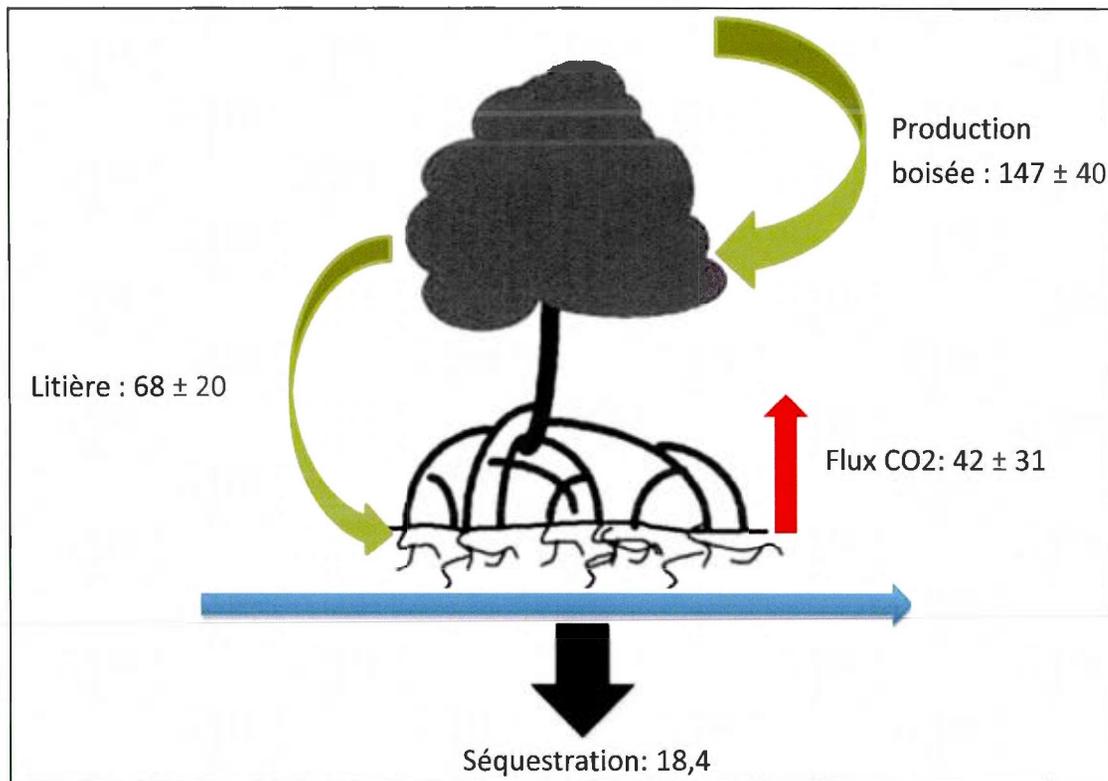


Figure 1.6 Estimation des échanges de carbone dans l'écosystème global (TgC.an⁻¹) selon Bouillon (2008a)

- Devenir de la matière organique produite
 - Flux de dioxyde de carbone vers l'atmosphère

Dans les écosystèmes continentaux, la litière présente au sol est essentiellement dégradée par l'activité microbienne oxydant complètement la MO ($\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$). Cette réaction relâche du dioxyde de carbone vers l'atmosphère. Elle n'est toutefois possible qu'en milieu aérobie. Cela ne concerne, pour les mangroves, que les premiers millimètres à la surface du sol, qui sont en contact avec l'atmosphère. Les conditions anoxiques et saturées en eau salée limitent cette réaction. En milieu anaérobie, d'autres échanges s'opèrent tels que

la fermentation ou encore la réduction sulfatée. Le produit de ces réactions est ensuite oxydé par les microorganismes anaérobiques qui utilisent pour cela les échanges entre électrons d'éléments présents dans le sol (Mn^{4+} ; NO_3^- , Fe^{3+} et SO_4^{2-}). Toutes ces réactions métaboliques émettent en différentes quantités du CO_2 dans l'atmosphère. Ce flux est qualifié « d'émission noire de CO_2 » (*dark CO_2 release*) (Kristensen *et al.*, 2008). L'importance de ces respirations aérobiques et anaérobiques est tributaire de multiples variables biologiques (âge des forêts, espèces dominantes, systèmes racinaires, activité des organismes à la surface du sol), édaphiques (tailles des sédiments, des pores, pH, salinité, humidité) et environnementales (latitude, type de côtes, précipitations, température) (Kristensen *et al.*, 2008). Les mécanismes et la quantification de cette source de CO_2 vers l'atmosphère sont encore mal définis.

Si la productivité des mangroves est comparable à celle des forêts tropicales humides, il semblerait en revanche que la respiration du sol y soit par contre bien inférieure, du fait des conditions limitantes du milieu. Ces propriétés permettent de considérer les mangroves comme un puits de carbone, accumulant au cours des saisons et années du carbone organique dans ses sédiments.

- Séquestration de carbone dans les sols de la mangrove.

L'oxydation complète de la MO par processus aérobique étant limitée, une quantité significative de MO échappe à cette transformation et est rapidement piégée dans les sédiments du milieu. Les forêts de mangroves sont des zones d'accumulation et dépôts sédimentaires ou des éléments organiques et minéraux d'origines diverses (terrestre, marine et autochtone) se déposent quotidiennement. L'accumulation en milieu intertidal est plus importante que dans les tourbières continentales et la présence de végétaux massifs dans les mangroves accroît ce phénomène d'accrétion, en comparaison avec les marais salants (Chmura *et al.*, 2003). À l'échelle globale, les estimations de séquestration dans l'écosystème mangrove se situeraient aux environs de $18.4 - 23 \text{ TgC.a}^{-1}$ (Bouillon *et al.*, 2008a ; Jennerjahn et Ittekkot, 2002).

- Transfert latéral d'éléments.

Malgré sa faible répartition spatiale, la mangrove joue un rôle prépondérant dans le cycle du carbone. Elle a en effet des prédispositions à piéger le carbone dans ses sédiments. Elle fournit et distribue également une quantité significative de MO dans ses environnements adjacents. Ce transfert s'effectue sous forme de particulaire et dissoute (POC et DOC). 11 % du carbone terrestre se déversant dans l'océan et 15 % du carbone total accumulé dans les sédiments marins transiterait ou serait issu des mangroves (Jennerjahn et Ittekkot, 2002). Une quantité importante de nutriments et d'éléments inorganiques effectue également ce trajet. Si cet échange est significatif pour le budget du carbone global, ses influences nutritives et énergétiques sont toutefois limitées. En 1968, Odum a lancé la théorie de l'*outwelling*, en stipulant qu'étant donné la quantité importante de MO déversée dans l'océan celle-ci devrait avoir une influence majeure dans la chaîne trophique océanique. Des études plus récentes ont atténué ce postulat en expliquant que le rayon d'influence des mangroves est limité par des contraintes géomorphologiques et hydrodynamiques. La présence des mangroves dans des milieux tidaux de faible amplitude (estuaires, deltas et lagons) limite l'étendue des éléments à grande échelle ainsi que la force des courants (Kristensen *et al.*, 2008). Les fortes teneurs en tanins et les valeurs nutritives faibles de la MO produite dans les mangroves limitent l'efficacité d'assimilation et ses intérêts énergétiques (Lee, 1995). Le transfert latéral mangrove-océan est significatif dans le cycle du carbone puisqu'une partie importante du carbone organique produit dans la mangrove s'y déverse et s'y sédimente. Toutefois, la contribution de la MO issue des mangroves dans la chaîne trophique océanique reste limitée.

Dans un contexte de changement climatique et face aux multiples et importantes pressions anthropiques que subissent les mangroves, il est intéressant de comprendre la dynamique du carbone dans ce milieu multifonctionnel unique. Dresser un bilan précis des échanges dans les mangroves permet de comprendre l'influence et l'importance de ce territoire. Cela aide également à prendre conscience des impacts directs et indirects découlant d'une dégradation du milieu du fait des changements globaux (anthropiques et climatiques). La Figure 1.6 résume les différentes sources et exutoires du carbone organique dans l'écosystème mangrove. La Figure 1.7 détaille selon leur importance les différentes actions auxquelles est soumis le carbone organique produit dans l'écosystème. Si les principaux mécanismes

semblent être identifiés (séquestration, émissions et transferts), le cycle du carbone dans l'écosystème mangrove, à l'échelle globale, demeure incompris pour 55 % du carbone organique produit par l'écosystème (Figure 1.7) (Bouillon *et al.*, 2008b). Deux raisons pourraient expliquer cette large incertitude.

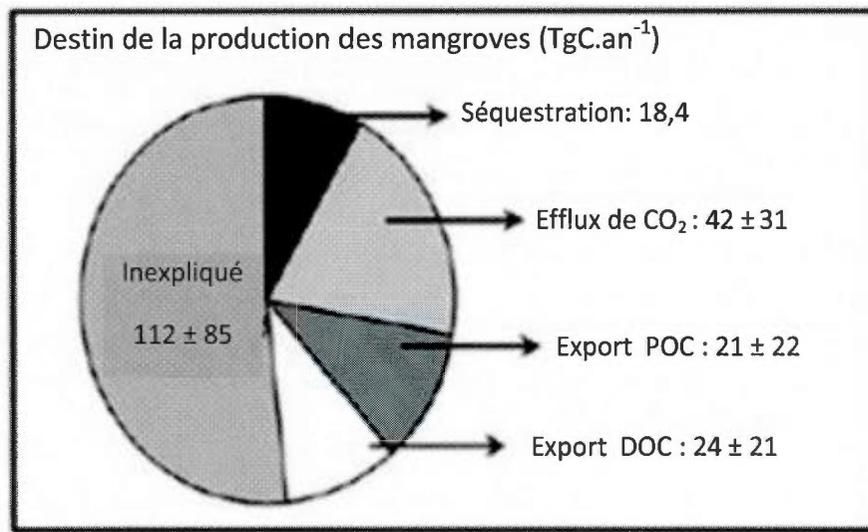


Figure 1.7 Estimation du devenir du carbone produit dans l'écosystème mangrove (Bouillon *et al.*, 2008b)

Dans un premier temps, il faut reconsidérer les mécanismes négligés qui auraient un impact significatif sur ce budget. La minéralisation de la MO et la transformation en carbone inorganique pourraient avoir une importance significative dans le budget global. Le processus de dégradation de la matière organique est souvent réduit à l'activité microbienne aérobie. Il semblerait que les transformations dans les premiers horizons du sol par les réactions anaérobiques fourniraient du carbone inorganique. Cette nouvelle forme de carbone serait ensuite, par l'action des marées et du drainage, transportée vers le milieu océanique. Le carbone inorganique dissous (DIC) constituerait alors une nouvelle composante des éléments en transit vers l'océan à considérer, comptant pour une valeur peut-être même supérieure aux échanges de carbone organique dissous (DOC) (Kristensen *et al.*, 2008). Un autre élément potentiellement significatif, mais négligé dans les budgets résulte dans la production secondaire et la respiration par la faune, pourtant abondante dans les mangroves. En effet, la consommation des herbivores et des invertébrés qui, en tant qu'organismes hétérotrophes,

consommant et restituent de la MO est souvent négligée dans les estimations de budget (Bouillon *et al.*, 2008b).

Deuxièmement, les estimations présentées sont probablement conservatives. L'élaboration d'un budget à l'échelle globale résulte dans l'extrapolation de données spécifiques. Or, comme nous l'avons vu, la mangrove est un ensemble de milieux hétérogènes. La quantité de données obtenues, au vu des fortes variabilités, n'est pas encore suffisante. Enfin les méthodes et les conditions de terrain limitent la représentativité des données récoltées, dans ce milieu hautement dynamique.

Les considérations sur le statut et le devenir des mangroves ont crû en nombre et en importance dans les dernières années. Des projets de conservation et de restauration fleurissent et se maintiennent dans les différentes régions tropicales et subtropicales. 25 % de la surface totale des mangroves actuelle serait intégré dans un programme de conservation ou de restauration (Spalding *et al.*, 2010). Les exemples les plus cités, du fait de leur succès et aussi de l'intérêt particulier des sites sont, entre autres, la forêt de Matang (Malaysia), de Gazi (Kenya) ou encore des Sundarbans (Inde) (Bosire *et al.*, 2008). Toutefois, malgré cette prise de conscience et la mise en place de cadres législatifs visant à protéger ces aires naturelles, la surface d'occupation des mangroves s'amoindrit d'année en année.

De nombreux bienfaits et services permettent de justifier la préservation de ce milieu original (barrière naturelle protectrice, réserve de biodiversité, filtre naturel, ressource alimentaire et nutritive). Dans un contexte de changement climatique, comprendre la dynamique du carbone dans un milieu à l'interface entre les différents réservoirs principaux du globe est fondamental. Les mangroves produisent une quantité significative de carbone, en comparaison avec les autres milieux humides du globe (Tableau 1.2). Le devenir de ce carbone organique est quant à lui incertain, dans ses mécanismes et répartitions, entre (1) la dégradation et réémissions dans l'atmosphère (2) la séquestration dans les sédiments et (3) le transfert vers le milieu océanique.

Tableau 1.2
Contribution globale des mangroves et des autres milieux côtiers dans la séquestration du carbone (Alongi, 2009)

Type de milieu	Surface (10^{12} m^2)	Taux de séquestration ($\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$)	Séquestration totale (TgC.an^{-1})
Mangroves	0,16 (0,5 %)	181,3	29,0 (12 %)
Marais salants	0,4 (1,4 %)	151,0	60,4 (25 %)
Lagunes	0,3 (1 %)	83,0	27,4 (11 %)
Estuaires	1,8 (6,2 %)	45,0	81,0 (33 %)
Côtes	26,6 (90,9 %)	17,0	45,2 (19 %)
Total			243,0

La compréhension du comportement du carbone dans ce milieu dynamique et hétérogène doit se faire selon deux approches complémentaires. La première serait de mesurer *stricto sensu* les mécanismes de transfert du carbone. En parallèle avec ces mesures, il faudrait dans un second temps évaluer les variables biologiques, édaphiques et climatiques qui influencent directement la dynamique du carbone dans les mangroves à différentes échelles. C'est dans cette logique que se positionne la présente étude.

1.6. Approches, région d'étude et objectifs de recherche

1.6.1. Considération et cadre de recherche

Notre recherche s'insère dans la deuxième phase du projet Asbiom Delta, dirigé par le groupe de recherche ICARGC (International Center for Advanced Research on Global Change, Vietnam National University), basé à Hanoï.

La vocation du groupe de recherche ICARGC est d'étudier et de diriger des recherches à échelles régionale et internationale reliées aux changements climatiques. Basée en priorité sur des travaux de photo et télédétection, une composante significative des travaux inclut d'autres domaines de recherche (sciences naturelles, mathématiques, informatique,

sociologie, anthropologie et économie). L'unité de recherche universitaire promeut également les relations et échanges internationaux entre universités de plusieurs pays, afin de favoriser le dialogue scientifique et interculturel. De ce fait, l'UQAM, par l'intermédiaire du professeur Yann Roche, travaille en collaboration avec le groupe de recherche.

Le projet Asbiom Delta, débuté en 2010, étudie l'étendue et l'évolution des mangroves dans la zone côtière du delta du fleuve Rouge. Le projet est divisé en trois objectifs distincts :

- 1 Évaluer par télédétection la biomasse des mangroves dans la région et son évolution depuis 1970.
- 2 Développer une méthode d'analyse spatio-temporelle entre la biomasse des mangroves et les émissions de gaz à effet de serre émis par le milieu.
- 3 Élaborer des applications géomatiques pour suggérer un développement soutenable de la région, en considérant le rôle des mangroves et les changements climatiques.

1.6.2. Région d'étude

- Vietnam

Le Vietnam, pays d'Asie du Sud-est en pleine croissance, supporte une partie considérable de son économie et de ses activités le long de ses côtes (Figure 1.8). Étendus sur plus de 3 200 km, avec deux deltas fertiles à proximité de ses deux métropoles (Hanoi et le delta du fleuve Rouge au nord, Ho Chi Minh ville et le delta du Mékong au sud), les environnements naturels côtiers ont été altérés par le développement d'activités diverses (aquaculture, agriculture, tourisme) (Nhuan *et al.*, 2009). Le Vietnam est le troisième producteur aquacole mondial derrière la Chine et l'Indonésie (Food and Agriculture Organization [FAO], 2010 b, p. 26). Ce haut rang n'est toutefois que très récent. La production a été multipliée par cinquante entre 2000 et 2008 (Tableau 1.3). Si la progression au cours de la dernière décennie est remarquable, le virage productiviste s'est opéré dès le milieu des années 1980 et le lancement de la politique du Doi Moi (Irvin, 1995). Le gouvernement socialiste au pouvoir a alors voulu développer l'économie et la croissance du pays en s'ouvrant au commerce extérieur, en exploitant intensivement diverses ressources de son territoire, notamment alimentaires

(production de riz, café et aquaculture) (Irvin, 1995). Ce tournant ne s'est pas fait sans dommages. Les premières victimes en sont les milieux naturels côtiers, notamment les mangroves, historiquement présente le long des côtes.

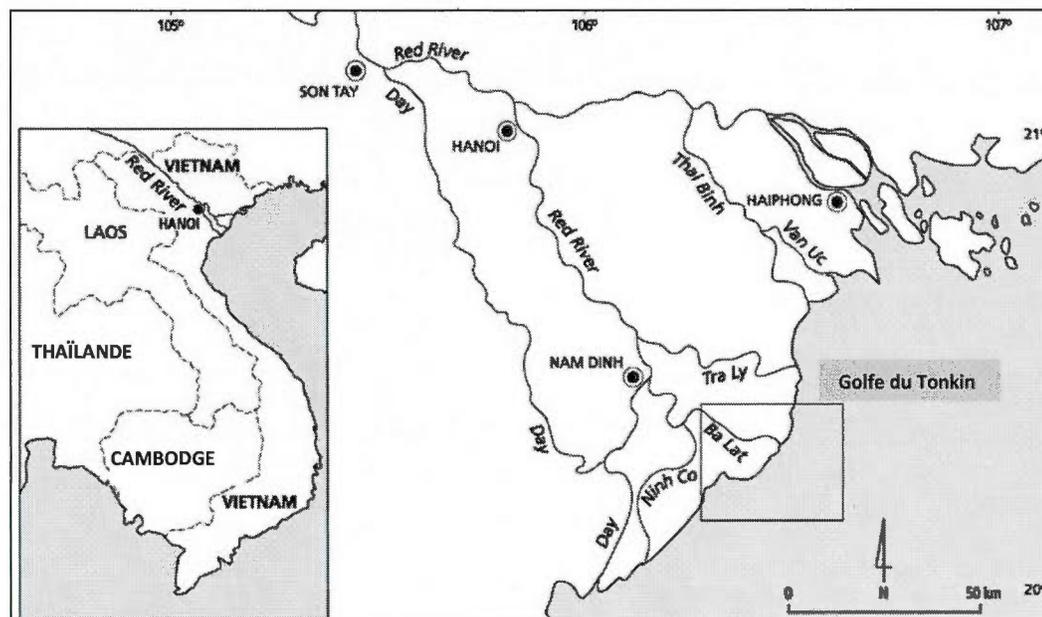


Figure 1.8 Localisation du Vietnam (à gauche) et de l'estuaire de Ba Lat dans le delta du fleuve Rouge (à droite) (Van Maren et Hoekstra, 2004)

Tableau 1.3

Évolution de la production aquacole au Vietnam (Food and Agriculture Organization [FAO], 2010b)

Année	1980	1990	2000	2008
Production aquacole (tonnes équivalents de poids vif)	98 160	160 046	498 517	2 461 700

- Les mangroves du Vietnam.

La surface des mangroves, qui aurait représenté 400 km² en 1940, se situerait maintenant aux alentours de 150 km² (Spalding *et al.*, 2010). Les espèces de mangroves présentes au Vietnam sont très diverses. Cela s'explique par le gradient latitudinal qui existe entre le nord et le sud du pays, affectant les conditions climatiques (température, précipitation, salinité, influence de la marée). Au total, 92 espèces occupant l'écosystème mangrove ont été

répertoriées, regroupées en 72 branches et trois familles (Hong et San, 1993). Parmi celles-ci figurent des espèces propres aux écosystèmes mangroves et d'autres que l'on peut retrouver dans d'autres milieux naturels.

Les plaines deltaïques jouent un rôle significatif dans le dynamisme économique du Vietnam ainsi que dans la richesse naturelle du milieu, puisqu'on y retrouve de grandes surfaces de mangroves. Ces communautés végétales sont significativement différentes entre le nord et le sud. La situation des mangroves reste pourtant la même pour l'ensemble du pays, les milieux naturels étant partout menacés par de multiples pressions anthropiques.

- Delta du fleuve Rouge

Le fleuve Rouge est le plus important cours d'eau du nord du Vietnam (Figure 1.8). Il prend sa source dans la région du Yunnan (Chine) et se déverse dans la mer de Chine, par le delta du fleuve Rouge. Ses sédiments argileux sont chargés en éléments ferrugineux oxydés. Cela explique l'appellation du fleuve, lié à sa couleur rouge brunâtre.

Le delta du fleuve Rouge est un réseau large et complexe. Sa surface totale se chiffre à 14 300 km² (Luu *et al.*, 2010). Le delta est séparé en quatre exutoires majeurs : Ba Lat, Lach Gia, Tra Ly et Day. Le climat de la région est de type mousson subtropicale avec une saison sèche de novembre à avril et une saison humide de mai à octobre, représentant 85 à 90 % des précipitations annuelles (Le *et al.*, 2007). Le dépôt et l'accrétion sédimentaires varient grandement selon les saisons, et sont principalement affectés par le régime de moussons. Les sols sont qualifiés d'ultisols. Plus que la qualité nutritive des sédiments, c'est le renouvellement régulier de la surface qui supporte la production rizicole abondante dans la plaine alluviale.

Les mangroves du delta du fleuve Rouge sont essentiellement composées des espèces *Sonneratia caseolaris*, *Bruguiera gymnorrhiza*, *Kandelia candel*, *Aegiceras corniculatum*, et *Acanthus ilicifolius* (Tue *et al.*, 2011). Du fait de la localisation, relativement distante de l'équateur (en comparaison avec le delta du Mékong par exemple), la productivité végétale y est moins importante. Son rôle de bio-filtration, de bouclier naturel, de réserve pour la biodiversité et de support pour de multiples ressources alimentaire demeure toutefois précieux.

L'originalité et les fonctions vitales que représentent les mangroves du delta du fleuve Rouge sont si importantes que certaines zones sont protégées. Le parc national de Xuan Thuy (PNXT), dans l'estuaire de Ba Lat, relève de la convention Ramsar. Cette convention rassemble des milieux humides du monde entier, ayant un intérêt d'importance internationale par rapport aux supports que le milieu représente pour la biodiversité ou bien pour les besoins des communautés locales (Gardner et Davidson, 2011).

- L'Estuaire de Ba Lat et le parc national de Xuan Thuy (PNXT)

L'estuaire de Ba Lat, en forme de lobe, se situe au sud-ouest du delta et se termine à plus de 10 km de distance de la côte, par les dépôts sédimentaires et l'influence des courants de marée (Figure 1.8). L'accrétion côtière y est très active ainsi que la turbidité de ses eaux. Les macrophytes aquatiques, les hautes herbes et les macro-algues sont faibles à absents (Tue *et al.*, 2012). L'intrusion limitée de lumière dans la colonne d'eau ainsi que la forte concentration en tanins limite la présence des organismes benthiques. Le parc national de Xuan Thuy (20.233248N, 106.570105E) est une partie significative de l'embouchure. Ce site protégé représente une surface de 12 km² à l'intérieur desquels se retrouvent 3 km² de mangroves. Les espèces végétales sont à la fois naturelles et replantées. Au nord du parc se retrouvent les espèces naturelles que sont *Sonneratia caseolaris*, *Kandelia obovata*, *Bruguiera gymnorrhiza*, *Aegiceras corniculatum*, et *Avicennia marina*. Dans la partie sud sont présentes les espèces replantées de type *K. obovata*, cohabitant avec les espèces historiques *Avicennia spp.*, *Kandelia candel*, *Rhizophora stylosa*, *Acanthus ebrateatus* and *Derris trifoliata*. Un gradient de végétation (espèces et biomasse) existe de manière croissante depuis le milieu continental vers l'arrière-pays (Tue *et al.*, 2011). Une des renommées du site provient du rôle de refuge que celui-ci représente pour les oiseaux migrateurs.

Les forêts de mangroves jouent un rôle prépondérant dans le processus de sédimentation le long des côtes. Cette activité biologique est contrôlée par les facteurs biotiques (biomasse, densités et tailles des réseaux racinaires) et abiotiques (apports sédimentaires, régime hydrologique, tailles des sédiments, caractéristiques géomorphologiques et climatiques) (Tue *et al.*, 2012). Les éléments piégés, assimilés et transformés peuvent être divisés en éléments organiques et inorganiques.

La teneur en carbone organique totale (TOC) dans le PNXT est supérieure dans les zones de forêt de mangroves par rapport aux zones intertidales dénudées de toute couverture boisée (Tue *et al.*, 2012). Plus particulièrement, ce sont les mangroves naturelles qui sont les plus efficaces dans le piégeage du carbone organique, agissant alors comme un important puits pour les sédiments fins et le carbone organique (Tue *et al.*, 2011).

- Apports des données satellitaires sur le site de Xuan Thuy

Les données satellitaires facilitent la visualisation et la quantification précises des écosystèmes naturels, tels que les mangroves (Green *et al.*, 1998). Si la surface du site du Xuan Thuy lors de son inscription dans la convention Ramsar était officiellement chiffrée à 120 km² en 1989, sa surface actuelle est en fait située entre 49 et 60 km² (Seto et Fragkias, 2007). Le classement du PNXT comme site protégé n'a en effet pas réduit la progression des bassins de crevetticulture à la périphérie ni même à l'intérieur de la zone protégée. Toutefois, cette protection légale a permis la replantation d'arbres, ce qui a finalement limité la vitesse de réduction de surface de mangrove au cours des deux dernières décennies.

- Biomasse

Bien qu'un certain nombre d'espèces propres aux forêts de mangroves ait été replantées, certains aspects ne sont pas compensés dans les mécanismes de production et de piégeage d'éléments. En effet, la biomasse la plus importante demeure dans les mangroves originelles, qui sont de ce fait les plus efficaces en termes de production primaire, mais également de piégeage sédimentaire grâce à leur implantation durable et de longue date.

La biomasse au-dessus du sol pour la mangrove de Xuan Thuy est évaluée en moyenne à 62 tonnes sèches par hectare (Tsec.ha⁻¹) (Toan, 2011). Les valeurs les plus importantes se retrouvent dans les mangroves naturelles les plus anciennes, qui sont également celles produisant et accumulant le plus de carbone organique dans leurs sols (Tue *et al.*, 2011).

Des études spécifiques aux espèces de mangroves historiques existent dans le PNXT pour quantifier la biomasse et la capacité de stockage de l'écosystème. En revanche, le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère qui représente pourtant un flux significatif dans le cycle du carbone, n'a pas été étudié précisément. Étant donné le rôle important que jouent les

mangroves naturelles dans la mangrove de Xuan Thuy concernant la productivité primaire et le stockage de carbone organique, la présente étude quantifie le flux de CO₂ provenant du sol dans les mangroves originelles, en considérant les différences de biomasse et les paramètres environnementaux.

1.6.3. Hypothèses de recherche

La présente étude s'appuie sur les travaux menés par l'équipe de l'ICARGC, qui ont quantifié précisément sur le terrain et à partir de données satellitaires la biomasse au-dessus du sol de la mangrove de Xuan Thuy (Toan, 2011). Notre plan de recherche avec cas multiples (quatre parcelles sélectionnées en fonction de leurs différentes biomasses) nous a permis d'accroître la validité de l'étude afin de représenter le plus possible la variabilité naturelle des sols et de biomasse dans la mangrove de Xuan Thuy. Divers variables et paramètres environnementaux ont été considérés. Ces éléments peuvent être regroupés dans quatre domaines distincts que sont les indicateurs climatiques, tidaux, biogéomorphologiques et édaphiques.

Les hypothèses suivantes ont été évaluées dans le cadre de cette étude :

- le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère est lié à la teneur en biomasse présente dans la zone d'étude (les valeurs varient selon les parcelles);
- le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère varie selon les variables climatiques, tidales et géomorphologiques (température, précipitations, temps de résidence de la marée, topographie);
- le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère varie selon les variables édaphiques évaluées (pH, salinité, résistivité, conductivité, humidité, teneur en matière organique, C:N ; TDS).

1.6.4. Objectif général de recherche

Le but de cette recherche est de quantifier le flux de carbone à l'interface sédiment-atmosphère dans la mangrove du Xuan Thuy (delta de fleuve Rouge, Vietnam) et de comprendre l'influence des variables (climatiques, tidales, biogéomorphologique et édaphiques) sur les variations spatio-temporelles des valeurs de flux de CO₂ mesurés.

1.6.5. Objectifs spécifiques de recherche

Pour quantifier et comprendre les mécanismes influençant le flux de carbone à l'interface sédiment-atmosphère dans la mangrove de Xuan Thuy, nous allons :

- obtenir une valeur représentative de la respiration du sol dans la mangrove de Xuan Thuy pour la période d'échantillonnage (mai à juillet 2012);
- déterminer la relation entre la respiration du sol et la teneur en biomasse dans les zones de mesure;
- caractériser et interpréter la variabilité temporelle et l'hétérogénéité spatiale des valeurs obtenues, en considérant les différents paramètres environnementaux mesurés (climatiques, tidaux, biogéomorphologique et édaphiques).

CHAPITRE II

MÉTHODES DE COLLECTES ET D'ANALYSES D'ÉCHANTILLONS

2.1. Site d'étude

Le Vietnam est caractérisé par ses vastes zones côtières le long desquelles se concentre la majorité de la population et des activités économiques. Ce pays d'Asie du Sud-est est classé parmi l'un des principaux producteurs et exportateurs de produits aquacoles, mais aussi comme l'un des plus menacés face à l'élévation du niveau moyen des océans (Dasgupta *et al.*, 2009). Un total de 92 espèces végétales vivant dans l'environnement mangrove se répartit sur environ 150 000 hectares. Le delta du fleuve Rouge et du Mékong concentrent une proportion importante de la surface des mangroves nationales.

Situé dans la partie nord, le delta du fleuve Rouge possède des espèces moins productives que le delta du Mékong. (Tue *et al.*, 2011). Souvent qualifiés de naines, on retrouve essentiellement les espèces *Sonneratia caseolaris*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Kandelia candel*, *Aegiceras corniculatum* et *Acanthus ilicifolius*.

La présente étude a été réalisée dans le parc national de Xuan Thuy (PNXT), situé dans l'estuaire de Ba Lat au sud-ouest du delta du fleuve Rouge. La surface totale du site recouvre officiellement 12 000 hectares parmi lesquels 3 000 hectares sont occupés par les mangroves (Figure 1.8). À l'intérieur de ce site se retrouvent des mangroves naturelles et replantées. Le site de Xuan Thuy relève de la convention Ramsar, en tant que milieu humide d'importance internationale depuis 1989. Le climat dans l'estuaire de Ba Lat est semi-tropical avec des précipitations annuelles moyennes de 1 667 mm. La saison humide, qui s'étale de mai à octobre, concentre 85 à 90 % des précipitations annuelles. La température annuelle moyenne est proche de 23 °C avec un maximum en juillet de 28 °C et un minimum de 16 °C en janvier, février (Tri *et al.*, 1998).

2.2. Mesure du flux de CO₂

Les flux de CO₂ ont été mesurés durant six jours consécutifs au cours des mois de mai, juin et juillet 2012. Les flux de CO₂ présentés ici sont les valeurs moyennes mensuelles dans quatre différents sites au sein même de la mangrove de Xuan Thuy (Figure 2.1, Tableau 2.1). Ces quatre parcelles de 10m² ont été sélectionnées en fonction de leurs biomasses respectives, qui sont représentatives de la diversité des valeurs recensées par l'étude de Toan (2011), et de leur facilité et rapidité d'accès. La biomasse moyenne pour le PNXT est fixée à 62,3 Tsec.ha⁻¹. De ce fait, les quatre sites sélectionnés représentent respectivement :

- Une parcelle à biomasse **Haute** : le site **H-4** (22,38006N ; 66,3565E) qui possède une biomasse de **120,34Tsec.ha⁻¹**
- Une parcelle à biomasse **Basse** : le site **B-5** (22,37696N ; 66,3571E) qui possède une biomasse de **38,31 Tsec.ha⁻¹**
- Une parcelle à biomasse **Moyenne supérieure** : le site **Msup-6** (22,38424N ; 66,3765E) qui possède une biomasse de **77,65 Tsec.ha⁻¹**
- Une parcelle à biomasse **Moyenne inférieure** : le site **Minf-7** (22,39069N ; 66,4050E) que possède une biomasse de **61,75 Tsec.ha⁻¹**

Tableau 2.1

Description des parcelles d'études selon la biomasse (TSec.ha⁻¹), l'altitude (m) et les espèces dominantes.

Numéro de site (position)	Biomasse de la parcelle (TSec.ha ⁻¹)	Altitude de la parcelle (m)	Espèces
Msup-6	77,65	7,2	<i>Aegiceras Corniculatum</i>
H-4	120,34	4,3	<i>Aegiceras Corniculatum</i> , <i>Bruguiera Gymnorrhiza</i>
B-5	38,31	3,8	<i>Bruguiera Gymnorrhiza</i>
Minf-7	61,75	0,9	<i>Aegiceras Corniculatum</i> , <i>Bruguiera Gymnorrhiza</i>

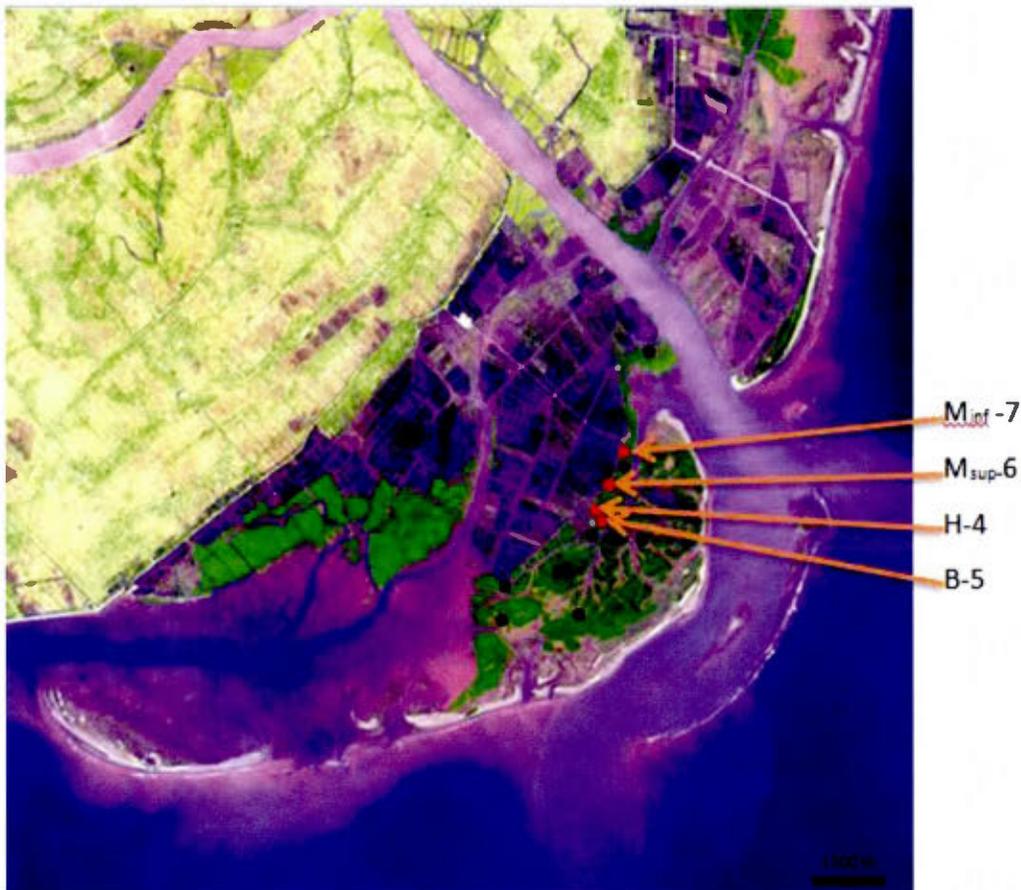


Figure 2.1 Site de Xuan Thuy. En noir et rouge, les parcelles d'études de quantification de la biomasse. En rouge, les parcelles d'études pour la présente recherche (Toan, 2011)

À chaque jour de collecte, les flux ont été mesurés à l'intérieur de 24 chambres statiques closes (CSC) d'une aire de 243 cm^2 un volume de $7\,602 \text{ cm}^3$. Les mesures ont été effectuées le long d'un cycle de 24 heures, chacune incubée et récoltée à marée basse dans le même ordre, entre 6 h et 12 h, afin de limiter les différences entre les campagnes et le positionnement des chambres.

La technique de collecte utilisée est appelée piégeage par solution alcaline en CSC, décrite par Ohlinger (1996) et modifiée par Thuyen (2012, non publié). Une solution de soude (NaOH, 70 mL, 0,1 mole) présente dans une bouteille en plastique d'un volume de $133,0 \text{ cm}^3$ est fixée à l'intérieur de la chambre. Une surface de $21,2 \text{ cm}^2$ permet le contact et les échanges gazeux entre le CO_2 présent dans la chambre et la solution alcaline. Celle-ci absorbe alors les molécules de CO_2 présente dans la chambre et émises par les réactions

physico-chimiques du sol au cours de l'incubation, une pellicule plastique opaque isole la chambre de tout contact avec l'environnement extérieur. À la fin de la période de mesure (24 heures), du baryum chlorure (BaCl_2) (14 mL, 0,05 mole) est ajouté dans l'échantillon pour précipiter le CO_2 piégé dans la bouteille. La masse totale de CO_2 piégée ($C_{\text{piégé}}$) par la solution alcaline (NaOH) est ensuite déterminée en laboratoire par titration à partir d'acide chlorhydrique (HCl) dilué (Luo et Zhou, 2006). Le flux de CO_2 issu des sédiments (F) exprimé en $\text{mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ est déterminé selon l'équation 1 :

$$F = \frac{C_{\text{piégé}} - C_{\text{blanc}}}{\Delta t_{\text{abs}} A} \quad (1)$$

- $C_{\text{piégé}}$ représente la quantité de carbone piégé par la solution alcaline, déterminée par titration.
- C_{blanc} correspond à la quantité moyenne de CO_2 présent dans les deux échantillons de contrôle quotidien, réalisé dans les conditions de terrain. Cette valeur témoin sert de référence pour limiter les biais et les contaminations potentielles lors des manipulations.
- Δt_{abs} est le temps total d'incubation de l'échantillon.
- A représente la surface totale d'occupation de la chambre (243cm^2).

Cette méthode possède deux avantages. Le premier réside dans son faible coût d'opération et sa facilité de réalisation, permettant d'effectuer de multiples mesures simultanées à divers endroits. Dans la présente étude, ce sont vingt-quatre échantillons qui ont été récoltés quotidiennement (les 4 parcelles possèdent chacune 2 sous-parcelles dans lesquels sont positionné 3 chambres ($4 \times 2 \times 3 = 24$), Figure 2.2). Le second avantage à considérer est lié au temps d'incubation optimale, se situant à 24 h (Rochette *et al.*, 2005), soit le cycle d'une journée complète. Cela se révèle particulièrement intéressant lorsque nous cherchons à étudier les relations entre la production de CO_2 et les variables environnementales, ce qui est le cas dans cette étude.

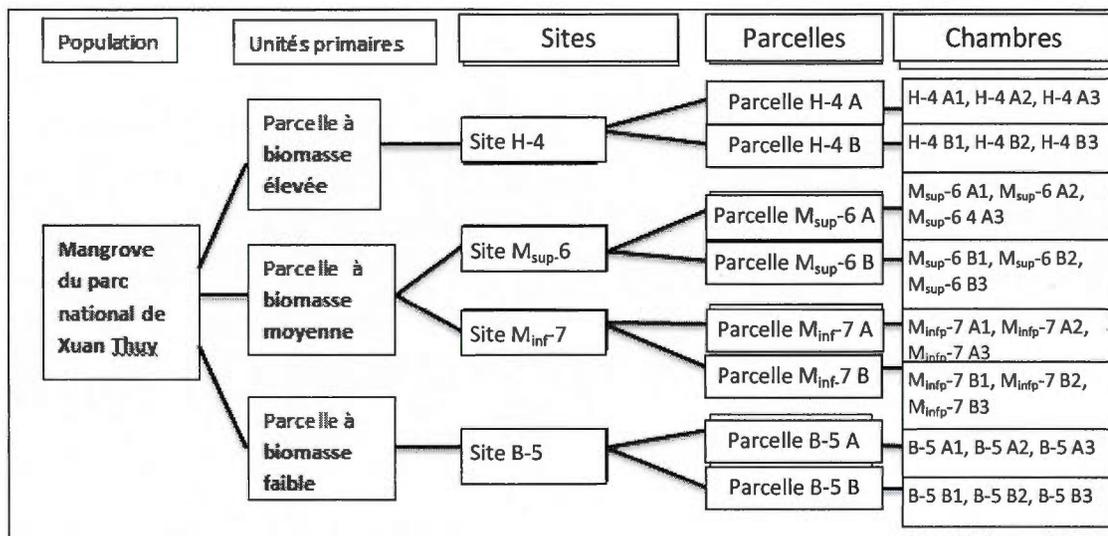


Figure 2.2 Schéma de choix de la méthode d'échantillonnage

2.3. Caractérisation des paramètres climatiques et tidaux

À chaque sortie, la température et le niveau d'élévation de la marée ont été relevés sur les quatre sites. Les précipitations quotidiennes, l'humidité à 13h00, l'humidité minimum, la température (maximale, minimale moyenne) quotidienne, l'évaporation et la vitesse du vent maximale ont également été recueillies sur une base quotidienne depuis la station météo de Vãn Lý (20.128N, 106.303E) du service national Hydro-météorologique du Vietnam.

2.4. Caractérisation des sédiments

Des duplicatas de carottes de sédiments ont été prélevés dans chaque sous-parcelle sur une profondeur de 120 cm, en utilisant une tarière manuelle. Ces prélèvements ont tous été réalisés durant la période de terrain du mois de juin. Les échantillons ont permis de déterminer un certain nombre de propriétés physico-chimiques pour trois horizons différents (A : 0-5 cm, B : 15-20 cm, C : 30-40 cm).

Les échantillons ont été conservés au frais et transportés jusqu'au laboratoire de *l'Institute of*

Agricultural Environment (IAE), à Hanoi. Ils ont ensuite été séchés au four à 40 °C jusqu'à l'obtention d'un poids stable puis broyés au mortier et au pilon en pierre d'agate et tamisés. La teneur en carbone organique total (TOC) par perte au feu pour chaque horizon a été déterminée à l'aide d'un four à 1100 °C (Audesse, 1982). À partir d'un multimètre (SevenGo duo, Meter Toledo), le pH, la conductivité, la salinité, la résistivité, TDS (total de solides dissous) a été déterminé (1 :5 - sol : eau distillée). Les teneurs en carbone total (TC) et en azote total (TN) dans les trois horizons sélectionnés par carottes ont été obtenues à partir des méthodes de Walkley et Black et de Kjeldhal (Rayment et Higginson, 1992). L'ensemble des mesures effectuées est décrit et résumé dans l'Annex A.

2.5. Traitement statistique

L'analyse statistique des données recueillies durant les trois mois de terrain se divise en trois parties. Celles-ci s'alignent avec les trois hypothèses formulées.

Dans un premier temps, nous avons cherché à comprendre l'évolution et le comportement des flux de CO₂ dans le temps (mai, juin, juillet) et dans l'espace (les quatre parcelles d'échantillonnages, représentant les différences de biomasse au sein de la mangrove de Xuan Thuy). L'analyse de variance univariée à mesure répétée non balancée dans un plan divisé a été utilisée pour déterminer les différences de valeurs de flux de CO₂ existant entre les périodes et les sites d'échantillonnages (Littell *et al.*, 1991). Le design de collecte, à chambres fixes, a permis une récolte de données récurrentes parfaitement intégrée à ce type d'analyse statistique.

Les deuxième et troisième hypothèses cherchent à déterminer une relation entre le flux de CO₂ et les paramètres environnementaux mesurés. Pour faciliter les analyses, les variables mesurées sont séparées en deux groupes distincts : celles représentatives des paramètres situés « au-dessus du sol » (climatique, tidaux, biogéomorphologique) et les variables représentatives des paramètres « du sol » (édaphiques).

Les relations et influences existant entre les flux de CO₂ et les variables « au-dessus du sol » (climatiques, tidales et biogéomorphologiques) ont été déterminées par une analyse en

régression multiple. En complément, des matrices de corrélations par paires ont été élaborées pour chaque sous-groupe de variables définies (climatiques, tidales et biogéomorphologiques). Pour les variables climatiques, les tests ont été effectués selon les corrélations de Spearman tandis que pour les variables biogéomorphologiques, les analyses ont été effectuées à partir du test de Pearson.

Enfin concernant les paramètres édaphiques, une analyse de variance (ANOVA) à mesure répétée a été réalisée sur les échantillons de sol pour chacune des variables, en considérant les profils de sol (0-5 cm, 15-20 cm et 30-40 cm). Un second test édaphique ne prenant en compte que l'horizon de surface (0-5cm) a permis d'analyser les différences inter-sites pour ce même horizon. Cette analyse s'est effectuée par comparaison multiple à partir du test de type t de Student, avec un nombre d'échantillons balancé.

Les analyses statistiques ont été conduites à l'aide des logiciels JMP 10.0.0 et SAS 9.3.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1. Flux de CO₂ à l'interface sédiment-air

3.1.1. Hiérarchisation des variations de valeurs

Les moyennes des flux de CO₂ mesurées varient selon les mois et les sites d'échantillonnages (Annexe B). Une analyse de hiérarchisation (à partir du test d'estimation du composant de la variance du maximum de vraisemblance restreint (REML)) nous permet d'isoler les sous parcelles et les jours dans l'interprétation des résultats. En effet, leurs influences sont faibles par rapport aux variations du flux de CO₂ (respectivement 0 % pour les sous-parcelles et 9,89 % pour les jours). À l'inverse, ce test révèle qu'il existe des variations importantes entre les mois d'échantillonnage (35,98 %) et entre les chambres d'un même site (49,02 %) (Tableau 3.1). La variabilité n'est pas très élevée entre les quatre différents sites (8,11 %). Cette unité est toutefois conservée pour l'analyse des données étant donné que l'analyse de variance entre les sites figure dans nos objectifs de recherche établis antérieurement.

Tableau 3.1
Résultat du test d'estimation du composant de la variance de vraisemblance

Unité	Site	Sous-parcelle	Mois	Jours	Résidus	Total
Effet de variance (%)	8,11	0,00	35,98	9,89	49,02	100,00

Les valeurs utilisées pour les flux de CO₂ sont exprimées par moyennes mensuelles en milli mole par mètre carré et par jour (mmol.m⁻².j⁻¹). Toutefois, pour l'analyse de variance à mesure répétée, les données sont exprimées en moyenne des moindres carrés, par parcelles et par mois. Cette méthode tient compte de grandes variabilités de mesures et minimise leurs impacts sur les résultats, grâce à leur intégration dans la formule (Scherrer, 1984). L'analyse

de variance à mesure répétée nous permet d'affirmer qu'il existe entre les quatre parcelles des différences de valeurs ($F=0,0172^*$, Epsilon non ajusté univarié= $0,0080^*$).

3.1.2. Variations temporelles

Le test univarié à mesures répétées, testé sur chaque colonne séparément, exprime les relations et proximités existant entre les valeurs mensuelles de flux de CO_2 des différents sites. Entre les trois mois de collecte, le mois de mai se démarque par ses faibles valeurs ($3,45 \pm 8,28 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) en comparaison des mois de juin ($13,53 \pm 10,19 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) et juillet ($14,94 \pm 12,35 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) (Figure 3.1).

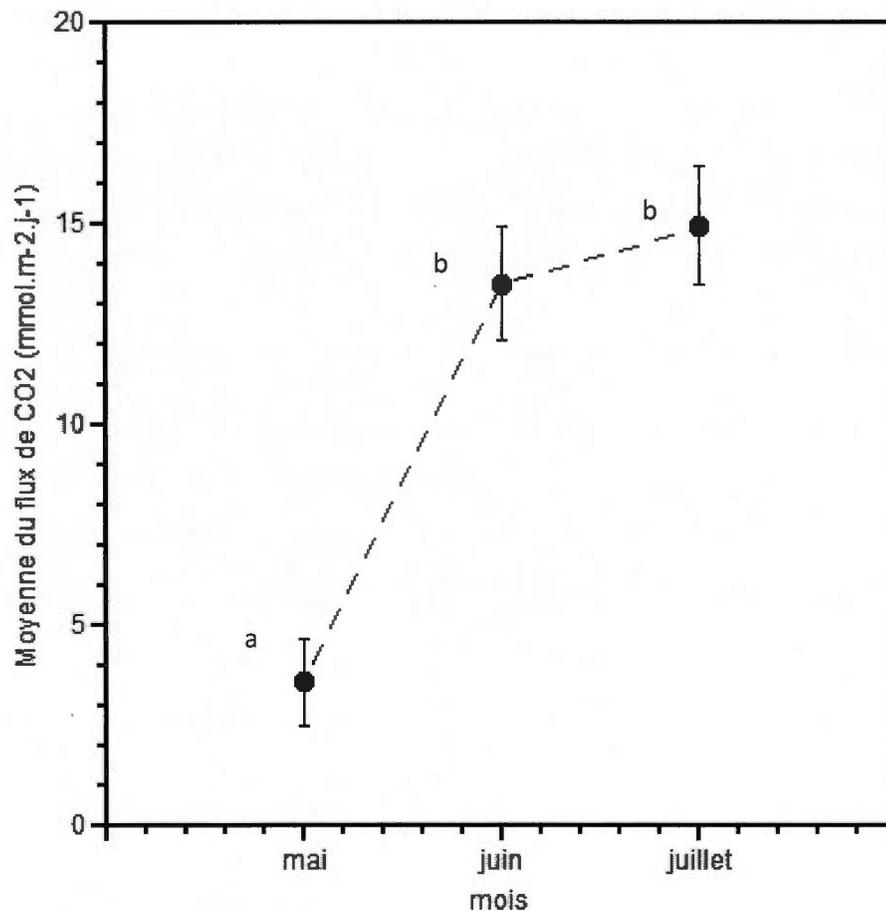


Figure 3.1 Flux de CO₂ mensuels moyennes (mmol.m⁻².j⁻¹) à la surface des sédiments des quatre sites d'échantillonnage de la mangrove de Xuan Thuy pour le mois de mai (n=61), juin (n=52) et juillet 2012 (n=70). La barre verticale représente l'erreur type. n est le nombre de mesures effectuées, à partir desquels nous avons calculé la valeur moyenne et l'erreur standard des flux de CO₂ mensuels. Les lettres "a" et "b" représentent les relations statistiques des valeurs entre elles.

3.1.3. Variations spatio-temporelles

- Évolution entre mai et juin.

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, les valeurs de flux de CO₂ durant le mois de mai sont plus faibles que les valeurs des mois de juin et juillet pour chaque site (et

également par rapport aux valeurs moyennes). Les valeurs durant le mois de mai varient entre $1,24 \pm 7,66 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ pour la parcelle à la biomasse la plus faible (B-5) et $5,32 \pm 9,04 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ pour la parcelle à biomasse moyenne inférieur (Minf-7). En juin, deux tendances se dégagent : une nette augmentation pour les sites Msup-6 et B-5 et augmentations plus modestes pour Minf-7 et H-4. Les valeurs oscillent entre $6,88 \pm 9,47 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ (Minf-7) et $20,34 \pm 6,82 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ (Msup-6) (Figure 3.2).

- Évolution entre juin et juillet.

À l'exception du site B-5, les valeurs enregistrées augmentent entre juin et juillet. Deux ensembles s'identifient en juillet, le site Msup-6 avec la plus forte valeur ($23,52 \pm 11,61 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) et les trois autres sites ayant des valeurs plus faibles (situées entre $10,19 \pm 10,57 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ et $15,30 \pm 13,39$) (Figure 3.2).

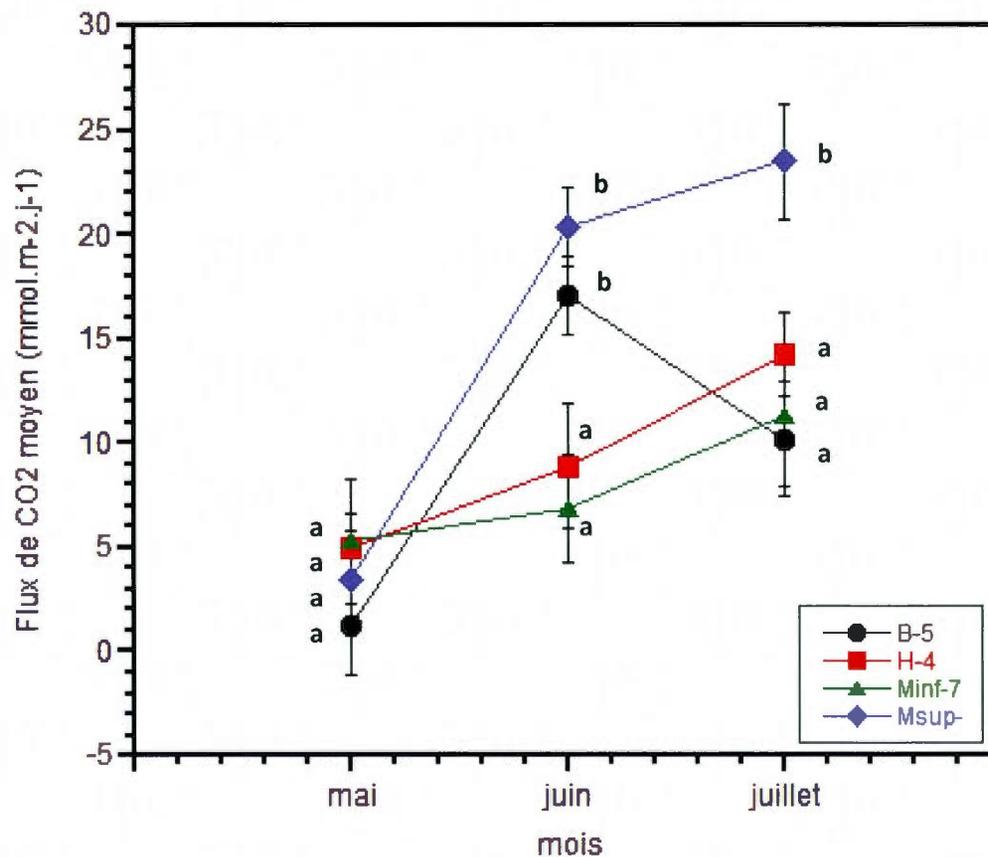


Figure 3.2 Flux de CO₂ mensuels moyens par site (mmol.m⁻².j⁻¹) à la surface des sédiments de la mangrove de Xuan Thuy pour le mois de mai, juin et juillet 2012.

La barre verticale représente l'erreur type.

Le nombre d'échantillons n utilisé est respectivement :

Pour le mois de mai : nB-5=18, nH-4= 17, nMsup-6=17, nMinf-7=9

Pour le mois de juin : nB-5=15, nH-4= 13, nMsup-6=12, nMinf-7=13

Pour le mois de juillet : nB-5=17, nH-4= 18, nMsup-6=18, nMinf-7=17

Les lettres "a" et "b" représentent les relations statistiques des valeurs entre elles.

Une analyse ANOVA à mesure répétée non balancée dans un plan divisé sur chaque colonne séparée nous permet d'étudier les différences et proximités entre les quatre sites au cours du temps par rapport à leurs valeurs ainsi que l'évolution de celle-ci au cours du temps. Au mois de mai, les valeurs des quatre sites sont similaires ($F=0,5538$). En juin, la valeur moyenne du site à biomasse la plus haute (H-4) et celle à biomasse moyenne faible (Minf-7) sont semblables, tout comme les sites à biomasse faible (B-5) et moyenne supérieure (Msup-6). Ces deux ensembles sont toutefois significativement différents entre eux (H-4 et Minf-7

versus B-5 et Msup-6) ($F=0,0059^*$).

Au mois de juillet, seul le site à biomasse moyenne supérieure (Msup-6) possède une valeur moyenne significativement différente des trois autres sites ($F=0,0010^*$). Les sites H-4 Minf-7 et B-5 possèdent des valeurs similaires entre eux et inférieures à celle de Msup-6.

Les mesures de flux de CO_2 obtenus s'avèrent être significativement différentes au cours du temps et entre les parcelles. Pour comprendre quels mécanismes peuvent influencer cette production de carbone, il convient d'analyser les variables environnementales entre elles et par rapport aux données de flux de CO_2 . Pour faciliter les analyses statistiques, les variables collectées ont été séparées en deux types :

- Les variables situées «au-dessus du sol» (climatique, tidaux, biogéomorphologique);
- les variables « du sol » (édaphiques).

3.2. Flux de CO_2 et paramètres environnementaux

3.1.1. Analyse par régression multiple

Concernant les variables climatiques, tidales et biogéomorphologiques, une analyse par régression multiple a été effectuée. Un modèle à partir de la méthode pas à pas permet d'expliquer 66,89 % des variations de flux de CO_2 à partir de trois variables (Figure 3.3) :

- Le coefficient des marées (régression inversement proportionnelle expliquant 39,91 %);
- La température maximale (régression proportionnelle expliquant 13,93 %);
- L'altitude des parcelles (régression proportionnelle expliquant 13,05 %).

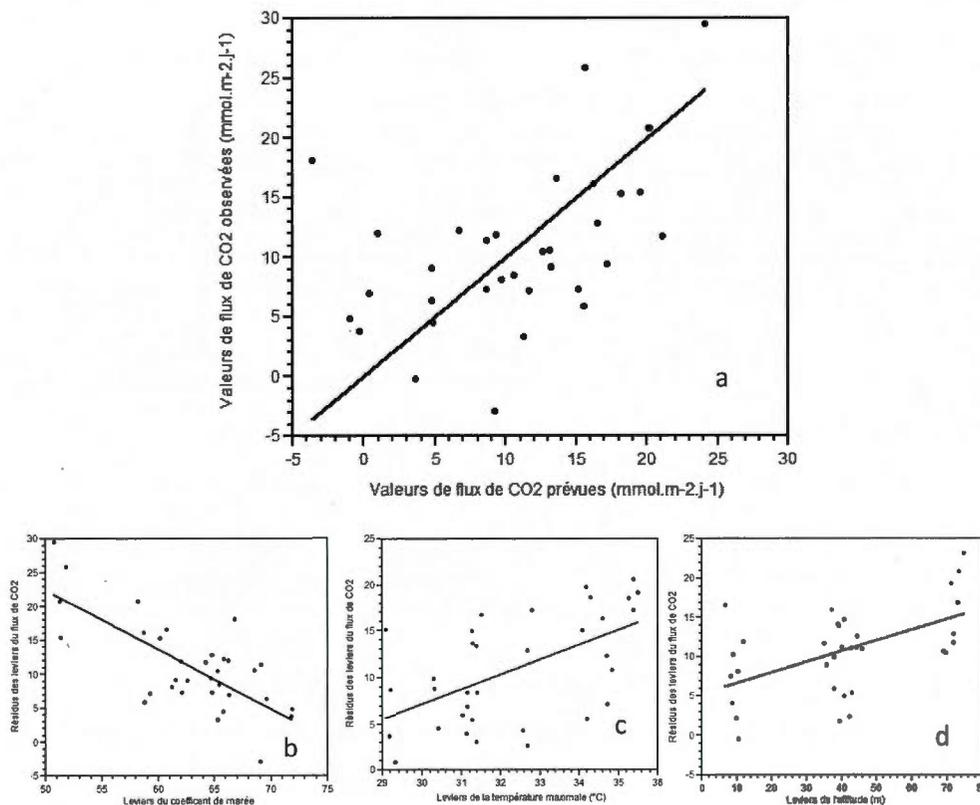


Figure 3.3 Analyse par régression multiple des variables climatiques, tidales et biogéomorphologiques par rapport aux flux de CO₂.

Le graphique **a** représente les valeurs prévues du flux de CO₂ en fonction des valeurs observées du flux de CO₂ ($r^2=66,89$ $n=34$)

Le graphique **b** représente les valeurs leviers du coefficient de marée quotidien en fonction des valeurs des résidus des leviers du flux de CO₂ ($r^2=39,91$, $P<0,0001$)

Le graphique **c** représente les valeurs leviers de la température maximale en fonction des valeurs des résidus des leviers du flux de CO₂ ($r^2=13,93$, $P=0,0009$)

Le graphique **d** représente les valeurs leviers de l'altitude de chaque site en fonction des valeurs des résidus des leviers du flux de CO₂ ($r^2=13,05$, $P=0,0017$)

Les régressions simples soumises pour chaque variable environnementale par rapport au flux de CO₂ montrent que chacune d'entre elles influence, de manière plus ou moins prononcée, la variation de flux de CO₂ (Tableau 3.2). L'humidité à 13h00, par exemple, exprime 24,05 % des variations.

Tableau 3.2

Synthèse des résultats obtenus pour chaque variable dans le test de régression multiple par rapport aux flux de CO₂

*, **et *** indiquent la signification de r² avec P<0,05, 0,01 et 0,001

	Coefficient marée	Biomasse sèche	Altitude	Couverture végétale	Densité végétale	Vent maximal	
r ²	0.3991***	0.0094	0.0908*	0.0111	0.0457	0.0495	
	U13h	Tmax	Tmin	Tmoyenne	Evap	Umin	Précipitation
r ²	0.2405**	0.2709**	0.2772**	0.3035***	0.1519*	0.1617*	0.1510*

Pourtant, lorsqu'il s'agit de l'intégrer dans un modèle de régression multiple, tel que dans cette recherche (Figure 3.3), la portée de la variable humidité à 13 h n'est plus aussi importante. Cela s'explique par le fait que différentes variables réagissent de manière similaire aux variations d'un paramètre environnemental. En d'autres termes, certaines variables étudiées évoluent de manière similaire au cours du temps puisqu'elles représentent un même paramètre environnemental. Elles ont en conséquence une influence identique sur la variation de flux de CO₂. L'analyse par régression multiple prend en compte les relations qui existent entre les variables et sélectionne dans ce cas uniquement la variable la plus influente. Pour reprendre l'exemple de l'humidité à 13h00 par exemple, il semblerait que cette variable exprime une tendance similaire à une des trois variables ayant été sélectionnée dans le modèle (Figure 3.3). Pour identifier ces relations de proximités entre les variables, nous avons dressé une matrice de corrélation par paires.

3.2.1. Matrice de corrélation par paires

Pour comprendre ces variations, et surtout les relations qui existent entre les variables, nous avons dressé deux matrices de corrélations par paires entre les différentes variables. Un premier ensemble regroupe et teste les paramètres climatiques entre eux, essentiellement obtenus depuis de la station météorologique de Van Ly. Le second rassemble les paramètres biogéomorphologiques. Ces regroupements sont basés sur les proximités théoriques des variables d'un même groupe qui seraient alors représentatives des mêmes paramètres extérieurs et donc d'un phénomène identique. En déterminant leurs relations de proximité,

nous pouvons alors expliquer pourquoi certaines variables annulent l'influence d'une ou plusieurs autres variables dans un modèle de régression multiple utilisé (Figure 3.3).

- Variables climatiques

Les huit variables climatiques (humidité à 13h00, température maximale, température minimale, température moyenne, évaporation, humidité minimale quotidienne, vitesse du vent et précipitation quotidienne) ont été soumises aux corrélations par paires, selon le test de Spearman (Annexe C). Au sein de ce groupe, des relations étroites existent entre la température (maximale, minimale, moyenne), l'humidité (minimale, à 13h00) et l'évaporation. Elles ont en effet toutes des corrélations par paires significatives entre elles. À l'inverse, les variables du vent maximum et des précipitations semblent être en marge de ce groupe. Seulement deux corrélations par paires avec les variables de ce même groupe s'observent pour chacune d'elles.

Les corrélations par paires ont également été testées pour chacune de ces variables avec le flux de CO₂. L'humidité (moyenne et enregistrée à 13h00) et la température (minimale, moyenne, maximale) expriment des corrélations significatives avec les valeurs de flux de CO₂ (Annexe C).

Cette matrice révèle deux informations essentielles : (1) l'humidité et la température semblent évoluer de manière similaire au cours du temps et (2) elles apparaissent étroitement liées aux variations de flux de CO₂.

Étant donné ces similarités et proximités, toutes les variables climatiques ne peuvent pas figurer dans le modèle de régression multiple. Elles sont révélatrices des mêmes mécanismes : l'influence du climat, en particulier la température et l'humidité, sur le flux de CO₂. La température maximale, présente dans le modèle de régression nous semble représentative du groupe « variables climatiques ».

- Variables biogéomorphologiques

Le second groupe est basé sur les considérations biogéomorphologiques rassemblant la biomasse, la couverture végétale, la densité de la végétation et l'altitude des parcelles. Les corrélations apparaissent ici moins évidentes. Mise à part la densité végétale qui fournit des

valeurs significatives, les autres variables ne sont pas reliées de façon significative entre elles (Tableau 3.3).

Tableau 3.3

Matrice de corrélation par paires en condition paramétrique à partir du test de Pearson *, **et *** indiquent la signification de r avec $P < 0,0125$, $0,0025$ et $0,00025$, déterminé à partir de la correction de Bonferonni ($k=4$)

	Teneur en biomasse totale sèche (ton/ha) de la parcelle)	Altitude (m)	Couverture végétale (%)	Densité
Teneur en biomasse totale sèche (ton/ha) de la parcelle)	1			
Altitude (m)	-0.0690	1		
Couverture végétale (%)	0.2552	-0.0409	1	
Densité	-0.4617*	0.7614***	-0.5547**	1

L'analyse de corrélation par paires nous permet d'identifier les proximités existantes entre les variables d'études et de comprendre le choix des variables sélectionné pour le modèle de régression multiple. Étant donné l'influence par rapport au flux de CO_2 et l'indépendance par rapport aux autres variables, le coefficient de la marée, la température maximale et l'altitude ont été intégrées dans ce modèle (Figure 3.3). Chacun de ces trois paramètres peut être vu comme le représentant d'un groupe de variables : le coefficient de la marée pour les paramètres tidaux, la température maximale pour les paramètres climatiques et l'altitude pour les paramètres topographiques. Cette dernière ne représente pas pour autant le groupe biogéomorphologie étant donné que l'altitude n'a pas été corrélée avec les paramètres biologiques (hormis la densité végétale) (Tableau 3.3).

Pour terminer avec l'exemple de la non-sélection de la variable humidité à 13 h, malgré son influence chiffrée à 24,05 %, il faut comprendre que la sélection de la variable température maximale annule cette dernière. En se basant sur l'analyse de corrélation par paire (Annexe C), ils représentent un ensemble identique témoignant de l'influence du climat sur le flux de CO_2 . En d'autres termes, si dans un modèle de régression on sélectionne une variable, les autres variables du même groupe ont moins, voire aucune influence dans le modèle, puisque les mécanismes de variations sont les mêmes entre les variables d'un même groupe.

3.3. Caractéristiques des sols entre les sites de Xuan Thuy

3.3.1. Profils de sol

- Analyse spatiale sur le profil du sol et l'horizon de surface

De la même manière que pour les flux de CO₂, l'analyse des paramètres édaphiques révèle des différences significatives entre les quatre sites d'études. L'analyse de variance multiple pour chaque variable édaphique relève que cinq des neuf paramètres mesurés présentent des différences significatives entre les sites (Tableau 3.4). Les analyses de variances ont été effectuées entre les quatre sites sur l'ensemble de leurs profils de sol respectifs (horizon A (0-5 cm), B (15-20 cm) et C (30-40 cm)) et sur l'horizon de surface A exclusivement.

L'analyse des variations sur une grande profondeur permet de comprendre les liens entre le sol des différentes parcelles. L'analyse de l'horizon de surface, quant à elle, facilite la mise en relation directe entre le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère et les propriétés du sol, tel que requis dans l'objectif de recherche. Les valeurs enregistrées par site et par profondeur sont représentées dans la figure en annexe (Annexe D).

Tableau 3.4

F value du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du sol sur l'ensemble du profil (horizons A (0-5cm), B (15-20cm) et C (30-40cm))

* et ** indiquent la signification de r avec $P < 0,005$ et $0,001$ ($n=12$).

Paramètres	Khi deux	Epsilon non ajusté univarié
pH	0,577	0,0006*
C	0,753	0,0022*
N	0,714	0,0109*
C/N	0,777	0,0408*
Carbone organique	0,158	0,0010*
TDS	0,304	0,7697
Conductivité	0,401	0,6712
Résistivité	0,735	0,6835
Salinité	0,403	0,7993

- Données physicochimiques.

Le pH mesure la concentration des ions hydrogène dans une solution, afin de déterminer le degré d'acidité ou d'alcalinité de celle-ci (De Vivo *et al.*, 2008). Les mesures de pH, réalisées sur les sédiments des quatre sites, expriment un pH neutre à basique, avec une moyenne totale proche de 7,35. Des différences significatives s'observent entre les sites. Au niveau de l'horizon de surface, les sites H-4 et B-5 ont des valeurs plus faibles que les sites Msup-6 et Minf-7 (respectivement $6,46 \pm 0,48$ et $6,65 \pm 0,35$ contre $7,58 \pm 0,05$ et $7,72 \pm 0,06$). À la profondeur 15-20, le site B-5 se démarque par ses faibles valeurs ($6,18 \pm 0,44$), en opposition aux trois autres sites, proches de 7,51. À la profondeur 30-40, les quatre sites ont des valeurs similaires et élevées (moyenne des 4 sites pour l'horizon D : $7,78 \pm 0,26$) (Figure 3.4).

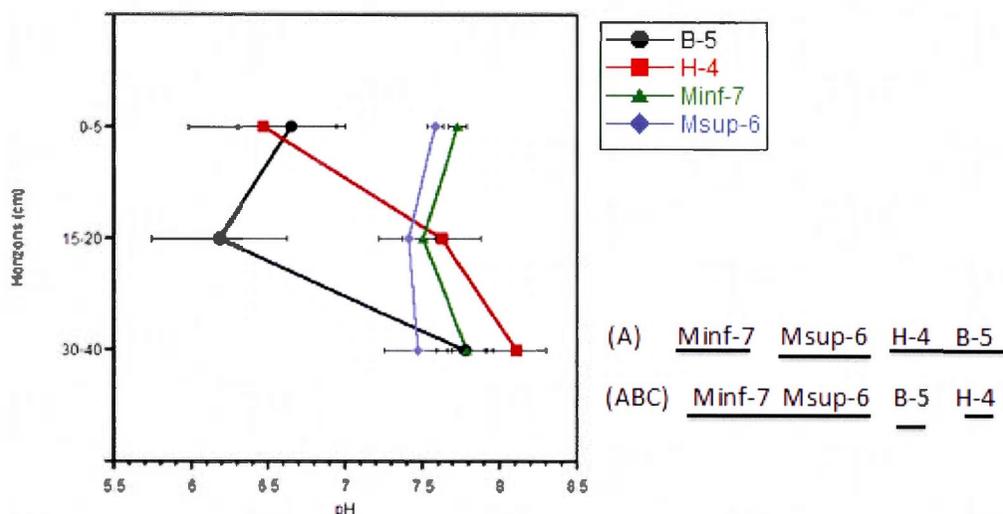


Figure 3.4 a : Profils de sols décrivant l'évolution du pH par sites et par profondeurs.
b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du pH sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

D'autres données physico-chimiques ont été mesurées. La conductivité représente la capacité d'une solution à transmettre le courant électrique. Cette variable dépend de la disponibilité et de la présence ionique d'éléments tels que le calcium, sodium, magnésium, etc. À l'inverse, la résistivité représente la capacité d'une solution à s'opposer à conduire le courant électrique. La variable des solides dissous totaux (TDS) est quant à elle similaire à la conductivité puisque comme l'indique son nom, elle quantifie la somme des solides dissous présents dans la solution. Et enfin la salinité qui exprime la teneur de NaCl en partie par trillion (ppt) (De Vivo *et al.*, 2008).

Les différences inter-sites, pour ces quatre variables décrites, ne sont pas significatives à l'échelle des profils de sols (Tableau 3.4, Figure 3.5, 3.6, 3.7 et 3.8). Au niveau de l'horizon de surface, les différences qui ressortent ciblent l'opposition entre les parcelles B-5 et Msup-6 qui se situent dans les trois profils aux extrémités. Pour les quatre paramètres, la variabilité s'amenuise à mesure que la profondeur augmente (même si à l'horizon C, Minf-7 est significativement différent pour les trois paramètres par rapport aux trois autres sites).

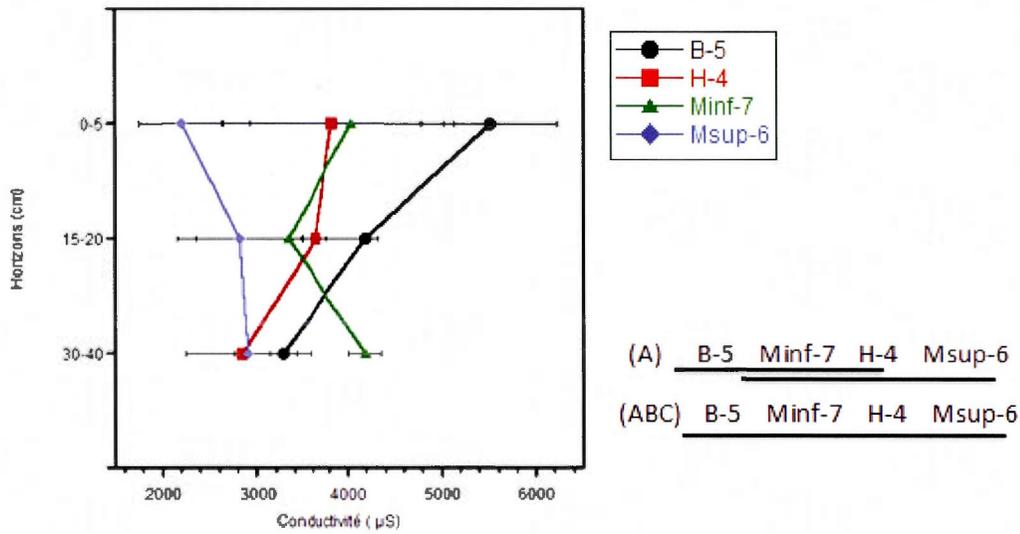


Figure 3.5 a : Profils de sols décrivant l'évolution de la conductivité (μS) par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres de la conductivité sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

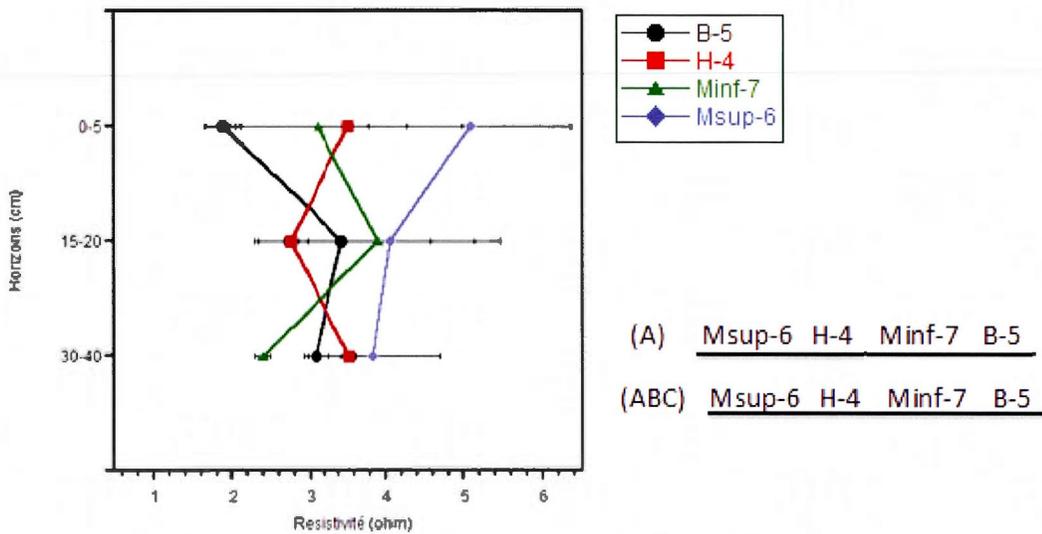


Figure 3.6 a : Profils de sols décrivant l'évolution de la résistivité (ohm) par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres de la résistivité sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

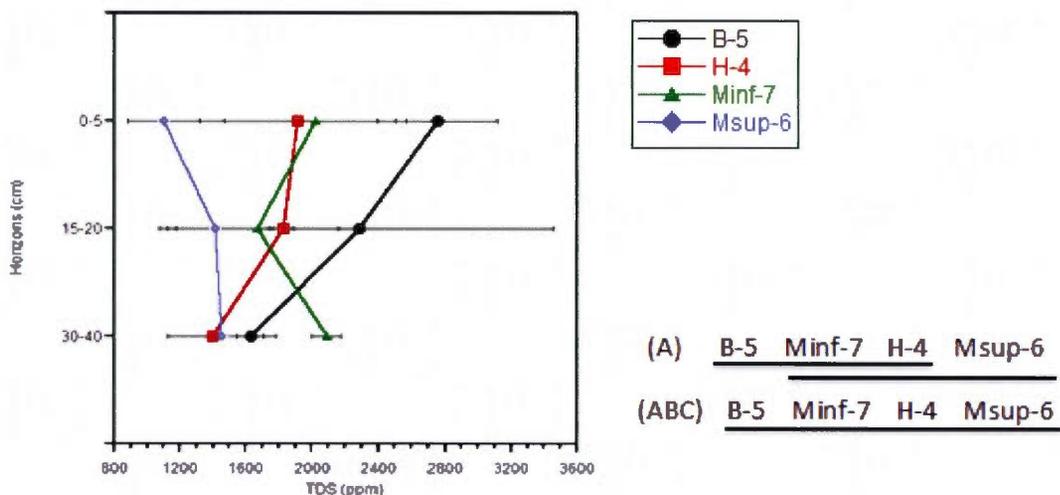


Figure 3.7 a : Profils de sols décrivant l'évolution des solides dissous totaux (TDS) (ppm) par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres de TDS sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

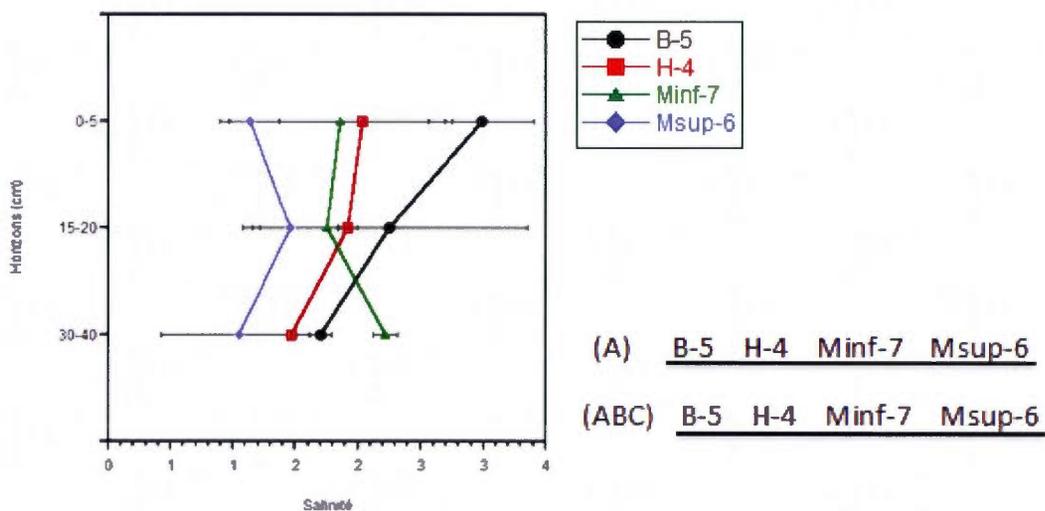


Figure 3.8 a : Profils de sols décrivant l'évolution de la salinité par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres de salinité sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

- Géochimie

La plus faible teneur en carbone organique total (TOC) dans l'horizon de surface se retrouve dans le site Msup-6 ($9,88 \pm 0,08$ %), similaire aux valeurs du site Minf-7 ($10,74 \pm 0,26$ %). À l'inverse, les sites H-4 et B-5 ont les valeurs les plus hautes (respectivement $13,20 \pm 0,42$ % et

12,35±0,52 %) et significativement différentes des sites Msup-6 et Minf-7 ($F < 0,0058^*$). Vers les horizons profonds, l'ensemble des valeurs diminue, pour tous les sites (à l'exception de l'horizon B du site Msup-6). Paradoxalement, les sites qui enregistrent les plus fortes concentrations en TOC en surface (B-5 et H-4) sont aussi ceux qui enregistrent les plus faibles en profondeur (Figure 3.9).

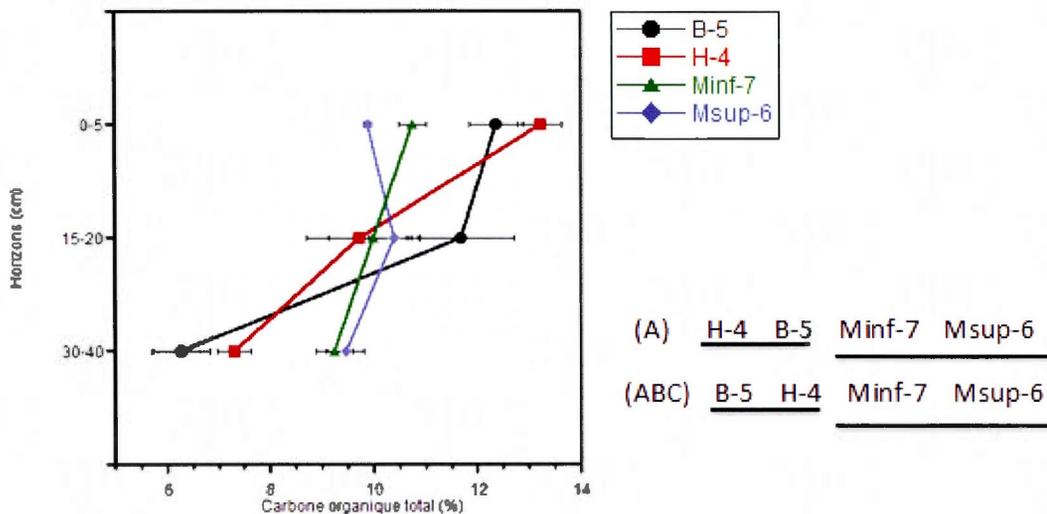


Figure 3.9 a : Profils de sols décrivant l'évolution du carbone organique total (TOC) par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du TOC sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

Les analyses de teneurs en carbone (C) des différents horizons dans chaque site concordent avec l'analyse du TOC : diminuant vers les profondeurs (de même que l'anomalie de l'horizon B-5 du site Msup-6) (Figure 3.10). La proximité des valeurs entre les sites Msup-6 et Minf-7 demeure étroite ($F=0,4457$). En revanche, les valeurs entre le site H-4 et B-5 sont, pour le carbone, significativement différentes entre elles ($F=0,0268^*$).

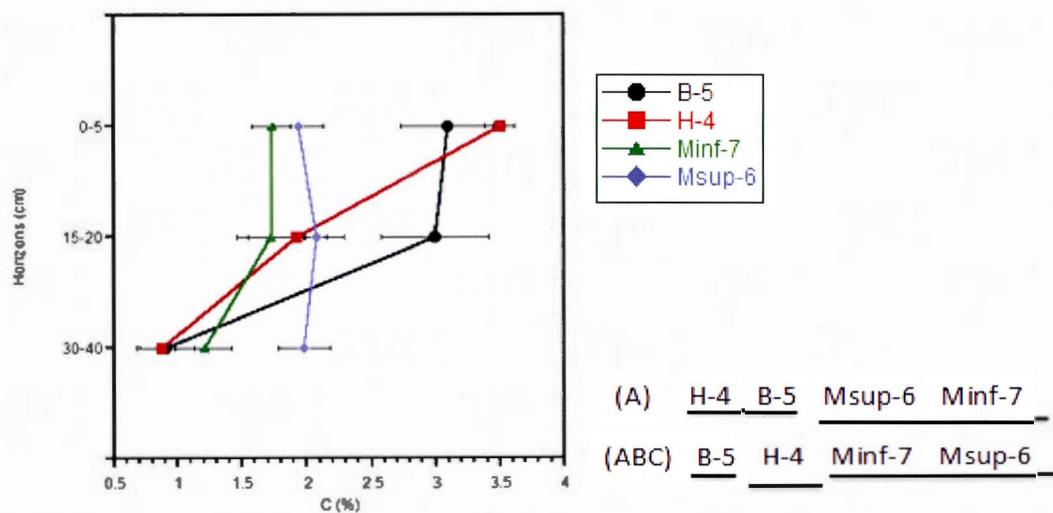


Figure 3.10 a : Profils de sols décrivant l'évolution du carbone total (C) (%) par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du C sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

Les analyses de teneurs en azote (N) sont similaires aux tendances précédentes (Figure 3.11).

Les regroupements par site sont identiques à ceux du carbone (B-5> H-4> Msup-6= Minf-7).

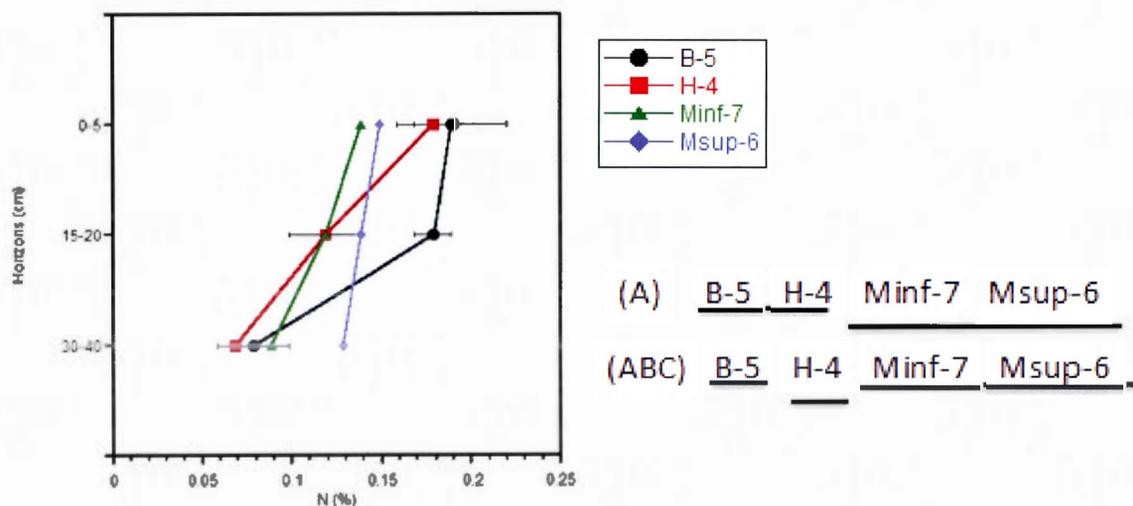


Figure 3.11 a : Profils de sols décrivant l'évolution du carbone l'azote total (N) (%) par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du N sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

Le rapport C/N permet de déterminer la capacité de dégradation de la matière organique du sol ainsi que son origine (terrestre ou marine) (Kristensen, 2007). Le ratio C/N le plus élevé pour l'horizon de surface se retrouve dans le site H-4 ($19,20 \pm 1,64$) tandis que le site Minf-7 possède les valeurs les plus faibles ($12,53 \pm 0,86$) (Figure 3.12). Bien que les résultats donnent des valeurs dissemblables, ils ne permettent pas d'établir des différences significatives entre les horizons A des quatre différents sites. En revanche, en considérant les horizons de profondeurs (B et C) les sites présentent des différences significatives ($H-4=B-5 > B-5=Minf-7 > Minf-7=Maup-6$, $F=0,0408^*$).

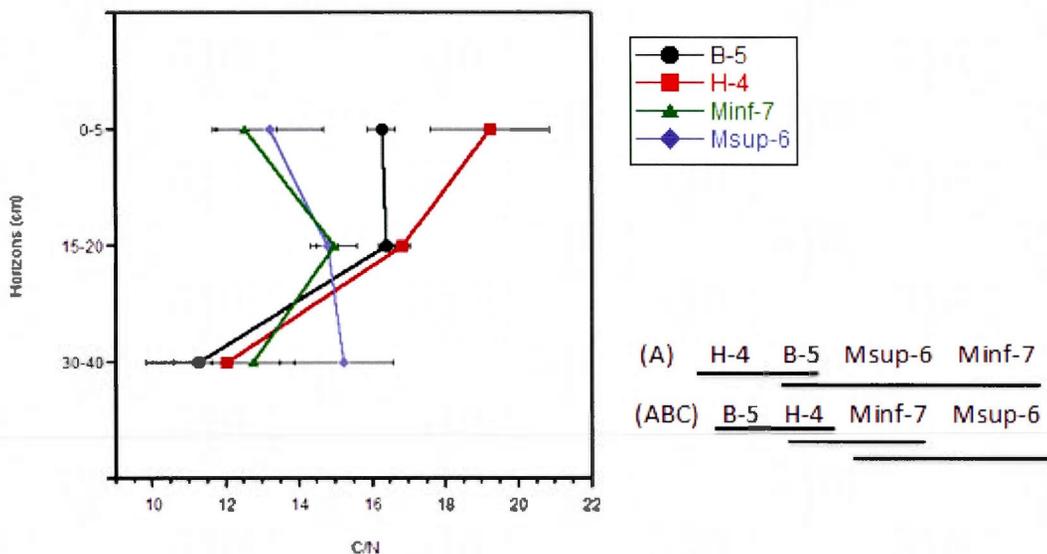


Figure 3.12 a : Profils de sols décrivant l'évolution du carbone le rapport C/N par sites et par profondeurs.

b : résultat du test ANOVA montrant les effets des sites d'échantillonnages sur les paramètres du rapport C/N sur l'horizon A et sur l'ensemble du profil (horizons A, B et C)

Une hiérarchisation des sites peut s'effectuer en fonction des sommes de différences significatives qui existent entre les différentes parcelles. À partir du test d'analyse de variance multiple, nous observons une proximité entre les sites Minf-7 et Msup-6 puisqu'aucune des neuf variables d'étude ne possède de différence significative entre ces deux sites. Cela s'observe aussi dans l'analyse de variance axée sur l'horizon de surface ou seulement une variable sur neuf exprime une différence significative (pH) entre les sites Minf-7 et Msup-6. Une autre relation de proximité s'observe entre le site B-5 et H-4. Celle-ci ne s'observe essentiellement au niveau de l'horizon de surface ou aucun des neuf paramètres n'exprime de

différences significatives entre ces deux sites.

Entre les autres sites, aucun lien n'est établi et les plus grandes différences de valeurs s'observent entre les sites Msup-6 et B-5.

3.3.2. Propriétés édaphiques et flux de CO₂

Seules trois carottes de sol ont été prélevées pour chaque parcelle, toutes réalisées au mois de juin. À l'inverse des mesures de flux de CO₂, aucun suivi temporel ne peut être effectué sur les paramètres édaphiques. Le nombre restreint de prélèvements limite également la puissance des valeurs pour effectuer des tests statistiques rigoureux. Les quelques données obtenues permettent toutefois de discuter de relations potentielles pouvant exister entre le flux de CO₂ et les propriétés édaphiques entre les parcelles.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1. Flux de CO₂ à l'interface sédiment-air

4.1.1. Flux de CO₂ à Xuan Thuy et sur le globe

Étendues sur trois mois consécutifs en saison humide estivale (mai à juillet 2012), les valeurs mensuelles moyennes obtenues dans la mangrove de Xuan Thuy (20.233107N, 106.570276E) varient entre $3,45 \pm 8,28$ et $14,94 \pm 12,3$ mmol.m⁻².j⁻¹. Ces valeurs sont comparables, mais inférieures aux données recueillies dans la mangrove de Can Gio, au sud du Vietnam (10.520219N, 106.864593E), variant entre 7,909 et 49,636 mmol.m⁻².j⁻¹ (Thuyen, 2012). Le point commun entre ces deux études résulte dans l'utilisation de méthodes de mesures identiques, en chambre statique close.

D'autres études ont évalué le flux de CO₂ dans quatre mangroves de la région de Hong Kong (Chen *et al.*, 2010 ; Chen *et al.*, 2012). Ces recherches présentent des similarités méthodologiques (mesure en chambre statique close), temporelles (échantillonnage en été), géographiques (les sites sont tous situés entre les latitudes 22,30N et 22,40N), climatiques (semi-tropical) et biologiques (domination de l'espèce *Bruguiera gymnorrhiza*) avec la présente étude. Dans ces mangroves du sud de la Chine, les valeurs oscillent entre 5,782 et 749,455 mmol.m⁻².j⁻¹.

Dans une vision plus globale, les revues d'articles recensent des flux de CO₂ à travers les mangroves du monde allant de 2 à 373 mmol.m⁻².j⁻¹ (Alongi, 2009 ; Bouillon *et al.*, 2008a ; Kristensen, 2007 ; Kristensen *et al.*, 2008 ; Lovelock, 2008 ; Luo et Zhou, 2006).

4.1.2. Raisons des variations de valeurs

Les données moyennes recueillies dans la présente étude, mais aussi à travers la littérature témoignent d'une certaine variabilité. Cela peut s'expliquer par deux considérations majeures : la large étendue spatiale du milieu et les limites méthodologiques de mesure.

- L'étendue de surface de répartition de l'écosystème

Situées majoritairement à l'intérieur de la bande intertropicale (Giri *et al.*, 2011), les mangroves possèdent 73 espèces végétales différentes qui se sont adaptées de diverses manières aux conditions climatiques, physico-chimiques et géomorphologiques impactant les bandes côtières de basses latitudes (Spalding *et al.*, 2010). La productivité biologique du milieu dépend aussi de ces paramètres. La large étendue territoriale et la diversité biologique permettent d'expliquer qu'à l'échelle globale les valeurs diffèrent entre les sites. La comparaison de la présente étude avec celle effectuée au sud du Vietnam (Thuyen, 2012) va dans ce sens. La mangrove de Can Gio, plus proche de l'équateur, possède des conditions favorisant le développement et la productivité des mangroves (Alongi, 2009).

Concernant la comparaison des résultats entre la recherche effectuée à Xuan Thuy et celle à Can Gio, la méthode d'analyse ne peut être mise en cause pour discuter des variations de valeurs. C'est en effet la même méthode qui a été utilisée pour les deux études. En revanche, il est important de considérer les variations méthodologiques lors des comparaisons de données à grandes échelles.

- Le défi de la quantification du flux de CO₂ dans les mangroves

La quantification de la respiration du sol, dans tout environnement et en particulier dans les forêts de mangroves, est un défi méthodologique et logistique (Bekku *et al.*, 1997). Différentes méthodes existent, possédant chacune leur lot d'avantages et d'inconvénients. Le but est de limiter l'impact et le dérangement des sites lors de l'installation des équipements et de l'échantillonnage. Le choix souvent privilégié est l'implantation de chambres statiques, tel que dans la présente étude. Selon les moyens et les considérations de chaque scientifique, la méthode en chambre ouverte dynamique, en chambre fermée dynamique ou en chambre statique close est sélectionnée (Luo et Zhou, 2006). La principale critique de ces méthodes

provient des probables sous-estimations des valeurs de CO₂ mesurées. Certains paramètres essentiels ne seraient en effet pas pris en compte dans la mesure en chambre, tels que la non-intégration de la respiration des racines aériennes, de l'activité et respiration de la faune et également du biais lié aux variations de pressions entre l'intérieur de la chambre et le milieu ouvert. Ces négligences entraîneraient une sous-estimation des valeurs allant de 6 % à 35 % par rapport à la réalité (Luo et Zhou, 2006 ; Norman *et al.*, 1997 ; Pumpanen *et al.*, 2004). D'autres méthodes indirectes permettent de quantifier le flux de CO₂. La méthode des gaz parfaits le long du gradient du sol, ou bien l'estimation de l'échange écosystémique net (NEE) à partir de mesures micro météorologique d'Eddy covariance (Luo et Zhou, 2006).

Un nombre conséquent de méthodes et d'outils quantifient le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère. Aucune méthode ne fait toutefois l'unanimité et la diversité de mesures entraîne diverses approximations limitant la précision des résultats et la validité des comparaisons entre les études. La grande variabilité des valeurs qui existent lors du recensement des études à travers le monde, mais aussi entre les répliquas de l'étude effectuée illustre les limites méthodologiques qui existent sur le sujet. À plus large échelle, c'est l'estimation globale qui en est affectée (Bouillon *et al.*, 2008a). Le moyen de parvenir à surmonter cette limite est d'améliorer les méthodes de mesures et d'accroître le nombre d'études sur le sujet.

4.2. Flux de CO₂ et influence des paramètres biologiques et environnementaux

En ce qui concerne les valeurs moyennes mensuelles, les données recueillies dans la présente étude figurent en deçà des valeurs moyennes de l'écosystème mangrove. Cela s'expliquerait par la sous-estimation qu'engendre la méthode choisie (en chambre statique close) et également par la position septentrionale du site de Xuan Thuy, pour une forêt de mangroves. La végétation de faible hauteur témoigne d'une productivité relativement faible, directement liée aux conditions climatiques. À partir de ce postulat, et même si cela est difficilement démontrable par une analyse inter-sites, l'activité microbienne y est elle aussi limitée.

4.2.1. Flux de CO₂ et biomasse des parcelles

Au sein même de la mangrove de Xuan Thuy, la variation des valeurs est significative entre les parcelles. Toutefois, la majorité des variations dans cette étude s'observe entre les répliquas d'une même parcelle (40,01 %) et entre les différents mois d'analyses (35,9 %) (Tableau 3.1). Entre les parcelles d'étude, c'est-à-dire entre les sites possédant des biomasses significativement différentes, c'est seulement 9 % des variations qui peuvent être expliqués. Le choix initial des sites d'échantillonnage, pourtant basé sur leurs différences de biomasse, ne permet donc pas d'établir de liens statistiques entre la biomasse des parcelles et le flux de CO₂ émis depuis les sédiments de ces sites. D'autres paramètres inter-site explicatifs sont à considérer pour comprendre les variations de flux de CO₂ entre les sites.

4.2.2. Flux de CO₂ et paramètres environnementaux

L'étude révèle que le site à biomasse moyenne élevée (Msup-6) a des valeurs significativement différentes des autres parcelles (Figure 3.2). L'altitude du site Msup-6 est une autre différence que celui-ci possède par rapport aux trois autres sites. Située à 7,2 m au-dessus du niveau moyen de la mer, cette parcelle se révèle être la plus élevée des quatre et donc la moins affectée par l'action de la marée (Tableau 2.1).

Cette distance élevée réduit le temps et la hauteur d'occupation de la colonne d'eau à la surface du sol. L'émission de CO₂ est supérieure lorsque le sol est directement exposé à l'atmosphère plutôt que lorsque celui-ci est inondé (Chen *et al.*, 2010 ; Jassal *et al.*, 2005). Basée sur plusieurs études réparties sur 62 différentes mangroves, Alongi (2009) situe la valeur moyenne globale de flux de CO₂ à 68,96 mmol.m⁻².j⁻¹ pour les sols exposés directement à l'atmosphère contre 49,32 mmol.m⁻².j⁻¹ pour les sols inondés. Ces observations vont dans le même sens que notre étude : la présence d'eau à l'interface sédiment-atmosphère limite le flux de CO₂.

Dans le site Msup-4, la marée n'a pas atteint le site au cours de la période d'échantillonnage du mois de juillet. Cela s'explique par l'élévation supérieure du site Msup-4 ainsi que par le

faible coefficient de marée à cette période³. Le flux de CO₂ moyen pour cette période (23,5±11,613 mmol.m⁻².j⁻¹) se révèle être le plus élevé de toutes les campagnes de terrain et celui se démarquant le plus de toutes les autres mesures (Figure 3.2).

- Flux de CO₂ et influence tidale

L'analyse par régression multiple indique que 39,91 % des variations de flux de CO₂ mesurés s'expliqueraient par les fluctuations du coefficient de la marée, ce qui en fait la variable environnementale la plus influente. La variation de la marée agirait de trois manières distinctes sur l'émission de CO₂.

Premièrement, l'émission de CO₂ supérieure en zone non inondée serait liée à la capacité de diffusion moléculaire plus rapide sous forme gazeuse que liquide au cours des réactions d'oxydation et de respiration aérobie (Chen *et al.*, 2010). Les pores à la surface des sédiments constituent les zones principales d'échanges gazeux. En période d'inondation, les vacuoles sont remplies par l'eau, limitant ainsi l'émission de CO₂ vers l'atmosphère (Jassal *et al.*, 2005). Toutefois, une fois l'apport hydrique stoppé (arrêt des précipitations ou recul de la marée), le flux de CO₂ devient à ce moment et pour une certaine période supérieur à ce qu'il était avant le déferlement hydrique. Cette émission accrue de CO₂ est liée à la stimulation biologique (Maier *et al.*, 2011). Ce pourrait être ce phénomène qui a été observé dans le site Mup-6 durant le mois de juillet.

Deuxièmement, la présence d'une colonne d'eau aurait comme effet direct d'atténuer les variations de température (Alongi, 2009). L'influence de la température est reconnue comme une variable d'influence majeure dans le flux de CO₂ dans tous les environnements et également dans les mangroves (Lovelock, 2008). La présence d'une pellicule d'eau à l'interface sédiment-atmosphère minimise les fluctuations des températures atmosphériques.

Troisièmement, le passage de la marée permet de fournir les milieux côtiers en matériel allochtone. Cette matière organique et inorganique représente un apport nutritif essentiel pour la chaîne trophique de l'écosystème (Kristensen *et al.*, 2008). La décomposition de la litière de la mangrove, mais également du matériel organique allochtone constitue le carbone qui est réémis vers l'atmosphère par l'activité bactérienne (Bouillon *et al.*, 2008b). La non-irruption

³ Le coefficient de marée moyen pour juillet était de 58,3 en juillet contre 67,5 en mai et 64,2 en juin pour les journées d'échantillonnages.

de la marée sur une longue durée limiterait l'apport de MO fraîche allochtone décomposable et donc le flux de CO₂. Toutefois, sur quelques jours, tels que cela est le cas pour le site Msup-6, il semblerait que l'absence de la marée ne limite pas la disponibilité de MO nécessaire à l'émission de CO₂, mais favorise au contraire cette réaction biogéochimique.

- Flux de CO₂ et température atmosphérique

De nombreuses études ont montré le lien entre la respiration microbienne du sol et la température (Lloyd et Taylor, 1994 ; Raich et Schlesinger, 1992 ; Schlesinger et Andrews, 2000). Ce facteur climatique est, pour certains, reconnu comme étant le plus influant sur la production de CO₂ à la surface du sol (Kang *et al.*, 2003). Dans l'écosystème mangrove la relation entre la variation de température et de flux de CO₂ semble moins étroite que dans les sols des forêts terrestres (Lovelock, 2008). L'environnement dynamique et les facteurs environnementaux multiples atténuent son influence au profit d'autres paramètres (tels que les variations de la marée ou encore la distance de la côte). Les résultats de l'étude effectuée dans la mangrove de Xuan Thuy et l'analyse par corrélation multiple expriment cette relation, vérifiée, mais non exclusive, entre la température atmosphérique et les variations de CO₂. La température moyenne enregistrée en mai (29,7 °C) est en effet plus faible que les températures moyennes des mois de juin (35,9 °C) et juillet (33,6 °C). Le flux de CO₂ mensuel moyen suit cette tendance (Figure 3.1).

- Flux de CO₂ et altitude des sites

La troisième variable environnementale d'influence est l'altitude des sites, qui explique 13,05 % des variations. Les études décrivant le gradient de l'écosystème mangrove font le même constat : les sites les plus éloignés de l'océan (du fait de leur distance, horizontale ou verticale) sont souvent les plus actifs en terme d'émission de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère (Chen *et al.*, 2012 ; Leopold *et al.*, 2013)

Les mesures quotidiennes continues étalées sur trois mois consécutifs ont permis l'évaluation du flux de CO₂ durant différentes phases du cycle d'inondation tidal (variations quotidiennes, mais également cycliques). Cette variable environnementale semble influencer de manière significative le flux de CO₂. Les différences d'altitudes entre les sites et notamment la situation de la parcelle Msup-6 par rapport aux trois autres, permettent de mettre ce principe

en évidence. Le site, situé à 7,6 m d'altitude, possède des valeurs de flux de CO₂ supérieures et significativement différentes durant la période de juin et surtout de juillet (période durant laquelle la marée n'a pas atteint le site). L'absence d'eau à la surface du sol, après une période d'inondation prolongée, y aurait favorisé la production de CO₂.

- Flux de CO₂ et autres paramètres climatiques

L'analyse de corrélation multiple se contente de sélectionner trois variables pour expliquer 66,89 % des variations de flux de CO₂. Comme vu précédemment, les variables climatiques peuvent être rassemblées en un groupe interdépendant. La température maximale représente ce groupe dans le modèle, mais induit l'influence de variables représentatives telles que l'humidité ainsi que l'évaporation dans les fluctuations de CO₂ vers l'atmosphère. Dans cet ensemble de variables climatiques, la vitesse du vent maximum et les précipitations ne semblent toutefois pas être aussi influentes que les autres paramètres.

Le vent est pourtant reconnu dans la littérature comme une variable influente par rapport aux variations de flux de CO₂ (Luo et Zhou, 2006). Malgré cela, il n'a pas pu être corrélé dans la présente étude. Trois raisons peuvent expliquer cette absence de relation. Premièrement, les vitesses de vent enregistrées varient très peu entre les jours de mesures, avec une valeur moyenne de $8,22 \pm 2,23 \text{ m.s}^{-1}$. Deuxièmement, ces mesures représentent la vitesse du vent maximal, donc une valeur ponctuelle. Or les données récoltées concernant le flux de CO₂ correspondent à une incubation de 24 h. L'échelle de temps entre les deux paramètres est trop importante pour obtenir une relation statistique entre les données. Troisièmement, l'une des limites des mesures en chambre statique close est de ne pas tenir compte des différences de pressions dans la zone de mesures (Luo et Zhou, 2006). La non-corrélation entre le vent mesuré et le flux de CO₂ peut témoigner d'une limite méthodologique double, le choix de mesure, en chambre close, et du type d'information choisi concernant la variable « vent ».

4.3. Flux de CO₂ et propriétés édaphiques

La production de CO₂ depuis les sols des mangroves est essentiellement liée à l'activité microbiologique. Leur action est contrôlée par différentes variables biologiques, chimiques et physiques du milieu, qui interagissent entre elles (Alongi, 2009). Un certain nombre de ces paramètres édaphiques ont été quantifiés dans la présente étude : pH, salinité, conductivité, résistivité, TDS, carbone total, azote total, C/N, carbone organique total.

4.3.1. Caractéristiques des sols des mangroves de Xuan Thuy

Malgré une proximité de valeurs entre certains sites, les analyses révèlent une grande diversité de valeurs à l'intérieur même de la mangrove de Xuan Thuy. Les environnements intertidaux, tels que les mangroves, sont influencés par de multiples forces. La végétation du milieu et ses racines, l'activité microbienne, l'influence de la marée et des rivières, la géomorphologie ou encore le climat sont autant de facteurs qui influencent directement le sol et ses propriétés, à échelle globale comme locale (Kristensen, 2007 ; McKee, 1993). Pour le site de Xuan Thuy, la large variabilité des valeurs s'observe surtout sur l'horizon de surface, en comparaison avec les horizons plus profonds. Cette dualité des valeurs s'explique par le fait que l'horizon de surface des mangroves est généralement bien différent de l'ensemble du profil, car il est oxydé et interagit avec les milieux marins, terrestres et l'atmosphère. Tandis qu'au-dessous, le sol est totalement ou partiellement anoxique.

- pH

Le pH du sol enregistré à Xuan Thuy est neutre à basique. Cette valeur s'intègre dans la moyenne des pH des mangroves à l'échelle mondiale situés entre 5,8 et 8,5 (Alongi, 2009). Le pH est contrôlé par plusieurs facteurs tels que la composition organique et inorganique des sols, la teneur en eau, la hauteur de la marée, la taille des sédiments, l'activité microbienne et encore l'influence anthropique environnante (Alongi, 2009). Le pH est aussi un indicateur du processus d'oxydation sulfatée, souvent élevé dans les sols acides en surface (Marchand *et al.*, 2003). Si l'on se réfère aux valeurs obtenues, l'oxydation sulfatée serait donc plus importante dans les sites B-5 et H-4, mais relativement faible par rapport à d'autres mangroves du globe.

- Carbone total et azote total

Les autres variables exprimant une différence significative au sein des sites sont les paramètres de carbone et d'azote. Dans un premier temps, il est important de noter que la proximité des valeurs obtenues entre le carbone total et le carbone organique total, déterminé par des méthodes différentes, témoignent de la validité des mesures et des manipulations. Ensuite, la tendance que des données recueillies entre les sites et le long des profils est à considérer. Les valeurs de surface représentent la matière organique fraîche issue de la litière de la mangrove et des apports allochtones. À l'exception du site H-4, l'horizon B (15-20 cm) possède pour les trois autres parcelles de valeurs similaires à celles enregistrées en surface. Cette tendance s'observe également dans l'étude de Marchand (2003), qui explique cela par la présence de racines et des débris ligno-celluliques en profondeur. Les racines semblent être présentes en concentration plus faible à l'horizon C (30-40cm).

- C/N

Le rapport C/N, qui suit la même tendance que les teneurs de TC, TN et TOC, a des valeurs similaires aux études relevées (Bouillon *et al.*, 2006 ; Kristensen *et al.*, 2008 ; Santos *et al.*, 2013). À la surface des sédiments, le rapport peut permettre de déterminer la source de la matière organique présente. La MO d'origine terrestre (provenant essentiellement de la litière de la mangrove) se situe aux environs du rapport C/N situé entre 25 et 50, tandis que la MO d'origine tidale se chiffre entre 6 et 12 (Bouillon *et al.*, 2003 ; Kristensen *et al.*, 2008 ; Saito, *et al.*, 1989 ; Santos *et al.*, 2013). Entre les deux valeurs, c'est un mélange des deux sources qui est présent, comme cela est souvent le cas pour les mangroves, avec une influence plus ou moins prononcée pour une source plutôt qu'une autre. Dans notre cas, les sites Minf-7 et Msup-6 ont une composition de carbone organique concentrant plus de MO d'origine marine que les sites B-5 et H-4.

La majorité des variables mesurées et même celles ne montrant pas de différences significatives entre les sites (tels que la conductivité, résistivité et TDS) ont mis en avant les rapprochements qui existent entre les valeurs des sites B-5 et H-4 et entre les valeurs des sites Msup-6 et Minf-7. Cette proximité, par rapport aux données que nous possédons, semble avant tout s'expliquer par la proximité géographique entre les sites.

4.3.2. Relations entre les propriétés édaphiques et le flux de CO₂

C'est au niveau de la surface du sol que les transformations physico-chimiques s'effectuent, entraînant la décomposition de la matière organique et l'émission de CO₂ vers l'atmosphère. Les propriétés édaphiques ainsi que l'influence de forces extérieures (marées, évènements climatiques extrêmes, pollutions) sur le site ont une influence sur cette productivité (Kristensen, 2007 ; Leopold *et al.*, 2013). Les mesures effectuées dans la présente étude n'établissent pas de relations directes entre les propriétés édaphiques et le flux de CO₂. La grande variabilité des valeurs et la faible quantité de données recueillies restreignent la puissance des analyses statistiques. Cette limite met toutefois en avant une autre réalité : la forte hétérogénéité des sols de mangroves au sein du site de Xuan Thuy.

Le long d'une journée comme au cours des saisons, au sein d'une même mangrove comme à l'échelle du globe, il existe un éventail de paramètres pouvant influencer la productivité et le flux de CO₂. Cette grande diversité limite la compréhension des mécanismes affectant le flux de CO₂ et rend impossible la généralisation des observations à l'échelle globale (Kristensen, 2007). Les propriétés et mécanismes édaphiques dans les mangroves sont si particuliers que même la dénomination du substrat des mangroves est discutée. Certains chercheurs le qualifient de « sol » quand d'autres le nomment « sédiment » (Ferreira *et al.*, 2007).

CHAPITRE V

CONCLUSION GÉNÉRALE

5.1. Synthèse des résultats de l'étude

Ce projet de recherche avait pour objectif de quantifier le flux de CO₂ à l'interface sédiment-atmosphère dans la mangrove de Xuan Thuy et de déterminer le degré d'influence de différents paramètres environnementaux sur les variations spatio-temporelles des flux de CO₂.

Un des objectifs était de parvenir à exprimer la relation directe existant entre la biomasse d'une parcelle et son flux de CO₂ vers l'atmosphère. Une telle relation aurait permis de quantifier plus facilement le budget du carbone à large échelle, à partir de données satellitaires et d'extrapolations. Malgré une sélection de sites d'études représentatifs de la diversité de biomasse existant au sein de la mangrove de Xuan Thuy, les valeurs de flux de CO₂ enregistrés entre mai et juillet 2012 n'ont pas permis d'exprimer de relation directe entre la biomasse et le flux de CO₂.

Plutôt que les paramètres biologiques, tels que la biomasse, notre étude suggère que le flux de CO₂ à l'interface sédiment – océan dans les mangroves est essentiellement influencé par :

- la position du site dans la zone intertidale;
- les variations saisonnières de la marée et du climat.

En effet, les zones les moins affectées par l'action de la marée, du fait de leurs altitudes supérieures, se sont révélées être les plus émettrices de CO₂. La diffusion du gaz est facilitée en l'absence d'eau à l'interface sédiment-atmosphère. Enfin, au cours des trois mois d'échantillonnages, deux variables ont influencé significativement le flux de CO₂ pour un même site : le coefficient de la marée et la température atmosphérique. Au même titre que la distance du site dans la zone intertidale, une plus faible influence tidale, au cours du cycle

lunaire, augmente le flux de CO₂. La température et l'humidité, plus élevées, favorisent elles aussi cette émission, en stimulant l'activité microbienne hétérotrophe.

5.2. Limites de l'étude

Tout au long du projet, un certain nombre de défis ont dû être surmontés, tant logistiques que méthodologiques. Des collaborations opportunistes et des compromis ont dû être mis en place pour faire face aux imprévus rencontrés. Les premières semaines de terrain, consacrées exclusivement à la recherche d'un laboratoire et à l'acquisition d'équipements de base, en témoignent. La réalisation d'une campagne d'échantillonnage, en effectif limité, dans une période de temps limitée et dans une région aussi reculée que le parc national de Xuan Thuy a entraîné son lot de complications (vol d'équipement, réorganisation perpétuelle de la feuille de route, transport et conservation des échantillons). C'est dans ce contexte que le soutien et l'aide du groupe ICARGC ont été primordiaux. C'est en effet à travers leur assistance que la mise en place d'un laboratoire, une formation sur la méthode et l'acquisition des équipements ont pu être facilités.

La méthode sélectionnée, en chambre statique close, a été choisie en fonction de sa facilité de reproductibilité et du soutien méthodologique disponible fourni par Thuyen. Cette méthode, comme la majorité des analyses de flux gazeux en chambre ne prend pas en considération les influences de turbulence de l'air ou des rafales de vent, pourtant déterminantes dans les variations de flux de CO₂ en surface (Luo et Zhou, 2006). Des variations de pression entre l'intérieur de la chambre et le milieu naturel sont une autre limite de la méthode sélectionnée, mais qui s'observe toutefois dans d'autres méthodes (Davidson *et al.*, 2002).

Les données météorologiques ont essentiellement été obtenues à partir de la station météo de Van Ly. Avec plus de moyens, des stations auraient pu être disposées dans chaque parcelle pour quantifier les observations inter-sites et identifier des éventuelles corrélations avec les valeurs de flux de CO₂.

Enfin, concernant les variables édaphiques et au vu de la grande variabilité des valeurs obtenues, la collecte d'échantillons aurait dû être effectuée au cours de chaque période de terrain (mai, juin et juillet) afin d'observer les variations temporelles pour chaque site et

notamment sur l'horizon de surface de ce milieu dynamique et changeant. Plutôt que des duplicatas, ce sont des triplicatas qui auraient dû être prélevés pour chaque sous-parcelle. Ainsi, des analyses statistiques auraient pu être plus facilement applicables entre les sites et par rapport aux variations mensuelles des flux de CO₂. En addition aux multiples analyses édaphiques effectuées, la mesure du potentiel redox aurait été pertinente. Cette variable permet de déterminer la disponibilité de dioxygène (O₂), élément essentiel à l'activité microbienne hétérotrophe.

5.3. Ouverture pour travaux futurs

Cette étude s'aligne avec les observations issues de la littérature en ce qui concerne les variations de flux de carbone le long du gradient intertidal et par rapport aux paramètres climatiques, et notamment la température. Peu d'études, en revanche, ont accordé de l'intérêt à l'influence du cycle de la marée sur le flux de CO₂. Les mesures effectuées de manière quotidienne et continue sur des mêmes sites, ont permis de mettre en avant l'influence prépondérante qu'a le niveau et le temps d'occupation de la marée sur la diffusion des flux de CO₂ à l'interface sédiment – atmosphère dans la mangrove.

Le cycle tidal sur le flux de CO₂ est donc à considérer pour améliorer nos connaissances sur le budget du carbone dans l'écosystème mangrove. Dans un contexte de changements climatiques, l'influence de la marée aurait tendance à être plus importante pour une même région, et donc à limiter l'émission de CO₂ vers l'atmosphère. En outre, la marée semble jouer un rôle essentiel dans le transfert du carbone organique vers le milieu océanique.

La compréhension cycle du carbone dans l'écosystème mangrove demeure un défi de taille. Les conditions spécifiques à chaque site (climat, marée, dépôt des rivières, sols, roches-mères environnantes, végétation) ainsi que le gradient intertidal à l'intérieur d'un même site limitent la compréhension d'ensemble des mécanismes. Le rôle que joue la marée, limitant le flux de CO₂ vers l'atmosphère dans un sens, mais favorisant le transport de carbone dans un autre, témoigne de la complexité des interactions dans cet écosystème. Parvenir à identifier précisément le devenir du carbone produit au sein de l'écosystème mangrove requiert un

certain nombre de considérations. Il faudrait dans un premier temps parvenir à quantifier précisément la production primaire nette d'une parcelle et mesurer simultanément :

- le flux de CO₂ émis vers l'atmosphère;
- la quantité de carbone prélevé par l'action de la marée (essentiellement sous forme de carbone inorganique et organique dissous);
- la quantité de carbone minéralisé et piégé dans les sédiments.

L'identification et la hiérarchisation des variables environnementales influençant les transformations du carbone sont elles aussi essentielles pour parvenir à comprendre le plus précisément possible le cycle du carbone dans l'écosystème mangrove.

5.4. Les mangroves, un écosystème aussi précieux que menacé

Les méthodes d'analyse de flux de carbone au sein des mangroves sont multiples et encore perfectibles. Les paramètres environnementaux influençant ce mécanisme sont eux aussi nombreux et variables. Toutefois, une hiérarchisation du degré d'influence se précise. La présente étude a mis en évidence l'influence prépondérante qu'a la position du site dans la zone intertidale, le cycle de la marée et la température par rapport au flux de CO₂.

Les mangroves ont un rôle particulier à jouer dans le contexte de réchauffement climatique. Elles pourraient en effet en subir les conséquences de plein fouet, en particulier par rapport à l'élévation du niveau moyen des océans. À l'inverse, la conservation des mangroves - étant donné leurs rôles particuliers dans le cycle du carbone - pourrait être une solution de mitigation efficace et durable.

En plus du rôle prépondérant dans le cycle du carbone marin et global, l'écosystème mangrove constitue un environnement naturel prolifique pour la faune et la flore ainsi qu'une ressource plurielle et vitale pour les communautés locales.

En dépit de la prise de conscience et des considérations accrues observées ces deux dernières décennies, la surface totale et la santé des mangroves sont en constante dégradation. Les recherches sur le sujet, les projets de conservation et de restauration impliquant les communautés locales sont alors essentiels. C'est en effet à partir de ces démarches que la valorisation et la protection de ce milieu unique pourront s'opérer.

ANNEXE A

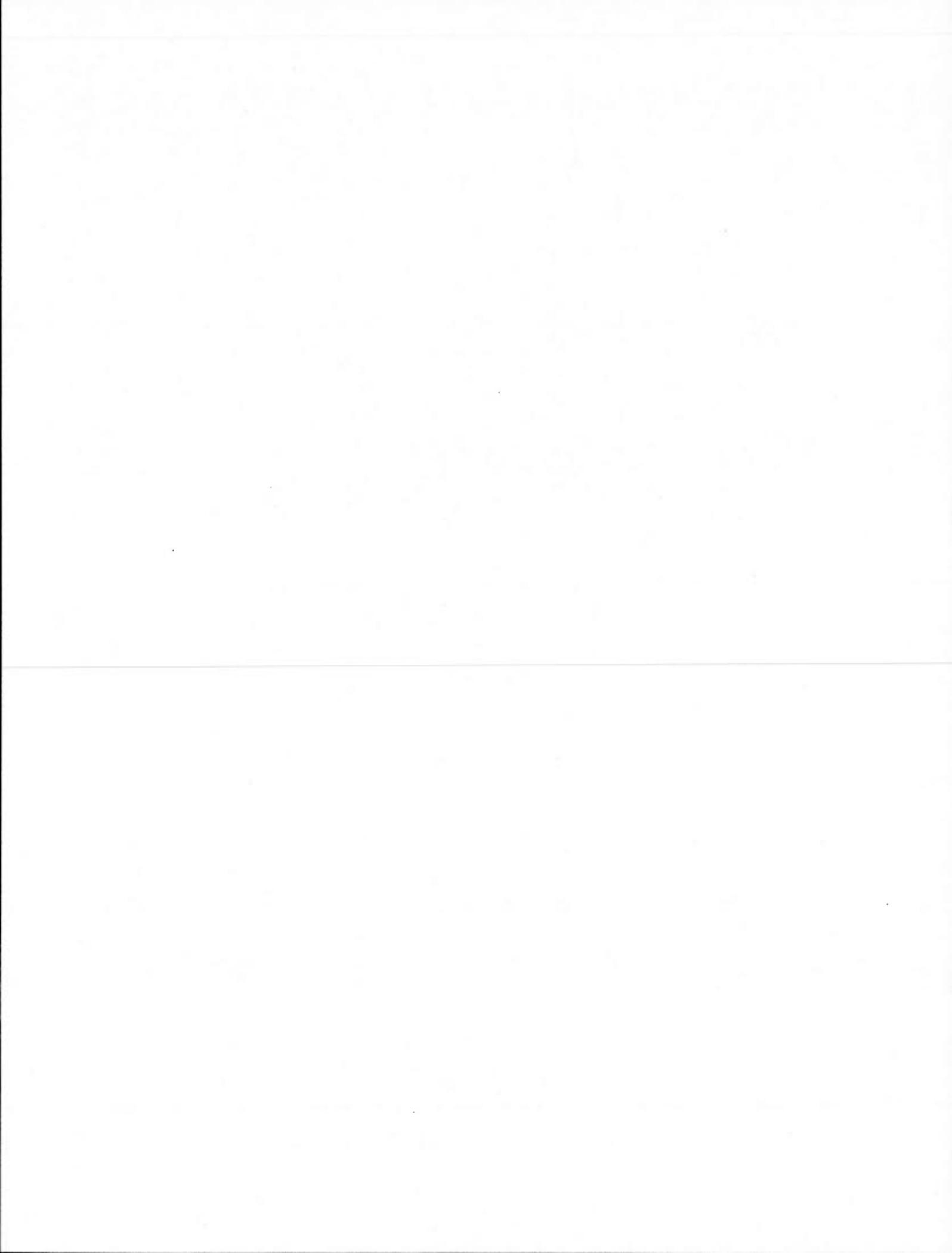
DESCRIPTION DES COLLECTES ET ANALYSES EFFECTUÉES AU COURS DE L'ÉTUDE

	Flux de CO ₂	Paramètres climatiques et tidaux	Sédiments	Date
Terrain (PNXT)	Collecte en CSC par solution alcaline du flux de CO ₂ dans 24 chambres réparties dans 4 sites	Relevé quotidien de la température, précipitation et niveau de la marée (par site)	Carottages et description des profils à l'aide de la charte Munsell et collectes des profils	26-05 au 31-05 15-06 au 20-06 11-07 au 16-07
		Récupération des données du service national Hydro météorologique de Van Ly: précipitations quotidiennes, l'humidité à 13 heures, l'humidité minimum, la température (maximum, minimale moyenne) quotidienne, l'évaporation et la vitesse de vent maximale		25-05 au 31-05 15-06 au 20-06 10-07 au 16-07
Laboratoire (IAE)	Détermination des teneurs en CO ₂ par titration des solutions alcalines		Séchage des échantillons à 40C Broyage des échantillons Tamisage Four: détermination de la teneur en Carbone organique par perte au feu Multimètre: Mesure du pH, Salinité, Conductivité, résistivité et TDS Détermination du CT et NT	04-06 au 13-06 24-06 au 09-07 17-07 au 03-08
				24-06 au 09-07 17-07 au 03-08

ANNEXE B

VALEURS MOYENNES DE FLUX DE CO₂ (mmol.m⁻².j⁻¹), ÉCART TYPE ET NOMBRE
n D'ÉCHANTILLONS

Site	Flux de CO ₂ moyen en mai (mmol.m ⁻² .j ⁻¹)	Flux de CO ₂ moyen en juin (mmol.m ⁻² .j ⁻¹)	Flux de CO ₂ moyen en juillet (mmol.m ⁻² .j ⁻¹)	Flux de CO ₂ moyen en total (mmol.m ⁻² .j ⁻¹)	n (mai)	n (juin)	n (juillet)	n (total)
H-4	4,98 ± 6,61	8,89 ± 10,33	14,27 ± 8,57	15,30 ± 13,39	17	12	18	47
Minf-7	5,32 ± 9,04	6,88 ± 9,47	11,33 ± 14,10	8,46 ± 11,66	9	13	17	39
Msup-6	3,43 ± 9,93	20,34 ± 6,82	23,52 ± 11,61	9,54 ± 9,18	17	12	18	47
B-5	1,24 ± 7,66	17,09 ± 8,28	10,19 ± 10,57	9,04 ± 10,91	18	15	17	50
Total	3,45 ± 8,28	13,53 ± 10,19	14,94 ± 12,35	10,53 ± 11,62	61	52	70	183



ANNEXE C

MATRICE DE CORRÉLATION PAR PAIRES DES VARIABLES CLIMATIQUES ET DU FLUX DE CO₂ EN CONDITION NON PARAMÉTRIQUE, À PARTIR DU TEST DE SPEARMAN

*, **et *** indiquent la signification de r avec $P < 0,00556$, $0,00111$ et $0,000111$, déterminé à partir de la correction de Bonferonni ($k=9$)

	Flux CO ₂ (mmol.m ⁻² .d-1)	Vitesse du vent max (m.s)	U13H (%)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmoyenne (°C)	Évaporation (mm.h)	Umin (%)	Précipitation (mm)
Flux CO ₂ (mmol.m ⁻² .d-1)	1.0000								
Vitesse du vent maximum (m.s)	0.2225	1.0000							
U13H (%)	-0.4904*	-0.1372	1.0000						
Tmax (°C)	0.5205*	0.0924	-0.9354***	1.0000					
Tmin (°C)	0.5265**	0.4127**	-0.4011**	0.6049**	1.0000				
Tmoyenne (°C)	0.5509*	0.1717	-0.7149***	0.8899***	0.8836***	1.0000			
Évaporation (mm.h)	0.3897	0.5838***	-0.7621***	0.8205***	0.6790***	0.7900***	1.0000		
Umin (%)	-0.4021*	-0.1296	0.9366***	-0.9349***	-0.3957**	-0.7305***	-0.8181***	1.0000	
Précipitation (mm)	-0.3885	-0.1883	0.3664	-0.5074	-0.6872***	-0.7054***	-0.5128	0.3432	1.0000

ANNEXE D

VALEURS MOYENNES (n=3) DES NEUF PARAMÈTRES ÉDAPHIQUES MESURÉS, PAR SITE ET PAR PROFONDEUR

(horizon A (0-5 cm), B (15-20 cm) et C (30-40 cm))

Site	Profondeur	pH	Conductivité (microS/cm)	TDS (mg/L)	Salinité (ppt)	Résistivité (ohm)	N	C	C/N	TOC (Perte au feu)
B-5	A	6,65 ± 0,35	5503 ± 724	2757 ± 361	2,98 ± 0,42	1,88 ± 0,23	0,19 ± 0,03	3,10 ± 0,36	16,25 ± 0,38	12,35 ± 0,52
	B	6,18 ± 0,44	4177 ± 19,38	2289 ± 1168	2,25 ± 1,10	3,43 ± 1,14	0,18 ± 0,01	3,00 ± 0,42	16,38 ± 0,21	11,66 ± 1,04
	D	7,77 ± 0,18	3273 ± 145	1626 ± 84	1,7 ± 0,09	3,09 ± 0,17	0,08 ± 0,01	0,91 ± 0,23	11,25 ± 1,44	6,27 ± 0,57
H-4	A	6,46 ± 0,48	3823 ± 1193	1910 ± 596	2,03 ± 0,66	3,51 ± 1,46	0,18 ± 0,01	3,51 ± 0,12	19,20 ± 1,64	13,2 ± 0,42
	B	7,62 ± 0,25	3627 ± 139	1824 ± 62	1,92 ± 0,07	2,75 ± 0,09	0,12 ± 0,02	1,93 ± 0,37	16,80 ± 0,21	9,70 ± 1,01
	D	8,10 ± 0,02	2836 ± 75	1391 ± 19	1,47 ± 0,04	3,53 ± 0,09	0,07 ± 0,01	0,88 ± 0,03	12,00 ± 1,45	7,29 ± 0,32
Msup-6	A	7,58 ± 0,05	2196 ± 445	1098 ± 222	1,13 ± 0,24	5,07 ± 1,28	0,15 ± 0,00	1,95 ± 0,19	13,22 ± 1,46	9,88 ± 0,08
	B	7,41 ± 0,19	2812 ± 657	1407 ± 329	1,46 ± 0,38	4,05 ± 1,08	0,14 ± 0,00	2,08 ± 0,08	14,77 ± 0,30	10,39 ± 0,49
	D	7,47 ± 0,22	2903 ± 665	1451 ± 333	1,05 ± 0,63	3,83 ± 0,86	0,13 ± 0,00	1,99 ± 0,20	15,21 ± 1,35	9,44 ± 0,37
Minf-7	A	7,72 ± 0,06	4030 ± 1106	2017 ± 554	1,86 ± 0,89	3,12 ± 1,16	0,14 ± 0,00	1,74 ± 0,15	12,53 ± 0,86	10,74 ± 0,26
	B	7,50 ± 0,08	3331 ± 985	1667 ± 493	1,75 ± 0,54	3,91 ± 1,56	0,12 ± 0,02	1,73 ± 0,26	14,94 ± 0,65	9,99 ± 0,87
	D	7,78 ± 0,13	4180 ± 175	2087 ± 87	2,22 ± 0,10	2,40 ± 0,10	0,09 ± 0,01	1,21 ± 0,22	12,74 ± 1,14	9,23 ± 0,35

BIBLIOGRAPHIE

- Adeel, Z., et R. Pomeroy. (2002). «Assessment and management of mangrove ecosystems in developing countries». *Trees-Structure and Function*, vol. 16, no 2, p. 235-238.
- Alongi, D.M. (2002). «Present state and future of the world's mangrove forests». *Environmental Conservation*, vol. 29, no 3, p. 331-349.
- Alongi, D.M. (2008). «Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 76, no 1, p. 1-13.
- Alongi, D.M. (2009). *The energetics of mangrove forests*: Springer, 216 p.
- Audesse, P. (1982). *Principes et techniques d'analyse de sol*: Quebec Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Laboratoire du service de recherche en sols, Section chimie et fertilité. 208 p.
- Aufdenkampe, A.K., E. Mayorga, P.A. Raymond, J.M. Melack, S.C. Doney, S.R. Alin, R.E. Aalto et K. Yoo. (2011). «Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 9, no 1, p. 53-60.
- Balmford, A., A. Bruner, P. Cooper, R. Costanza, S. Farber, R.E. Green, M. Jenkins, P. Jefferiss, V. Jessamy et J. Madden. (2002). «Economic reasons for conserving wild nature». *science*, vol. 297, no 5583, p. 950.
- Bandaranayake, W.M. (1998). «Traditional and medicinal uses of mangroves». *Mangroves and Salt Marshes*, vol. 2, no 3, p. 133-148.
- Barbier, E.B. (2007). «Valuing ecosystem services as productive inputs». *Economic Policy*, vol. 22, no 49, p. 177-229.
- Barbier, E.B., S.D. Hacker, C.Kennedy, E.W. Koch, A.C. Stier et B.R. Silliman. (2011). «The value of estuarine and coastal ecosystem services». *Ecological Monographs*, vol. 81, no 2, p. 169-193.

- Bekku, Y., H. Koizumi, T. Oikawa et H. Iwaki. (1997). «Examination of four methods for measuring soil respiration». *Applied Soil Ecology*, vol. 5, no 3, p. 247-254.
- Bosire, J.O., F. Dahdouh-Guebas, M. Walton, B.I. Crona, R.R. Lewis III, C. Field, J.G. Kairo et N. Koedam. (2008). «Functionality of restored mangroves: a review». *Aquatic Botany*, vol. 89, no 2, p. 251-259.
- Bouillon, S., F. Dahdouh-Guebas, A.V.V.S. Rao, N. Koedam et F. Dehairs. (2003). «Sources of organic carbon in mangrove sediments: variability and possible ecological implications». *Hydrobiologia*, vol. 495, no 1, p. 33-39.
- Bouillon, S., T. Moens, N. Koedam, F. Dahdouh-Guebas, W. Baeyens et F. Dehairs. (2006). «Variability in the origin of carbon substrates for bacterial communities in mangrove sediments». *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 49, no 2, p. 171-179.
- Bouillon, S., A.V. Borges, E. Castañeda-Moya, K. Diele, T. Dittmar, N.C. Duke, E. Kristensen, S.Y. Lee, C. Marchand et J.J. Middelburg. (2008a). «Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates». *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 22, no 2, p. GB(2013).
- Bouillon, S., R.M. Connolly et S.Y. Lee. (2008b). «Organic matter exchange and cycling in mangrove ecosystems: Recent insights from stable isotope studies». *Journal of Sea Research*, vol. 59, no 1, p. 44-58.
- Bouillon, S. (2011). «Carbon cycle: Storage beneath mangroves». *Nature Geoscience*, vol. 4, no 5, p. 282-283.
- Chapin III, F.S., G.M. Woodwell, J.T. Randerson, E.B. Rastetter, G.M. Lovett, D.D. Baldocchi, D.A. Clark, M.E. Harmon, D.S. Schimel et R. Valentini. (2006). «Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods». *Ecosystems*, vol. 9, no 7, p. 1041-1050.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M.A. Cairns, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi et T. Kira. (2005). «Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests». *Oecologia*, vol. 145, no 1, p. 87-99.

- Chen, G.C., N.F.Y. Tam et Y. Ye. (2010). «Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases N₂O, CH₄ and CO₂ from mangrove soil in South China». *Science of the Total Environment*, vol. 408, no 13, p. 2761-2767.
- Chen, G.C., N.F.Y. Tam et Y. Ye. (2012). «Spatial and seasonal variations of atmospheric N₂O and CO₂ fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics». *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 48, p. 175-181.
- Chmura, G.L., S.C. Anisfeld, D.R. Cahoon et J.C. Lynch. (2003). «Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils». *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 17, no 4, p. 1111.
- Cole, J.J., Y.T. Prairie, N.F. Caraco, W.H. McDowell, L.J. Tranvik, R.G. Striegl, C.M. Duarte, P. Kortelainen, J.A. Downing et J.J. Middelburg. (2007). «Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget». *Ecosystems*, vol. 10, no 1, p. 172-185.
- Comley, B.W.T., et K.A. McGuinness. (2005). «Above-and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves». *Australian journal of botany*, vol. 53, no 5, p. 431-436.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill et J. Paruelo. (1997). «The value of the world's ecosystem services and natural capital». *Nature*, vol. 387, no 6630, p. 253-260.
- Dasgupta, S., B. Laplante, C. Meisner, D. Wheeler et J. Yan. (2009). «The impact of sea level rise on developing countries: a comparative analysis». *Climatic Change*, vol. 93, no 3-4, p. 379-388.
- Davidson, E.A., K. Savage, L.V. Verchot et R. Navarro. (2002). «Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, no 1, p. 21-37.
- De Vivo, B., H. Belkin et A. Lima. (2008). *Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis and Case Histories: Site Characterization, Data Analysis and Case Histories*: Elsevier, 429 p.

- Donato, D.C., J.B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, M. Stidham et M. Kanninen. (2011). «Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics». *Nature Geoscience*, vol. 4, no 5, p. 293-297.
- Doney, S.C. (2010). «The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry». *science*, vol. 328, no 5985, p. 1512-1516.
- Duarte, C.M, et J. Cebrian. (1996). «The fate of marine autotrophic production». *Limnology and Oceanography*, vol. 41, no 8, p. 1758-1766.
- Duke, N.C., M.C. Ball et J.C. Ellison. (1998). «Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves». *Global Ecology and Biogeography Letters*, vol. 11, no 2, p. 27-47.
- Duke, N.C., J.O. Meynecke, S. Dittmann, A.M. Ellison, K. Anger, U. Berger, S. Cannicci, K. Diele, K.C. Ewel et CD Field. (2007). «A world without mangroves?». *science*, vol. 317, no 5834, p. 41-42.
- Ellison, A.M., E.J. Farnsworth et R.E. Merkt. (1999). «Origins of mangrove ecosystems and the mangrove biodiversity anomaly». *Global Ecology and Biogeography*, vol. 8, no 2, p. 95-115.
- FAO (2007). The world's mangroves 1980–2005, FAO Rome, Italy
- Ferreira, T.O., P. Vidal-Torrado, X.L. Otero et F. Macías. (2007). «Are mangrove forest substrates sediments or soils? A case study in southeastern Brazil». *Catena*, vol. 70, no 1, p. 79-91.
- Field, C.D. (1999). «Rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview». *Marine Pollution Bulletin*, vol. 37, no 8, p. 383-392.
- Gardner, R.C., et N.C. Davidson. (2011). «The Ramsar convention». *Wetlands*, p. 189-203.
- Gilman, E.L., J. Ellison, N.C. Duke et C. Field. (2008). «Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review». *Aquatic Botany*, vol. 89, no 2, p. 237-250.

- Giri, C., E. Ochieng, L.L. Tieszen, Z. Zhu, A. Singh, T. Loveland, J. Masek et N. Duke. (2011). «Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data». *Global Ecology and Biogeography*, vol. 20, no 1, p. 154-159.
- Green, E.P., C.D. Clark, P.J. Mumby, A.J. Edwards et A.C. Ellis. (1998). «Remote sensing techniques for mangrove mapping». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no 5, p. 935-956.
- Halpern, B.S., S. Walbridge, K.A. Selkoe, C.V. Kappel, F. Micheli, C. D'Agrosa, J.F. Bruno, K.S. Casey, C. Ebert et H.E. Fox. (2008). «A global map of human impact on marine ecosystems». *science*, vol. 319, no 5865, p. 948-952.
- Heumann, B.W. (2011). «Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities». *Progress in Physical Geography*, vol. 35, no 1, p. 87-108.
- Hong, P.N., et H.T. San. (1993). *Mangroves of Vietnam*. Bangkok, Thailand: IUCN, 173 p.
- Irvin, G. (1995). «Vietnam: assessing the achievements of Doi Moi». *The Journal of Development Studies*, vol. 31, no 5, p. 725-750.
- Jassal, R., A. Black, M. Novak, K. Morgenstern, Z. Nestic et D. Gaumont-Guay. (2005). «Relationship between soil CO₂ concentrations and forest-floor CO₂ effluxes». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 130, no 3, p. 176-192.
- Jennerjahn, T.C., et V. Ittekkot. (2002). «Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins». *Naturwissenschaften*, vol. 89, no 1, p. 23-30.
- Kang, S., S. Doh, D. Lee, D. Lee, V.L. Jin et J.S. Kimball. (2003). «Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea». *Global Change Biology*, vol. 9, no 10, p. 1427-1437.
- Kathiresan, K., et B.L. Bingham. (2001). «Biology of mangroves and mangrove ecosystems». *Advances in marine biology*, vol. 40, p. 81-251.
- Kirwan, M.L., et L.K. Blum. (2011). «Enhanced decomposition offsets enhanced productivity and soil carbon accumulation in coastal wetlands responding to climate change». *Biogeosciences Discussions*, vol. 8, no 1, p. 707-722.

- Komiyama, A., S. Pongpurn et S. Kato. (2005). «Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves». *Journal of Tropical Ecology*, vol. 21, no 4, p. 471-477.
- Komiyama, A., J.E. Ong et S. Pongpurn. (2008). «Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review». *Aquatic Botany*, vol. 89, p. 128-137.
- Kristensen, E. (2007). «Carbon balance in mangrove sediments: the driving processes and their controls». *Greenhouse Gas and Carbon Balances in Mangrove Coastal Ecosystems. Maruzen, Tokyo*, vol. 9, no 2, p. 61-78.
- Kristensen, E., S. Bouillon, T. Dittmar et C. Marchand. (2008). «Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review». *Aquatic Botany*, vol. 89, no 2, p. 201-219.
- Le, T.P.Q., J. Garnier, B. Gilles, T. Sylvain et C. Van Minh. (2007). «The changing flow regime and sediment load of the Red River, Viet Nam». *Journal of Hydrology*, vol. 334, no 1, p. 199-214.
- Lee, S.Y. (1995). «Mangrove outwelling: a review». *Hydrobiologia*, vol. 295, no 1, p. 203-212.
- Leopold, A., C. Marchand, J. Deborde, C. Chaduteau et M. Allenbach. (2013). «Influence of mangrove zonation on CO₂ fluxes at the sediment-air interface (New Caledonia)». *Geoderma*, vol. 202, p. 62-70.
- Littell, R.C., R.J. Freund et P.C. Spector (1991). SAS System for linear models, SAS Institute (Cary, NC)
- Lloyd, J., et J.A. Taylor. (1994). «On the temperature dependence of soil respiration». *Functional ecology*, vol. 4, no 10, p. 315-323.
- Lovelock, C.E. (2008). «Soil respiration and belowground carbon allocation in mangrove forests». *Ecosystems*, vol. 11, no 2, p. 342-354.
- Luo, Y., et X. Zhou. (2006). *Soil respiration and the environment*: Academic press, 316 p.

- Luu, T.N.M., J. Garnier, G. Billen, D. Orange, J. Némery, T.P.Q. Le, H.T. Tran et L.A. Le. (2010). «Hydrological regime and water budget of the Red River Delta (Northern Vietnam)». *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 37, no 3, p. 219-228.
- Maier, M, H. Schack-Kirchner, E.E. Hildebrand et D. Schindler. (2011). «Soil CO₂ efflux vs. soil respiration: Implications for flux models». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 151, no 12, p. 1723-1730.
- Marchand, C., E. Lallier-Vergès et F. Baltzer. (2003). «The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 56, no 1, p. 119-130.
- McKee, K.L. (1993). «Soil Physicochemical Patterns and Mangrove Species Distribution-- Reciprocal Effects?». *Journal of ecology*, vol. 123, no 3, p. 477-487.
- McLeod, E., et R.V. Salm. (2006). *Managing mangroves for resilience to climate change*: World Conservation Union (IUCN), 228 p.
- McLeod, E., G.L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C.M. Duarte, C.E. Lovelock, W.H. Schlesinger et B.R. Silliman. (2011). «A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 9, no 10, p. 552-560.
- Mitra, A., K. Sengupta et K. Banerjee. (2011). «Standing biomass and carbon storage of above-ground structures in dominant mangrove trees in the Sundarbans». *Forest Ecology and Management*, vol. 261, no 7, p. 1325-1335.
- Mitra, S., R. Wassmann, P.L.G. Vlek et Universität Bonn. Zentrum für Entwicklungsforschung. (2003). *Global inventory of wetlands and their role in the carbon cycle*: Zentrum für Entwicklungsforschung, Universität Bonn, 421 p.
- Moberg, F., et P. Rönnbäck. (2003). «Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration». *Ocean & Coastal Management*, vol. 46, no 1, p. 27-46.
- Müller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina et W.R. Roest. (2008). «Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 9, no 4, p. 152-173

- Nagelkerken, I., S.J.M. Blaber, S. Bouillon, P. Green, M. Haywood, L.G. Kirton, J.O. Meynecke, J. Pawlik, H.M. Penrose et A. Sasekumar. (2008). «The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review». *Aquatic Botany*, vol. 89, no 2, p. 155-185.
- Nhuan, M.T., N.T.M. Ngoc, N.Q. Huong, N.T.H. Hue, N.T. Tue et P.B. Ngoc. (2009). «Assessment of Vietnam Coastal Wetland Vulnerability for Sustainable Use (Case Study in Xuanthuy Ramsar Site, Vietnam)». *Journal of Wetlands Ecology*, vol. 2, no 1, p. 1-16.
- Norman, J.M., C.J. Kucharik, S.T. Gower, D.D. Baldocchi, P.M. Crill, M. Rayment, K. Savage et R.G. Striegl. (1997). «A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes». *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, p. 28-28.
- Öhlinger, R., F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler et R. Margesin. (1996). «Soil respiration by titration». In *Methods in Soil Biology*, p. 95-98. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Pachauri, R.K., et A. Reisinger. (2008). *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*: GIEC, 114 p.
- Pumpanen, J., P. Kolari, H. Ilvesniemi, K. Minkkinen, T. Vesala, S. Niinistö, A. Lohila, T. Larmola, M. Morero et M. Pihlatie. (2004). «Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 123, no 3, p. 159-176.
- Raich, J.W., et W.H. Schlesinger. (1992). «The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate». *Tellus B*, vol. 44, no 2, p. 81-99.
- Rayment, G.E., et F.R. Higginson. (1992). *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods*: Inkata Press Pty Ltd, 365 p.
- Rochette, P., G.L. Hutchinson, J.L. Hatfield, J.M. Baker et M.K. Viney. (2005). «Measurement of soil respiration in situ: chamber techniques». *Micrometeorology in agricultural systems*, vol. 87, no 2 p. 247-286.
- Saenger, P., et S.C. Snedaker. (1993). «Pan-tropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litterfall». *Oecologia*, vol. 96, no 3, p. 293-299.

- Saito, Y., A. Nishimura et E. Matsumoto. (1989). «Transgressive sand sheet covering the shelf and upper slope off Sendai, Northeast Japan». *Marine Geology*, vol. 89, no 3, p. 245-258.
- Santos, ElC., J.J. Celino, V.L. Cancio Souza Santos et J.R. Bispo De Souza. (2013). «Source and distribution of organic matter in surface sediments from mangroves on the island of Itaparica, Bahia/Brazil». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 48, no 1, p. 1-13.
- Sathirathai, S., et E.B. Barbier. (2001). «Valuing mangrove conservation in southern Thailand». *Contemporary Economic Policy*, vol. 19, no 2, p. 109-122.
- Scherrer, B. (1984). *Biostatistique*: Chicoutimi, Québec: G. Morin, 534 p.
- Schimel, D.S. (1995). «Terrestrial ecosystems and the carbon cycle». *Global Change Biology*, vol. 1, no 1, p. 77-91.
- Schlesinger, W.H., et J.A. Andrews. (2000). «Soil respiration and the global carbon cycle». *Biogeochemistry*, vol. 48, no 1, p. 7-20.
- Schlesinger, W.H., et E.S. Bernhardt. (2013). *Biogeochemistry: an analysis of global change*: Academic press, 672 p.
- Seto, K.C., et M. Fragkias. (2007). «Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: A remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands». *Global Environmental Change*, vol. 17, no 3-4, p. 486-500.
- Spalding, M., M. Kainuma et L. Collins. (2010). *World Atlas of Mangroves*. Malta: Earthscan, 319 p.
- Thatoi, H., B.C. Behera, R.R. Mishra et S.K. Dutta. (2013). «Biodiversity and biotechnological potential of microorganisms from mangrove ecosystems: a review». *Annals of Microbiology*, vol. 63, no 1, p. 1-19.
- Thuyen, L.X., Huong, P.Q. (2012). «Difference in soil physical – chemical parameters and respiration between collapsed (by Durian typhoon) and intact mangroves». *Unpublished*.

- Toan, L.Q. (2011). «Determination of the mangrove's biomass in the coastal area of Nam Dinh Province using radar satellite images». *Unpublished*.
- Tri, N., W.N. Adger et P.M. Kelly. (1998). «Natural resource management in mitigating climate impacts: the example of mangrove restoration in Vietnam». *Global Environmental Change*, vol. 8, no 1, p. 49-61.
- Tue, N.T., N.T. Ngoc, T.D. Quy, H. Hamaoka, M.T. Nhuan et K. Omori. (2011). «A cross-system analysis of sedimentary organic carbon in the mangrove ecosystems of Xuan Thuy National Park, Vietnam». *Journal of Sea Research*. vol. 54, no 1, p. 7-21
- Tue, N.T., T.D. Quy, H. Hamaoka, M.T. Nhuan et K. Omori. (2012). «Sources and Exchange of Particulate Organic Matter in an Estuarine Mangrove Ecosystem of Xuan Thuy National Park, Vietnam». *Estuaries and Coasts*, vol. 62, no 3 p. 1-9.
- Valiela, I., J.L. Bowen et J.K. York. (2001). «Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments». *Bioscience*, vol. 51, no 10, p. 807-815.
- Van Maren, D.S., et P. Hoekstra. (2004). «Seasonal variation of hydrodynamics and sediment dynamics in a shallow subtropical estuary: the Ba Lat River, Vietnam». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 60, no 3, p. 529-540.
- Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco et J.M. Melillo. (1997). «Human domination of Earth's ecosystems». *science*, vol. 277, no 5325, p. 494-499.
- Walters, B.B., P. Rönnbäck, J.M. Kovacs, B. Crona, S.A. Hussain, R. Badola, J.H. Primavera, E. Barbier et F. Dahdouh-Guebas. (2008). «Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review». *Aquatic Botany*, vol. 89, no 2, p. 220-236.
- Watson, A. J., U. Schuster, D.C.E. Bakker, N.R. Bates, A. Corbière, M. González-Dávila, Tobias Friedrich, J. Hauck, C. Heinze et T. Johannessen. (2009). «Tracking the variable North Atlantic sink for atmospheric CO₂». *science*, vol. 326, no 5958, p. 1391-1393.