

ZoNéCo

PROGRAMME D'EVALUATION DES RESSOURCES MARINES
DE LA ZONE ECONOMIQUE DE NOUVELLE-CALEDONIE

EVALUATION DE L'IMPACT DE L'AQUACULTURE DE CREVETTES SUR LES MANGROVES DE NOUVELLE-CALEDONIE

Sabrina Virly Consultant

Collaborations : Damien Buisson, Barry Clough, Hugues Lemmonier, Bertrand Richer de Forges



Juin 2005

Evaluation de l'impact de l'aquaculture de crevettes sur les mangroves de Nouvelle- Calédonie

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

Rapport final

Coordonnatrice : Sabrina Virly

**Damien Buisson (SMAI)
Barry Clough (AIMS)
Hugues Lemmonier (IFREMER)
Bertrand Richer de Forges (IRD)**

Programme ZoNéCo

Juin 2005

Sabrina VIRLY Consultant - BP 12681 Magenta 98802 Nouméa

Téllfax : 26-91-13 / 84 66 15 - Mél : svirly@canl.nc- Ridet : 394965 005 - BNP 17939 09148 01383900111 49

SOMMAIRE

LISTE DES LEGENDES.....	4
RESUME.....	7
1. OBJECTIF DE L'ETUDE	8
1.1. CONTEXTE	8
1.2. PROPOSITIONS D'ORIENTATION DE L'ETUDE	9
2. METHODOLOGIE.....	10
2.1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	10
2.1.1. <i>Thèmes traités</i>	10
2.1.1.1. Activité aquacole en Nouvelle-Calédonie	10
2.1.1.2. Cas d'études de l'impact de l'aquaculture sur la mangrove	10
2.1.1.3. Approches méthodologiques	10
2.1.2. <i>Moyens mis en oeuvre</i>	10
2.2. INVESTIGATIONS DE TERRAIN.....	11
2.2.1. <i>Choix des sites</i>	11
2.2.2. <i>Elaboration du plan d'échantillonnage</i>	12
2.2.3. <i>Description qualitative de la structure de la mangrove</i>	12
2.2.4. <i>Description de la faune mégabenthique de la mangrove</i>	13
2.2.5. <i>Prélèvements d'échantillons et mesures de paramètres physico-chimiques</i>	13
2.2.6. <i>Mesure d'indice foliaire</i>	16
2.3. TRAITEMENTS ET ANALYSES DE DONNÉES DE TERRAIN	17
2.3.1. <i>Analyses des paramètres physico-chimiques dans les différents compartiments échantillonnés</i>	17
2.3.2. <i>Calcul et interprétation des LAI (« Leaf Area Index »)</i>	17
2.4. ACQUISITION, TRAITEMENTS ET ANALYSES DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES	18
2.4.1. <i>Acquisition et tri</i>	18
2.4.2. <i>Numérisation</i>	18
2.4.3. <i>Géoréférencement</i>	18
2.4.4. <i>Photo-interprétations</i>	19
2.4.4.1. Digitalisation.....	19
2.4.4.2. Classification non supervisée.....	20
2.4.5. <i>Analyses</i>	20
2.4.5.1. Evaluation de superficies, de linéaire et d'indices.....	20
2.4.5.2. Analyses diachroniques	20
2.4.6. <i>Archivage</i>	20
2.4.7. <i>Synthèse de la chaîne de traitement</i>	20
3. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE RELATIVE AUX IMPACTS DE L'AQUACULTURE SUR LA MANGROVE	22
3.1. ADAPTATIONS ECO-PHYSIOLOGIQUES DE LA MANGROVE FACE A DIFFÉRENTS STRESS	22
3.1.1. <i>Particularités de la mangrove</i>	22
3.1.2. <i>Stress lié à l'eau et au sel</i>	23
3.1.3. <i>Stress lié à l'oxygène</i>	24

3.1.4.	<i>Synthèse sur les stress éco-physiologiques d'une mangrove</i>	26
3.2.	IMPACTS DUS A LA CONSTRUCTION	28
3.2.1.	<i>Conversion en bassins aquacoles</i>	28
3.2.2.	<i>Modification de l'hydrologie</i>	29
3.3.	IMPACTS DUS AU FONCTIONNEMENT	29
3.3.1.	<i>Enrichissement en matière organique et sels nutritifs et diminution de l'O₂ dissous</i>	29
3.3.2.	<i>Perturbation de l'hydrologie et sédimentation</i>	32
3.3.3.	<i>Synthèse sur les impacts</i>	32
4.	ETUDE DE L'AQUACULTURE ET DE SES IMPACTS SUR LES MANGROVES DE NOUVELLE-CALEDONIE	34
4.1.	AQUACULTURE DE CREVETTES EN NOUVELLE-CALEDONIE	34
4.1.1.	<i>Activité aquacole</i>	34
4.1.1.1.	Historique	34
4.1.1.2.	Types et Nombre de fermes.....	35
4.1.1.3.	Effet sur l'environnement littoral	37
4.1.2.	<i>Potentialités</i>	37
4.1.2.1.	Sites potentiels.....	37
4.1.2.2.	Projets en cours.....	37
4.2.	ETUDE DE MANGROVES IN SITU	39
4.2.1.	<i>Sites choisis et stations échantillonnées</i>	39
4.2.2.	<i>Résultats par site</i>	43
4.2.2.1.	Description des communautés végétales et de la structure de la mangrove	43
4.2.2.2.	LAI.....	50
4.2.2.3.	Analyse des caractéristiques physico-chimiques des différents compartiments.....	51
4.2.2.4.	Analyse de l'abondance de la faune mégabenthique de la mangrove.....	57
4.3.	ANALYSE COMPARATIVE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES DE MANGROVES.....	59
4.3.1.	<i>Généralités sur les photographies et les interprétations</i>	59
4.3.2.	<i>Ouano</i>	61
4.3.2.1.	Documents archivés.....	61
4.3.2.2.	Etat de la mangrove en 2004	61
4.3.2.3.	Evolution	65
4.3.2.4.	Superficies	66
4.3.3.	<i>Sodacal</i>	68
4.3.3.1.	Documents archivés.....	68
4.3.3.2.	Etat en 2004.....	68
4.3.3.3.	Evolution	71
4.3.3.4.	Superficies	72
4.3.4.	<i>Pouaco</i>	75
4.3.4.1.	Documents archivés.....	75
4.3.4.2.	Etat en 2004.....	75
4.3.4.3.	Evolution	78
4.3.4.4.	Superficies	78
4.3.5.	<i>Pouanga</i>	80
4.3.5.1.	Documents archivés.....	80
4.3.5.2.	Etat en 2004.....	80
4.3.5.3.	Superficies	83
4.3.6.	<i>Comparaison des sites</i>	84

5.	DISCUSSION - PERSPECTIVES	86
5.1.	NATURE DES IMPACTS OBSERVES	86
5.2.	PERTINENCE ET LIMITES DES METHODOLOGIES UTILISEES	89
5.2.1.	<i>Mesures in situ</i>	89
5.2.2.	<i>Mégafaune</i>	91
5.2.3.	<i>Utilisation des photographies aériennes</i>	92
5.3.	ORIENTATIONS FUTURES	92
6.	CONCLUSION	94
7.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	96
8.	ANNEXES	99

LISTE DES LEGENDES

FIGURE 1 : MATERIEL UTILISE POUR REALISER LES COMPTAGES DE LA MEGAFAUNE BENTHIQUE LORS DES MISSIONS DE TERRAIN EN OCTOBRE 2004.	13
TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES RELEVES PHYSICO-CHIMIQUES DES ECHANTILLONS DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS DES 3 SITES REALISES LORS DE LA CAMPAGNE D'OCTOBRE 2004.	14
FIGURES 2 ET 3 : PHMETRE ET PH/MVMETRE UTILISES POUR LES MESURES DE TERRAIN EN OCTOBRE 2004.	15
FIGURE 4 : MESURE DU POTENTIEL REDOX DANS UNE CAROTTE DE SEDIMENT PRELEVEE EN FRANGE MARITIME DE MANGROVE EN OCTOBRE 2004.	15
FIGURE 5 : UTILISATION DU PHOTOMETRE DANS UNE FORET DE PALETUVIERS RHIZOPHORA STYLOSA.	16
FIGURE 6 : MESURE DE L'ANGLE SOLAIRE AVEC LE ZENITH.	17
FIGURE 7 : CHAINE DE TRAITEMENTS APPLIQUEE AUX PHOTOGRAPHIES AERIENNES ET PRODUITS OBTENUS DANS LA CADRE DE LA PRESENTE ETUDE.	21
FIGURE 8: INTERACTION ENTRE LES DIFFERENTS FACTEURS POUVANT AFFECTES L'ETABLISSEMENT, LA SURVIE ET LA CROISSANCE DES PALETUVIERS (D'APRES CLOUGH, 2005).	23
FIGURE 9 : SCHEMA D'ECOULEMENT ENTRE 2 RESERVOIRS VIA UN TUYAU.	25
FIGURE 10 : INTERACTIONS ENTRE LES STRESS ECO-PHYSIOLOGIQUES LIES AUX FACTEURS HYDROLOGIQUES ET LA SURVIE ET LA CROISSANCE DES PALETUVIERS (D'APRES CLOUGH, 2005).	27
TABLEAU 2 : BILAN DES NUTRIMENTS DANS LE CAS DE SYSTEMES INTENSIFS ET SEMI-INTENSIFS D'AQUACULTURE DE CREVETTES EN THAÏLANDE (EN KG/HA/AN).	31
FIGURE 11 : SCHEMA SIMPLIFIE DU FONCTIONNEMENT D'UN ELEVAGE DE CREVETTES SEMI-INTENSIF OU INTENSIF ET DES IMPACTS POTENTIELS SUR LA MANGROVE.	33
TABLEAU 3 : FERMES AQUACOLEES DE GROSSISSEMENT DE CREVETTES EN NOUVELLE-CALÉDONIE EN 2004.	35
FIGURE 12 : LOCALISATION DES FERMES ET ECLOSERIES DE CREVETTES EN PRODUCTION EN 2004 (CASTELAIN, 2004).	36
FIGURE 13 : LOCALISATION DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE ET AUTRES POINTS REMARQUABLES REALISES EN OCTOBRE 2004 A OUANO (LES NUMEROS EN ROUGE CORRESPONDENT AUX WAYPOINTS DU GPS).	40
FIGURE 14 : LOCALISATION DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE ET AUTRES POINTS REMARQUABLES REALISES EN OCTOBRE 2004 A SODACAL (LES NUMEROS CORRESPONDENT AUX WAYPOINTS DU GPS).	41
FIGURE 15 : LOCALISATION DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE ET AUTRES POINTS REMARQUABLES REALISES EN OCTOBRE 2004 A POUACO (LES NUMEROS CORRESPONDENT AUX WAYPOINTS DU GPS).	42
FIGURE 16 : ZONATION DE LA MANGROVE DE POUACO.	43
FIGURE 17 : TRANSECT 1 DU SITE DE OUANO (RADIALE PRINCIPALE DE LA FRANGE TERRESTRE VERS LA FRANGE MARITIME ET RADIALE TRANSVERSE). LES FLECHES VERTES CORRESPONDENT AU MOINE DE SORTIE DES BASSINS.	44
TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE DE LA RADIALE 1 DE OUANO.	44
FIGURE 18 : TRANSECT 2 DU SITE DE OUANO (RADIALE PRINCIPALE DE LA FRANGE TERRESTRE VERS LA FRANGE MARITIME ET RADIALE TRANSVERSE).). LES FLECHES VERTES CORRESPONDENT AU MOINE DE SORTIE DES BASSINS.	45
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE DE LA RADIALE 2 DE OUANO.	45
FIGURE 19 : TRANSECT 1 DU SITE DE SODACAL. LES FLECHES VERTES CORRESPONDENT AUX MOINES DE SORTIE.	46
TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGES DE LA RADIALE 1 DU SITE DE SODACAL.	46
FIGURE 20 : TRANSECT 2 DU SITE DE SODACAL. LES FLECHES VERTES CORRESPONDENT AUX MOINES DE SORTIE.	47
TABLEAU 7 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGES DE LA RADIALE 2 DU SITE DE SODACAL.	47

FIGURE 21 : TRANSECT 1 SUR LE SITE DE POUACO (EN ROUGE, TRACE DU TRANSECT).	48
TABLEAU 8 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGES DE LA RADIALE 1 DU SITE DE POUACO.	48
FIGURE 22 : VUE EN HAUTEUR DE LA PARTIE NORD DE LA MANGROVE DE POUACO.	48
FIGURE 23 : TRANSECT2 SUR LE SITE DE POUACO (TRANCHEE DANS LA MANGROVE EN POINTILLE VERT).	49
TABLEAU 9 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGES DE LA RADIALE 2 DU SITE DE POUACO.	49
FIGURE 24 : ANGLE SOLAIRE EN FONCTION DU TEMPS – LA COURBE DE TENDANCE AJUSTEE EST POLYNOMIALE.	50
TABLEAU 10 : ANGLE SOLAIRE ET LAI POUR CHAQUE STATION DES 3 SITES DE MANGROVES ETUDIES.	50
FIGURES 25 A, B, C, D, E ET F : PROFILS DE POTENTIEL REDOX DES STATIONS DES 3 SITES (FAÇADE MARITIME EN BLEU, STATIONS INTERMEDIAIRES EN VERT ET STATIONS PRES DES BASSINS EN GRIS)	53
FIGURE 31 : RELATION ENTRE LE TAUX DE PHOSPHORE ET LE TAUX D'AZOTE CONTENUS DANS LES FEUILLES A PARTIR DE L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS.	55
FIGURES 26 A, B ET C : POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION ETABLI A PARTIR DES MOYENNES DE CHAQUE PROFIL MESURE A CHAQUE STATION.	56
FIGURES 27A, B ET C : PH IN SITU MOYEN MESURE EN SURFACE A CHAQUE STATION.	56
FIGURES 28A,B ET C, 29A, B ET C, 30A, B ET C : CONCENTRATION EN PHOSPHORE TOTAL, EN AZOTE TOTAL ET EN CARBONE TOTAL DANS LES ECHANTILLONS DE SEDIMENT DE CHAQUE STATION.	56
TABLEAU 11 : LISTE DES TAXA RECENSES DANS LES CADRATS REALISES SUR L'ENSEMBLE DES STATIONS.	57
TABLEAU 12 : DENSITE (Nb INDIVIDUS / M ²) PAR TAXON OU GROUPE DE TAXON ET PAR STATION.	58
FIGURE 32 : RELATION ENTRE LE NOMBRE DE TROUS DE CRABES ET LE NOMBRE DE CRABES ECHANTILLONNES SUR LES 7 STATIONS.	58
FIGURE33 : LEGENDE DES CARTES THEMATIQUES DE MANGROVE DES 4 SITES D'ETUDE.	60
FIGURE 34 : PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE LA ZONE DE OUANO EN 2004.	62
FIGURE 35 : INTERPRETATION DE LA MANGROVE DE OUANO EN 2004	63
FIGURE 36 : CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE LA MANGROVE DE OUANO EN 2004.	64
TABLEAU 13 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE OUANO ENTRE 1954 ET 2004.	66
FIGURES 37A, B, C, D ET E : EVOLUTION DE LA MANGROVE DE OUANO (1954, 1976, 1993, 1997, 2004)	67
FIGURE 38 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE OUANO ENTRE 1954 ET 2004.	67
FIGURE 39 : PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE LA MANGROVE DE SODACAL EN 2004.	69
FIGURE 40 : INTERPRETATION DE LA MANGROVE DE SODACAL EN 2004	70
TABLEAU 14 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE SODACAL ENTRE 1954 ET 2004.	73
FIGURE 42 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE SODACAL ENTRE 1954 ET 2004.	73
FIGURES 41A, B, C, D, E ET F : EVOLUTION DE LA MANGROVE DE SODACAL (1954, 1982, 1996, 1998, 2002, 2004)	74
FIGURE 43 : PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE LA MANGROVE DE POUACO EN 2004 (TRANCHEE EN VERT).	76
FIGURE 44 : INTERPRETATION DE LA MANGROVE DE POUACO EN 2004	77
TABLEAU 15 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE POUACO ENTRE 1976 ET 2004.	78
FIGURES 45A, B, C ET D : EVOLUTION DE LA MANGROVE DE POUACO (1976, 1982, 2002, 2004)	79
FIGURE 46 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE POUACO ENTRE 1976 ET 2004.	79
FIGURE 47 : PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE LA MANGROVE DE POUANGA EN 2004.	81

FIGURE 48 : INTERPRETATION DE LA MANGROVE DE POUANGA EN 2004	82
TABEAU 16 : SUPERFICIES DES DIFFERENTES STRATES VEGETALES DE LA MANGROVE DE POUANGA EN 2004.	83
FIGURE 49 : EVOLUTION DE LA SUPERFICIE RELATIVE DE LA STRATE D'AVICENNIA ET VEGETATION CLAIRSEMEE DES 3 SITES ENTRE 1954 ET 2004.	84
FIGURE 50 : EVOLUTION DE LA SUPERFICIE RELATIVE DE LA STRATE RHIZOPHORA COURTS ET/OU CLAIRSEMES DES 3 SITES ENTRE 1954 ET 2004.	84
FIGURE 51 : EVOLUTION DE LA SUPERFICIE RELATIVE DE LA STRATE DE RHIZOPHORA DENSES DES 3 SITES ENTRE 1954 ET 2004.	85
FIGURE 52 : EVOLUTION DE LA SUPERFICIE RELATIVE DE LA STRATE DE SOL NU OU AVEC SALICORNES ET/OU ENVASE OU INONDE DES 3 SITES ENTRE 1954 ET 2004.	85
FIGURE 53 : TROUEE DANS LA FORET DE RHIZOPHORA DE SODACAL.	87
FIGURE 54 : PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE LA TROUEE A L'EST DE LA DIGUE ARTIFICIELLE (SOURCE : SODACAL).	88
FIGURE 55 : INCIDENCES D'UN SOL DETREMPE SUR L'ANCRAGE, LA CROISSANCE ET LA SURVIE DE LA MANGROVE.	88
FIGURE 56: RELATION ENTRE LE POURCENTAGE D'AZOTE DANS LES FEUILLES ET LES MESURES DE LAI SUR LES 3 SITES.	91

RESUME

L'aquaculture de crevettes *Litopeneus stylirostris*, qui est apparue en 1970 en Nouvelle-Calédonie, est devenue une activité économique importante aujourd'hui avec 17 fermes en production et un tonnage de 2000 tonnes en 2004. Situées sur des zones d'arrière mangrove, les fermes exercent une pression sur l'environnement limitrophe, notamment les mangroves. Le rejet des eaux usées des fermes aquacoles dans le lagon semble constituer le principal impact sur l'environnement côtier.

La présente étude qui a été lancée dans le cadre du programme ZoNéCo a pour principal objectif l'évaluation d'éventuels impacts de l'aquaculture sur les mangroves de Nouvelle-Calédonie. Elle s'attache :

- d'une part à étudier l'évolution des différentes strates végétales d'une mangrove en terme de structure et de superficie par le biais d'analyses diachroniques de photographies aériennes de 3 sites (2 sites jouxtant des fermes aquacoles aux caractéristiques différentes et 1 site vierge) ;
- d'autre part à analyser in situ quelques paramètres physico-chimiques (pH, potentiel d'oxydo-réduction, concentrations d'azote et de phosphore totaux dans l'eau, le sédiment et les feuilles de palétuviers) et biologiques (richesse spécifique et densité des organismes mégabenthiques du sédiment à proximité des bassins) sur ces trois sites et voir dans quelle mesure ils peuvent être utilisés comme indicateurs d'impacts.

L'analyse diachronique des photographies aériennes depuis 1954 jusqu'en 2004 a mis en évidence sur les sites proches de fermes aquacoles une progression et une densification des palétuviers *Rhizophora* vers l'intérieur des terres. Cette évolution qui était minime avant construction des fermes est plus marquée depuis. En revanche, peu de changements ont été observés sur le site vierge. Parallèlement, un développement de zones envasées et l'apparition de trouées ont été observés sur les sites exploités depuis l'établissement des fermes. La description de la végétation et les mesures des paramètres physico-chimiques montrent des différences significatives entre sites et au sein même d'un site.

La pertinence des méthodologies et l'interprétation des variations intra et inter sites sont discutées. Le faible nombre d'observations ne nous permet pas d'attribuer les variations à un éventuel impact de l'aquaculture. D'autres études seront nécessaires pour valider ces résultats.

1.OBJECTIF DE L'ETUDE

1.1. Contexte

L'aquaculture de crevettes est apparue en Nouvelle-Calédonie au milieu des années 1970 avec les premières recherches sur les techniques d'élevage. L'activité commerciale a débuté dans les années 1980 avec la mise en place des fermes « La Sodacal » et « Aquamon ». La production annuelle de crevettes est passée de 65 tonnes en 1986 à 2001 tonnes en 2004. Dix sept fermes de grossissement installées en arrière de mangrove sur des zones nues et planes, appelées tannes ou prés salés, sont toutes situées sur la côte Ouest de la Grande Terre, et couvrent aujourd'hui une superficie d'environ 660 hectares.

L'importance de cette activité devrait se renforcer puisqu'il est prévu de produire en 2007, 5000 tonnes de crevettes par an sur une surface d'environ 1000 ha (GFA, 2002). La multiplication des fermes, l'augmentation de la production et le risque d'intensification des systèmes d'élevage sont susceptibles d'augmenter la pression sur l'environnement, notamment sur les mangroves et le lagon. Situées sur des zones d'arrière mangrove, les fermes exercent une pression sur l'environnement limitrophe, notamment les mangroves (conversion de portions de mangrove en ouvrages aquacoles, rejets des bassins, modification de l'écoulement des eaux pluviales, etc.), qu'il est important d'évaluer.

Dans le cadre d'une gestion durable de l'environnement et de ses ressources, il est crucial que ce développement ne se traduise pas, à terme, par un impact négatif sur ces écosystèmes.

Le rejet des eaux usées des fermes aquacoles dans le lagon semble constituer le principal impact sur l'environnement côtier. Les effluents engendrent un apport en matière organique dans le milieu marin. Une étude a été menée par l'IFREMER et l'IRD en 1995 et 1997, relative à l'état de la baie de Chambeyron avant et après la mise de la ferme « Les Pénéides de Ouano ». En revanche, le devenir de ces effluents au niveau de la mangrove reste méconnu.

Face à la quasi absence de données sur les impacts directs et indirects de ces effluents sur l'écosystème mangrove, la cellule « Bathymétrie – Environnement » du programme ZoNéCo a proposé le lancement d'un programme à partir de 2004, consacré aux impacts de l'aquaculture de crevettes sur l'environnement. Ce programme intègre deux études :

1. Evaluation de l'impact de l'aquaculture sur les mangroves de Nouvelle-Calédonie ;
2. Recherche d'indicateurs des effluents des élevages de crevettes de Nouvelle-Calédonie et modélisation des flux de nutriments.

La première qui fait l'objet de ce rapport, est coordonnée par un consultant privé, Sabrina Virly Consultant, avec la collaboration de l'IFREMER, du SMAI, de l'IRD et d'un spécialiste de cette problématique (AIMS Townsville – Australie).

L'équipe de l'IFREMER Nouvelle-Calédonie, en collaboration avec l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC), est responsable de la seconde étude.

1.2. Propositions d'orientation de l'étude

L'objectif de cette étude est de contribuer à la connaissance des impacts directs et indirects de la crevetticulture sur la mangrove. Deux approches complémentaires sont proposées :

- Le traitement et l'analyse de photographies aériennes des mangroves à proximité des fermes aquacoles prises à différentes époques ;
- la vérification *in situ* des différentes strates végétales mises en évidence par photographies aériennes, de leurs caractéristiques (superficie, densité, etc.) et de leur état de santé global. Le travail de terrain inclut également l'analyse de quelques paramètres physico-chimiques et biologiques de différents compartiments (eau, sédiment, feuille, communautés d'invertébrés).

Ces deux approches ont pour but de :

- aboutir à une cartographie thématique des mangroves étudiées sachant que le traitement d'images aériennes ou satellitaires représente un mode d'investigation intéressant en raison des difficultés d'accès sur le terrain ;
- tester et mettre en évidence des indicateurs des impacts de l'aquaculture sur les mangroves.

Un premier rapport, publié en juin 2004, a recensé l'ensemble des sites d'étude disponibles et les critères de sélection retenus pour choisir trois sites pilotes.

Le présent rapport final, qui est une synthèse de l'ensemble des méthodologies et des résultats de l'étude, se décline de la façon suivante :

- Synthèse bibliographique relative aux approches méthodologiques et aux résultats des études de l'impact de l'aquaculture sur les mangroves et cas d'études à l'étranger.
- Méthodologies développées dans le cadre de la présente étude ;
- Choix des sites d'études ;
- Description des investigations de terrain et analyses des résultats ;
- Géotraitements des photographies aériennes, cartographies thématiques des mangroves sélectionnées et analyses diachroniques.

2. METHODOLOGIE

2.1. Synthèse bibliographique

2.1.1. Thèmes traités

Des recherches ont été réalisées sur trois principaux thèmes :

2.1.1.1. *Activité aquacole en Nouvelle-Calédonie*

Dans le but de mieux cerner cette activité en Nouvelle-Calédonie et particulièrement les rejets, des informations ont été collectées sur :

- Les fermes aquacoles existantes et les sites potentiels ;
- La production des fermes aquacoles de Nouvelle-Calédonie ;
- Leur fonctionnement, particulièrement en terme de rejets.

2.1.1.2. *Cas d'études de l'impact de l'aquaculture sur la mangrove*

Des exemples d'impacts sur la mangrove dans le monde ont été recherchés afin d'en analyser les principaux résultats et d'en tirer des conclusions en terme des :

- Impacts de la conversion de zone de mangrove en bassins aquacoles ;
- Impacts du fonctionnement de fermes aquacoles sur les zones avoisinantes.

La bibliographie relative aux cas d'études rencontrés à travers le monde a permis de mettre en évidence des indicateurs d'impacts dont certains ont été retenus dans le cadre de la présente étude en Nouvelle-Calédonie.

2.1.1.3. *Approches méthodologiques*

La synthèse bibliographique a également pour but de rechercher des approches méthodologiques tant en terme d'études sur le terrain que de méthodes de traitement et d'analyse de données photographiques et cartographiques.

Un certain nombre de références ont été rassemblées concernant les géotraitements de photographies aériennes, leur intérêt et leur efficacité en fonction des objectifs de l'étude et des caractéristiques des images (couleur, résolution, échelle, etc.).

2.1.2. Moyens mis en oeuvre

Les recherches de références bibliographiques relatives aux thèmes précédemment cités ont été principalement réalisées à la station aquacole de l'IFREMER, à la bibliothèque de l'IRD à Nouméa et sur internet.

La constante collaboration avec l'IFREMER et le SMAI a permis d'augmenter le nombre de références relatives aux trois thèmes précédemment cités.

2.2. Investigations de terrain

2.2.1. Choix des sites

Les sites ont été sélectionnés en fonction de plusieurs critères dont l'importance a été appréciée et discutée par les différents partenaires du programme ZoNéCo au cours d'une réunion qui a eu lieu à l'ADECAL en juin 2004.

A) Les critères primordiaux retenus dans le choix des sites sont :

- Age de la ferme : Pour pouvoir étudier l'impact de l'accumulation des rejets sur la mangrove, il est important de comparer une ferme ancienne et une plus récente (cette dernière doit toutefois avoir cumulé plusieurs cycles de production pour pouvoir noter un impact s'il en existe un) ;
- Type d'évacuation des rejets : Pour pouvoir étudier l'impact des rejets sur la mangrove, il est nécessaire que les rejets soient évacués directement dans la mangrove et non via un canal d'évacuation des effluents.

B) Parallèlement, d'autres critères ont été proposés pour affiner la sélection des sites :

- Degré d'intensification des élevages ;
- Configuration et agencement des bassins semblables par rapport à la mangrove ;
- (Taille des fermes et méthode de production comparables) ;
- Similitude en terme de configuration de mangrove comme par exemple la taille, la zonation ;
- Disponibilité d'informations sur les caractéristiques des fermes aquacoles et particulièrement de leurs rejets – Existence d'études antérieures ou actuelles ;
- (Autorisation d'accès aux sites et logistique disponible sur les sites).

Après discussion avec le groupe technique, les arguments présentés ci dessus entre parenthèses n'ont pas été retenus comme critères de choix.

Après l'établissement de la liste des fermes aquacoles en fonctionnement, des projets de fermes en cours et des projets à venir, les différents intervenants se sont accordés à sélectionner **4 sites** (2 en Province Sud et 2 en Province Nord) :

- 2 sites proches de fermes en cours d'activité (de niveau d'intensification et d'âge différents) ;
- 1 site proche d'une ferme prochainement construite ;
- 1 site de mangrove vierge aux configurations proches de celles des précédents.

La première sélection s'est faite par élimination des sites ne présentant pas de rejets directs dans la mangrove. La sélection finale a tenu compte des études en cours, notamment l'étude portée par l'IFREMER dans le cadre du programme ZoNéCo, relative à la « Recherche d'indicateurs d'effluents des élevages de crevettes et modélisation des flux de nutriments », en s'accordant sur un choix de sites communs.

2.2.2. Elaboration du plan d'échantillonnage

Sur les 4 sites sélectionnés, seuls trois ont fait l'objet d'investigations de terrain, suivant le cahier des charges originel de la présente prestation.

Sur chacun des 3 sites,

- **deux radiales perpendiculaires à la côte** ont été réalisées en partant de la sortie d'un bassin et aboutissant à la frange maritime de la mangrove.

Le choix de la direction de ces radiales a pour but la mise en évidence d'un **éventuel gradient côte – large** des paramètres physico-chimiques et chimiques à mesurer. Les modifications par rapport à un site vierge pourraient être un indicateur potentiel d'un impact du fonctionnement des bassins aquacoles sur la mangrove.

Sur chacune des 2 radiales,

- un nombre de stations d'échantillonnage est déterminé en fonction du nombre de strates végétales différentes rencontrées. En général, il a été retenu de réaliser **4 stations par radiale**. Il est possible de réduire ou d'augmenter le nombre de stations en fonction de l'intérêt et des particularités de certaines zones dans la mangrove.

Sur chaque station,

- un ou plusieurs compartiments ont été étudiés. On appelle ici compartiment une entité biotique ou abiotique sur laquelle ont été mesurés différents paramètres. Au total, **4 compartiments ont été retenus** pour cette étude. Il s'agit de l'eau de mer, du sédiment, des feuilles de palétuviers et de la faune mégabenthique vivant dans le sédiment. Les coordonnées géographiques de chaque station ont été relevées à l'aide d'un GPS de marque Garmin en WGS84. Leur superposition sur les photographies aériennes ou les cartes a été réalisée dans le système IGN72 – UTM58S.

Pour chaque compartiment,

- **3 prélèvements correspondant à 3 réplicats** ont été effectués afin que les résultats soient statistiquement interprétables. Sur chaque échantillon, une ou plusieurs mesures de paramètres physico-chimiques ont été réalisées.

2.2.3. Description qualitative de la structure de la mangrove

Il s'agit de décrire et caractériser la mangrove en terme de **composition et structure des communautés végétales**. Une liste d'espèces végétales a été établie.

Une description globale qualitative a précédé l'analyse de la biodiversité floristique (Type de mangrove, zonation et représentativité).

Cette phase de terrain a pour l'objectif de confirmer et d'affiner la distribution géographique des strates végétales mises en évidence à partir de photographies aériennes.

2.2.4. Description de la faune mégabenthique de la mangrove

Les **communautés mégabenthiques** ont été échantillonnées par la méthode des cadrats. Le matériel utilisé est illustré sur la figure 1.

Il s'agit de réaliser des comptages des différents organismes dans un volume de sédiment prédéfini après tamisage (cadrat de 0,25 m² sur environ 20 cm d'épaisseur). Une liste des espèces mégabenthiques (voire des genres ou des familles) et une densité moyenne par espèce ont été établies.

Ces cadrats, géoréférencés à l'aide d'un GPS ont été réalisés à l'interface bassin aquacole - pré salé, sur des zones émergées à la limite de la strate de palétuviers blancs **Avicennia** sp. Le nombre de cadrats est limité à 2 par site (1 au début de chacune des radiales).

Une attention particulière a été portée aux crabes qui sont considérés dans certains cas comme de bons indicateurs faunistiques (Clough, com. pers. ; Anderson et al., 2004).



Figure 1 : Matériel utilisé pour réaliser les comptages de la mégafaune benthique lors des missions de terrain en octobre 2004.

2.2.5. Prélèvements d'échantillons et mesures de paramètres physico-chimiques

Sur chaque site, des échantillons d'eau de mer, de sédiment et de feuilles de palétuviers ont été effectués ; le nombre d'échantillons varie en fonction de la taille du site et du nombre de différentes strates végétales rencontrées. Les échantillons sont réalisés au niveau de chaque station positionnée le long de deux radiales sélectionnées.

Les paramètres à relever sont récapitulés dans le tableau 1. Ils ont été sélectionnés d'après la bibliographie comme indicateurs potentiels des impacts de l'aquaculture ou tout au moins facteurs partiellement explicatifs des variations observées entre sites, et sont testés dans le cas présent.

Le potentiel d'oxydo-réduction (eH) est un indice du degré d'oxydation ou de réduction dans les systèmes chimiques. La mesure de eH a déjà été utilisée comme moyen rapide d'évaluation d'un impact potentiel d'apport organique dans les sédiments marins (English et al, 1997).

Un eH bas correspond à un milieu réduit où la dégradation de la matière organique se fait en conditions anaérobies, impliquant le fer ou les sulfates dans le processus. Des conditions anaérobies poussées peuvent conduire à la production de sulfures à l'odeur nauséabonde caractéristique.

Un eH élevé correspond à un milieu oxydé où la dégradation de la matière organique se fait plutôt en conditions aérobie.

Le pH mesuré in situ mesure l'acidité du sol en l'état. L'acidité des sols influence la transformation chimique de la plupart des nutriments et de leur disponibilité aux plantes (English et al, 1997).

Le dosage de l'azote et du phosphore totaux dans les différents compartiments de la mangrove peut donner une indication sur les apports exogènes de ces éléments comparativement à une mangrove ne recevant aucun effluent.

Les appareils mis à disposition par l'IFREMER et utilisés pour mesurer les paramètres physico-chimiques du sol et de l'eau sont présentés dans les figures 2 et 3. Il s'agit de un pH mètre Sentron avec une électrode Sentron Red-Line LanceFET et d'un pH/mv mètre Knick 651 avec une électrode Cofralab PT 5700A.

L'utilisation de la sonde de mesure du potentiel rédox est illustrée sur la figure 4 (Hussenot et al., 1995). Après carottage du sédiment, le potentiel rédox est mesuré en introduisant l'électrode dans les orifices distants de 3 cm sur toute la longueur de la carotte, correspondant aux différentes profondeurs comprises entre 10 et 40 cm. Le potentiel d'oxydo-réduction est rapporté à l'électrode d'hydrogène.

Tableau 1 : Caractéristiques des relevés physico-chimiques des échantillons des différents compartiments des 3 sites réalisés lors de la campagne d'octobre 2004.

Paramètres / Compartiments	Eau	Sédiment	Feuille
pH	X	X	
Potentiel redox eH		X	
Azote total	X	X	X
Phosphore total	X	X	X
Description (Nature/Espèce)		X	X

Les analyses chimiques des échantillons d'eau d'une part, de sédiment et de feuilles d'autre part ont été réalisées respectivement au laboratoire de chimie de l'Unité de Recherche « Camélia » de l'IRD de Nouméa et aux laboratoires de chimie générale de l'IRD de Nouméa et de Cayenne.

Le dosage de l'azote total est effectué au moyen d'un auto analyseur élémentaire de type Bran-Luebbe III après une oxydation des composés organiques en substances minérales. La méthode de Raimbault et al. (1999) d'oxydation par voie humide est celle utilisée au laboratoire de Chimie Marine.

Le dosage du phosphore total se fait selon la méthode de Murphy et Riley (1962) qui consiste en une fusion au moyen d'hydroxyde de sodium à 450°C, puis un dosage colorimétrique à 660 nm.



Figures 2 et 3 : pHmètre et pH/mvmètre utilisés pour les mesures de terrain en octobre 2004.



Figure 4 : Mesure du potentiel rédox dans une carotte de sédiment prélevée en frange maritime de mangrove en octobre 2004.

2.2.6. Mesure d'indice foliaire

L'indice de surface foliaire « Canopy Leaf Area Index » ou LAI, exprimé en m² de surface foliaire sur m² de surface du sol, est mesuré en utilisant la méthode de Clough et al. (1997). Il indique la quantité de lumière pouvant pénétrer la canopée par rapport à celle mesurée sur un sol nu.

Cette méthode est utile pour comparer des forêts entre elles parmi une variété de forêts ou de suivre des changements dans une forêt particulière (English et al., 1997).

L'estimation du LAI est basée sur l'hypothèse que la radiation diminue exponentiellement lorsqu'elle traverse la canopée :

$$I = I_0 \exp - (k L)$$

- I : densité de flux de photons sous la canopée ;
- I₀ : densité de flux de photons au dessus de la canopée ;
- L : indice foliaire LAI ;
- K : coefficient d'extinction de la lumière par la canopée qui est déterminé par l'arrangement spatial et l'angle des feuilles.

Le coefficient d'extinction est fixé à 0,56 pour une forêt de ***Rhizophora***.

La densité de flux de photons au dessous et au dessus de la canopée est mesurée à l'aide d'un photomètre de marque LICOR 190SB (Figure 5).

Cet appareil composé d'un capteur et d'un écran de contrôle permet de visualiser la valeur de la radiation lumineuse reçue sur le capteur positionné verticalement. A chaque station, un minimum de 50 mesures (généralement au moins 75) sont effectuées de façon aléatoire sous la canopée. Toutes mesures sont généralement réalisées entre 10h30 et 15h30 afin de minimiser les erreurs associées aux faibles valeurs d'angles que fait le soleil avec le zénith (angle solaire).

Avant et après la série de mesures faites sous la canopée, un relevé supplémentaire est réalisé sur une zone nue afin de calculer I₀.



Figure 5 : Utilisation du photomètre dans une forêt de palétuviers *Rhizophora stylosa*.

Toutes les mesures sont corrigées en tenant compte de l'angle solaire. Une technique simple a été mise en œuvre afin de déterminer cet angle ; elle consiste à mesurer l'ombre portée d'un bâton d'une cinquantaine de cm planté verticalement sur une zone plane et la diviser par la longueur totale du bâton (Figure 6). Les mesures d'angles solaires sont effectuées aléatoirement à différents moments de la journée au cours de la période d'échantillonnage. Les angles obtenus sont reportés sur un graphique afin de tracer une courbe journalière de l'angle solaire qui sera prise en compte dans la correction des mesures de LAI.



Figure 6 : Mesure de l'angle solaire avec le zénith.

2.3. Traitements et analyses de données de terrain

2.3.1. Analyses des paramètres physico-chimiques dans les différents compartiments échantillonnés

En collaboration avec Hugues Lemonnier (IFREMER) et Barry Clough (AIMS), les valeurs obtenues de pH, du potentiel rédox eH et des taux d'azote total et de phosphore total sur les échantillons collectés dans la mangrove jouxtant les fermes aquacoles de Ouano et Sodacal ont été interprétées par comparaison :

- Intra-site, le long des radiales ;
- Inter-site avec celles obtenues sur le site vierge (Pouaco) ;
- Avec les valeurs obtenues dans d'autres zones de mangrove étudiées dans le monde.

2.3.2. Calcul et interprétation des LAI (« Leaf Area Index »)

Un logiciel de calcul des LAI a spécialement été programmé par Barry Clough sous Microsoft Access. Equipé de plusieurs modules, il permet la saisie des données de radiations lumineuses mesurées *in situ* et le calcul des LAI correspondantes.

Les différentes valeurs de l'angle solaire mesurées au cours de la période de terrain ont été reportées sur un diagramme afin d'en tracer une courbe en fonction du temps. Cette courbe de tendance a été intégrée dans le programme de calcul des LAI dans le but d'apporter une correction aux valeurs brutes mesurées *in situ*.

L'interprétation des LAI a été réalisée par comparaison avec celles obtenues dans d'autres mangroves étudiées de par le monde (Clough et al., 1997 ; Clough et al., 2000).

2.4. Acquisition, traitements et analyses des photographies aériennes

2.4.1. Acquisition et tri

Il s'agit de collecter et de rassembler l'ensemble des photographies aériennes historiques couvrant la plus grande période possible relatives aux mangroves des 4 sites sélectionnés, qui sont disponibles au sein de différents organismes publics ou privés.

Parallèlement, une série de photographies de 2004 a été commandée à la société SPP de Nouméa et a été réalisée en septembre 2004 à partir d'un avion spécialement équipé venu d'Australie. Pour chaque site, plusieurs photographies ont été réalisées couvrant l'ensemble des zones d'intérêt prédéfinies.

La zone d'intérêt de chaque site est définie de telle façon qu'elle englobe l'ensemble de la mangrove depuis les bassins jusqu'à la frange maritime de la mangrove.

Un premier tri a été effectué afin :

- de conserver les photographies qui couvrent uniquement la zone d'intérêt prédéfinie ;
- d'éliminer les photographies dont la qualité est incompatible avec une photo-interprétation correcte et fiable.

2.4.2. Numérisation

Cette étape consiste à transformer en format numérique une image enregistrée initialement sur une épreuve photographique.

Les photographies ont été numérisées au SMAI à l'aide d'un scanner Epson Expression 1640 XL. Elles ont été scannées à 600 dpi, compromis acceptable entre la précision nécessaire à l'interprétation des données et le taille des fichiers générés.

2.4.3. Géoréférencement

Le géoréférencement ou correction d'image est un ajustement géométrique d'une image pour compenser des erreurs. L'ortho rectification consiste en un redressement d'une image en perspective classique de sorte que les déplacements d'image causés par l'inclinaison ou le relief du terrain sont supprimés.

Dans le cadre de l'étude, les photographies sélectionnées et numérisées ont été géoréférencées dans un même système de coordonnées caractérisé par :

- Le datum : IGN72
- Le système de projection : UTM58S
- Les unités : en mètres

Elles n'ont pas nécessité d'ortho rectification du fait de l'absence de relief dans la mangrove.

Les données de référence qui ont servi à géoréférencer les photographies sont les cartes au 1/10 000 ième de la DITTT issues de la base de données TOPO et disponibles au SMAI (Annexe 1).

Le logiciel utilisé est ArcGis 8.3.800.d dont le module Arc Map possède un applicatif de géoréférencement.

2.4.4. Photo-interprétations

Deux voies ont été explorées : la digitalisation permettant la création d'images vectorielles et la classification non supervisée engendrant des images raster. Le choix de la première est basé sur l'analyse des références bibliographiques relatives aux traitements d'images aériennes de mangrove et qui ont prouvé l'efficacité de la digitalisation pour l'interprétation des différentes strates végétales (Al-Tahir, 1998 ; Duke et al, 2003 ; Green et al, 2000). La seconde qui est plus souvent utilisée sur des photographies satellitales de mangroves (Green et al, 2000) est également retenue pour être testée dans le cas présent et voir dans quelle mesure elle apporte des précisions supplémentaires par rapport à la digitalisation.

2.4.4.1. Digitalisation

Ce procédé consiste à encoder la description géométrique d'objets géographiques (point, ligne, polygone) sous forme numérique (série de coordonnées).

Les différentes formations végétales ont été contournées formant ainsi des polygones.

Les valeurs de l'attribut « type de formation végétale » tiennent compte de :

- la formation végétale (Tannes nues ou avec salicornes, ***Avicennia***, ***Rhizophora***, végétation indéterminée) ;
- la densité de la formation (clairsemée, moyennement dense, dense).

Pour chaque site, il y a autant de couches d'informations qu'il y a d'années pour lesquelles une photographie aérienne existe. L'ensemble des couches a été regroupé sous un projet Arc Gis.

Les digitalisations ont permis la réalisation de cartes illustrées par une légende commune englobant toutes les strates végétales rencontrées. La symbologie associée à la légende a été choisie de telle façon qu'elle mette clairement en évidence les différentes formations végétales ainsi que leur niveau de densification.

2.4.4.2. Classification non supervisée

C'est une classification de données d'image numérique par traitement informatique appelé algorithme de classification non supervisée, uniquement basé sur les statistiques d'image sans recours à des échantillons de vérité terrain.

Cette méthode consiste en un regroupement naturel des pixels de l'image à traiter que l'on nomme « classe ». Ainsi, on présume que les régions de l'image ayant une même signature spectrale ont un type de sol similaire. Le thématicien doit ensuite déterminer l'identité de ces regroupements spectraux en précisant le nombre pertinent de classes à retenir et les valeurs limites de ces classes.

Ce traitement a été réalisé à l'aide du logiciel Erdas.

2.4.5. Analyses

2.4.5.1. Evaluation de superficies, de linéaire et d'indices

A partir des tables attributaires des cartes thématiques créées sous Arc Gis, les superficies en m² de chaque polygone ont été extraites puis regroupées par type de mangrove afin de calculer la superficie totale de chaque formation végétale au sein d'un même site pour les différentes époques étudiées.

Par ailleurs, l'indice d'ouverture correspondant au rapport façade maritime / façade terrestre ainsi que l'indice de potentialité d'échange avec les eaux côtières ont été calculés afin de caractériser les mangroves originelles.

$$I_{ouv} = FM / FT$$
$$I_{ech} = S \times (FM / FT)$$

2.4.5.2. Analyses diachroniques

Pour chaque site, les cartes thématiques par année ont été comparées afin de mettre en évidence une évolution des différentes formations végétales en terme de superficie (régression, progression ou stabilisation) mais également de positionnement géographique (remplacement d'une strate par une autre).

2.4.6. Archivage

Les photographies utilisées pour l'interprétation ont été archivées dans une base de donnée photographique du SMAI. L'ensemble des données traitées a également été stocké dans une autre base de données.

Un accès aux photographies et aux données interprétées est prévu pour l'ensemble des partenaires du programme ZoNéCo.

2.4.7. Synthèse de la chaîne de traitement

L'ensemble des opérations de géotraitement réalisées dans le cadre de la présente étude est récapitulé dans la figure 7. Ces méthodes sont communément utilisées pour étudier des

changements temporels et spatiaux sur une zone donnée (Al-Tahir, 1998 ; Cazadilla et al., 2002 ; Dahdouh-Guebas, 2002 ; Duke et al., 2003 ; Manson et al., 2003 ; Perez et al., 2002 ; Verdeyden et al., 2002).

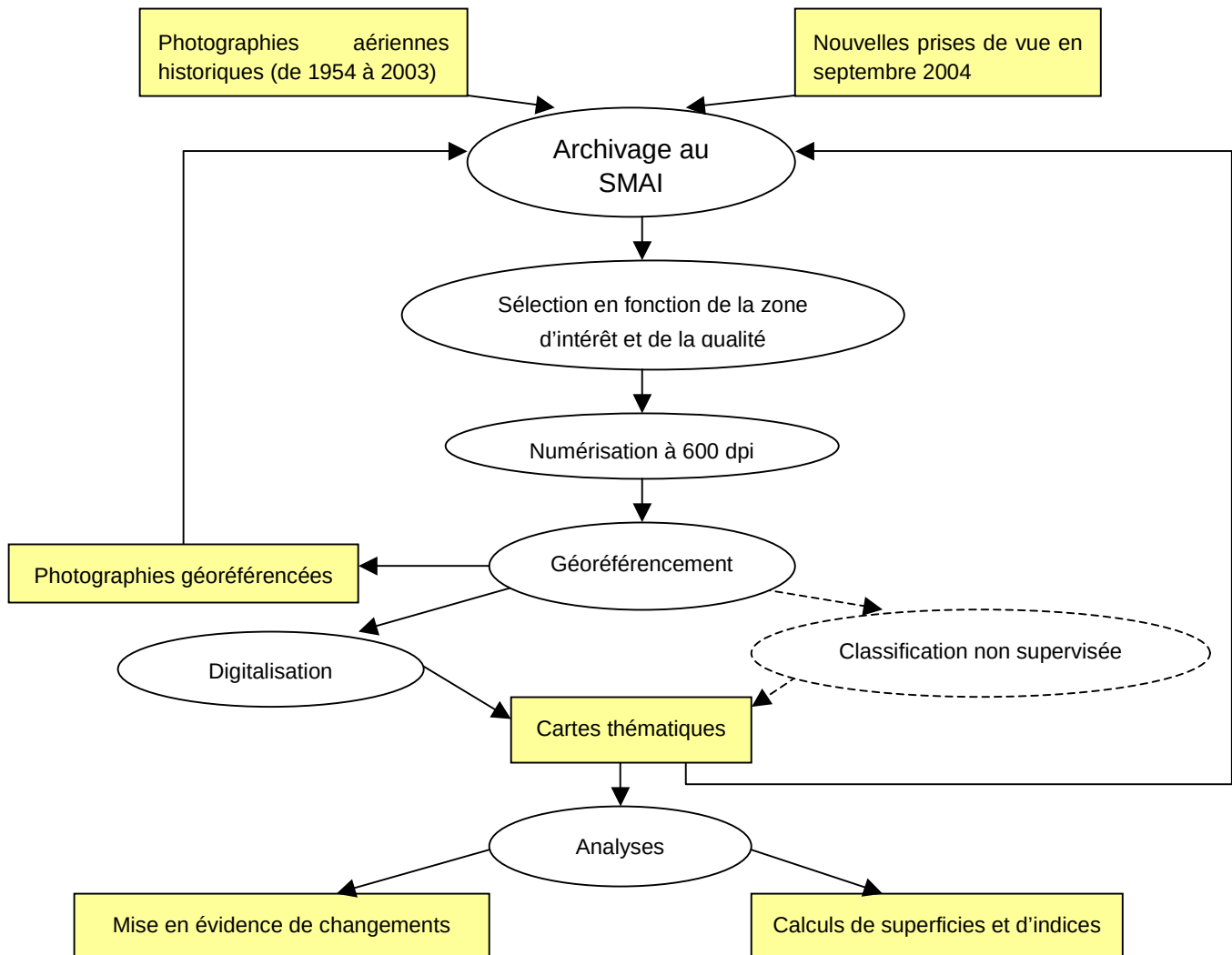


Figure 7 : Chaîne de traitements appliquée aux photographies aériennes et produits obtenus dans la cadre de la présente étude.

3.SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE RELATIVE AUX IMPACTS DE L'AQUACULTURE SUR LA MANGROVE

3.1. Adaptations éco-physiologiques de la mangrove face à différents stress

3.1.1. Particularités de la mangrove

La mangrove est une formation typiquement tropicale se développant sur les sols salés et vaseux soumis à une alternance des marées. Constituant une **interface** entre le milieu terrestre et le milieu marin (herbiers, fonds meubles et récifs coralliens), elle interagit donc avec les écosystèmes environnants.

Parmi ses différents rôles, sa fonction de **biofiltre** est de nos jours reconnue (Gautier et al., 2001). Elle présente en effet une **capacité importante de rétention et de traitement de matières dissoutes mais surtout particulières d'origine organique et minérale** provenant :

- soit de sa propre productivité qui est très élevée (feuilles et racines constituant la litière) ;
- soit de sources extérieures (apports naturels par les pluies par exemple ou anthropiques par le déversement d'effluents domestiques, aquacoles ou agricoles par exemple).

Si la productivité élevée des mangroves est généralement contrôlée naturellement par la capacité de rétention que présente le sol et le système racinaire, les apports extérieurs ne sont pas toujours traités et assimilés par la mangrove. Leur assimilation dépend de la nature et de la quantité des rejets ainsi que des conditions physico-chimiques et biologiques du milieu récepteur.

Si les sols saturent du fait de quantités trop élevées de matières en suspension ou dissoutes, une accumulation de ces matières peut se produire pouvant engendrer des conséquences néfastes sur l'écosystème (modifications des caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol et de l'eau notamment en terme de disponibilité en oxygène).

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer le fonctionnement et la santé de cet écosystème.

Le **régime hydrologique** est un des paramètres les plus importants gouvernant la survie et la croissance des mangroves. Il englobe plusieurs facteurs sous-jacents tels que la fréquence d'immersion, la pente, la composition physique du sol, les apports d'eau douce, l'exposition aux vagues, la direction et la vitesse des courants localisés. Tout cela a un effet direct ou indirect sur l'approvisionnement en plantules ainsi que sur la dissémination des maladies.

L'ensemble de ces facteurs détermine une limite écologique pour chaque espèce de palétuviers qui poussera ou non compte tenu de ses **adaptations écophysiologiques aux différents stress**. Ils doivent être pris en considération (mesure et suivi) afin de pouvoir distinguer les processus naturels existant dans la mangrove de ceux liés à l'action de l'homme tels que la construction et le fonctionnement d'une ferme aquacole par exemple (Clough, 2005).

L'hydrologie, et dans une moindre mesure le climat, sont des facteurs clés qui influencent les causes majeures de stress que les mangroves doivent gérer (Figure 8) :

- Stress lié aux à l'eau et au sel ;
- Stress lié à la température ;
- Stress lié à l'oxygène (conditions anoxiques).

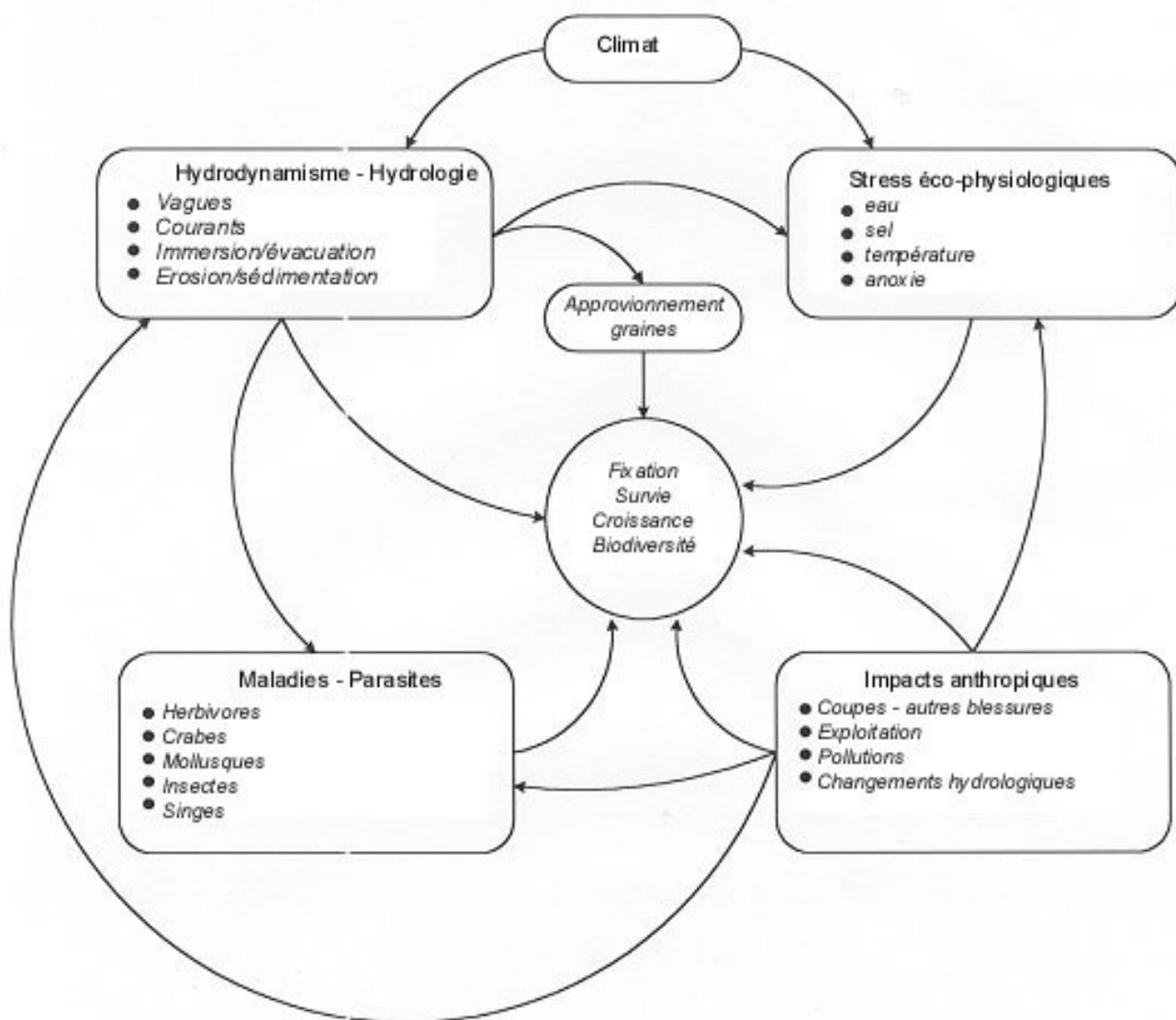


Figure 8: Interaction entre les différents facteurs pouvant affectés l'établissement, la survie et la croissance des palétuviers (d'après Clough, 2005).

3.1.2. Stress lié à l'eau et au sel

Les fortes salinités du sol influencent la survie et la croissance des palétuviers de deux façons :

- Premièrement, elles rendent le **pompage de l'eau par les racines plus difficiles** du fait notamment d'une pression osmotique extérieure (sol) plus élevée que celle à l'intérieur des racines (Clough et al., 1982 ; Ball, 1988 ; Passioura et al, 1992) ;
- Deuxièmement, le surplus de sel absorbé par les plantes peut **affecter le métabolisme** de manière irréversible (Flowers et al, 1977) :

- Les racines qui ont été endommagées ou cassées, **perdent souvent leur capacité à exclure le sel** et constituent par ailleurs une porte d'entrée directe d'eau salée sans être filtrée par une membrane habituellement présente à la périphérie des racines. Certaines espèces qui possèdent des glandes à sels comme les *Avicennia*, sont plus tolérantes aux blessures sur leurs racines, contrairement aux *Rhizophora*, *Bruguiera*, *Xylocarpus* ou aux *Heritiera*.
- Les **problèmes chroniques de croissance** peuvent également apparaître lorsqu'une exposition à des salinités élevées est exacerbée par des fortes expositions au soleil augmentant la perte en eau. Les arbres, particulièrement au cours de leur premier stade de développement, développent un **système racinaire aérien important** nécessitant plus de carbone (Clough et al., 1997). La croissance des branches et des feuilles est alors ralentie lorsque les pertes en d'eau (évapotranspiration des feuilles) sont plus importantes et plus rapides que les apports (pompage de l'eau dans le sol par les racines). Face à l'évapotranspiration, les palétuviers ont développé un système de fermeture de leurs stomates au niveau des feuilles, qui engendre également malheureusement une réduction de l'apport en CO₂ nécessaire à la photosynthèse. La **photosynthèse étant limitée**, la croissance l'est également. Ce phénomène est plus fréquent dans des régions arides ou avec une saison sèche bien marquée comme en Nouvelle-Calédonie où les mangroves sont moins luxuriantes que celles des zones équatoriales humides.
- Des **problèmes de colonisation du milieu par certaines espèces**, liés à des expositions importantes au sel, sont plus fréquents lorsque les sols sont peu voire pas inondés (du à un niveau plus élevé du sol). C'est une des raisons pour laquelle les *Avicennia* spp. qui sont plus tolérants au sel que les *Rhizophora* spp., ont généralement colonisé les zones plus hautes et plus souvent asséchées sur la frange interne de la mangrove, là où les *Rhizophora* spp. ont du mal à pousser.

3.1.3. Stress lié à l'oxygène

Les sols de mangrove présentent généralement des conditions moyennement à fortement anaérobies du fait de leur nature détrempée. Face à cette contrainte, les palétuviers ont développé un système de racines aériennes (pneumatophores, racines contrefort, racines genouillées, racines ergot) qui représente une voie d'absorption et de diffusion de l'oxygène jusqu'aux racines souterraines.

Ces racines aériennes n'apparaissent généralement pas avant 4 à 8 mois suivant l'ancrage des plantules. Or l'oxygène est nécessaire dès les premiers stades de développement ; c'est pourquoi, **les plantules ont plus tendance à souffrir du manque d'oxygène** que les arbres adultes sur des sols en majeure partie détrempés.

Le manque d'oxygène est généralement associé à des zones basses souvent inondées, où l'eau a du mal à s'évacuer naturellement. L'évacuation est fonction de :

- la différence de niveau entre le sol et celui de l'eau de mer à marée basse (Plus l'écart est important, meilleure est l'évacuation) ;
- la conductivité hydraulique liée à la porosité du sol (un sol vaseux est faiblement poreux du fait du peu d'espaces entre les particules et présente donc une faible conductivité hydraulique) ;
- la pente et la distance comprise entre la zone d'évacuation et la laisse des plus basses mers (l'évacuation est ralentie lorsque la pente est faible et la distance importante).

L'évacuation d'eau de la mangrove vers la mer, qui peut être comparée à celle d'un réservoir en hauteur vers un autre réservoir plus bas via un tuyau (Figure 9), peut donc s'exprimer par la relation suivante :

$$u = \frac{(h_2 - h_1) \cdot d}{l}$$

où

- ***u* est le débit**
- ***h₂ - h₁* la différence de niveau entre la zone d'évacuation et la laisse des plus basses mers**
- ***d* la section du tuyau correspondant à la taille des pores dans le sol**
- ***l* la longueur du tuyau correspondant à la distance entre la zone d'évacuation et la laisse des plus basses mers**

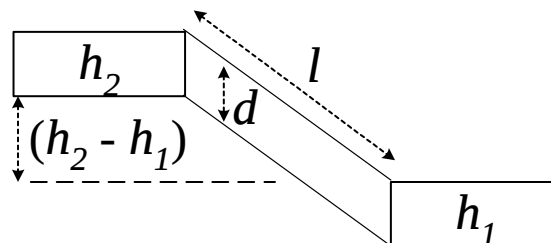


Figure 9 : Schéma d'écoulement entre 2 réservoirs via un tuyau.

Les terriers des crabes et plus généralement l'activité biologique (méiofaune et macrofaune) contribuent à augmenter l'oxygénation des sols en :

- améliorant l'évacuation de l'eau de mer ;
- permettant l'arrivée d'oxygène directement au niveau des racines souterraines et jouant donc un rôle indirect dans les processus de minéralisation avec une augmentation du potentiel redox (Nielsen et al., 2003).

De fortes concentrations en matière organique dégradable dans le sol sont un autre facteur qui contribue au stress anoxique. Le carbone organique est en effet la première source de carbone utilisée par le métabolisme bactérien aérobie puis anaérobie qui engendre une succession de réactions de réduction. Au début, ce sont les microorganismes aérobies utilisant l'oxygène contenu dans le sol qui dégradent la matière organique. Ensuite, ce sont d'autres microorganismes qui réduisent les nitrates en ammonium NH_4^+ voire en azote N_2 , mais également d'autres éléments tels que le manganèse et le fer (Clough et al, 1983, Alongi et al, 2002). La réduction par voie anaérobie peut conduire à la production de sulfures (FeS , Fe_2S_3 , H_2S) qui, accumulés en grande quantité, peuvent devenir toxiques pour la faune et la flore.

Plus le sol contient de matière organique dégradable, plus il présente des conditions anaérobies et plus il peut engendrer de risque de toxicité pour l'écosystème.

En absence de stress anoxique, le surplus d'oxygène a tendance à diffuser depuis les racines en créant une couche superficielle tampon de 1 à 5 mm d'épaisseur, appelée « Oxidised Rhizosphere ».

Cette couche a plusieurs fonctions :

- Elle limite l'exposition de la surface des racines à un milieu réducteur ;
- Elle modifie les formes disponibles de certains éléments chimiques :
 - ***Le fer est présent sous forme Fe^{3+} , inerte, dans un milieu oxydé et sous forme Fe^{2+} toxique dans un milieu réducteur ;***
 - ***L'azote devient de l'ammonium NH_4^+ en conditions anaérobies, et NO_3^- en conditions aérobies.***

En présence de cette couche, la couleur du sol autour des racelles est plutôt orangé clair ; en son absence (conditions anoxiques), la couleur devient gris foncé à noire, indicateur d'un milieu réducteur (potentiel rédox bas). L'absence de cette couche engendre des problèmes d'absorption d'azote sous leur forme inerte pouvant entraîner la mort des jeunes plantules (Boto et al., 1985).

Ainsi, de faibles potentiel rédox (< -150 mV) ou encore l'absence de la couche superficielle d'oxygène autour des racelles appelée « Oxidised rhizosphere » sont autant d'indicateurs de conditions anaérobies, voire de stress lié à l'anoxie.

3.1.4. Synthèse sur les stress éco-physiologiques d'une mangrove

L'ensemble des stress liés principalement aux facteurs hydrologiques est résumé sur la figure 10.

Les différentes espèces de palétuviers présentent une capacité d'adaptation spécifique aux différents stress jusqu'à une certaine limite. Au delà, leur établissement, leur survie et leur croissance en dépendent.

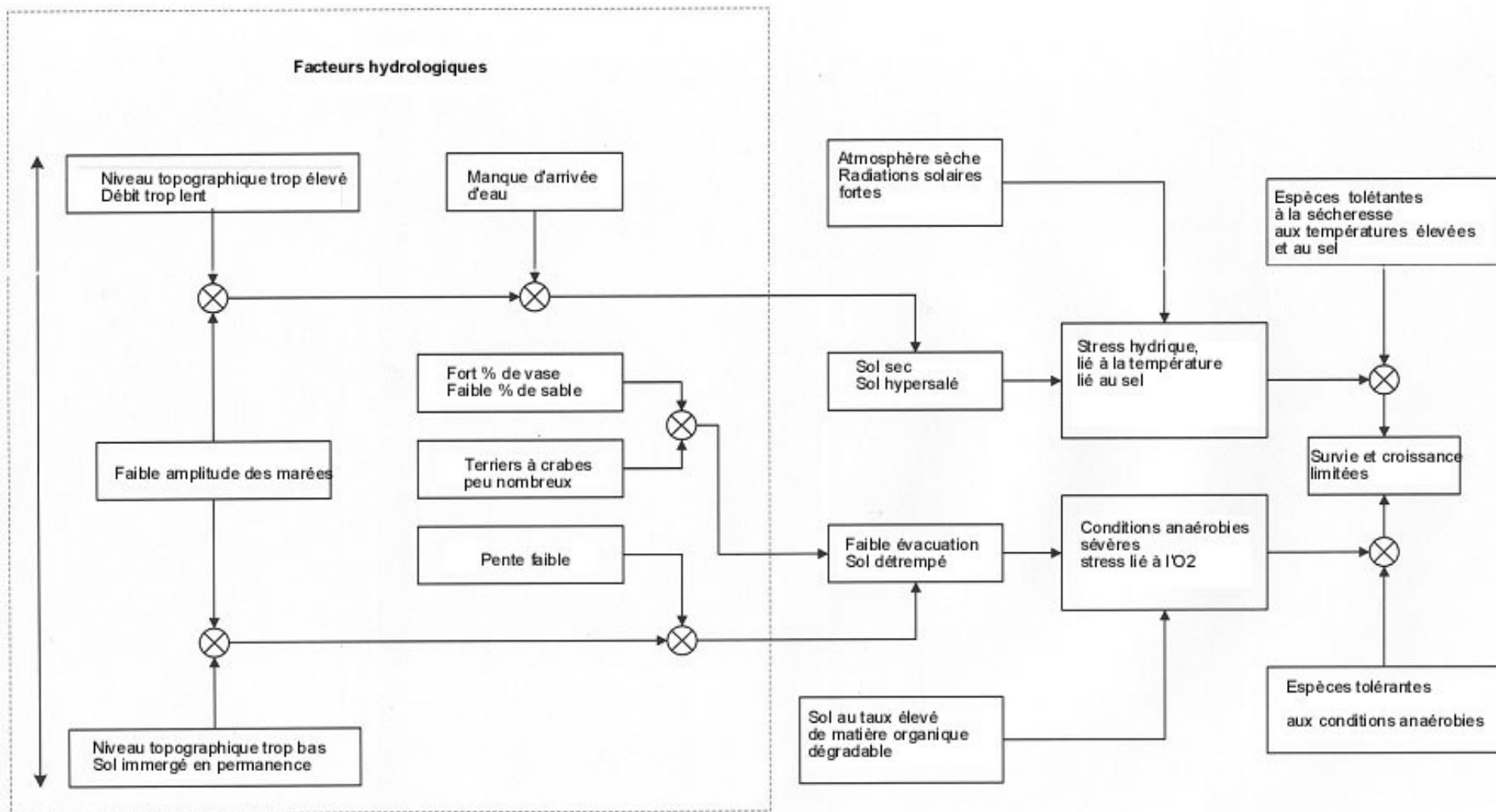


Figure 10 : Interactions entre les stress éco-physiologiques liés aux facteurs hydrologiques et la survie et la croissance des palétuviers (d'après Clough, 2005).

3.2. Impacts dus à la construction

La construction de fermes aquacoles engendre dans certains cas :

1. la destruction de zones de mangroves par conversion en bassins aquacoles ;
2. la modification de leur hydrologie et leur hydrodynamisme.

3.2.1. Conversion en bassins aquacoles

En Thaïlande, la destruction de mangroves à des fins de construction de bassins aquacoles de crevettes est courante. Entre 1961 et 1993, 54,7% de la mangrove ont été détruites, dont 32% à des fins d'activités aquacoles, soit 65 000 hectares (Menasveta, 1997). Ce scénario se rencontre également dans d'autres pays d'Asie du Sud-est ou en Amérique du Sud. En Indonésie, plus de 300 000 hectares de bassins à crevettes étaient d'anciennes zones de mangroves (Csavas, 1988). Aux Philippines, plus de 50% des mangroves ont été converties en bassins aquacoles entre 1951 et 1988 (Primavera 1996 *In* Hambrey 1996). Au Mexique, une diminution de 50% de superficie totale des mangroves a été observée entre 1973 et 1997 mais il est difficile de dissocier les causes de cette déforestation qui est une combinaison de plusieurs impacts anthropiques (Paez-Osuna et al., 2003). En Equateur, il s'agit de 14% de la surface totale de mangroves utilisée pour la construction de fermes aquacoles pour la seule année 1987 !

Cette conversion en bassins aquacoles dépend fortement du type d'intensification choisi pour l'élevage. En effet, sur les trois types d'élevage pratiqués notamment en Thaïlande (extensif, semi-intensif et intensif), seuls les deux premiers requièrent des zones de mangroves propices à la construction de grands bassins utilisant la topographie naturelle (fond de bassins compris entre 0 et +1,4 du niveau moyen de la mer).

- Les zones de mangroves dans les estuaires sont les premières sélectionnées pour la construction de bassins d'élevage extensif qui reçoivent des larves de crevettes par arrivée naturelle d'eau de mer. Après 2 à 3 mois d'élevage, les crevettes sont pêchées, et les rendements ne dépassent guère 300 kg / ha / an.
- Le système semi-intensif apparu en 1980 utilise les bassins d'élevage extensif existants, au niveau desquels est rajouté un système de pompage d'eau de mer. Avec un contrôle de la densité de stockage, il peut produire entre 600 et 1800 kg / ha / an, soit 2 à 6 fois plus qu'un élevage extensif ; il a finalement le même impact que ce dernier en terme d'utilisation de la mangrove.
- Enfin, le système intensif apparu en 1986 en Thaïlande requiert des zones d'arrière mangrove pour la construction de bassins plus petits et plus hauts (niveau topographique > +2 du niveau moyen de la mer). Il ne touche donc pas directement la mangrove dont les sols sont inappropriés pour ce type d'élevage du fait d'une acidité trop élevée et d'une impossibilité de les assécher (immersion trop importante). Produisant plus de 6 tonnes / ha / an, il n'a pas d'impact direct sur la mangrove en terme d'utilisation. De ce fait, ce type d'élevage est de plus en plus recommandé pour limiter la destruction de la mangrove (Menasveta, 1997), sans toutefois tenir compte des impacts liés au fonctionnement des fermes.

3.2.2. Modification de l'hydrologie

La modification de l'hydrologie peut représenter un impact non négligeable sur certaines zones de mangrove puisque ce facteur gouverne en majeure partie la survie et le développement des palétuviers.

Les changements hydrologiques apparaissent essentiellement lors de la construction d'un ouvrage nécessitant de :

- creuser (des bassins) et/ou de remblayer (digues, terre-plein) des zones dans la mangrove ou à proximité, et donc changer la topographie générale ;
- dérouter les apports d'eau et de matières provenant des bassins versants en amont (en augmentant ou en diminuant les apports d'eau douce ou effluents d'origine anthropiques) ;
- perturber, voire d'obstruer des chenaux et des creeks naturels à l'intérieur de la mangrove (asséchant ou inondant des zones) ;
- construire de nouveaux chenaux artificiels (asséchant ou inondant des zones).

Les conséquences qui en découlent sont les principaux stress décrits dans le paragraphe relatif au fonctionnement de la mangrove (stress hydrique, stress lié au sel, à la température et à l'anoxie). En effet, dans le cas de zones qui deviennent constamment immergées, il s'en suit l'apparition de conditions anoxiques qui peuvent être sévères et entraîner l'affaiblissement, voire la mort des arbres. Dans le cas de zones qui deviennent asséchées, il peut apparaître une augmentation de la température et de la salinité qui peuvent être des facteurs de stress pour certaines plantes aux tolérances limitées. Le manque d'eau peut également engendrer un stress hydrique.

3.3. Impacts dus au fonctionnement

Le fonctionnement des fermes aquacoles de crevettes peut également engendrer des impacts en terme de modifications biologiques et physico-chimiques du milieu avoisinant (mangrove). Les principales modifications sont :

1. L'enrichissement en sels nutritifs et en matière organique (dissous et/ou particulaire) ;
2. La diminution des niveaux d'oxygène dissous et du pH, et l'augmentation de la demande en oxygène dissous lors de processus biologiques et chimiques ;
3. La perturbation de l'hydrologie naturelle et l'augmentation de la sédimentation liée au rejet de particules.

3.3.1. Enrichissement en matière organique et sels nutritifs et diminution de l'O₂ dissous

Ces impacts peuvent être plus ou moins importants en fonction du niveau d'intensification de l'élevage :

- Dans le cadre d'un élevage extensif sans apport extérieur d'aliment, le système ne contribue pas à une charge importante en nutriments dans les zones côtières. La mangrove (végétation, sol et creek) joue plutôt le rôle de piège à nutriments et en assimile la majeure partie. Les effluents qui peuvent dans ce cas contribuer à la

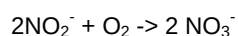
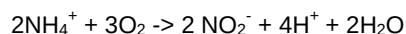
croissance et au développement de la mangrove ont d'ailleurs parfois été valorisés dans le cadre de techniques mixtes associant élevage de crevettes et culture de palétuviers (Tuan et al, 1994).

- Dès lors que l'élevage s'intensifie, la quantité de déchets rejetés dans le milieu environnant augmente. On note particulièrement une augmentation de matières en suspension en sortie de bassins comparativement à la quantité existant en entrée mais en revanche, la quantité de sels nutritifs azotés et phosphatés (nitrites, nitrates, phosphates) est quasiment la même en entrée et en sortie (Martin et al., 1998 ; Gautier et al. 2001 ; MacKinnon et al., 2002a ; Lemonnier et al., 2003 ; Martin et al., 2004). Parallèlement, on observe une diminution de l'oxygène dissous et du pH dans la mangrove, liée aux processus de dégradation de la matière organique rejetée par les **effluents**. Outre les matières particulaires et dissoutes issues des effluents du fait du renouvellement en eau des bassins, des quantités conséquentes de **boues** sont produites provenant en partie de l'érosion des digues et accumulées au milieu des fonds de bassins par une circulation artificielle due aux aérateurs (Frederiksen et al., 1998). Ces boues peuvent être soit enlevées des bassins (comme en Thaïlande) pour être déposées dans des zones de sédimentation au niveau des mangroves à des fins de consolidation par assèchement, soit diluées dans l'eau des bassins et évacuées par le renouvellement en eau dans les effluents. Le fait d'ôter ces boues de façon artificielle contribue à ré-oxygéner les sédiments des bassins et donc à diminuer la quantité de déchets azotés et phosphatés dans les bassins et dans les effluents qui sont déversés dans la mangrove. Néanmoins, les boues peuvent avoir un impact sur les zones où elles ont été déposées si elles ne sont pas asséchées, pouvant engendrer des phénomènes possibles d'eutrophisation localisée.

Certaines études ont tenté de quantifier le devenir des nutriments (particulièrement N et P) rejetés dans la mangrove ainsi que la part pouvant être traitée par les différents processus de dégradation par voies aérobie et anaérobie (impliquant le cycle de l'azote [nitrification – dénitrification – ammonification]¹, et le cycle du phosphore) ou d'absorption ayant lieu dans la mangrove.

Des essais d'élevages intensifs et semi-intensifs menés en Thaïlande ont permis de montrer que les bilans d'azote et de phosphore introduits par les aliments étaient différents suivant le niveau d'intensification (Tableau 2). Si les boues produites au cours d'un élevage représentent respectivement 72% et 69% des apports d'azote par les aliments dans un système semi-intensif et dans un système intensif, elles sont bien plus élevées en quantité absolue dans le cas d'un élevage intensif (respectivement 408 et 1371 kg/ha/an) (Roberston and Phillips, 1995 *In* Frederiksen et al., 1998). En revanche, la quantité d'azote dissous rejeté par les effluents est

¹ La nitrification est le processus par lequel les bactéries oxydent l'ammonium NH_4^+ présent dans le sol en nitrites NO_2^- puis en nitrates NO_3^- .



La dénitrification est le processus par lequel certaines bactéries tirent le dioxygène nécessaire à leur métabolisme du nitrate plutôt que de l'atmosphère dans des conditions anaérobies.



L'ammonification est le processus par lequel de nombreux détritivores bactériens et fongiques décomposent l'azote organique en ammonium NH_4^+ .

pratiquement identique en quantité absolue que l'élevage soit semi-intensif ou intensif (respectivement 23% et 10% de l'apport d'azote initial, soit 128 et 199 kg/ha/an).

Les charges d'azote dans les boues sont probablement plus faibles que les valeurs annoncées précédemment du fait du processus de dénitrification bactérienne qui peut convertir jusqu'à 40% de nutriments azotés.

Tableau 2 : Bilan des nutriments dans le cas de systèmes intensifs et semi-intensifs d'aquaculture de crevettes en Thaïlande (en kg/ha/an).

Niveau d'intensification	Apport de nutriments	Production de crevettes	Perte (boues)	Perte (effluent)
Semi-intensif				
N	565	29 (5%)	408 (72%)	128 (23%)
P	70	2 (3%)	28 (40%)	40 (57%)
Intensif				
N	1975	405 (21%)	1371 (69%)	199 (10%)
P	459	26 (6%)	394 (86%)	39 (8%)

Parallèlement, la quantité de carbone exportée dans le milieu environnant a été estimée à environ 1250 kg par tonne de crevettes produites, contribuant à un enrichissement probable des écosystèmes voisins, tant en matière organique qu'en nutriments (Frederiksen et al., 1998).

Se basant sur des calculs théoriques, Roberston et Phillips (1995) ont estimé que 2 à 22 hectares de mangrove sont nécessaires pour traiter les nutriments issus des déchets d'un bassin de crevette de 1 hectare. Ces calculs se sont avérés surestimés car les auteurs n'avaient pas pris en compte les processus de dénitrification, de sédimentation et d'absorption par le sol. En tenant compte de la dénitrification, Rivera-Monroy et al (1999) ont évalué que 0,04 à 0,12 hectares de mangrove pouvaient éliminer l'azote inorganique dissous issus des effluents produits par un bassin semi-intensif d'un hectare.

Les effluents issus des bassins à crevettes sont également riches en chlorophylle **a**, en phytoplancton et en bactéries (Martin et al, 1998 ; McKinnon et al., 2002a et 2002b ; Lemonnier et al., 2003). Les concentrations en matières particulaires et en chlorophylle **a** sont élevées à proximité des évacuations des effluents. En revanche dans la partie basse et les embouchures des creeks, la quantité de matières particulaires et les taux de production primaire et bactérienne sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés dans des zones ne recevant aucun effluent.

Les perturbations en terme de qualité de l'eau des creeks de mangrove restent toutefois temporaires. En effet, Trott et Alongi (2000) ont montré que les concentrations en matières particulaires et en suspension reviennent à des conditions normales au terme d'un à deux mois d'arrêt des rejets. Les processus trophiques et physiques ayant lieu dans la colonne d'eau des creeks contribuent à transformer une partie des déchets issus des effluents. Le microzooplancton joue un rôle primordial dans les processus de transformation en « broutant » le phytoplancton qui contribue lui même activement à une minéralisation des effluents au même titre que les bactéries.

3.3.2. Perturbation de l'hydrologie et sédimentation

L'hydrologie peut être modifiée lors du fonctionnement d'un ouvrage tel qu'une ferme aquacole du fait :

- Des rejets des effluents pouvant modifier le tracé et le débit des chenaux naturels ;
- D'une sédimentation liée au rejet de particules en suspension dans les effluents, pouvant entraîner un déroutage des apports hydriques.

Ces modifications physiques engendrent les mêmes conséquences que lors de la construction, à savoir une inondation de certaines zones et un assèchement d'autres.

Les conséquences qui en découlent sont les principaux stress décrits dans le paragraphe relatif au fonctionnement de la mangrove (stress hydrique, stress lié au sel, à la température et à l'anoxie).

En effet, dans le cas de zones qui deviennent constamment immergées, il s'en suit l'apparition de conditions anoxiques qui peuvent être sévères et entraîner l'affaiblissement, voire la mort des arbres. Dans le cas de zones qui deviennent asséchées, il peut apparaître une augmentation de la température et de la salinité qui peuvent être des facteurs de stress pour certaines plantes aux tolérances limitées. Le manque d'eau peut également engendrer un stress hydrique.

3.3.3. Synthèse sur les impacts

La figure 11 synthétise de façon simplifiée le fonctionnement d'un élevage semi-intensif ou intensif de crevettes et ses impacts possibles sur la mangrove.

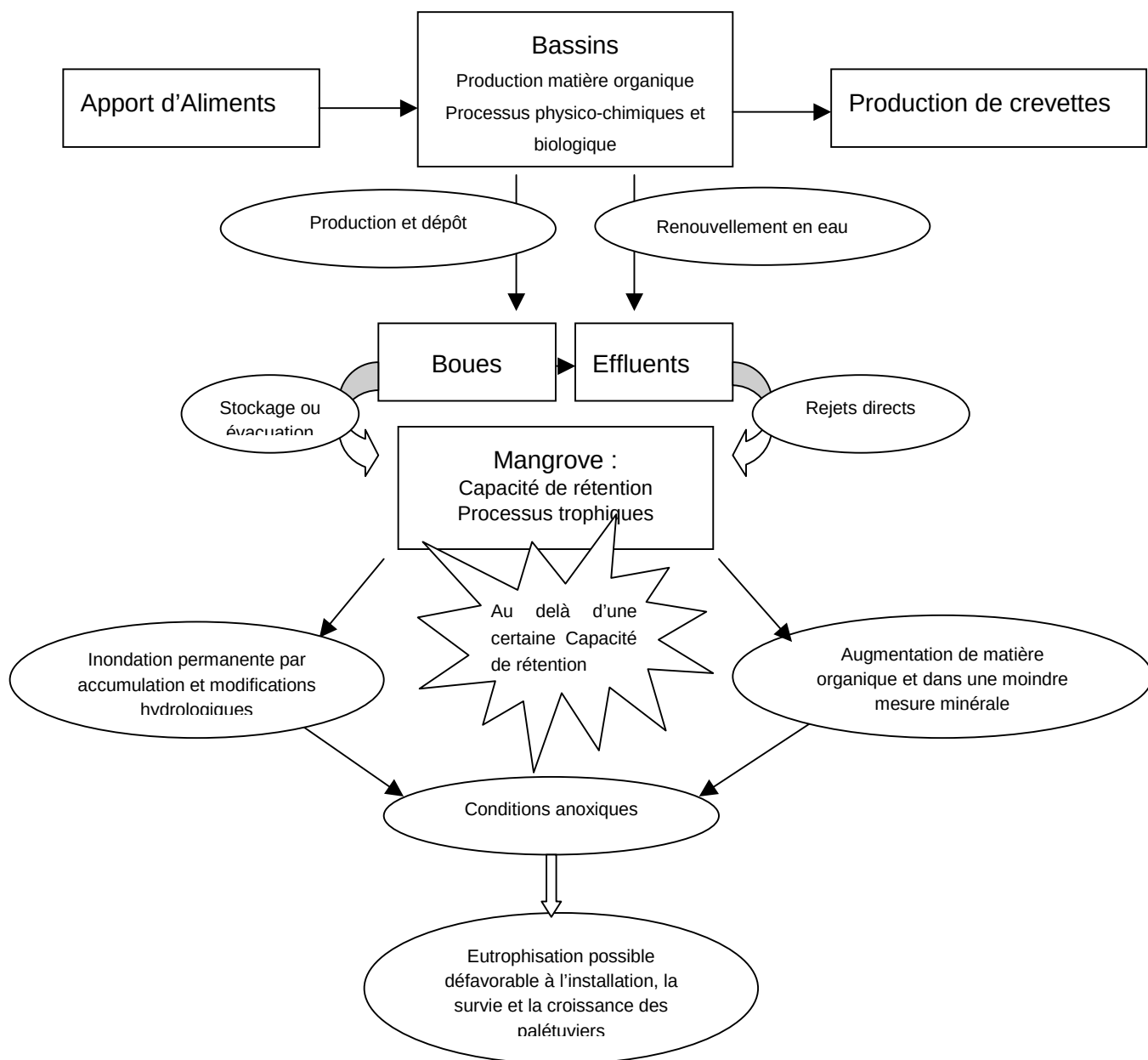


Figure 11 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un élevage de crevettes semi-intensif ou intensif et des impacts potentiels sur la mangrove.

4. ETUDE DE L'AQUACULTURE ET DE SES IMPACTS SUR LES MANGROVES DE NOUVELLE-CALÉDONIE

4.1. Aquaculture de crevettes en Nouvelle-Calédonie

4.1.1. Activité aquacole

4.1.1.1. Historique

Des conditions climatiques favorables, une eau de mer de qualité, la présence de sites pour la construction de fermes, une volonté forte de développement de la part des institutions (Territoire, Provinces, Etat) et la présence d'organismes de recherche ont été les conditions qui ont permis le développement de la filière crevette, principale filière aquacole en Nouvelle Calédonie.

Après des essais d'élevages infructueux réalisés sur les espèces locales dans les années 70, l'introduction d'une espèce d'origine mexicaine *Litopenaeus stylirostris* a eu lieu en 1981. La souche importée qui est l'unique source de la production depuis cette date (32 générations en 2004), présente la particularité de résister au virus IHHN.

Le développement de la filière s'est fait progressivement, dans un premier temps sous l'impulsion technique, scientifique et commerciale de l'IFREMER avec la création de la ferme « La Sodacal » (1983) et en s'appuyant sur la consommation locale. Dans un second temps, on a assisté à la création de plusieurs structures impliquées à différents niveaux de la filière :

- Une usine de production locale d'aliments en 1984 puis un deuxième provendier plus tard ;
- La première éclosérie privée à Sodacal en 1988 ;
- Des fermes et écloséries privées depuis ;
- Un atelier de transformation et de conditionnement par la SOPAC (SOciété des Producteurs Aquacoles Calédoniens) en 1995 puis deux projets d'atelier en cours de réalisation.

La mise en place et la structuration de la filière a permis une augmentation de la production et un développement de l'exportation. Elle est passée de 65 tonnes en 1986 à environ 2100 tonnes en 2004. Cette production, qui a connu une progression importante freinée conjoncturellement par le « syndrome 93 », reste toutefois limitée comparativement aux 1,3 millions de tonnes de crevettes produites par l'aquaculture mondiale.

Avec des coûts élevés de production et de transport vers les principaux marchés (Europe, Japon et Australie) et un marché local limité (estimé à 500 tonnes), le prix de revient du kilogramme de crevettes est élevé (6 à 10 €). Afin de compenser ce handicap, une démarche commerciale a été mise en place pour viser un marché rémunérateur. La SOPAC a initié et piloté la mise en place d'un cahier des charges avec en particulier des normes d'élevages strictes (absence de farines d'animaux terrestres dans l'aliment, pas d'antibiotiques, charge en élevage limitée...) et une

démarche de maîtrise de la qualité du produit (Normes CEE). Cette démarche a été récompensée par l'obtention de deux labels. Aujourd'hui, la sphère crevette mobilise environ 900 personnes, 300 permanents et 600 occasionnels, pour environ 350 équivalents temps pleins.

4.1.1.2. Types et Nombre de fermes

En 2004, 17 fermes aquacoles et 4 écloséries sont en production (Tableau 3). La majorité adhère au GFA ou Groupement des Fermes Aquacoles (Rapport d'activité 2003 du GFA de Nouvelle-Calédonie).

Tableau 3 : Fermes aquacoles de grossissement de crevettes en Nouvelle-Calédonie en 2004.

Fermes	Superficie (ha)	1 ^{er} cycle de production	Evacuation des rejets	Type d'élevage
Aigue Marine (Boulouparis)	28	2003/2004	directe	Semi-intensif
April (La Foa) puis extension	20	2003/2004	directe	Semi-intensif
Aquamer (Moindou)	40	1994/1995	directe	Intensif
Aquamon (Tontouta)	51	1983	directe	Semi-intensif
Aquawa (Poya)	42	2004/2005	directe	Semi-intensif
Bassins de Dumbéa	23		directe	Semi-intensif
Blue Lagoon Farm (Koné)	76	1996/1997	directe	Intensif
FAO (Boulouparis)	18	1981/1982	directe	Semi-intensif
Kapuidéa (Poya)	50	2004	directe	Semi-intensif
La Pénéide de Ouano (La Foa)	30	1995	directe	Intensif
Montagne Blanche (Pouembout)	17	2004		
Pointe Monot (Moindou)	15	2004	directe	Semi-Intensif
Seafarm (Boulouparis)	36	1991/1992	canal	Intensif puis semi-intensif
Sodacal (Moindou)	132	1983	directe	Semi-intensif
Stylibleue (La Foa)	15	2001/2002	directe	Semi-intensif
S.C.A. Tournier (Bourail)	11	1997/1998	directe	Semi-intensif
Webuihoone (Voh)	55	1993/1994	canal	Semi-intensif

Les fermes peuvent se classer en trois types de structures :

- Les fermes familiales de moins de 20 hectares
- Les fermes intermédiaires de 20 à 60 hectares
- Les fermes industrielles de plus de 60 hectares

Elles sont exclusivement localisées sur la côte ouest, représentant près de 660 hectares de bassins (Figure 12).



Figure 12 : Localisation des fermes et écloseries de crevettes en production en 2004 (Castelain, 2004).

Deux systèmes d'élevage sont pratiqués en Nouvelle-Calédonie :

- Le système intensif qui correspond à :
 - ***des densités d'ensemencement généralement supérieures à 30 PL / m² ;***
 - ***une taille de bassins généralement autour de 4 hectares ;***
 - ***l'existence d'un système d'aération ;***
 - ***des rendements moyens de 5,5 t/ha/an.***
- Le système semi-intensif qui correspond à :
 - ***des densités d'ensemencement autour de 20 PL / m² ;***
 - ***une taille de bassins compris entre 4 et 10 hectares;***
 - ***l'absence de système d'aération ;***
 - ***des rendements moyens de 3,5 t/ha/an.***

4.1.1.3. Effet sur l'environnement littoral

Les fermes sont construites en arrière de mangrove sur des zones nues de végétation, les tannes. Lemonnier et Herlin (1999) estiment à moins de 5 ha, la superficie de mangroves arrachée sur l'ensemble de la Nouvelle Calédonie pour la construction des fermes. L'abattage des arbres est parfois nécessaire pour accéder à l'eau de mer et à la construction des stations de pompage.

Aucun antibiotique ou produit chimique n'est utilisé durant les phases de grossissement et n'est donc rejeté dans le milieu naturel. Les effluents sont principalement constitués de matières organiques sous forme particulaire (principalement sous forme phytoplanctonique) et sous forme dissoute. Les rejets sont globalement moins concentrés en nitrate, en nitrite et en ammoniac que l'eau des baies. Les pratiques zootechniques (densité, renouvellement) et la saison modifient la qualité et la quantité de déchets rejetés vers le littoral ainsi que les bilans d'azote (Martin et al., 1998 ; Fuchs et al., 1998 ; Lemonnier et Faninoz, 2001 ; Lemonnier et al., 2003 ; Martin et al., 2004).

L'élevage de crevettes en Nouvelle Calédonie connaît actuellement un essor important. Or la multiplication des fermes, l'augmentation de la production et le risque d'intensification des systèmes d'élevage sont susceptibles d'augmenter la pression sur l'environnement. Une opération ZONECO (recherche d'indicateurs des effluents des élevages de crevettes de Nouvelle-Calédonie et Modélisation des flux de nutriments) est actuellement menée parallèlement à cette étude sur les mangroves avec les objectifs suivants :

- Rechercher des bio-indicateurs permettant de suivre le devenir des effluents dans le milieu récepteur (eau du lagon) ;
- Concevoir un modèle prédictif des flux azotés et phosphorés qui prend en compte les paramètres de gestion des élevages (densités, fertilisants, renouvellements en eau).

4.1.2. Potentialités

4.1.2.1. Sites potentiels

Une première étude réalisée par l'IFREMER à partir d'images satellitaires SPOT en 1993 (Projet Alias) a permis d'identifier un certain nombre de sites potentiellement exploitables. La superficie potentiellement aménageable avait été évaluée à 6000 hectares.

Une seconde étude réalisée en 2000 par Aquadev revoit à la baisse ce potentiel et identifie 1300 hectares aménageables sur la côte Ouest du Territoire pour une production supplémentaire de 4500 tonnes. Dans ce travail, le développement d'une aquaculture de type familiale est mis en avant. Elle représenterait 40% de la surface potentiellement aménageable (Aquadev, 2000). Toutefois, l'auteur note que seules des études de faisabilité seront de nature à valider ces chiffres.

4.1.2.2. Projets en cours

Plusieurs projets sont en cours de réalisation et mettront leurs bassins en eau en 2004-2005 pour une production en 2005-2006. Il s'agit de :

- Novella : 75 ha non aérés à Poya (2005/2006) ;
- Dalstein : 20 ha avec aération de confort et rejets directs à Poya (2005/2006) ;
- Nessaquacole : 1^{ère} tranche de 48 ha aérés avec rejets directs à Bourail (2004/2005) ;

- Kabar : 25 ha non aérés avec rejets directs à Pouaco (2005/2006).

Parmi les projets à plus long terme (2005-2007), citons :

- Canacout (PN) : 98 ha (fin 2006) ;
- Ile Boh à Poum : 10 ha (fin 2005) ;
- Koniene (PN) : 18 ha (fin 2006) ;
- Mondoni (PN) : 29 ha (fin 2005) ;
- Nekoro et Neoni (PN) : 50 ha - ? (promoteurs indécis sur réalisation ou non du projet) ;
- Tangadiou-Paxii (PN) : 45 ha (fin 2005) ;
- Trou aux requins (PN) : 18 ha (fin 2006).

Les perspectives de développement établies courant 2003 indiquaient pour 2007, un doublement des surfaces d'élevage pour une production à terme de 5000 tonnes.

4.2. Etude de mangroves in situ

4.2.1. Sites choisis et stations échantillonnées

Les quatre sites retenus (Virly, 2004) pour la présente étude sont :

- « La Pénéide de Ouano » dans la baie de Teremba (Province Sud), construite en 1995, totalisant 29 ha de bassins de type intensif ;
- « La Sodacal » dans la baie de Chambeyron (Province Sud), construite en 1983, totalisant 125 ha de bassins de type semi-intensif ;
- La ferme de M. Kabar dans l'Anse de Pouaco (Province Nord), dont la construction de 25 ha de bassins de type semi-intensif est prévue en 2005 ;
- Un site de mangrove vierge dans l'Anse de Pouanga (Province Nord).

Leur localisation est schématisée en annexe 1.

Ces quatre sites ont été photographiés en 2004. Seuls les trois premiers ont fait l'objet d'investigations de terrain en 2004.

Les zones explorées in situ et les stations d'échantillonnage sont indiquées sur les figures 13 à 15.



Figure 13 : Localisation des stations d'échantillonnage et autres points remarquables réalisés en octobre 2004 à Ouano (les numéros en rouge correspondent aux waypoints du GPS).



Figure 14 : Localisation des stations d'échantillonnage et autres points remarquables réalisés en octobre 2004 à Sodacal (les numéros correspondent aux waypoints du GPS).



Figure 15 : Localisation des stations d'échantillonnage et autres points remarquables réalisés en octobre 2004 à Pouaco (les numéros correspondent aux waypoints du GPS).

4.2.2. Résultats par site

4.2.2.1. Description des communautés végétales et de la structure de la mangrove

La zonation habituellement rencontrée depuis la frange interne vers la frange maritime d'une mangrove était bien visible sur les 3 sites échantillonnés en octobre 2004 (Figure 16) :

- Pré salé nu ou avec salicornes et/ou avec quelques arbustes d'**Avicennia** sp. cf. **officinalis** ;
- Strate à **Avicennia** sp. cf. **officinalis** ;
- Strate mixte à **Avicennia** sp. cf. **officinalis** et **Rhizophora** spp. courts ;
- Strate à **Rhizophora** spp. plus grands et plus denses.

Notons toutefois sur l'ensemble des 3 zones étudiées l'absence de la zone mixte à **Rhizophora** spp. et **Bruguiera** sp. habituellement comprise entre la mangrove interne de type arbustive peuplée d'**Avicennia** sp. cf. **officinalis** et la strate de **Rhizophora** spp. de la mangrove externe.



Figure 16 : Zonation de la mangrove de Pouaco.

Les coordonnées géographiques des stations sont récapitulées en annexe 2.

La description détaillée de chaque station des 3 sites d'étude illustrée de photographies de terrain est développée en annexe 3.

OUANO

Deux radiales ont été explorées de la frange terrestre vers la frange maritime :

La radiale 1 au sud part de la fin du canal collecteur des bassins 1 et 2 vers la frange maritime de direction nord ouest (Figure 17 et Tableau 4). Elle inclut 5 stations le long du transect (OU3=545 ; OU10=560 ; OU12=563 ; OU11=567 ; OU1=542) plus 2 stations latérales à la hauteur de la station OU10 (OU13=569 ; OU14=568) afin de voir s'il existe également un gradient transverse depuis la sortie du canal collecteur des bassins 1 et 2.

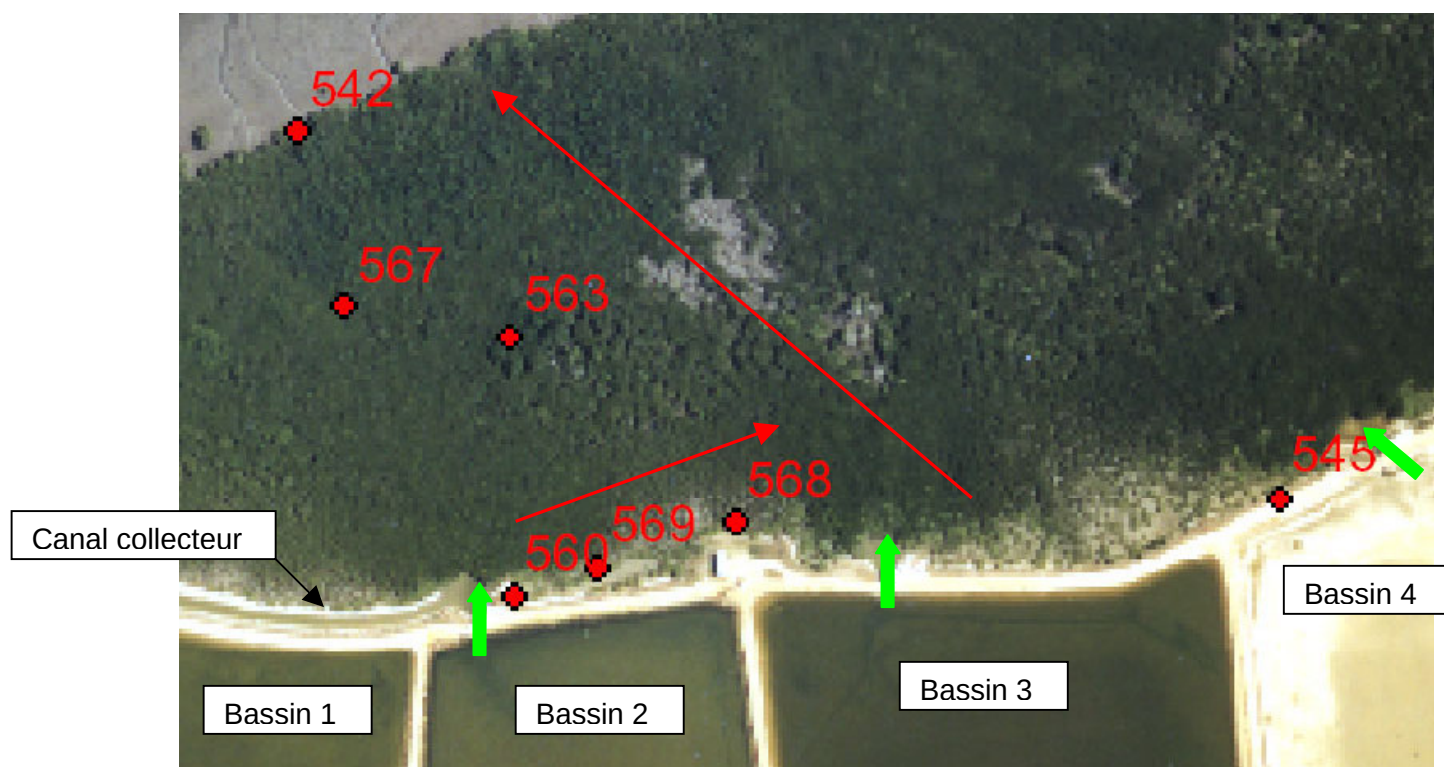


Figure 17 : Transect 1 du site de Ouano (radiale principale de la frange terrestre vers la frange maritime et radiale transverse). Les flèches vertes correspondent au moine de sortie des bassins.

Tableau 4 : Caractéristiques des stations d'échantillonnage de la radiale 1 de Ouano.

Site	Station	WP	Description	Espèce prédominante	Hauteur	Densité racine (1-5)	Densité canopée (1-5)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
OUANO	OU3	545	Pied de digue, dans zone asséchée avec quelques Avicennia et salicornes proche de la sortie du bassin 4	Avicennia sp. cf officinalis	1 à 2	1	1		x			x
OUANO	OU10	560	Sortie du canal collecteur des bassins 1 et 2	Avicennia sp. cf officinalis Rhizophora stylosa	1 à 2 1 à 2	1	2			x	x	
OUANO	OU13	569	Petits Rhizophora à 30 m de la digue, à droite de la station 10 (Strate d'Avicennia pratiquement inexistante)	Rhizophora stylosa	1,8	2	3		x	x		
OUANO	OU14	568	Au droit du générateur à environ 30 m de la digue, petits Rhizophora, plus petits que ceux de la station 13	Rhizophora stylosa	1,5	2	3		x	x		
OUANO	OU12	563	Patch de hauts Rhizophora clairsemés à l'interface entre Rh. stylosa moins grands (3m) et clairsemés et RS de 4-5 m denses sans feuilles à la base (station 11)	Rhizophora stylosa	3 à 5	3	4	x	x	x	x	
OUANO	OU11	567	Dans la forêt de Rhizophora morts à la base. Feuilles de la canopée seulement	Rhizophora stylosa	3 à 5	4	4	x	x	x	x	
OUANO	OU1	542	Frange maritime constituée de Rhizophora	Rhizophora stylosa	5 à 6	4	5	x	x	x	x	

La radiale 2 au nord, commence à la sortie du bassin 7 et de direction ouest (Figure 18 et Tableau 5). Elle inclut 5 stations le long du transect (OU4=546 ; OU7=547 ; OU6=553 ; OU5=548 ; OU2=543) plus 2 stations latérales à la hauteur de la station OU7 (OU8=558 ; OU9=559).

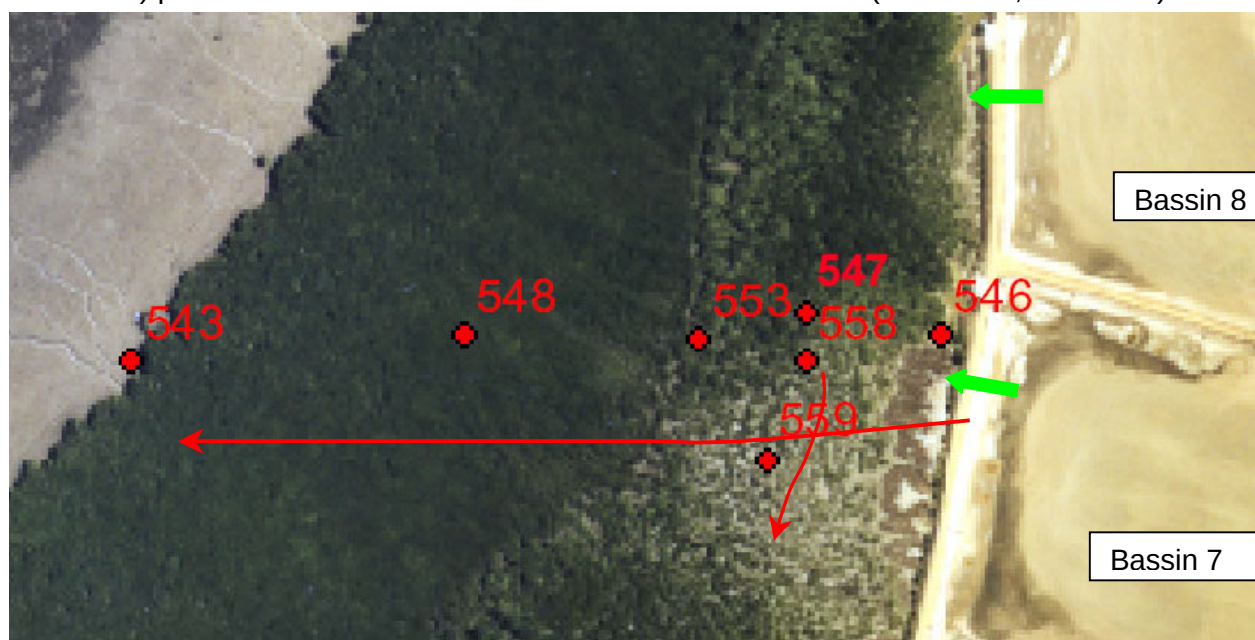


Figure 18 : Transect 2 du site de Ouano (radiale principale de la frange terrestre vers la frange maritime et radiale transverse). Les flèches vertes correspondent au moine de sortie des bassins.

Tableau 5 : Caractéristiques des stations d'échantillonnage de la radiale 2 de Ouano.

Site	Station	WP	Description	Espèce prédominante	Hauteur	Densité racine (1-5)	Densité canopée (1-5)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
OUANO	OU4	546	Pré salé avec quelques <i>Avicennia</i> et tapis de salicornes humides face au moine de sortie du bassin 7	<i>Avicennia</i> sp. cf <i>officinalis</i>	1	2	1		x	x		x
OUANO	OU7	547	Transition <i>Avicennia</i> - <i>Rhizophora</i>	<i>Rhizophora stylosa</i>		3	3	x	x	x		
OUANO	OU8	558	Transition <i>Avicennia</i> - <i>Rhizophora</i> courts	<i>Rhizophora stylosa</i>	1,8	3	3		x	x		x
OUANO	OU9	559	Petits <i>Rhizophora</i> peu denses	<i>Rhizophora stylosa</i>	1,5	3	3			x		
OUANO	OU6	553	Limite entre <i>Rhizophora</i> et <i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora stylosa</i> <i>Avicennia</i> sp. cf <i>officinalis</i>	2,5	4	3	x	x	x	x	
OUANO	OU5	548	Dans la forêt de <i>Rhizophora</i>	<i>Rhizophora stylosa</i>	4	3	5	x	x	x	x	
OUANO	OU2	543	Frange maritime constituée de <i>Rhizophora</i>	<i>Rhizophora stylosa</i>	5 à 6	4	5	x	x	x	x	

Les 2 transects présentent en général les mêmes caractéristiques de végétation et notamment :

- La zone de pré salé ainsi que la strate des *Avicennia* sp. cf *officinalis* sont réduites.
- Une avancée des *Rhizophora* spp. vers la frange terrestre est très nette à chaque sortie de bassins aquacoles et au niveau du canal collecteur des bassins 1 et 2. Seules la zone se situant à la sortie des bassins 3 et 4 et celle se trouvant à la sortie des bassins 6 et 7 présentent encore une strate de pré salé plus marquée qu'ailleurs.
- On observe globalement un gradient de densité de canopée des *Rhizophora* de la façade terrestre vers la façade maritime, qui devient toutefois moins net à partir du milieu des chaque transect.

SODACAL

Deux radiales ont été explorées de la frange terrestre vers la frange maritime :

La radiale 1 au sud part d'un des moines de sortie du bassin V vers la frange maritime de direction ouest (Figure 19 et Tableau 6). Elle inclut 5 stations le long du transect (SO4=573 ; SO3=578 ; SO2=577 ; SO1=572 ; SO5=582).

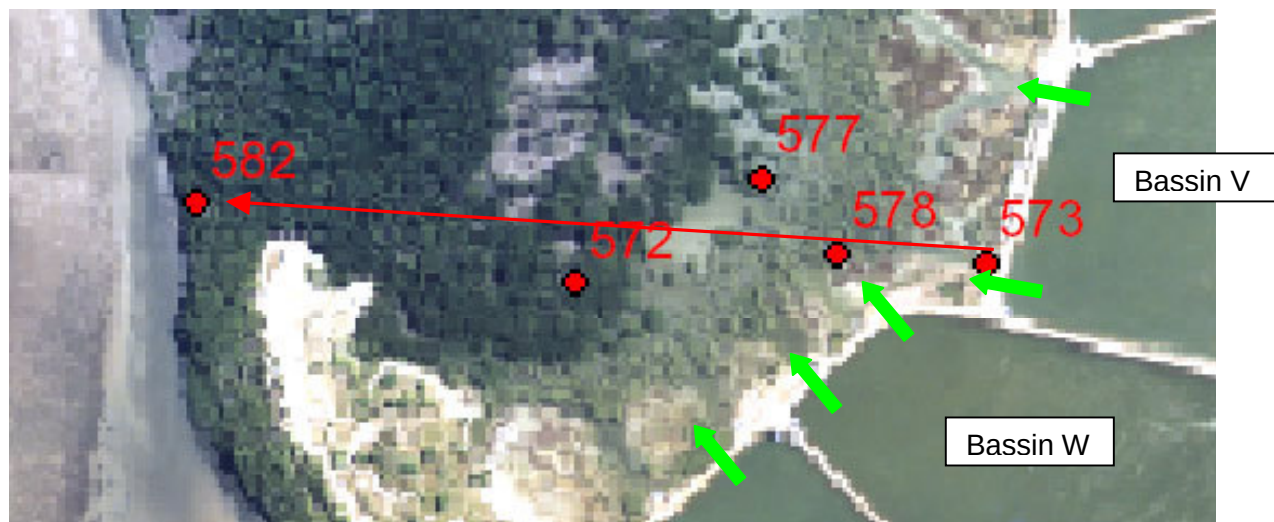


Figure 19 : Transect 1 du site de Sodacal. Les flèches vertes correspondent aux moines de sortie.

Tableau 6 : Caractéristiques des stations d'échantillonnages de la radiale 1 du site de Sodacal.

Site	Station	WP	Description	Espèce prédominante	Hauteur	Densité racine (1-5)	Densité canopée (1-5)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
SODACAL	SO4	573	Pré salé, au niveau du moine de sortie n°1 du bassin V, où l'eau s'évacue uniformément sur toute la zone	Salicornia sp.	1	1				x	x	x
SODACAL	SO3	578	Avicennia, à la limite du pré salé étroit, recevant les effluents du bassin W (moine n°2)	Avicennia sp. cf officinalis	1,5	3	3		x	x		
SODACAL	SO2	577	Patch de petits Rhizophora sur un sédiment très vaseux recouvert d'eau sur 1 m à marée descendante. Rhizophora en bonne santé, poussant vite (internoeud long) et avec feuilles vertes	Rhizophora stylosa	2,5				x	x	x	
SODACAL	SO1	572	Au bout du promontoire de sable, forêt de vieux Rhizophora de grande taille et cassés en de nombreux endroits (trous de lumière)	Rhizophora stylosa	4	3	2	x	x	x	x	
SODACAL	SO5	582	Frange maritime constituée de Rhizophora	Rhizophora stylosa				x	x	x		

La radiale 2 au nord, à l'est de la digue, part du moine de sortie du bassin C vers la frange maritime de direction sud sud ouest (Figure 20 et Tableau 7). Elle inclut 4 stations le long du transect (SO9=586 ; SO8=593 ; SO7=589 ; SO6=580).

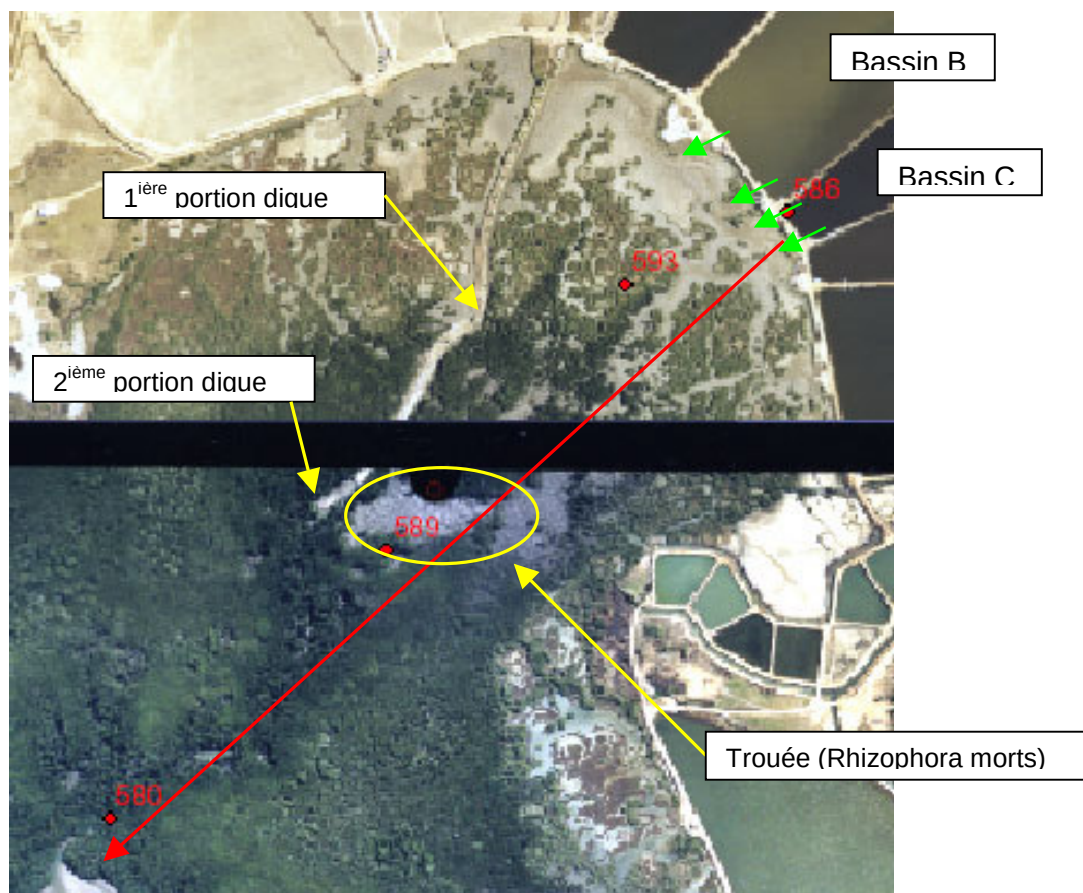


Figure 20 : Transect 2 du site de Sodacal. Les flèches vertes correspondent aux moines de sortie.

Tableau 7 : Caractéristiques des stations d'échantillonnages de la radiale 2 du site de Sodacal.

Site	Station	WP	Description	Espèce prédominante	Hauteur	Densité racine (1-5)	Densité canopée (1-5)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
SODACAL	SO9	586	Zone boueuse immergée à marée haute, sur bord d'îlot légèrement surélevé et asséché avec quelques Avicennia, face à la sortie du bassin C	Avicennia sp. cf officinalis	1	2	2			x		x
SODACAL	SO8	593	Sur talus avec Avicennia et quelques salicornes, asséchés et légèrement surélevés, entourés de vase molle d'environ 50 cm de profondeur et recouverte d'eau à marée haute	Avicennia sp. cf officinalis	1,5	3			x	x		
SODACAL	SO7	589	Zone de Rhizophora hauts avec feuillage en hauteur	Rhizophora mangle variété samoensis & Rhizophora stylosa	6	3	4	x	x	x		
SODACAL	SO6	580	Frange maritime constituée de Rhizophora, au bout du creek	Rhizophora mangle variété samoensis & Rhizophora stylosa	4 à 5			x	x	x	x	

POUACO

La radiale 1 au nord part du présalé à l'ouest des habitations de la famille Kabar vers la frange maritime de direction ouest sud ouest (Figure 21 et Tableau 8). Elle inclut 3 stations le long du transect (PO7=618; PO6=617 ; PO1=594).

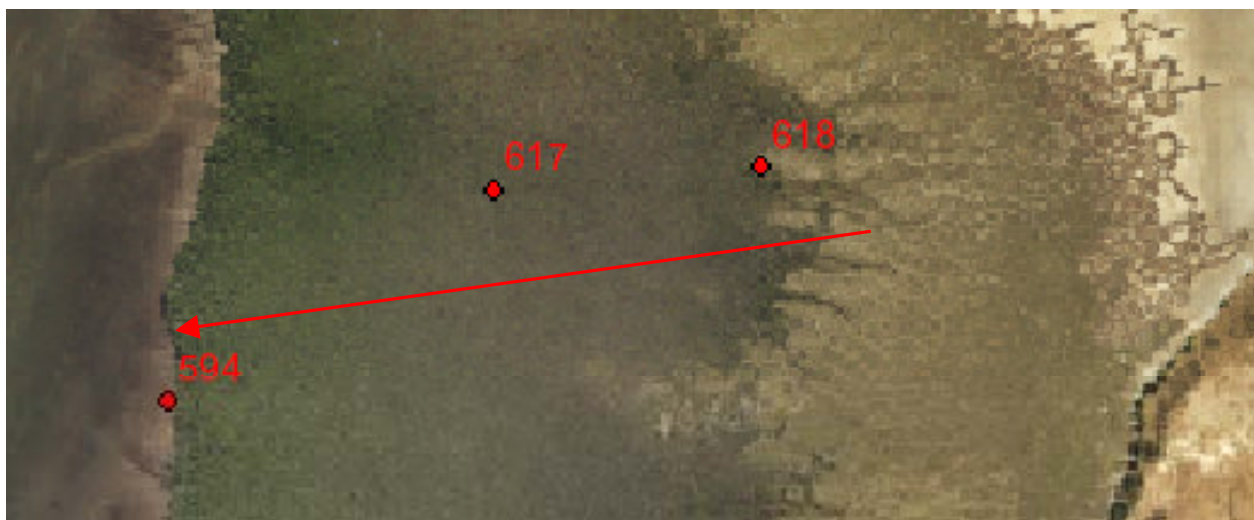


Figure 21 : Transect 1 sur le site de Pouaco (En rouge, tracé du transect).

Tableau 8 : Caractéristiques des stations d'échantillonnages de la radiale 1 du site de Pouaco.

Site	Station	WP	Description	Espèce prédominante	Hauteur	Densité racine (1-5)	Densité canopée (1-5)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
POUACO	PO7	618	Petits Avicennia sur sol majoritairement asséché	Avicennia sp. cf officinalis	0,5	2			x	x		x
POUACO	PO6	617	Forêt de petits Rhizophora	Rhizophora stylosa	1,8	3	2		x	x	x	
POUACO	PO1	594	Frange maritime constituée de Rhizophora de taille moyenne et clairsemés	Rhizophora stylosa	3	3	3	x	x	x	x	

La zone de tannes asséchées recouverte d'un voile algaire est particulièrement étendue dans la portion nord où seront construits les bassins aquacoles (Figure 22).

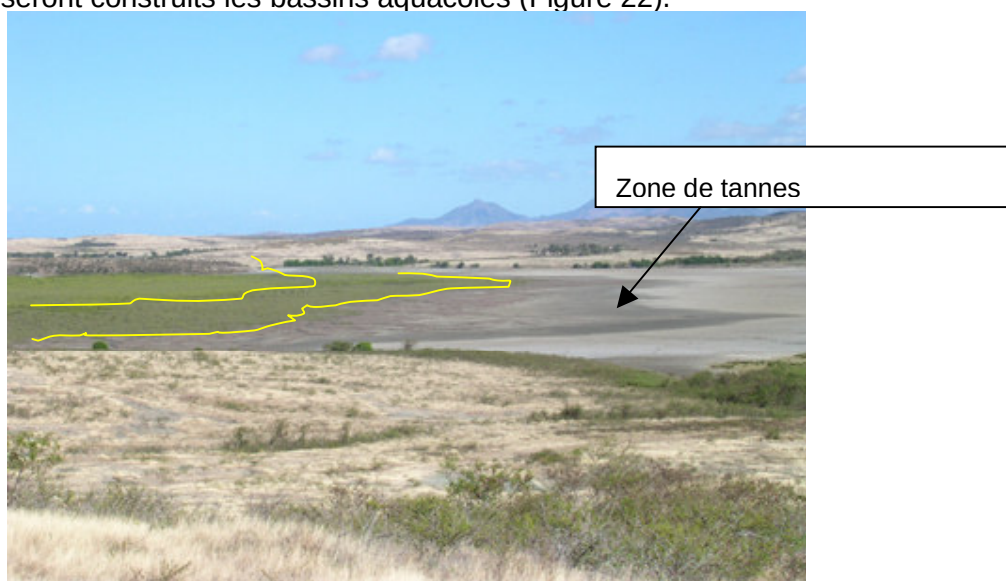


Figure 22 : Vue en hauteur de la partie nord de la mangrove de Pouaco.

La radiale 2 au sud suit le tracé de la tranchée réalisée dans la mangrove correspondant au futur canal de pompage (Figure 23 et Tableau 9). Elle inclut 5 stations le long du transect (PO8=604; PO5=619 ; PO3=606 ; PO4=607 ; PO2=600).



Figure 23 : Transect2 sur le site de Pouaco (tranchée dans la mangrove en pointillé vert).

Tableau 9 : Caractéristiques des stations d'échantillonnages de la radiale 2 du site de Pouaco.

Site	Station	WP	Description	Espèce prédominante	Hauteur	Densité racine (1-5)	Densité canopée (1-5)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
POUACO	PO8	604	Petits Avicennia sur sol majoritairement asséché (polygone de dessiccation). Station sur zone plus humide	Avicennia sp. cf officinalis	1	2			x	x		x
POUACO	PO5	619	Forêt de petits Rhizophora au sud de la tranchée	Rhizophora stylosa	1,8	3	2		x	x		
POUACO	PO3	606	Forêt de Rhizophora du côté sud de la tranchée; feuilles mangées par insectes. Etat moyen	Rhizophora stylosa	3	4	3	x	x	x		
POUACO	PO4	607	Forêt de Rhizophora au feuillage clairsemé et racines denses du côté nord de la tranchée	Rhizophora stylosa	2	4	2	x	x	x		
POUACO	PO2	600	Frange maritime dans le creek principal, constituée de Rhizophora de taille moyenne	Rhizophora stylosa	3	3	4	x	x	x	x	

De façon générale, la mangrove présente une zonation caractéristique de cet écosystème aussi bien dans le nord que dans le sud. Aucune station n'a été réalisée dans les zones de tannes.

4.2.2.2. LAI

Tous les LAI ont été corrigés en tenant compte de l'angle solaire mesuré in situ puis modélisé. Le meilleur ajustement de l'angle solaire en fonction du temps est une courbe polynomiale dont le R^2 est de 0,9941 (Figure 24) et l'équation :

$$Y = -1,4945 X^2 + 35,826 X - 159,74$$

L'ensemble des mesures de LAI corrigées est reporté dans le tableau 10. Le nombre de mesures par site est différent du fait que :

- La structure et de zonation de chacune de trois mangroves étudiées sont différentes ;
- Les faibles hauteurs et densités des arbres et du feuillage n'ont pas toujours permis la mesure de LAI.

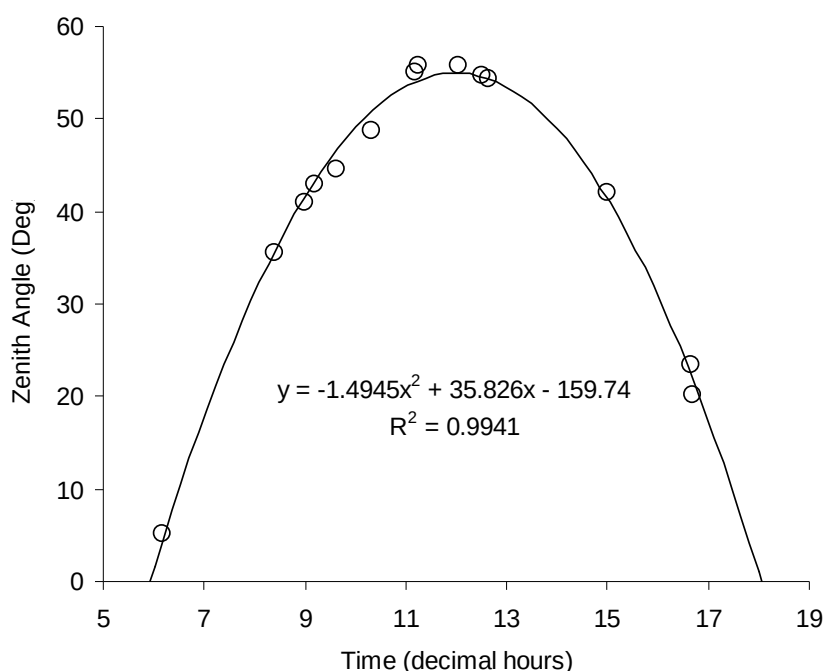


Figure 24 : Angle solaire en fonction du temps – La courbe de tendance ajustée est polynomiale.

Tableau 10 : Angle solaire et LAI pour chaque station des 3 sites de mangroves étudiés.

Site	Station	Date	Heure	Nombre d'enregistrements	Angle solaire (degrés)	LAI
OuanoT1	OU12	02-Oct-04	13:50	70	51.36	6.5
	OU11	02-Oct-04	12:10	50	56.35	6
	OU1	30-Sep-04	11:40	75	56.23	6.1
OuanoT2	OU7	01-Oct-04	15:35	75	37.18	4.4
	OU6	01-Oct-04	11:58	100	56.39	4.6
	OU5	01-Oct-04	10:19	74	52.17	7.2
	OU2	30-Sep-04	11:40	68	56.23	6.6
SodacalT1	SO1	03-Oct-04	10:19	75	52.17	3.5
	SO5	04-Oct-04	12:43	62	55.62	4.6
SodacalT2	SO7	05-Oct-04	9:50	75	49.39	4.8
	SO6	04-Oct-04	11:19	66	55.70	4.6
PouacoT1	PO1	06-Oct-04	14:20	76	48.25	3.8
PouacoT2	PO3	07-Oct-04	10:10	75	51.38	4.1
	PO4	07-Oct-04	11:05	77	55.15	3.5
	PO2	06-Oct-04	15:10	59	41.39	4.42

Les LAI mesurés dans le cadre de la présente étude sont généralement supérieurs à 4, à l'exception d'une station sur Sodacal (SO1) et de 2 stations à Pouaco (PO1 et PO4), indiquant que le développement de la canopée est satisfaisant, particulièrement sur Ouano. Le système racinaire est en outre bien développé à de nombreux endroits, particulièrement à Ouano avec une densité élevée d'arbres.

Globalement, les LAI mesurés à Sodacal sont plus bas que ceux de Ouano, ce qui signifie que la canopée est souvent plus ouverte même si les arbres sont hauts.

On n'observe pas de net gradient de LAI depuis la façade terrestre jusqu'à la frange maritime à l'exception de la radiale 2 de Ouano où l'on note une augmentation des valeurs de l'indice le long du transect.

4.2.2.3. Analyse des caractéristiques physico-chimiques des différents compartiments

L'ensemble des valeurs des différents paramètres mesurés est récapitulé en Annexe 4.

POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION (EH)

C'est un indice du degré d'oxydation ou de réduction dans les systèmes chimiques. Il indique la source d'oxygène utilisée par les bactéries pour la minéralisation de la matière organique dans les sédiments. Les sols sont généralement stratifiés verticalement en fonction de l'accepteur d'électron utilisé pour cette minéralisation. En surface, généralement en conditions aérobies, l'oxygène est l'accepteur terminal : les Eh sont de +720 à +740 mV. Les accepteurs sont ensuite en fonction du potentiel d'oxydo-réduction le nitrate (Eh = +720 mV), le manganèse (+470 mV), le fer (+60 mV), le sulfate (-200 mV) et le méthane (-250 mV) (Reeburg, 1983 ; Hussenot et Martin ,1995)

Un eH bas correspond à un milieu réduit où la dégradation de la matière organique se fait en conditions anaérobies, impliquant le fer ou les sulfates dans le processus. Des conditions anaérobies poussées peuvent conduire à la production de sulfures à l'odeur nauséabonde caractéristique.

Un eH élevé correspond à un milieu oxydé où la dégradation de la matière organique se fait plutôt en conditions aérobies.

Les valeurs mesurées dans cette étude sont généralement comprises entre -100 et +150 mV (Figures 25).

Les sols régulièrement à l'air libre ont des potentiels d'oxydo-réduction élevés en surface et sont donc bien oxydés (stations OU10, OU4, SO4, SO6, PO1 et PO8).

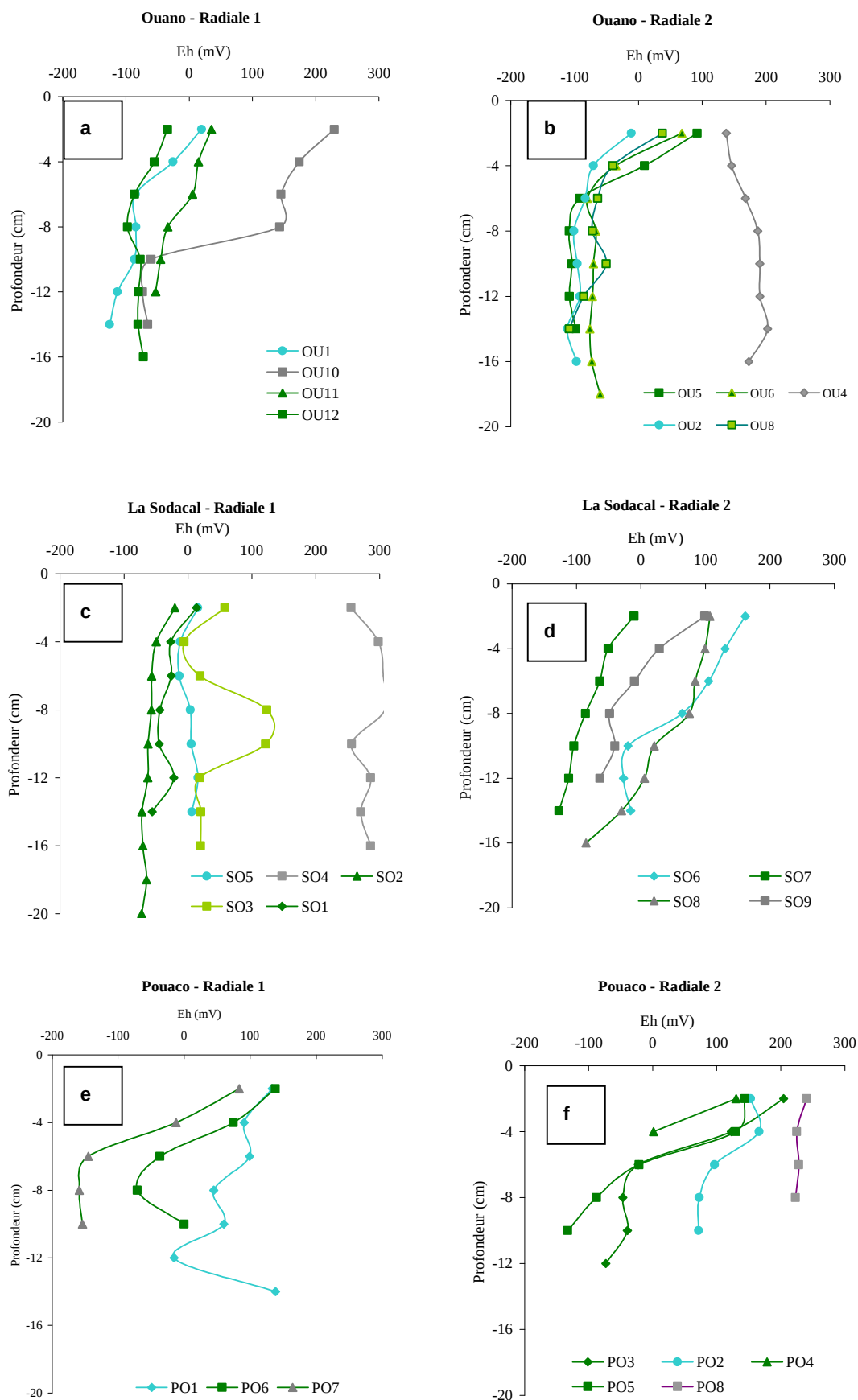
Les prélèvements réalisés à Ouano et à Sodacal sur la station SO5 sur des sols continuellement immergés de la frange maritime présentent des potentiels plus faibles compris entre 0 et -100mV. Toutefois, les valeurs sont plus élevées dans des zones toujours immergées à fort hydrodynamisme (sortie de creek ou d'arroyo) à Pouaco et à Sodacal (SO6). A l'image des stations de la zone maritime à faible hydrodynamisme, les zones intermédiaires à Rhizophora soumises à l'influence des fermes aquacoles montrent généralement des valeurs comprises entre 0 et -100 mV.

Seules les stations intermédiaires à Rhizophora de la radiale 2 de Pénéide de Ouano montrent un sédiment en surface bien oxydé. Les deux radiales de Pouaco sans influence aquacole, présentent la même caractéristique. Toutefois sur ce site, les valeurs en profondeur pour les

stations intermédiaires à Rhizophora et à Avicenia sont relativement basses (environ – 100mV) et sont à relier à un taux de matière organique élevé (cf les valeurs de carbone) lié à un développement racinaire important.

Les mesures montrent que les potentiels d'oxydo-réduction sur les deux premiers centimètres de sédiment sont significativement différents entre les sites. Ils sont significativement plus faibles à Ouano (+ 60 mV) et à Sodacal (+ 60 mV) qu'à Pouaco (+ 153 mV).

De plus, le potentiel d'oxydo-réduction moyen calculé à partir de l'ensemble des données mesuré sur toute la colonne sédimentaire est plus faible à Ouano (N=27) et Sodacal (N=26) qu'à Pouaco (N=24) pour les stations à Rhizophora (Figures 26a, b et c)



Figures 25 a, b, c, d, e et f : Profils de potentiel rédox des stations des 3 sites (façade maritime en bleu, stations intermédiaires en vert et stations près des bassins en gris)

PH

Le pH mesuré in situ mesure l'acidité du sol en l'état.

Le pH mesuré in situ est généralement compris entre 6 et 7,5 sur les trois sites, valeurs qui sont généralement observées pour des sols de mangrove.

On note toutefois un effet site significatif, avec Ouano légèrement acide et Sodacal et Pouaco proches de la neutralité. Les valeurs de Ouano, Sodacal et Pouaco sont respectivement de 6,5, 6,8 et 7,0.

Au sein d'un même site, on observe également un effet station (Figures 27a, b et c) :

- A Ouano, les valeurs sont généralement comprises entre 6 et 6,5 sauf pour les stations proches des sorties de bassins à savoir OU8 (mixte Rh-Av) et OU4 (sortie bassin) qui sont autour de 7.
- A Pouaco, les valeurs mesurées sont globalement neutres à légèrement basiques, exception faite des stations PO5 (6,4) et PO8 (6,5) qui sont légèrement acides.
- A Sodacal, les valeurs sont variables en fonction des stations.

CARBONE, AZOTE ET PHOSPHORE TOTAUX DANS LE SOL

Carbone total

Les concentrations mesurées par Alongi et al. (2002) dans des sols de mangrove en Thaïlande sont comprises entre 27 et 67 µg/g de sédiment sec. Les valeurs sont inférieures à 10 µg/g pour des sédiments de mangrove en Australie (Smith, 1995). Les valeurs sont de 54, 60 et de 120 µg/g de sédiment sec, respectivement à Ouano (N=27), Sodacal (N=27) et Pouaco (N=24). Si les deux premiers sites présentent des valeurs communes à ce qui a été mesuré par ailleurs, le site de Pouaco est riche en carbone. La concentration y est significativement plus élevée. Les racines mortes des arbres représentent une part significative de la concentration en carbone dans les sédiments et le développement racinaire était extrêmement important sur ce site. La forte teneur en carbone pourrait s'expliquer en partie par un turn-over élevé du système racinaire. On note un effet station au sein de chaque site avec les valeurs les plus élevées dans les zones à Rhizophora (Figures 28a, b et c).

Azote total

Les valeurs reportées dans la littérature montrent une concentration en azote pour des sédiments de mangrove non perturbés comprises entre 0,6 et 2,7 mg/g (Robertson et Phillips, 1995 ; Smith, 1995 ; Alongi et al., 2002) (i.e. 0.07% to 0.2%). Les concentrations sont de 2,1, 2,7 et 4,7 mg/g de sédiment sec respectivement pour Ouano (N=27), Sodacal (N=27) et Pouaco (N=24). Les valeurs à Pouaco sont relativement élevées comparativement aux valeurs observées en Thaïlande. Les trois sites présentent des concentrations significativement différentes : le taux d'azote dans les sédiments de Pouaco est significativement plus élevé que ceux de Ouano et de Sodacal. Au sein d'un même site, on note également des différences significatives entre stations avec des concentrations maximales observées dans les zones à Rhizophora (Figures 29a, b et c).

Phosphore Total

Les valeurs reportées dans la littérature montrent une concentration en phosphore pour des sédiments de mangrove non perturbés comprise entre 200 et 1500 µg/g de sédiment sec. Elles

sont de 240 µg/g pour des mangroves en Australie (Smith, 1995). Les concentrations sont de 235, 411 et 423 µg/g de sédiment sec respectivement pour Ouano (N=27), Sodacal (N=27) et Pouaco (N=24). Les valeurs sont donc dans la gamme généralement observée dans la littérature. On note un effet site avec les taux de Ouano significativement différents de ceux des autres sites. A Ouano et à Sodacal, les valeurs diminuent de la frange maritime en allant vers les bassins (Figures 30a, b et c). Les valeurs sont stables (autour de 400 µg/g) quelle que soit la station d'échantillonnage à Pouaco.

CARBONE, AZOTE ET PHOSPHORE TOTAUX DANS LES FEUILLES

Les taux de carbone sont la conséquence de la fixation de carbone par les feuilles et ne sont pas liés aux taux de carbone contenu dans les sédiments.

Dans les mangroves, le taux d'azote habituellement mesuré dans les feuilles est compris entre 0,1 et 1,16% du poids sec alors que ceux de phosphore varient entre 0,05 et 0,07% du poids sec.

Les taux de phosphore obtenus sur Ouano et Sodacal sont significativement plus élevés que ceux de Pouaco. Les taux d'azote dans les feuilles sont également plus élevés à Ouano et Sodacal qu'à Pouaco mais la différence n'est pas statistiquement significative.

Il y a une très forte corrélation entre le taux de phosphore et le taux d'azote dans les feuilles sur les 3 sites (Figure 31).

Cette forte corrélation et les taux élevés d'azote et de phosphore à Ouano et à Sodacal mettent en évidence une plus grande assimilation de N et P sur ces deux sites comparativement à Pouaco.

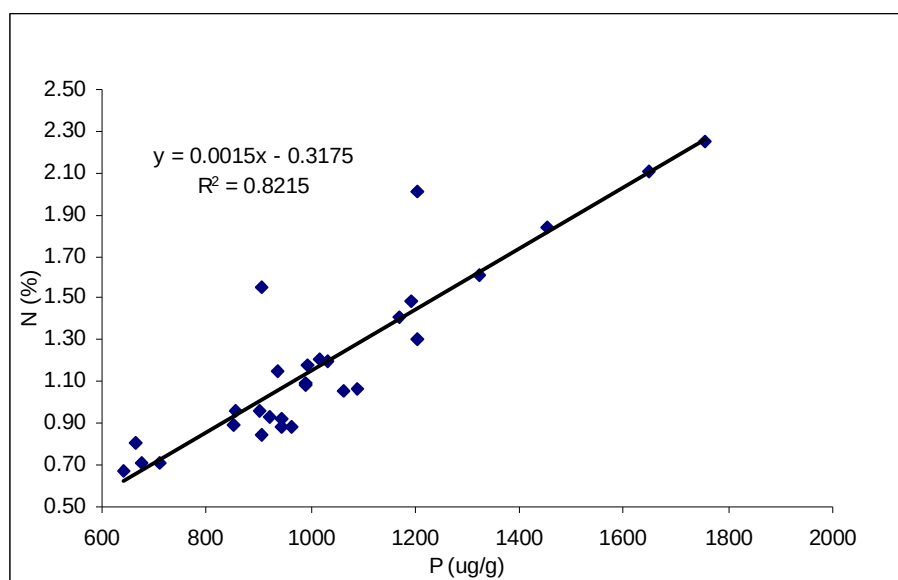
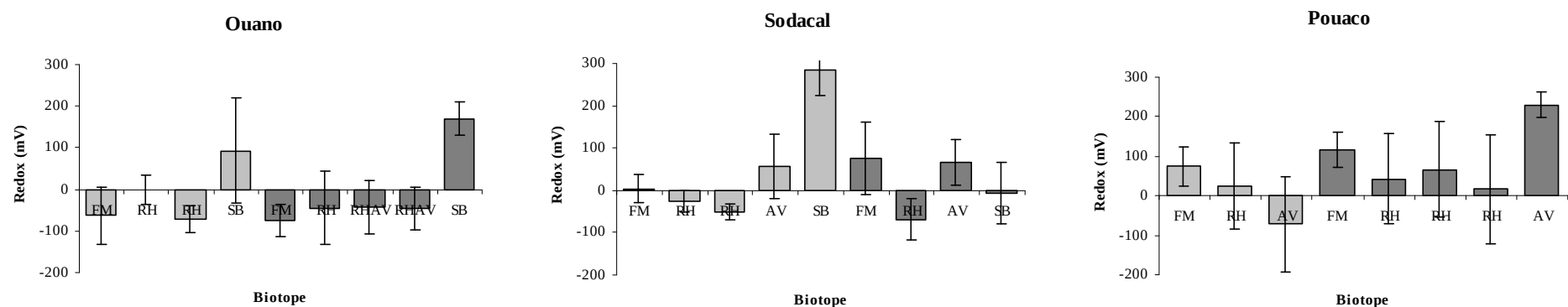
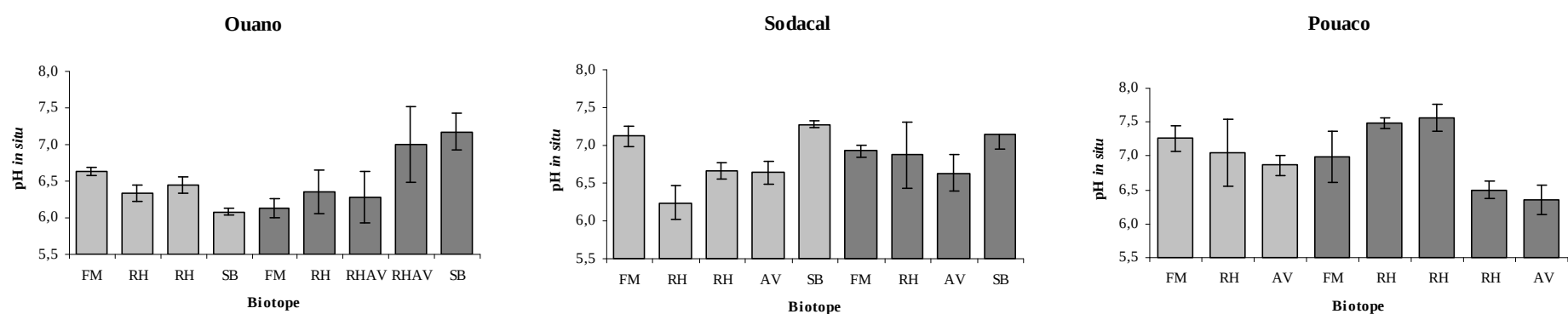


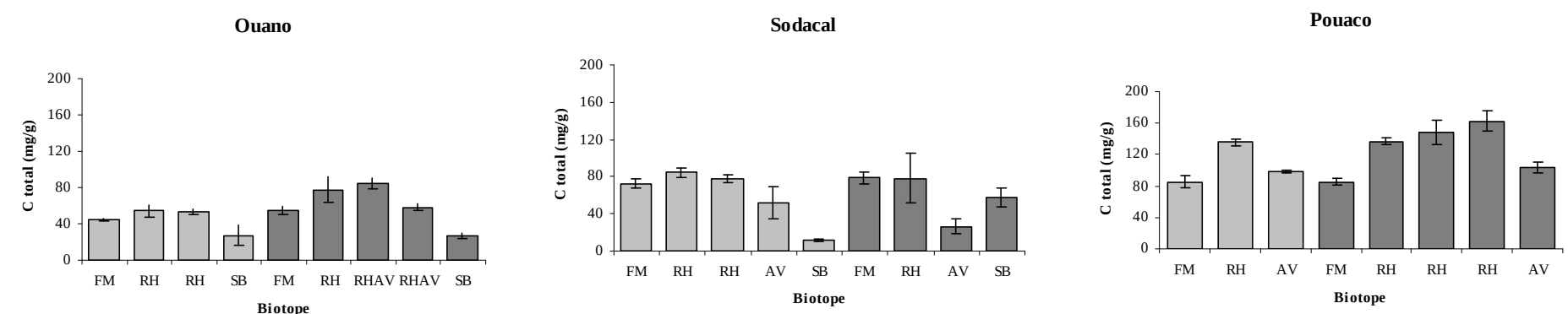
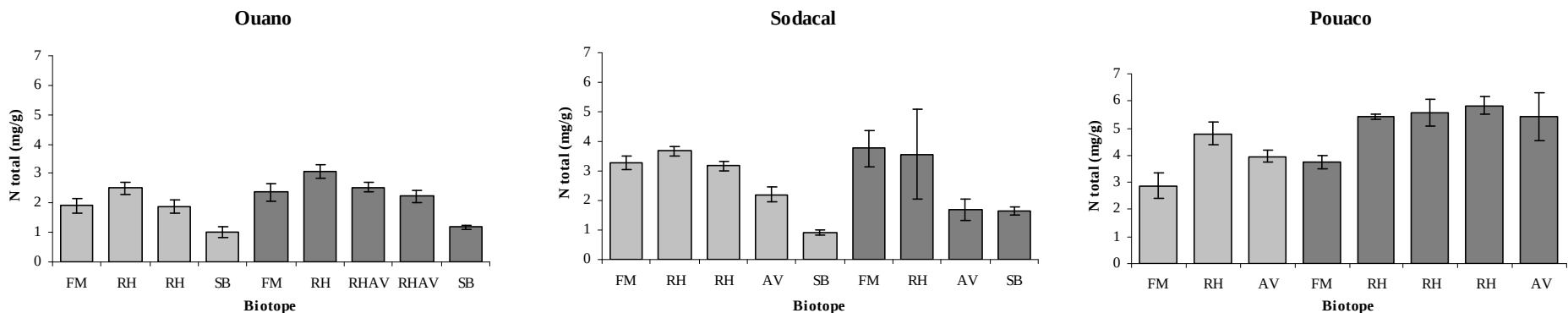
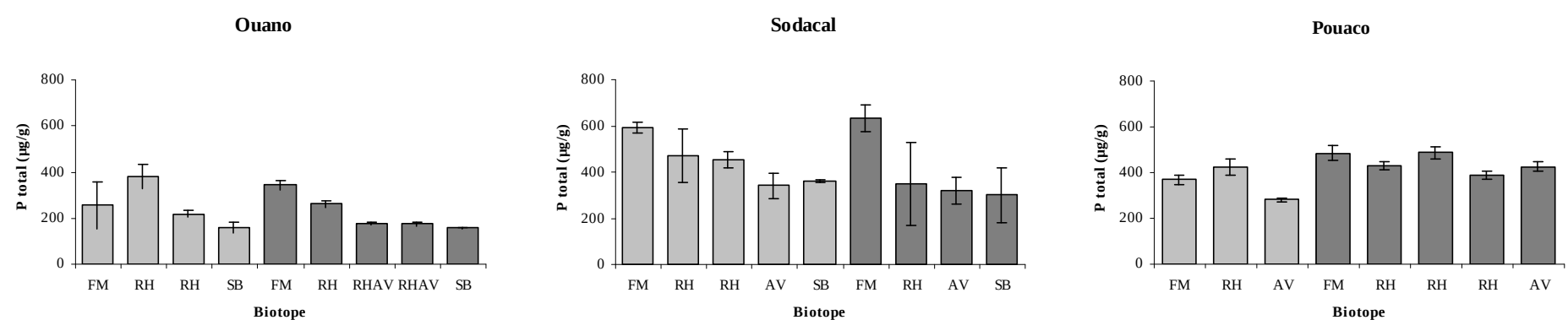
Figure 31 : Relation entre le taux de phosphore et le taux d'azote contenus dans les feuilles à partir de l'ensemble des échantillons.



Figures 26 a, b et c : Potentiel d'oxydo-réduction établi à partir des moyennes de chaque profil mesuré à chaque station.



Figures 27a, b et c : pH in situ moyen mesuré en surface à chaque station.



Figures 28a,b et c, 29a, b et c, 30a, b et c : Concentration en phosphore total, en azote total et en carbone total dans les échantillons de sédiment de chaque station.

FM : station OU1
 RH : station OU11
 RH : station OU12
 SB : station OU10
 FM : station OU2
 RH : station OU5
 RHAV : station OU6
 RHAV : station OU8
 SB : station OU4

FM : stations SO5
 RH : station SO1
 RH : station SO2
 AV : station SO3
 SB : station SO4
 FM : station SO6
 RH : station SO7
 AV : station SO8
 SB : station SO9

FM : stations PO1
 RH : stations PO6
 AV : stations PO7
 FM : stations PO2
 RH : stations PO4
 RH : stations PO3
 RH : stations PO5
 AV : stations PO8

FM = Frange Maritime ; AV = zone à Avicennia ; RH = zone à Rhizophora ; RHAV = zone de transition Avicennia – Rhizophora ; SB = sortie de bassin

4.2.2.4. Analyse de l'abondance de la faune mégabenthique de la mangrove

Les stations les plus internes proches des digues des bassins ont fait l'objet d'échantillonnage de faune mégabenthique par cadrats. Il n'a pas été possible d'échantillonner la faune dans d'autres strates plus externes, à l'exception de la station OU8, du fait d'une immersion de ces zones empêchant la récolte d'organismes tels que les crabes notamment.

Au total, 7 stations de faune ont été réalisées :

- Ouano : Transect1 OU3 (zone asséchée entre Avicennia et salicornes)
 Transect2 OU4 (zone de pré salé) et OU8 (zone de transition entre Avicennia et Rhizophora)
- Sodacal : Transect1 SO4 (zone de pré salé)
 Transect2 SO9 (zone de pré salé parmi quelques Avicennia éparses)
- Pouaco : Transect1 PO7 (zone d'Avicennia courts et clairsemés)
 Transect2 PO8 (zone d'Avicennia courts et clairsemés)

Remarque : Même si les échantillonnages ont été effectués dans le même type de strate pour chaque site, la nature et l'état des sols (sec ou humide, plus ou moins compacté) étant parfois différents d'une station à l'autre ont pu engendrer un biais dans l'approche comparative des densités.

Globalement, la diversité est peu élevée quel que soit le site considéré. Le nombre total de taxa recensés s'élève à 11. Les organismes majoritairement présents sur l'ensemble des stations sont des crabes et des vers (Tableau 11). Les cérithes observées en grand nombre de façon très localisée sur une station en bordure de digue de bassins étaient toutes mortes. Elles ont été notées dans la liste mais aucun autre spécimen n'a été observé ailleurs, vivants ou morts. Il est possible qu'elles proviennent d'ailleurs et qu'elles aient été transportées avec les sédiments.

De nombreux vers ont été observés mais du fait de leur taille réduite et de leur état après échantillonnage (souvent écrasés dans la boue compacte), il a été impossible de les identifier. Ont été toutefois notées trois espèces différentes.

Tableau 11 : Liste des taxa recensés dans les cadrats réalisés sur l'ensemble des stations.

Groupe	Espèce	Nom commun
Mollusque gastéropode	Coquilles de cérithe indet.	
Mollusque pulmoné	<i>Onchidium</i> cf. <i>damelli</i>	
Ver	Ver indet1	
	Ver indet2	
	Ver indet3 plat annelé	
Crustacé	<i>Neosamartium</i> sp.	Grapsidé
	<i>Parasesarma</i> sp.	Grapsidé
	<i>Macrophthalmus latreilli</i>	Grapsidé
	<i>Uca</i> cf. <i>crassipes</i>	Crabe violoniste
	<i>Uca dussumieri</i>	Crabe violoniste
	<i>Scylla serrata</i>	Crabe de palétuvier

Les résultats de densité par station sont récapitulés dans le tableau 12. Les densités totales (sans tenir compte des coquilles mortes de cérithes et des trous de crabes) sont comprises entre 2,7 et

34 individus / m². La faible densité de station OU8 est délicate à interpréter car l'échantillonnage n'a pas été réalisé sur le même type de substrat que les autres.

Pour chaque site, les densités totales obtenues aux deux stations sont très différentes avec des écarts compris entre 10,7 et 26 individus / m². Quelle que soit l'espèce ou le groupe d'espèce considéré, les réplicats mettent en évidence une grande variabilité intra-station mais également intra-site.

Les écarts les moins importants sont ceux relatifs aux densités totales de crabes. Les valeurs obtenues à Sodacal sont les moins élevées (1, 3 et 1, 3 ind. / m²), celles de Ouano intermédiaires (8 et 9, 3 ind. / m²) et celles de Pouaco les plus élevées (9,3 et 25,3 ind. / m²). La comparaison des densités des 3 sites ne permet pas de montrer significativement une quelconque influence du fonctionnement de fermes aquacoles sur la faune mégabenthique de la mangrove jouxtant les bassins.

Tableau 12 : Densité (Nb individus / m²) par taxon ou groupe de taxon et par station.

Espèce / Station	OU3	OU4	OU8	PO7	PO8	SO4	SO9
Coq. Cérithes	0	0	0	0	0	0	133,3
<i>Onchidium</i> sp.	0	0	0	0	0	1,3	0
<i>Uca</i> cf <i>crassipes</i>	2,7	1,3	0	8	1,3	0	0
<i>Uca</i> <i>dussumieri</i>	2,7	0	0	0	0	0	0
Grapsidae indet	2,7	5,3	0	17,3	8,0	1,3	1,3
<i>Scylla</i> <i>serrata</i>	0	2,7	0	0	0	0	0
Trous de crabes	13,3	21,3	0	49,3	0	6,7	0
Ver indet1	0	24,7	2,7	0	0	6,7	0
Ver indet2	0	0	0	0	0	9,3	0
Ver indet3 plat annelé	0	0	0	0	0	0	6,7
Total Crabes	8,0	9,3	0,0	25,3	9,3	1,3	1,3
Densité totale	8,0	34,0	2,7	25,3	9,3	18,7	8,0

Parallèlement au recensement des crabes dans le cadrat et face à la difficulté de les échantillonner, il a été décidé de compter également les trous à la surface du sédiment. D'après les résultats obtenus, il semble qu'une corrélation puisse exister entre le nombre de trous et le nombre de crabes (Figure 32). Toutefois, l'équation de la courbe de tendance basée sur un nombre restreint de stations peut être sujette à caution.

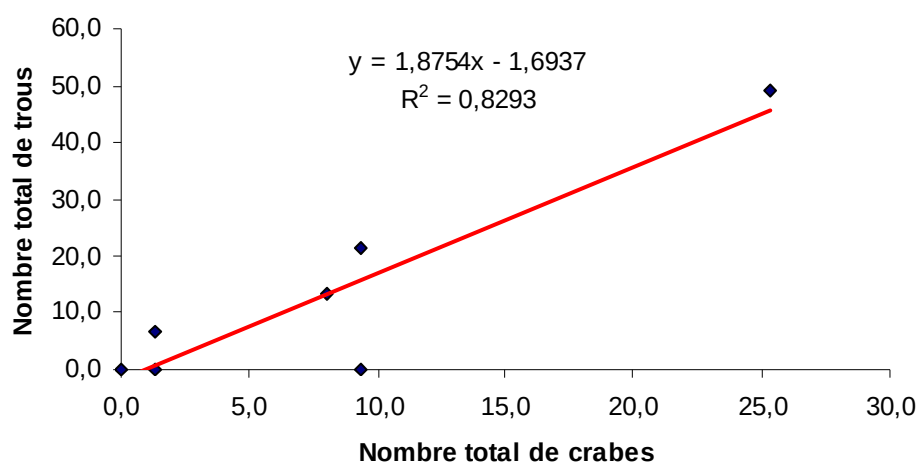


Figure 32 : Relation entre le nombre de trous de crabes et le nombre de crabes échantillonnés sur les 7 stations.

4.3. Analyse comparative des photographies aériennes de mangroves

4.3.1. Généralités sur les photographies et les interprétations

Plus de 100 photographies aériennes des 4 sites d'étude ont été répertoriées au SMAI. Elles sont d'origine variée (DITTT, DPSI, IFREMER, La Sodacal, ZoNéCo) et présentent des caractéristiques différentes.

Chaque photographie est caractérisée par :

- La date et l'heure de prise photographique (conditionnant son exposition par rapport au soleil) ;
- Le type de plateforme à partir de laquelle est prise la photographie (verticale/oblique depuis un avion, un hélicoptère ou un satellite) et sa verticalité ;
- L'emprise et l'échelle du 1/8000 au 1/40 000 ;
- L'orientation des runs photographiques engendrant une exposition différente ;
- La résolution de numérisation entre 300 et 600 dpi ;
- La couleur ou le noir et blanc.

Seules les photographies prises depuis une plateforme verticale et de qualité suffisante pour l'interprétation ont été conservées, scannées (lorsqu'elles étaient en format papier) puis géoréférencées. Le nombre de photos retenues par année est fonction de l'emprise de chaque photo pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Au total, 32 photos ont été géoréférencées et 21 uniquement ont été utilisées pour l'interprétation du fait de leur pertinence (qualité permettant la mise en évidence d'évolution de la structure végétale sur la zone d'étude), aboutissant à la création de 15 cartes par digitalisation (Annexe 5).

Une recherche complémentaire sur la disponibilité d'images satellitales (Ikonos QuickBird, SPOT et Landsat7) a été réalisée afin de compléter la série temporelle de la base de données photographiques. Compte tenu des objectifs initiaux (mise en évidence des évolutions des superficies des différentes strates végétales sur chaque site) aucune image satellitale n'a été retenue pour cette étude, du fait de leur qualité limitée pour différencier des formations végétales.

Les photographies anciennes sont en général noir et blanc et l'échelle est grande, celles prises depuis 1993 sont en couleur et l'échelle plus petite. Ainsi, l'interprétation thématique des anciennes photographies est parfois plus difficile du fait d'une qualité moyenne. La distinction entre les différentes strates végétales n'a pas toujours été possible.

C'est pourquoi, il a été nécessaire de créer des classes supplémentaires, correspondant à des formations végétales non identifiées ou plus ou moins caractérisées telles que :

- « Indéterminé » ;
- « Végétation clairsemée » ;
- « Végétation moyennement dense » ;

- « Végétation dense ».

Le terme « végétation » est dans la plupart des cas synonyme de *Avicennia* ou de *Rhizophora*, les deux principales espèces végétales observées dans les mangroves de Nouvelle-Calédonie. Les *Avicennia* qui apparaissent plus clair sur une photographie en couleur, ne se distinguent pas toujours des *Rhizophora* courts sur une photographie en noir et blanc de qualité moyenne. La limite entre les deux strates est donc difficile à mettre en évidence et dans ce cas, une des classes « végétation » est utilisée pour symboliser la zone digitalisée. En fonction de l'appréciation du niveau de densité, il est utilisé « végétation clairsemée », « végétation moyennement dense » ou « végétation dense ».

De même, il a parfois été difficile de distinguer sur certaines photographies anciennes « les sols nus ou avec salicornes » des « zones inondées ou envasées ». La symbologie des « sol nu ou avec salicornes ou inondé » regroupant les deux précédentes catégories a alors été utilisée dans ce cas.

La légende, tenant compte de ces limites d'interprétation, est identique pour chacune des cartes (Figure 33). Les termes *Avicennia* et *Rhizophora* sont utilisés comme nom commun dans le reste du rapport, sauf lorsqu'il est précisé une espèce particulière. *Avicennia* correspond ici à ***Avicennia* sp. cf *offinialis*** et *Rhizophora* peut englober plusieurs espèces dont la principale est ***Rhizophora stylosa***.



Figure33 : Légende des cartes thématiques de mangrove des 4 sites d'étude.

Les ouvrages aquacoles ont également été symbolisés afin de repérer facilement d'une part leur emprise sur la mangrove et d'autre part les évacuations des effluents.

Pour chaque site, une zone d'étude ou emprise a été déterminée en tenant compte des **limites naturelles de la mangrove** telles que la façade maritime ainsi que des **limites artificielles** telles que les digues des bassins aquacoles. La définition géographique de l'emprise a également pris

en compte **la couverture des photographies aériennes** de bonne qualité retenues pour la digitalisation. En effet, certaines photographies intéressantes pour l'interprétation ne couvraient pas l'ensemble de la mangrove. La zone d'étude a donc été basée sur les limites imposées par le cadre de ces photographies. Enfin, l'emprise a été définie de telle sorte qu'elle corresponde à la **zone sous influence potentielle directe du fonctionnement des bassins**.

Ainsi pour chaque site et compte tenu des 4 critères précédemment cités, la zone d'étude est identique d'une année sur l'autre afin de pouvoir comparer quantitativement les superficies des différentes strates de la mangrove.

4.3.2. Ouano

4.3.2.1. Documents archivés

Les documents archivés relatifs à Ouano sont :

- 7 photographies géoréférencées : 1954, 1976, 1993, 1996, 1997, 2 photos 2004 ;
- 5 cartes réalisées par digitalisation : 1954, 1976, 1993, 1997, 2004 ;
- 1 carte réalisée par classification non supervisée : 2004.

L'emprise des cartes est délimitée par :

- Le chenal d'arrivée d'eau à l'ouest ;
- Les bassins et leurs digues au sud et à l'est ;
- Le droit de la digue nord du dernier bassin au nord.

4.3.2.2. Etat de la mangrove en 2004

La mangrove de Ouano en 2004 est une mangrove de fond de baie relativement ouverte avec un coefficient d'ouverture de 0,458 et une potentialité d'échange de 0,335.

$$ECH = S \text{ (km}^2\text{)} \times FM \text{ (façade maritime en m)} / FT \text{ (façade terrestre en m)} = 0,73 \times 1770/3865$$

Elle est essentiellement composée de *Rhizophora* denses formant un croissant de lune depuis la façade maritime jusqu'à environ les deux tiers de la distance côte-bassins (Figures 34 et 35). Des zones de *Rhizophora* denses sont également visibles en face des moines de sorties des bassins 2, 3, 4, 5 et 6. L'observation sur le terrain a confirmé l'existence de zones denses.

La strate d'*Avicennia* est étroite particulièrement devant les bassins sud (1, 2, 3, 4 et 5) alors qu'elle est plus développée dans le nord. Il s'agit principalement d'*Avicennia* clairsemé avec toutefois un îlot plus dense en face des bassins nord 7 et 8.

La strate de sol nu ou avec salicornes est pratiquement inexistante à l'exception de la moitié nord de la mangrove, en face des bassins 6, 7, 8 et 9, où elle atteint une largeur d'une trentaine de mètres depuis la digue des bassins. Elle est souvent colonisée par quelques petits *Avicennia*, ce qui fait que la limite entre les deux strates est difficile à déterminer.

Des zones inondées localisées juste en sortie de bassins correspondent aux endroits où sont rejetés les effluents. Elles sont nettement plus visibles en face des bassins en eau au moment de la prise photographique.

Une trouée d'environ 70 m de long sur 30 de large constituée de 3 lobes principaux a été identifiée dans les *Rhizophora* denses au droit du bassin 3.



Figure 34 : Photographie aérienne de la zone de Ouano en 2004.

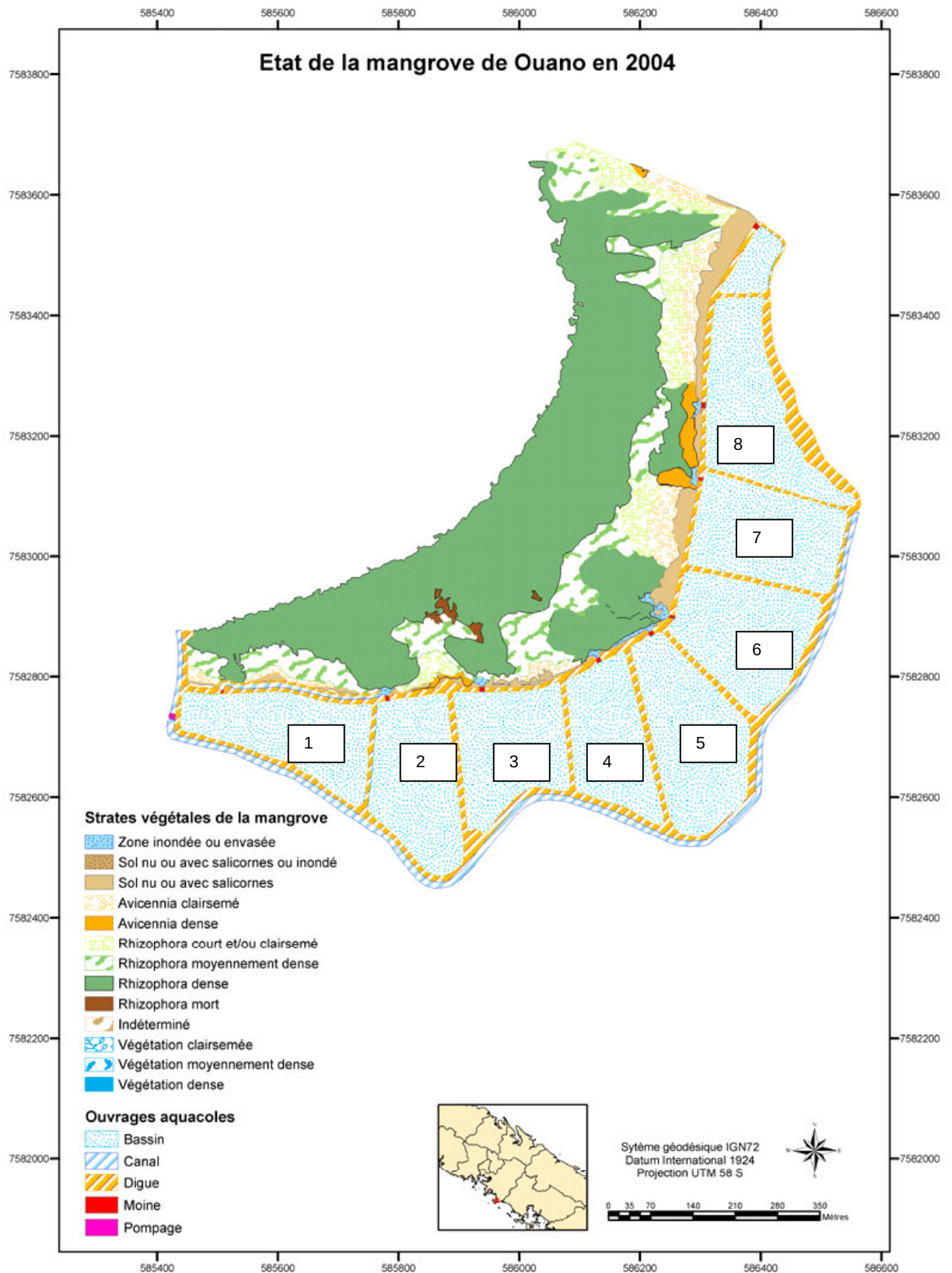


Figure 35 : Interprétation de la mangrove de Ouano en 2004

L'essai de classification non supervisée a permis de classer les pixels de la photographie de Ouano de 2004 en 10 classes qui ont été regroupées par la suite et 4 classes (Figure 36).

Le regroupement des classes a été réalisé en fonction des observations de terrain. Toutefois cette méthode ne s'est pas avérée aussi pertinente que l'interprétation par digitalisation. En effet, l'information radiométrique peut être identique pour 2 formations végétales différentes telles que *Avicennia* dense et *Rhizophora* clairsemée.

Les formations végétales différentes ne sont donc pas facilement discriminées à l'aide de cette méthodologie.

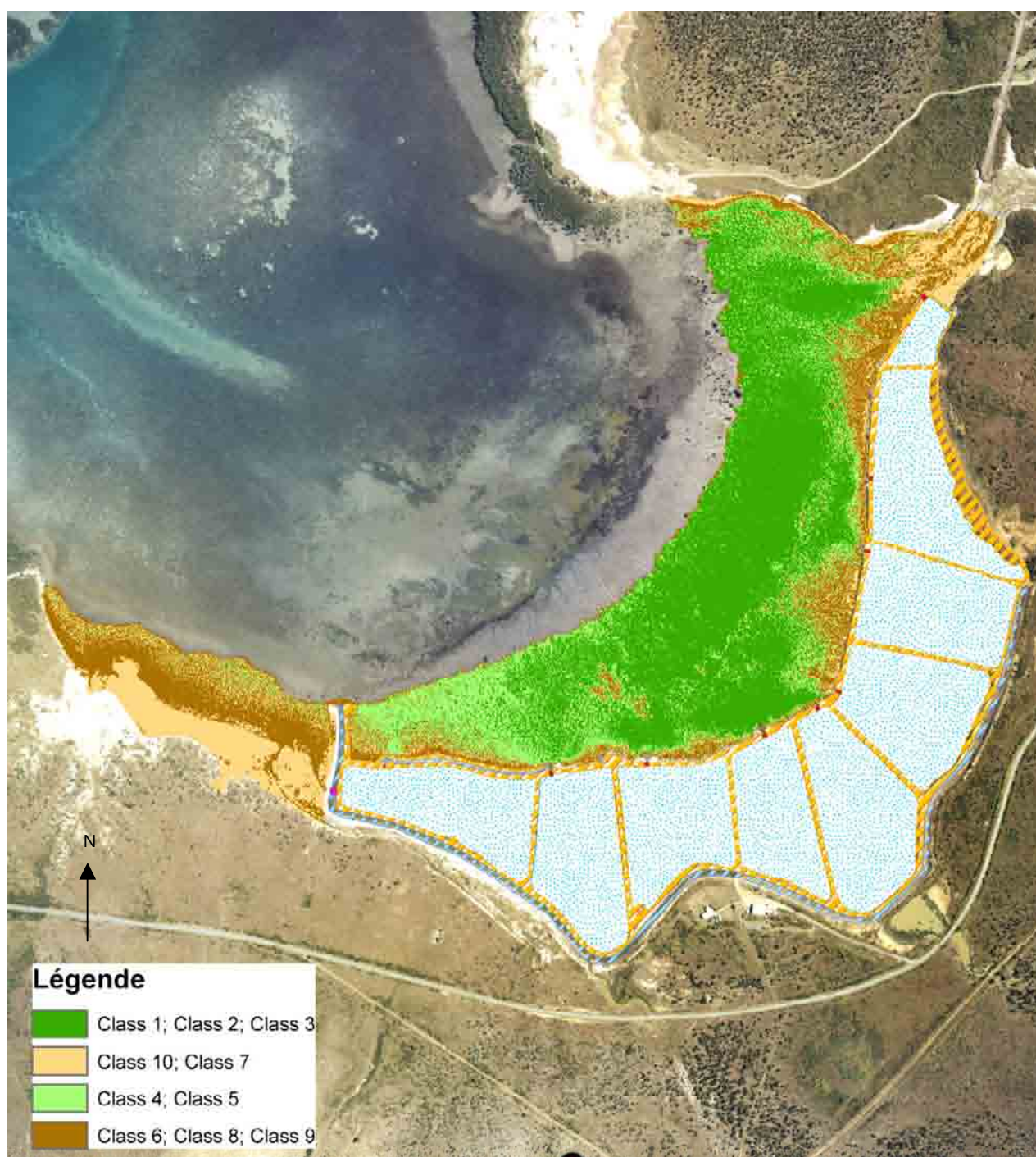


Figure 36 : Classification non supervisée de la mangrove de Ouano en 2004.

4.3.2.3. Evolution

La digitalisation des photographies de 1954, 1976, 1993, 1997 et 2004 a permis de montrer comment a évolué la mangrove de Ouano avant et après construction de la ferme en 1995 (Figures 37a, b, c, d et e).

Jusqu'en 1993, la structure de la mangrove n'a pratiquement pas évolué :

- La succession des strates est conservée de la frange interne à la façade maritime : reste de tannes, végétation clairsemée, Rhizophora clairsemés, Rhizophora moyennement denses, Rhizophora denses.
- La classe « végétation clairsemée » est utilisée pour représenter la zone comprise entre les prés salés et la strate de Rhizophora clairsemés. Il s'agit probablement d'Avicennia mais la texture et la couleur ne permettent pas de l'affirmer. De plus sans la vérité terrain de l'époque, cette hypothèse reste posée d'autant que cette bande végétale correspond à des Rhizophora en 2004.
- La strate des Rhizophora denses a tendance à avoir légèrement augmenté en repoussant ses limites vers l'intérieur. Les modifications restent toutefois mineures et cette bande végétale reste très bien discernable quelle que soit l'année de la photographie.
- La végétation du premier tiers interne de la mangrove reste clairsemé quelle que soit l'espèce végétale prédominante.

La comparaison des photographies de 1997 et surtout de 2004 avec celle de 1993 indique des changements notables dans la structure de la mangrove :

- Rétrécissement des prés salés qui occupent généralement une bande d'une largeur maximale de 5 m à l'exception de ceux situés en face des bassins 6, 7 et 8 au nord est.
- Quasi disparition de la strate d'Avicennia, à l'exception de la partie localisée en face des bassins 6, 7 et 8.
- Apparition d'un patch d'Avicennia dense en face des bassins 7 et 8.
- Progression des strates de Rhizophora vers l'intérieur, jusqu'en face des moines de sortie des bassins, particulièrement à la sortie des bassins 3, 4 et 5.
- Densification des Rhizophora moyennement denses ou clairsemés, particulièrement en face des moines de sortie des bassins et au bout du chenal d'évacuation des effluents des bassins 1 et 2, parallèle à la côte.
- Apparition d'une trouée d'une cinquantaine de m de long au droit du bassin 3 dans la strate de Rhizophora denses. Elle n'existait pas sur la photographie de 1997.

Il est à noter que la photographie de 1997 (deux ans après le fonctionnement de la ferme) ne montre pas de modifications importantes de la structure de la mangrove comparativement aux photographies prises avant la construction de la ferme. On peut déjà observer une densification des Rhizophora moyennement denses et clairsemés mais l'avancée des Rhizophora jusqu'aux sorties de bassins n'avait pas encore eu lieu à cette époque. Cette progression interne des Rhizophora par remplacement des Avicennia a du apparaître après.

4.3.2.4. Superficies

La mangrove de Ouano a une superficie totale de 32 hectares qui n'a guère évolué depuis 1954 (Tableau 13).

Le changement le plus spectaculaire de la structure de la mangrove de Ouano est la nette augmentation de la strate de Rhizophora denses, surtout entre 1997 et 2004 passant de 12,9 hectares à environ 20,5 ha, soit une progression de près de 1,1 ha / an (Figure 38). Cette strate représente 63% de la superficie totale de la mangrove en 2004 (seulement 28% en 1954).

L'augmentation était moins importante, avec quasiment aucune modification de cette strate 4 ans après la construction de la ferme, passant de 12, 6 à 12,9 hectares entre 1993 et 1997. L'influence de la ferme ne s'est pas faite sentir dès son démarrage mais plutôt après un certain nombre d'années de fonctionnement.

Notons une évolution avant la mise en place de la ferme, notamment sur la strate de Rhizophora denses qui est passée de 8,6 ha en 1954 à 12,6 ha en 1993, soit une augmentation naturelle de 1025 m² par an, c'est-à-dire 10 fois moins que celle observée entre 1997 et 2004.

L'augmentation de la superficie de la strate de Rhizophora denses est à rattacher à une densification des strates de Rhizophora clairsemés et surtout des Rhizophora moyennement denses dont la superficie est passée respectivement de 7 et 6,8 ha en 1954 à 6,6 et 3,9 ha en 1993.

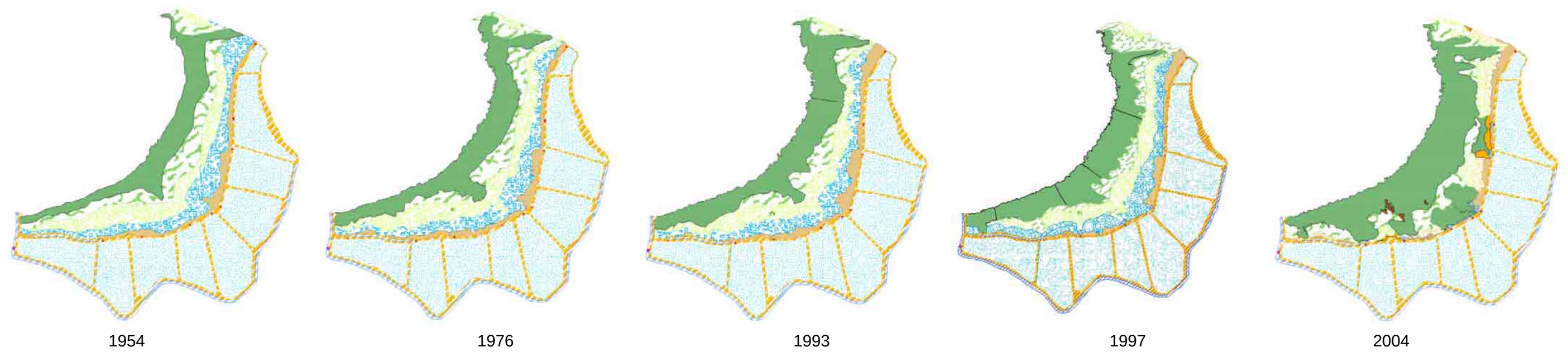
Dès 1997, elle s'est faite aux dépens des Avicennia et de ce qui a été appelée « Végétation clairsemée » correspondant probablement en grande partie à des Avicennia, passant de 5,8 ha en 1997 à 2,4 ha en 2004.

Les sols nu ou avec salicornes associés aux zones envasées ou inondées ont légèrement augmenté jusqu'en 1993 puis ont eu tendance à diminuer depuis, passant de 3,2 ha en 1993 à 2 ha environ en 2004. Cette diminution ne prend pas en compte l'utilisation des tannes à des fins de construction des bassins puisque les superficies ont été calculées à partir de la même emprise.

Par ailleurs, une trouée de 1700 m² dans la strate de Rhizophora, dont on ne connaît ni l'origine ni la date d'apparition, a été notée sur la photographie aérienne de 2004.

Tableau 13 : Evolution des superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Ouano entre 1954 et 2004.

Type de mangrove / Année	Superficie (m ²)						Superficie (%)					
	1954	1976	1993	1997	2004	Moyenne	1954	1976	1993	1997	2004	Moyenne
Zone inondée ou envasée				1165	2390	1777	0%	0%	0%	0%	1%	1%
Sol nu ou avec salicornes	23403	27298	32273	22394	17885	24651	8%	8%	10%	7%	5%	8%
Végétation clairsemée	61299	61564	60685	58565		60528	20%	19%	19%	18%	0%	19%
Avicennia clairsemé					18450	18450	0%	0%	0%	0%	6%	6%
Avicennia dense					5180	5180	0%	0%	0%	0%	2%	2%
Rhizophora court et/ou clairsemé	70370	73210	65629	60586	24097	58778	23%	23%	20%	19%	7%	18%
Rhizophora moyennement dense	67837	51223	39708	51856	51321	52389	22%	16%	12%	16%	16%	16%
Rhizophora dense	85897	109777	126108	129007	204968	131151	28%	34%	39%	40%	63%	41%
Rhizophora mort					1706	1706	0%	0%	0%	0%	1%	1%
Total	308805	323072	324404	323572	325997	321170	100%	100%	100%	100%	100%	100%



Figures 37a, b, c, d et e : Evolution de la mangrove de Ouano (1954, 1976, 1993, 1997, 2004)

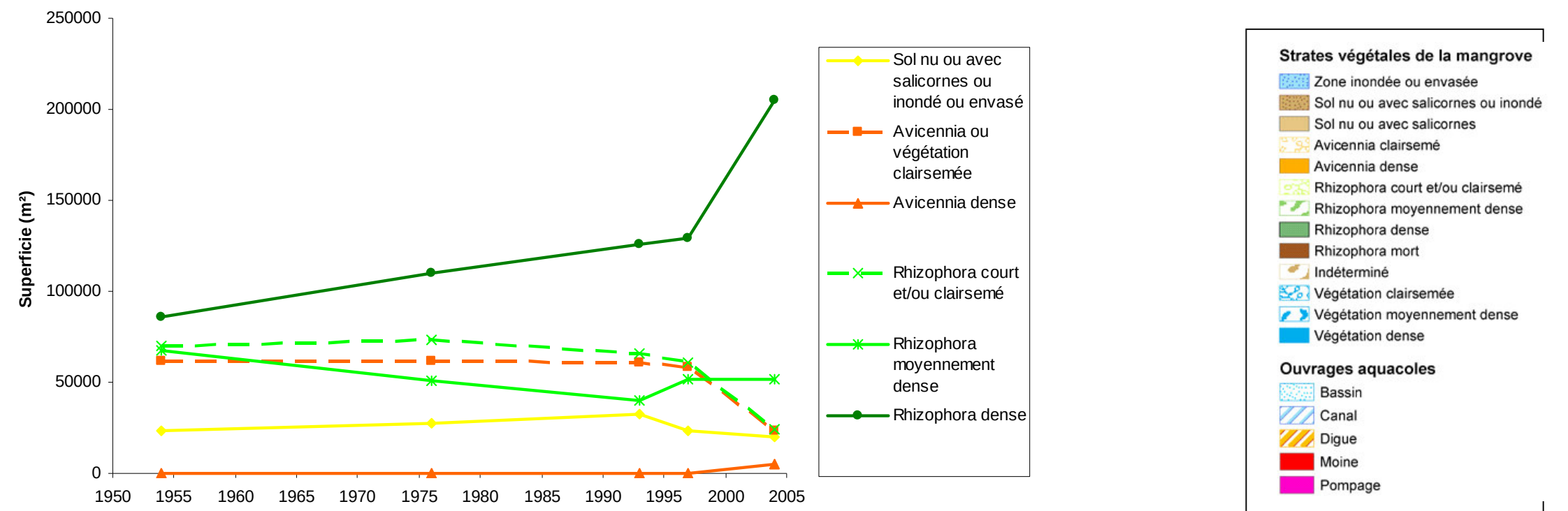


Figure 38 : Evolution des superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Ouano entre 1954 et 2004.

4.3.3. Sodacal

4.3.3.1. Documents archivés

Les documents archivés relatifs à Sodacal sont :

- 13 photographies géoréférencées : 2 photos 1954, 1976, 1982, 1996, 1998, 2 photos 2002, 5 photos 2004 ;
- 6 cartes réalisées par digitalisation : 1954, 1982, 1996, 1998, 2002, 2004.

L'emprise des cartes est délimitée par :

- Les bassins et leurs digues au nord et à l'est ;
- Le creek naturel principal remontant vers le dernier bassin de grossissement à l'ouest ;
- Le promontoire de sol nu au sud.

4.3.3.2. Etat en 2004

La mangrove de Sodacal en 2004 est plus complexe que celle de Ouano en terme de structure générale. Bien qu'elle soit également une mangrove de fond de baie, elle présente une façade maritime plus restreinte comparativement à la précédente (Figures 39 et 40). Elle s'enfonce plus profondément à l'intérieur des terres, les prés salés les plus éloignés de la côte étant à environ 1km au niveau des bassins nord. De ce fait, le coefficient d'ouverture est plus petit que celui de Ouano, avec 0,334, mais du fait d'une superficie importante, la potentialité d'échange est plus grande atteignant 0,851.

$$ECH = S \text{ (km}^2\text{)} \times FM \text{ (façade maritime en m)} / FT \text{ (façade terrestre en m)} = 2,55 \times 2480 / 7430$$

Le cœur de la forêt est essentiellement composé de *Rhizophora* denses jusqu'à la frange maritime, qui laissent place à des *Rhizophora* moyennement denses puis clairsemés vers l'intérieur des terres. Une large trouée observée *in situ* correspondant à des souches cassées de grands *Rhizophora* a également été mise en évidence à partir de la photographie 2004 au sud-est de la grande digue et du chenal artificiels de direction nord sud. Quelques trouées de plus petite taille ont également été notées dans la partie sud de la strate de *Rhizophora* dense.

La strate d'*Avicennia* ne constitue pas une bande régulière mais est plutôt représentée par des îlots plus ou moins grands correspondant à des « patchs » surélevés sur sol asséché observés *in situ*. Elle est majoritairement clairsemée avec toutefois des zones plus denses dans la partie sud de la mangrove. Ces parties denses sont positionnées en face des sorties de bassins.

La strate de sol nu ou avec salicornes est globalement plus développée que celle de Ouano. Elle atteint parfois près de 80 m de large avec toutefois une incursion de la strate d'*Avicennia* à certains endroits. Contrairement à Ouano, une grande partie du sol nu est envasé, voire inondé sous forme de chenaux entourant les îlots surélevés de sol nu asséché. L'envasement ou l'inondation semble plus marqué dans la partie nord de la mangrove, notamment à l'est de la digue qui traverse la mangrove. Ce sol envasé ou inondé est à l'interface des bassins et de la strate d'*Avicennia* dans le nord alors qu'il se situe généralement entre la strate d'*Avicennia* et celle des *Rhizophora* dans le sud. On observe en effet des zones immergées sous forme de cordons ou plus étendues isolant des patchs de *Rhizophora* au droit des bassins U et V dans le sud.

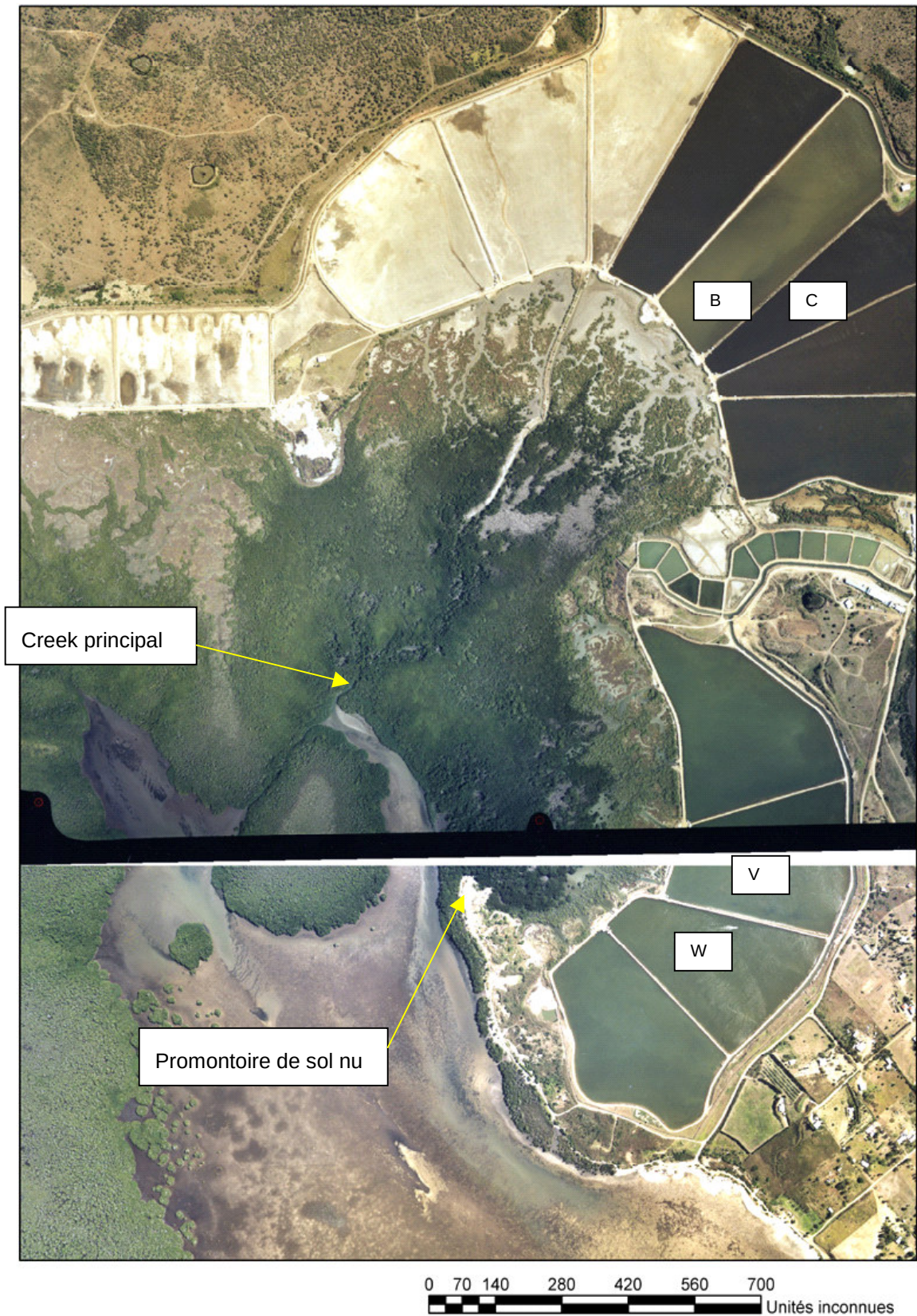


Figure 39 : Photographie aérienne de la mangrove de Sodacal en 2004.

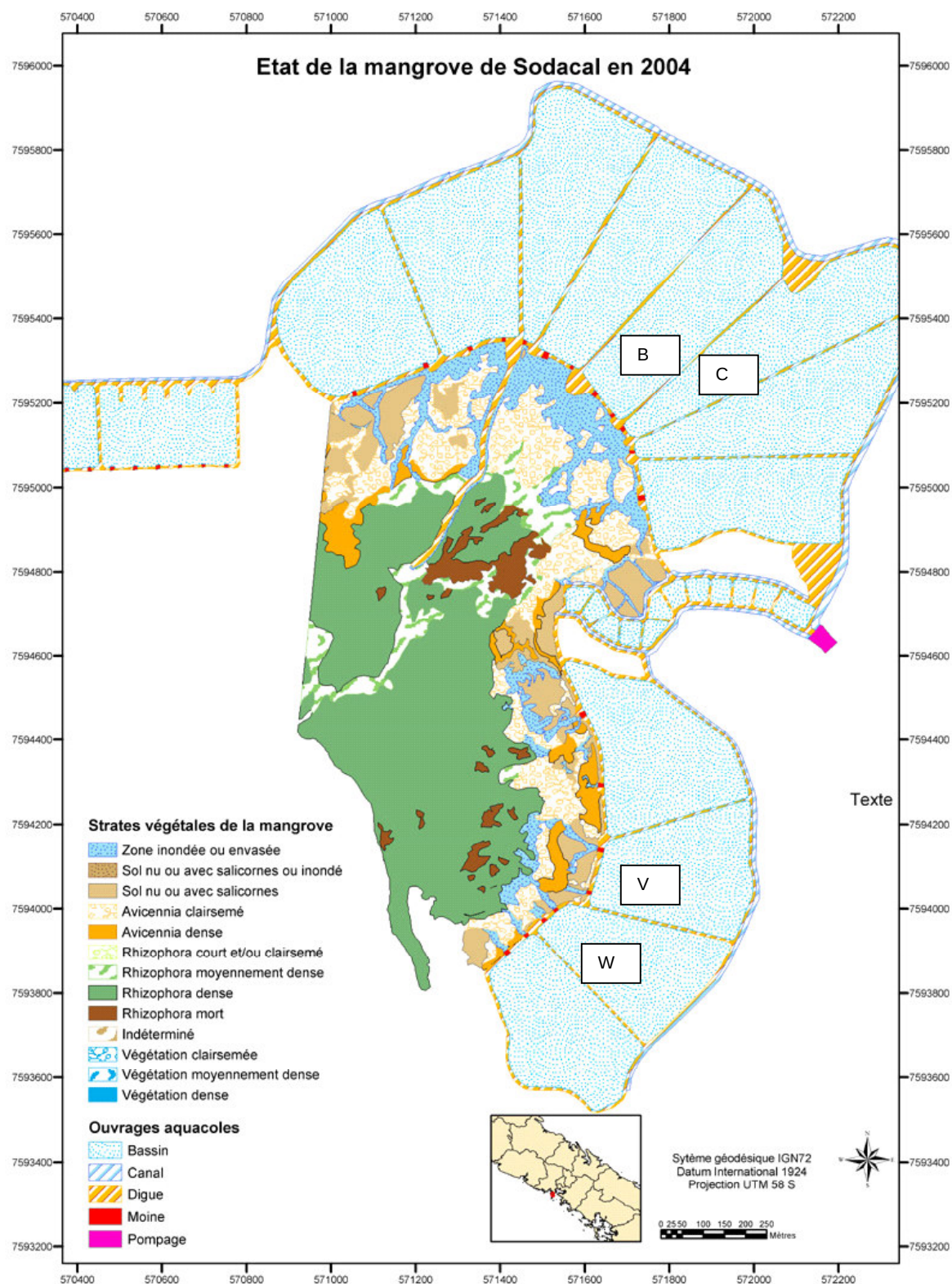


Figure 40 : Interprétation de la mangrove de Sodacal en 2004

4.3.3.3. Evolution

L'interprétation des photographies aériennes de 1954, 1982, 1996, 1998, 2002 et 2004 a permis de mettre en évidence des modifications importantes de la structure de la mangrove au cours du temps (Figures 41 a, b, c, d, e et f).

La ferme aquacole ayant été construite en 1983, toute modification observée avant cette date est a priori d'origine naturelle. L'ensemble des ouvrages construits depuis 1983 a toutefois été représenté sur les photos antérieures à cette date afin de pouvoir plus facilement établir des comparaisons.

L'analyse des photos de 1954 et 1982, compte tenu de leur qualité moyenne engendrant notamment une interprétation limitée au niveau du premier tiers interne de la mangrove, a montré les faits suivants :

- Développement limité de Rhizophora moyennement denses vers l'intérieur des terres remplaçant progressivement les Avicennia clairsemés les plus externes.
- Densification des Rhizophora notamment au nord-ouest de la mangrove.
- Diminution de la strate d'Avicennia qui progresse vers l'intérieur sur les sols nus ou envasés moins rapidement que les Rhizophora.
- Difficulté de distinction des prés salés, des zones envasées et des zones inondées. C'est pourquoi la classe « Sol nu ou avec salicornes ou envasée ou inondée » englobant sans distinction l'ensemble des de ces catégories a été utilisée pour symboliser une grande partie de la mangrove interne. Sur la photo de 1982, on commence à pouvoir observer distinctement des zones inondée ou envasées.

Ces observations montrent que la structure de la mangrove évolue indépendamment de la construction et du fonctionnement de la ferme.

L'analyse des photos de 1996, 1998, 2002 et 2004 met en évidence de nouvelles modifications dans la structure de la mangrove :

- Progression des Rhizophora vers la strate d'Avicennia déjà observée avant la construction de la ferme.
- Diminution de la strate de Rhizophora clairsemés au profit des Rhizophora moyennement denses à denses, particulièrement sur le bord interne de cette strate.
- Eclaircissement des Rhizophora autour de l'arroyo principal.
- Apparition de quelques patches isolés de Rhizophora morts de part et d'autre de la digue artificielle en 1996. Augmentation du nombre de ces patches de petite taille vers le sud en 1998.
- Large trouée dans la strate de Rhizophora denses au sud est de la fin de la deuxième portion de la digue artificielle ; Cet évènement a eu lieu entre 1998 et 2002.
- Inondation dans la zone de transition entre Rhizophora et Avicennia, surtout dans la partie sud de la mangrove.
- Arrêt de la progression des Avicennia sur les sols nus ou envasés.
- Densification des Avicennia en sortie de bassins de part et d'autre des moines et également sur sols mixtes Avicennia-tannes surtout de 1996 à 1998.
- Augmentation des zones inondées ou envasées. Progression des zones inondées ou envasées sur les sols nus ou avec salicornes, suivant deux directions principales : nord-nord-est à sud-sud-ouest dans la partie nord et est à ouest dans la partie sud de la mangrove. Ces directions correspondent globalement à celles des effluents partant de la

périphérie du croissant de lune de mangrove vers son centre qui se situe à l'embouchure de l'arroyo principal.

4.3.3.4. Superficies

La mangrove de Sodacal, compte tenue de l'emprise qui a servi à digitaliser les photographies aériennes, a une superficie moyenne de 82 ha (Tableau 14).

Comme pour Ouano, l'évolution la plus visible a été l'augmentation de la strate de *Rhizophora* denses entre le début de la phase opérationnelle de la ferme en 1983 jusqu'à nos jours, passant de 21,2 ha en 1982 à 35,5 ha en 2004, soit une progression de 0,65 ha par an (Figure 42). Cet accroissement est pratiquement la moitié de celui observé sur Ouano.

Cette strate représente 42% de la superficie totale de la mangrove en 2004 alors qu'elle ne représentait que 27% jusqu'en 1982.

Etant donné la difficulté de distinguer les « sols nus ou avec salicornes » et des « zones envasées ou inondées » sur les photos de 1954 et de 1982, il a été créé une classe supplémentaire regroupant ces deux catégories. Si l'on regroupe pour chaque année l'ensemble de ces 3 classes, on observe une diminution de la superficie totale de ces 3 classes, passant de 39% en 1954 à 23% de la superficie totale en 2004. En revanche, lorsque l'on peut les distinguer c'est-à-dire à partir de 1996, on observe entre 1996 et 2004 :

- une diminution des sols nus ou avec salicornes de 23 à 11% de la superficie totale (19,3 ha à 8,9 ha) ;
- une augmentation des zones envasées ou inondées passant de 8 à 12% de la superficie totale (6,4 ha à 10,1 ha).

La diminution des sols nus ou avec salicornes s'est faite au profit des zones envasées mais également en partie des *Avicennia* denses dont la superficie a augmenté de 2,8 ha en 8 ans.

La superficie de la strate d'*Avicennia* clairsemés est restée quasiment la même depuis 1982, représentant en moyenne 18% de la superficie totale, soit environ 14 ha.

Tableau 14 : Evolution des superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Sodacal entre 1954 et 2004.

Type de mangrove / Année	Superficie (m²)							Superficie (%)						
	1954	1982	1996	1998	2002	2004	Moyenne	1954	1982	1996	1998	2002	2004	Moyenne
Zone inondée ou envasée	686	3648	64518	87007	77871	101771	55917	0%	0%	8%	10%	9%	12%	7%
Sol nu ou avec salicornes	41	92106	192746	126447	111864	89287	102082	0%	12%	23%	15%	13%	11%	12%
Sol nu ou avec salicornes ou inondé	326232	155126	0	0	0	0	80226	39%	20%	0%	0%	0%	0%	10%
Avicennia clairsemé	225720	141067	139243	158827	149360	156341	161760	27%	18%	17%	19%	18%	19%	20%
Avicennia dense		2037	16075	41508	47244	44223	30217	0%	0%	2%	5%	6%	5%	4%
Indéterminé		26903					26903	0%	3%	0%	0%	0%	0%	3%
Rhizophora court et/ou clairsemé	0	13748	4306	3427	0	0	3580	0%	2%	1%	0%	0%	0%	0%
Rhizophora moyennement dense	61314	137632	123342	64749	93943	59145	90021	7%	18%	15%	8%	11%	7%	11%
Rhizophora dense	217002	212002	283661	349849	320786	355287	289764	26%	27%	34%	42%	38%	42%	35%
Rhizophora mort			2571	4826	32598	32177	18043	0%	0%	0%	1%	4%	4%	2%
Total	830995	784269	826461	836640	833666	838231	825043	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

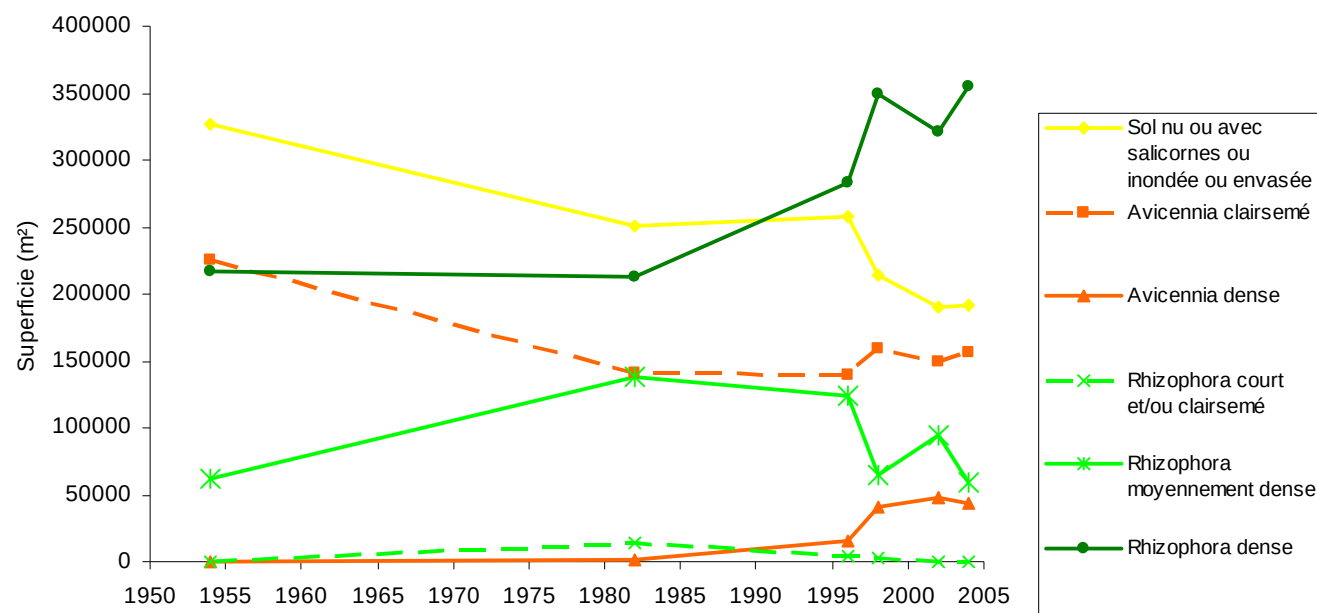
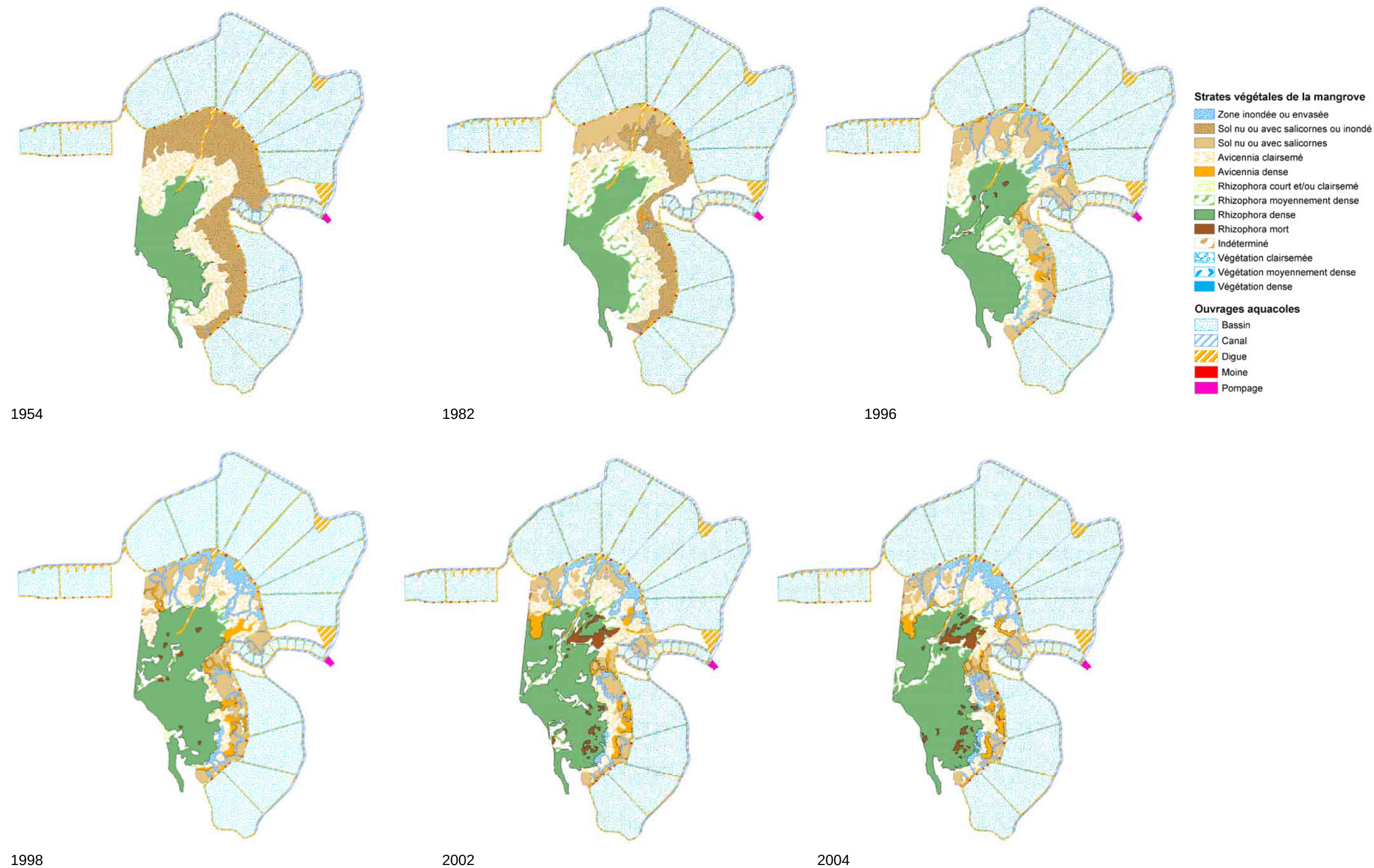


Figure 42 : Evolution des superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Sodacal entre 1954 et 2004.



Figures 41a, b, c, d, e et f : Evolution de la mangrove de Sodacal (1954, 1982, 1996, 1998, 2002, 2004)

4.3.4. Pouaco

4.3.4.1. Documents archivés

Les documents archivés relatifs à Pouaco sont :

- 7 photographies géoréférencées : 1976, 1982, 2 photos 2002, 3 photos 2004 ;
- 4 cartes réalisées par digitalisation : 1976, 1982, 2002, 2004.

L'emprise des cartes est délimitée par :

- Les futurs bassins et leurs digues au nord et au nord-est ;
- La limite sud de l'emprise des photographies aériennes de bonne qualité, englobant le futur canal d'arrivée d'eau et le creek naturel principal au sud et au sud-est.

4.3.4.2. Etat en 2004

La mangrove de Pouaco en 2004 est une grande mangrove dont l'orientation principale est nord-sud (Figures 43 et 44). Elle présente une façade maritime étendue dans la partie nord. Son coefficient d'ouverture est plus faible comparativement à celui de Ouano et de Sodacal, atteignant 0,285 ; Du fait de sa superficie importante de tannes, les potentialités d'échange avec les eaux côtières sont plus grandes comme en témoigne le coefficient d'échange de 0,673.

$$ECH = S \text{ (km}^2\text{)} \times FM \text{ (façade maritime en m)} / FT \text{ (façade terrestre en m)} = 2,36 \times 2030 / 7120$$

La zonation est bien marquée avec successivement de l'intérieur vers la côte, une strate de tannes nues particulièrement développée dans la partie nord, une strate d'Avicennia courts et clairsemés, une strate de Rhizophora courts clairsemés à moyennement denses et enfin une strate de Rhizophora denses. Cette dernière est plus importante dans la partie sud, plus particulièrement autour du creek principal situé au sud.

La strate d'Avicennia est constituée de cinq lobes principaux dans la moitié sud de la mangrove alors qu'elle forme une large bande d'environ 80 m en moyenne dans le nord. Elle est clairsemée à moyennement dense, contrairement à certaines zones des mangroves de Ouano et particulièrement de Sodacal.

En règle générale, cette mangrove apparaît moins dense au niveau de toutes les strates végétales que celle de Ouano ou de Sodacal.

La partie nord-est des tannes sera convertie en 3 bassins dans le cadre du projet de ferme aquacole de la famille Kabar. Au niveau de la tranchée artificielle au sud, d'orientation nord-est à sud-ouest, sera positionné le canal principal d'arrivée d'eau qui coupera la mangrove sud en deux parties (désigné en pointillés verts sur la photographie aérienne).

Aucune trouée n'a été observée à partir des photographies aériennes.

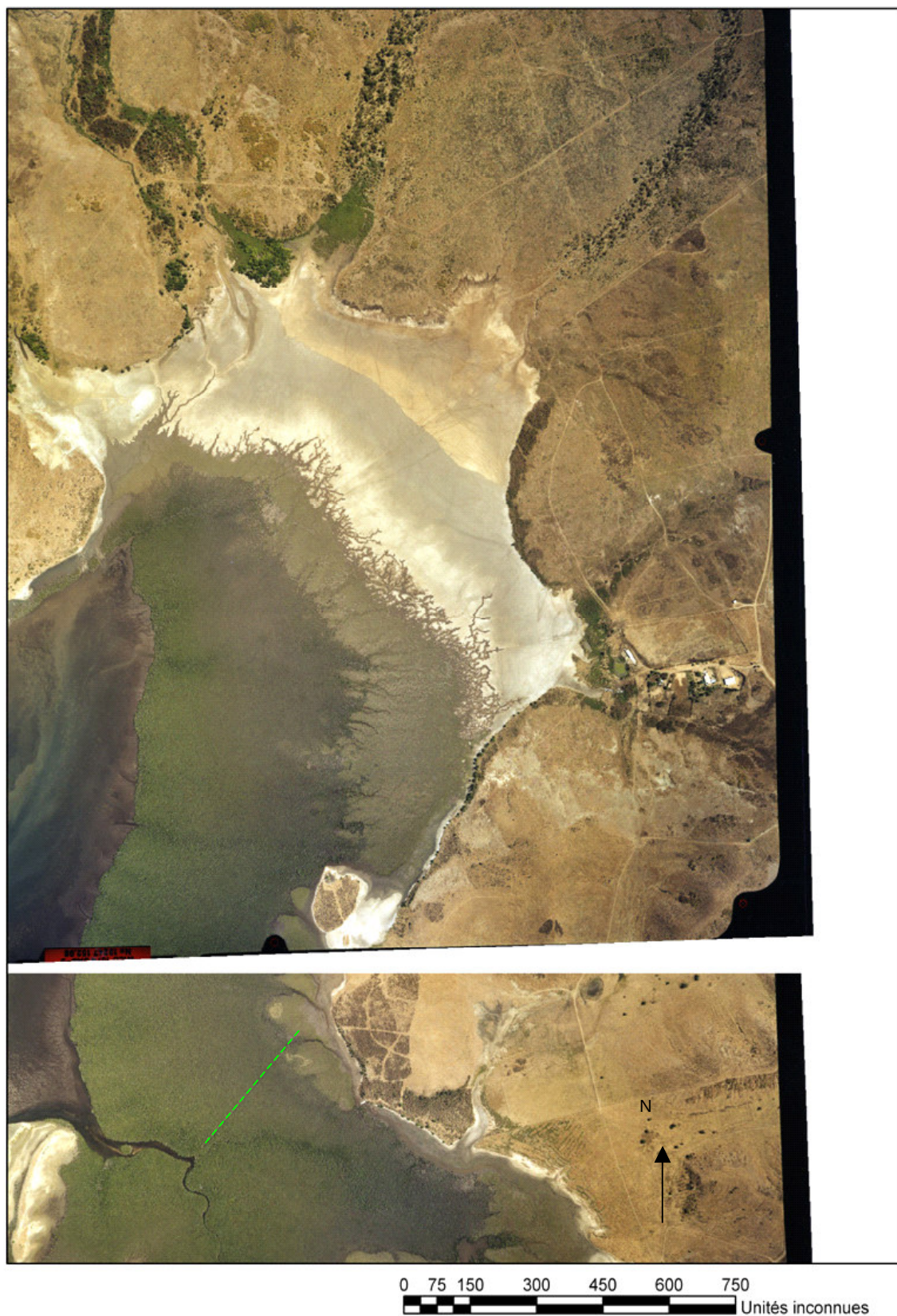


Figure 43 : Photographie aérienne de la mangrove de Pouaco en 2004 (tranchée en vert).

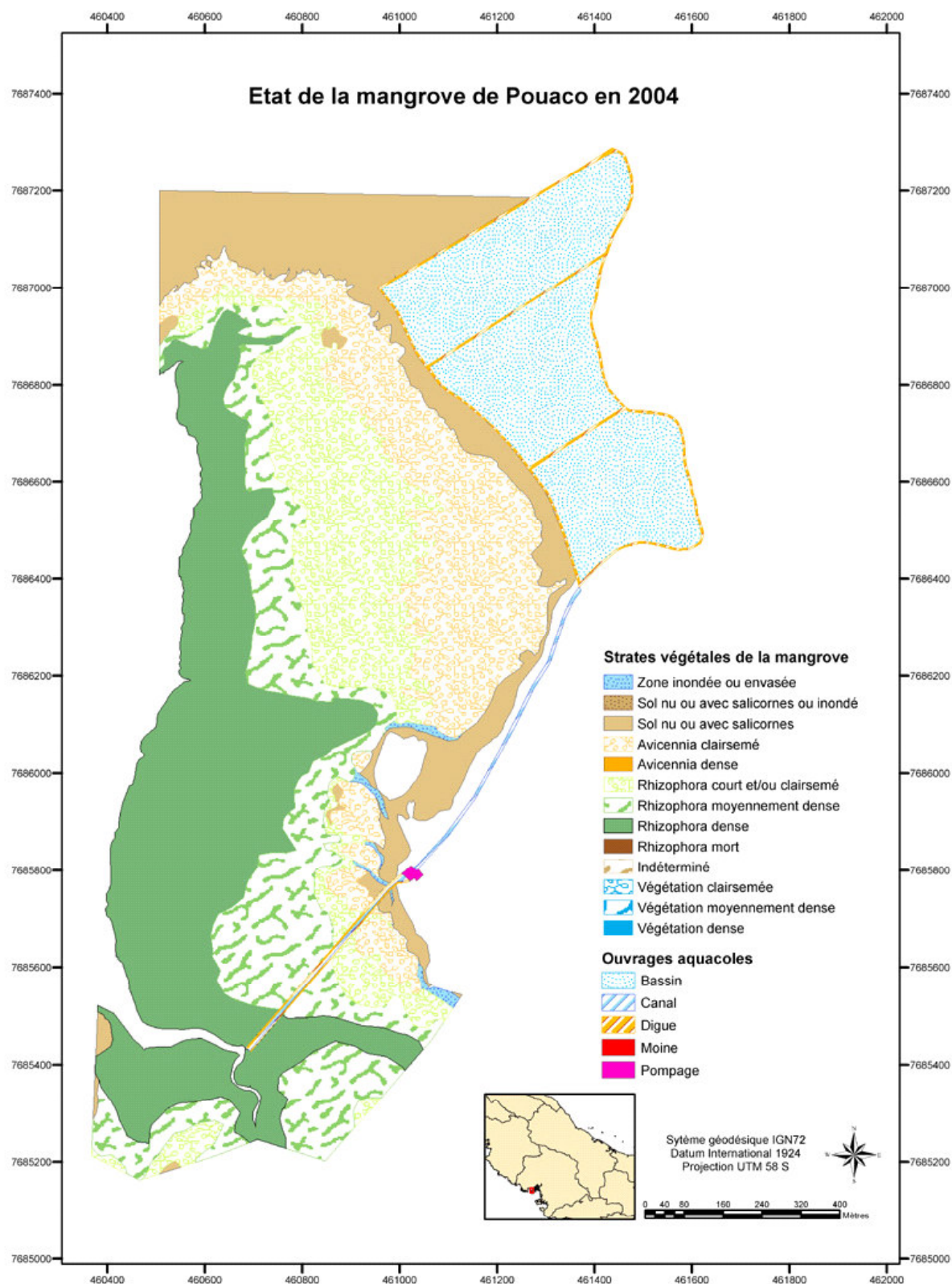


Figure 44 : Interprétation de la mangrove de Pouaco en 2004

4.3.4.3. Evolution

Les photos disponibles de 1976, 1982, 2002 et 2004 permettent de mettre en évidence l'évolution naturelle de la structure de la mangrove de Pouaco (Figures 45a, b, c et d).

Globalement les modifications sont loin d'être aussi spectaculaires que celles observées à Sodacal ou à Ouano. Contrairement aux deux autres sites, on n'observe pas de remplacement progressif d'une strate par une autre.

La structure reste donc quasiment identique d'une année sur l'autre avec toutefois un léger déplacement des limites de certaines strates. En effet, les Rhizophora denses ont tendance à diminuer au profit des Rhizophora moyennement denses à clairsemés sur l'ensemble de la période étudiée. Il est toutefois important de noter que les appellations « dense », « moyennement dense » et « clairsemé » sont subjectives, particulièrement sur les photos de Pouaco où l'interprétation de la densité est plus délicate du fait d'une forêt globalement peu dense. Il est donc possible qu'une zone observée comme « dense » une année ait été appelée « moyennement dense » une autre année du fait des caractéristiques différentes des photographies (couleur, luminosité, exposition notamment).

4.3.4.4. Superficies

La superficie totale de la mangrove de Pouaco, compte tenu l'emprise qui a servi à digitaliser les photos aériennes, atteint 125 ha (Tableau 15). Cette surface exclue la zone de pré salé qui fera l'objet d'une reconversion en 3 bassins aquacoles. La superficie réelle est donc plus élevée mais n'a pas été calculée dans le cadre de cette étude.

La superficie des sols nus ou avec salicornes qui représentent 19,8 ha, soit 16% du total, n'a pratiquement pas évolué sur la période étudiée (Figure 46). Encore une fois, cette superficie n'est pas celle de l'ensemble des tannes mais uniquement celles des tannes incluses dans l'emprise. La limite rectiligne au nord n'est pas la réalité mais celle de l'emprise permettant une comparaison des photographies historiques, actuelle et à venir compte tenue de la construction des bassins.

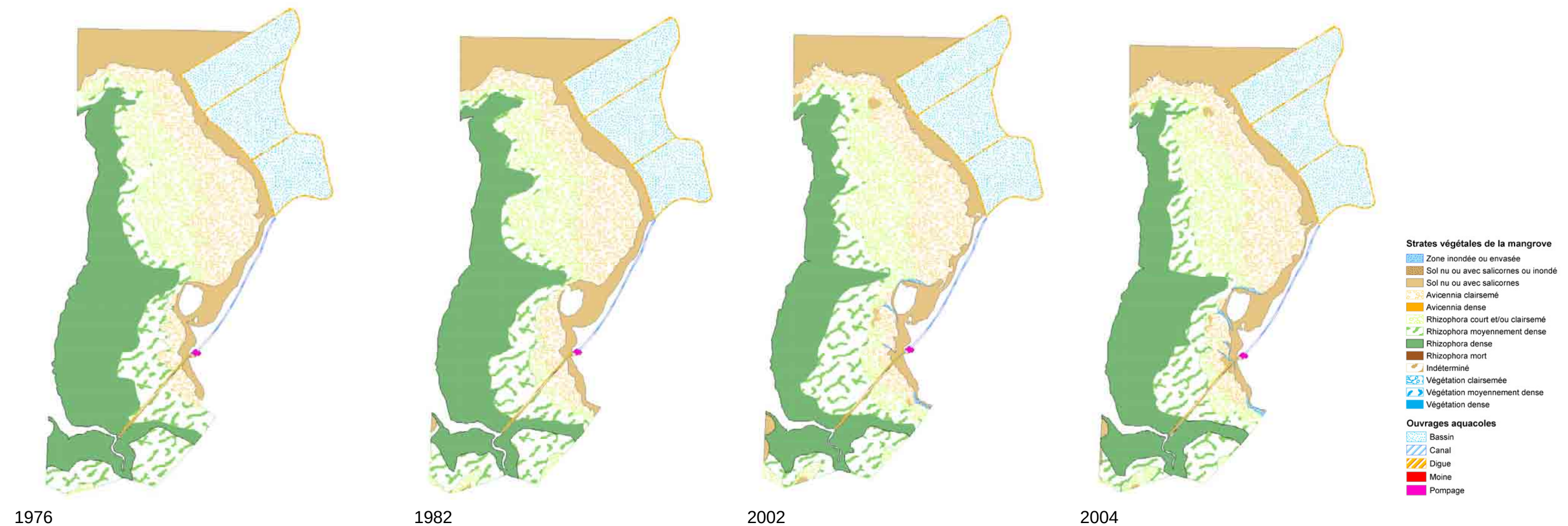
La strate d'Avicennia qui atteint en moyenne 19% de la superficie globale, a varié de 21,6 ha à 22,8 ha entre 1976 et 2004, ce qui est minime.

Les Rhizophora représentent les 2/3 des formations végétales en place, avec une prédominance des Rhizophora denses. Si la superficie totale des Rhizophora est identique d'une année sur l'autre (83 ha), la part respective des 3 classes de Rhizophora de densité différente a légèrement varié sur l'ensemble de la période considérée.

Pour une formation végétale donnée telle que les Rhizophora, il est difficile d'établir des limites nettes entre les niveaux de densité car on est plutôt en présence d'un gradient continu de densité. L'interprétation du niveau de densité reste donc subjective, ce qui peut expliquer les petites variations de chacune des classes.

Tableau 15 : Evolution des superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Pouaco entre 1976 et 2004.

Type de mangrove / Année	Superficie (m²)					Superficie (%)				
	1976	1982	2002	2004	Moyenne	1976	1982	2002	2004	Moyenne
Zone inondée ou envasée	0	0	4420	6233	2663	0%	0%	0%	0%	0%
Sol nu ou avec salicornes	190753	207810	200970	193856	198347	15%	17%	16%	15%	16%
Végétation clairsemée						0%	0%	0%	0%	0%
Avicennia clairsemé	219167	228078	216034	220542	220955	18%	18%	17%	18%	18%
Avicennia dense						0%	0%	0%	0%	0%
Rhizophora court et/ou clairsemé	179595	200262	225443	212314	204403	14%	16%	18%	17%	16%
Rhizophora moyennement dense	241151	224097	270706	233328	242321	19%	18%	22%	19%	19%
Rhizophora dense	419484	398849	334432	388328	385273	34%	32%	27%	31%	31%
Rhizophora mort						0%	0%	0%	0%	0%
Total	1250151	1259096	1252004	1254601	1253963	100%	100%	100%	100%	100%



Figures 45a, b, c et d : Evolution de la mangrove de Pouaco (1976, 1982, 2002, 2004)

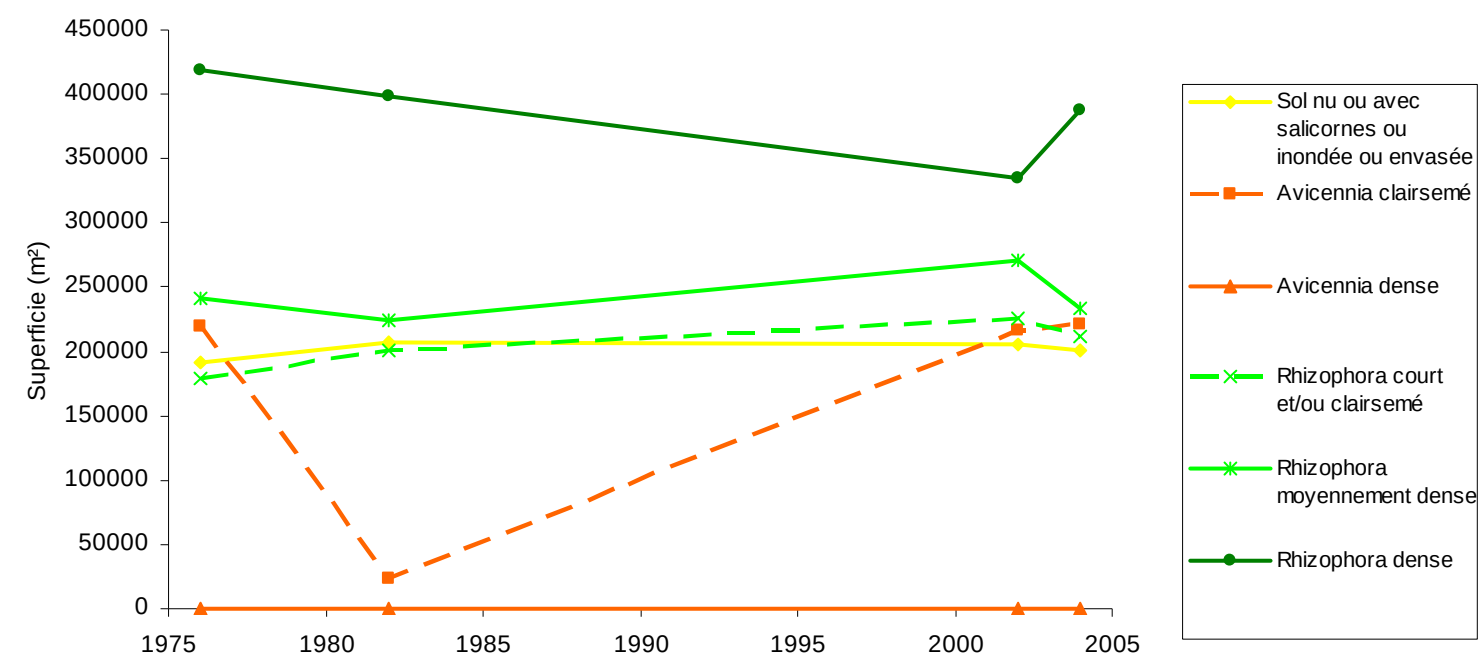


Figure 46 : Evolution des superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Pouaco entre 1976 et 2004.

4.3.5. Pouanga

4.3.5.1. Documents archivés

Les documents archivés relatifs à Pouanga sont :

- 5 photographies géoréférencées 1976, 1982, 3 photos 2004 ;
- 1 carte réalisée par digitalisation : 2004.

L'emprise des cartes est délimitée par :

- Les limites naturelles de tannes à l'est ;
- L'arroyo naturel principal au nord-ouest ;
- Les limites de l'emprise des photographies aériennes de bonne qualité.

4.3.5.2. Etat en 2004

La mangrove de Pouanga d'orientation principale nord-nord-ouest à sud-sud-ouest, présente une façade maritime très étendue, avec une incursion plus importante à l'intérieur des terres dans sa partie nord (Figures 47 et 48). Son coefficient d'ouverture atteint 0,65 et sa potentialité d'échange avec les eaux côtière est moyenne avec 0,47.

$$ECH = S \text{ (km}^2\text{)} \times FM \text{ (façade maritime en m)} / FT \text{ (façade terrestre en m)} = 0,72 \times 2150 / 3300$$

C'est globalement la mangrove la moins dense des 4 sites étudiés.

Dans sa partie sud, elle est caractérisée par une longue bande présentant la succession habituelle des différentes strates végétales depuis la frange terrestre jusqu'à la façade maritime : pré salé, Avicennia clairsemés, Rhizophora clairsemés, Rhizophora moyennement denses et Rhizophora denses. Les tannes et les Avicennia représentent un tiers de la largeur totale de la bande végétale, les 2/3 restants étant occupés par les Rhizophora.

Contrairement aux autres sites, la strate de Rhizophora dense est étroite (50 m en moyenne).

La partie sud est caractérisée par une prédominance de tannes et un cordon littoral très étroit de Rhizophora moyennement dense (30 m en moyenne). Les Rhizophora se sont densifiés en fond de baie, formant un patch d'une cinquantaine de mètres de large.

Au nord ouest, la limite naturelle de la mangrove est représentée par un creek principal de direction sud-nord.

Aucune trouée n'a été observée à partir de photographies aériennes.

Aucune zone inondée ou envasée n'a également été notée sur ce site.

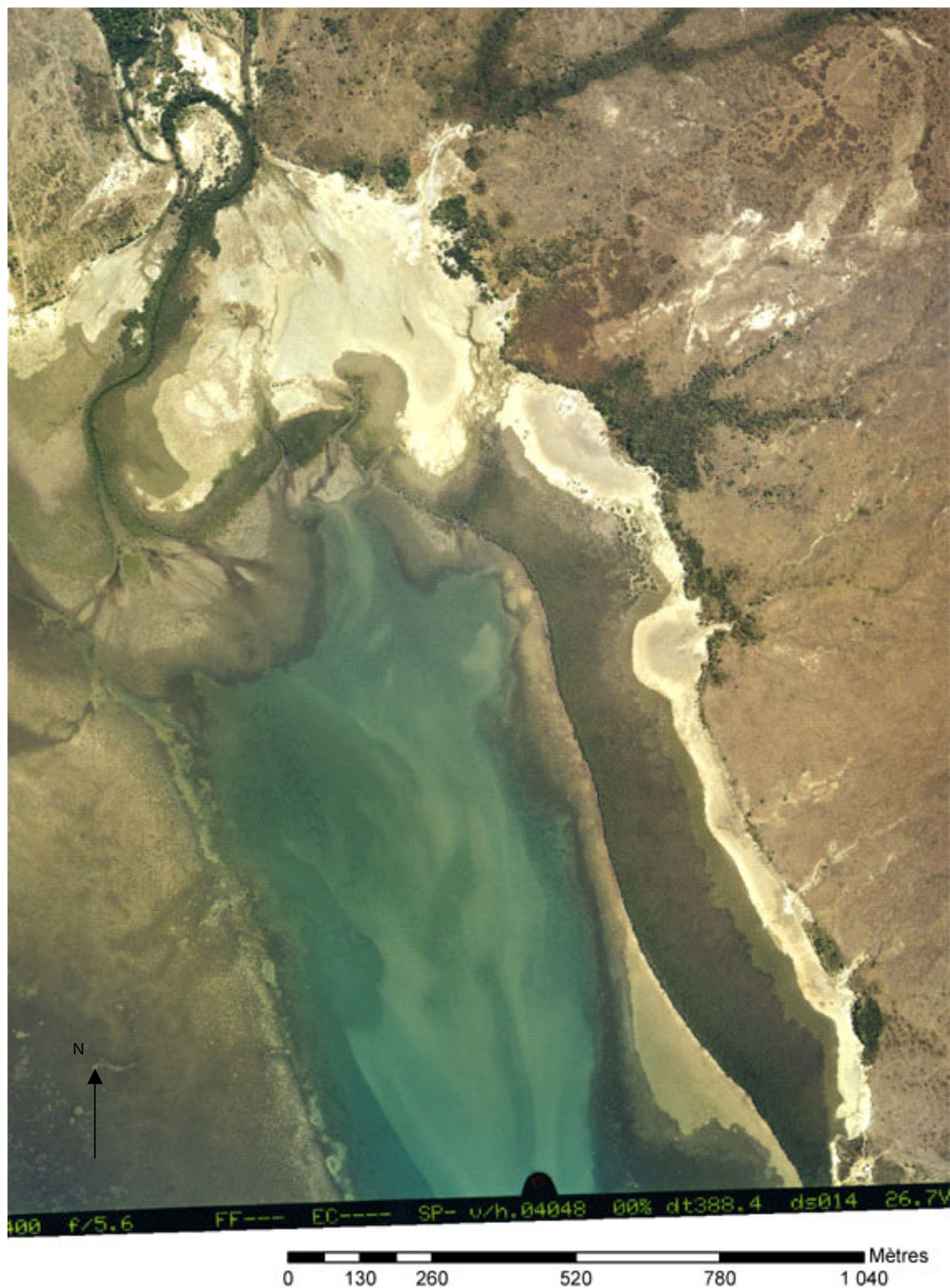


Figure 47 : Photographie aérienne de la mangrove de Pouanga en 2004.

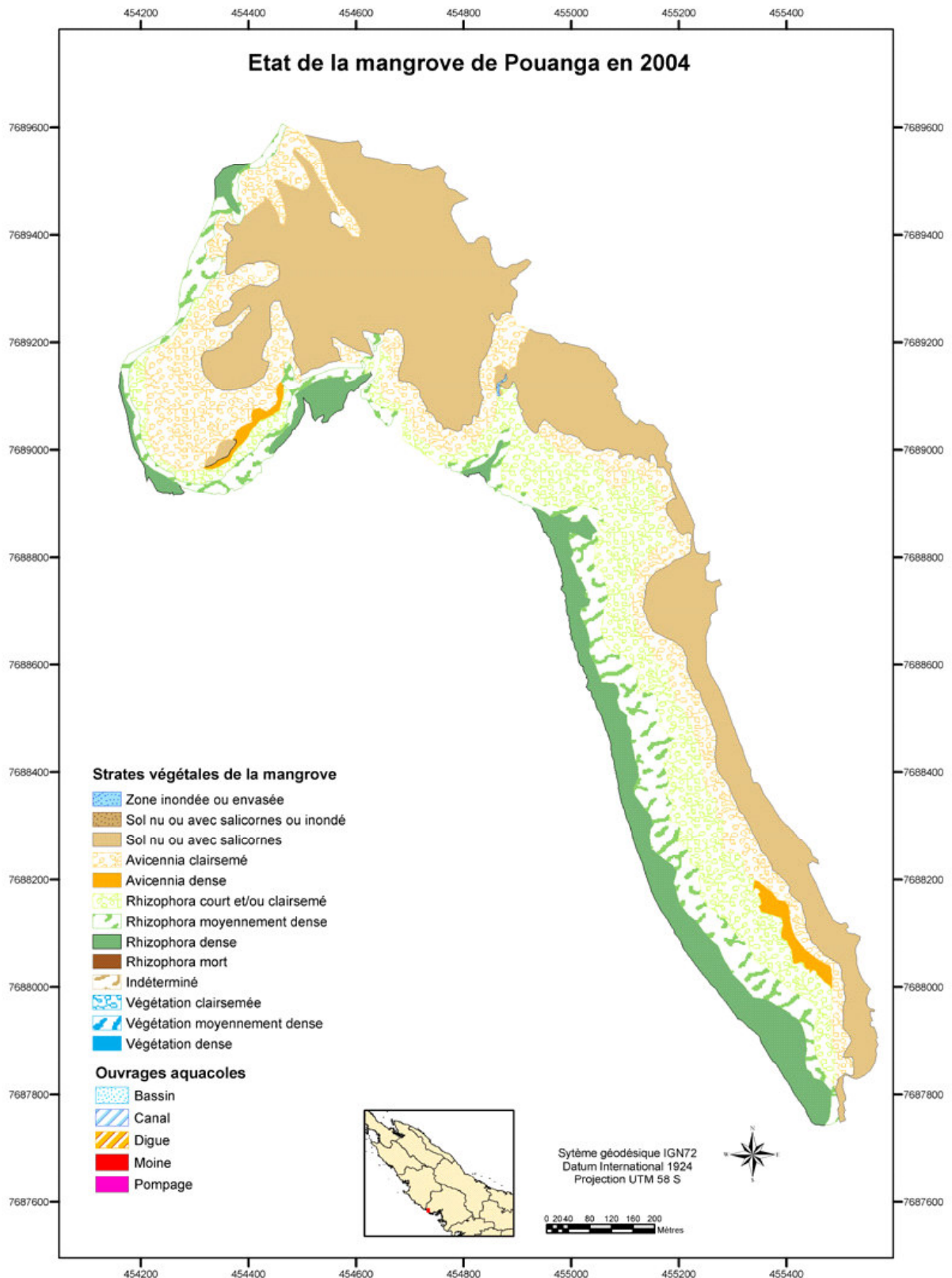


Figure 48 : Interprétation de la mangrove de Pouanga en 2004

4.3.5.3. Superficies

La mangrove de Pouanga a une superficie totale de 70,3 ha, compte tenu de l'emprise qui a servi à digitaliser les photos aériennes (Tableau 16).

Elle est principalement constituée de sols nus ou avec salicornes (39% de la superficie totale) et d'Avicennia clairsemés (20% de la superficie totale).

Parmi les Rhizophora, la strate clairsemée est prédominante avec 17% de la superficie totale.

Cette mangrove est en somme particulièrement clairsemée comparativement aux autres sites d'étude, d'après les photographies aériennes de 2004.

Tableau 16 : Superficies des différentes strates végétales de la mangrove de Pouanga en 2004.

Type de mangrove / Année	Superficie en 2004	
	m²	%
Zone inondée ou envasée	194	0%
Sol nu ou avec salicornes	276212	39%
Avicennia clairsemé	140566	20%
Avicennia dense	8944	1%
Rhizophora court et/ou clairsemé	120763	17%
Rhizophora moyennement dense	86109	12%
Rhizophora dense	70306	10%
Total	703094	100%

4.3.6. Comparaison des sites

La comparaison des superficies relatives des 4 principales strates végétales de chaque site met en évidence sur l'ensemble de la période considérée entre 1954 et 2004 :

- Une nette diminution du pourcentage des *Avicennia* et/ou végétation clairsemée à Ouano depuis la création de la ferme, qui est également visible à Sodacal mais de façon moins nette (Figure 49) ;
- En revanche, il n'y a pas de changement sur Pouaco qui reste vierge.

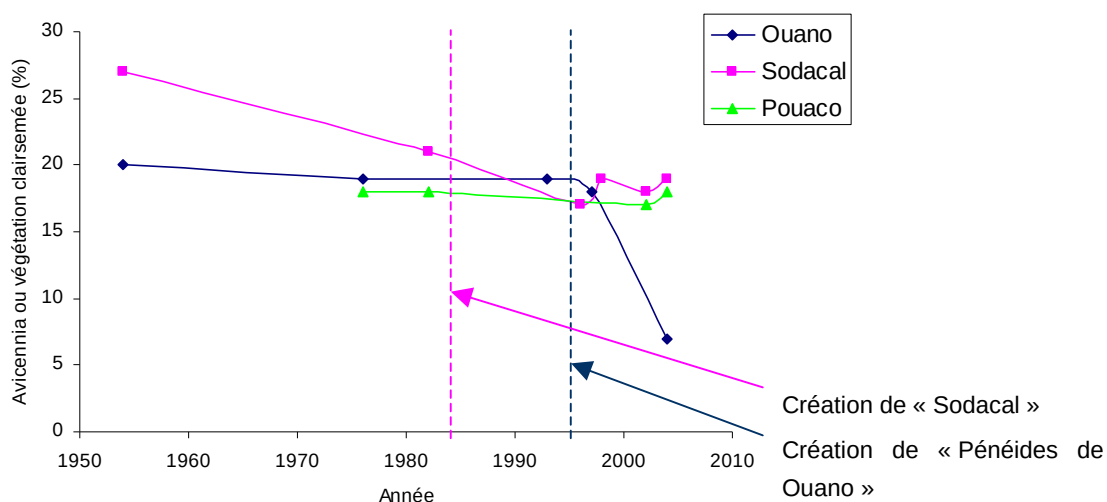


Figure 49 : Evolution de la superficie relative de la strate d'*Avicennia* et végétation clairsemée des 3 sites entre 1954 et 2004.

- Une nette diminution du pourcentage des *Rhizophora* clairsemés à Ouano depuis la mise en place de la ferme, qui est également visible sur Sodacal mais, comme pour la strate d'*Avicennia* et de végétation clairsemée, de façon moins spectaculaire (Figure 50) ;
- Une légère augmentation de cette strate sur le site de Pouaco.

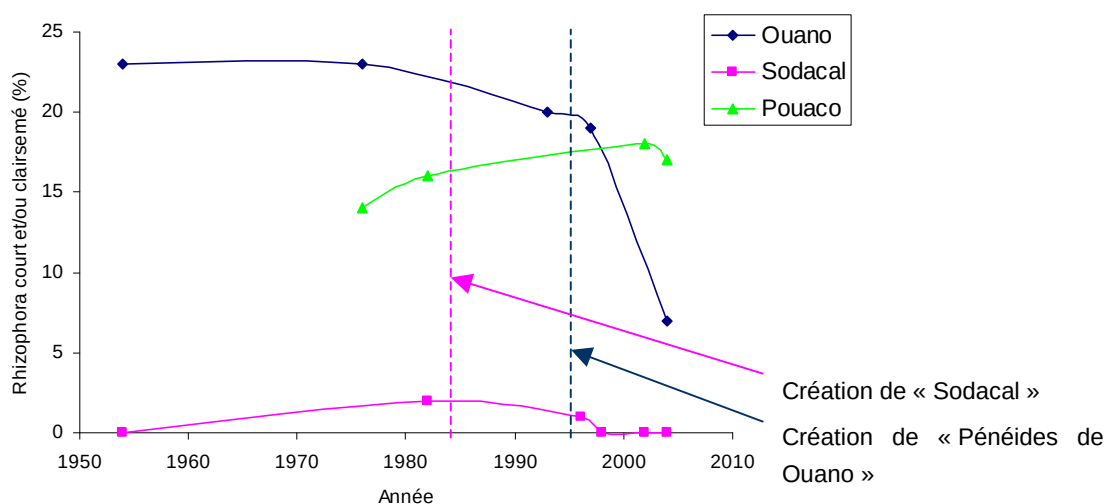


Figure 50 : Evolution de la superficie relative de la strate *Rhizophora* courts et/ou clairsemés des 3 sites entre 1954 et 2004.

- Une nette augmentation du pourcentage des Rhizophora denses depuis 1982 à Sodacal et depuis 1997 à Ouano ; elle est plus spectaculaire à Ouano alors qu'à Sodacal, elle a cessé depuis 1998 pour reprendre à partir de 2002 (Figure 51).
- Une légère diminution de cette strate sur le site de Pouaco jusqu'en 2002 avec une reprise à partir de cette date.

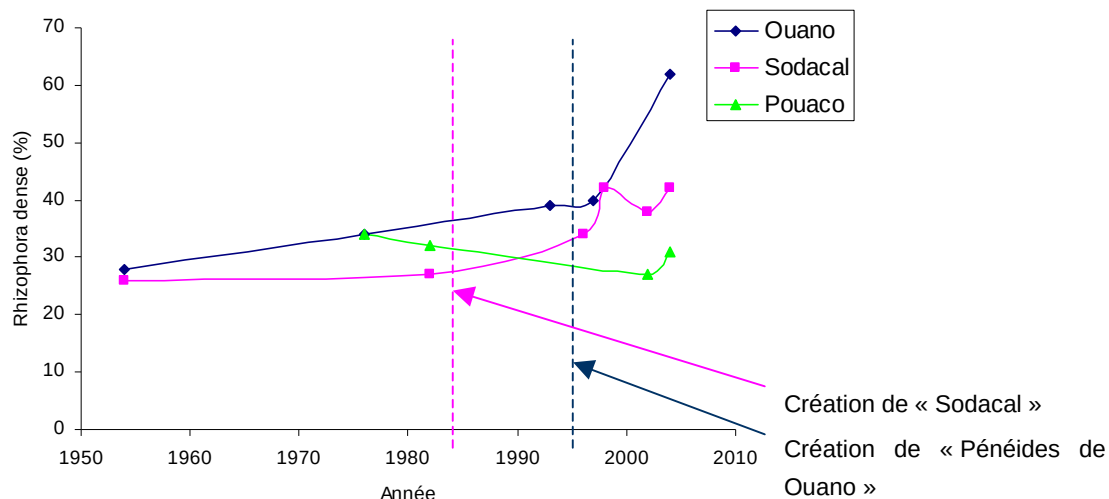


Figure 51 : Evolution de la superficie relative de la strate de Rhizophora denses des 3 sites entre 1954 et 2004.

- Une faible variation du pourcentage de la strate sol nu ou avec salicornes ou envasé ou inondé à Ouano, avec une légère diminution depuis 1993 (Figure 52) ;
- Une faible variation du pourcentage de la strate sol nu ou avec salicornes ou envasé ou inondé à Sodacal, même inexistante depuis la création de la ferme mais en revanche marquée par une diminution depuis 1998 ;
- Quasiment pas d'évolution de cette strate sur le site de Pouaco.

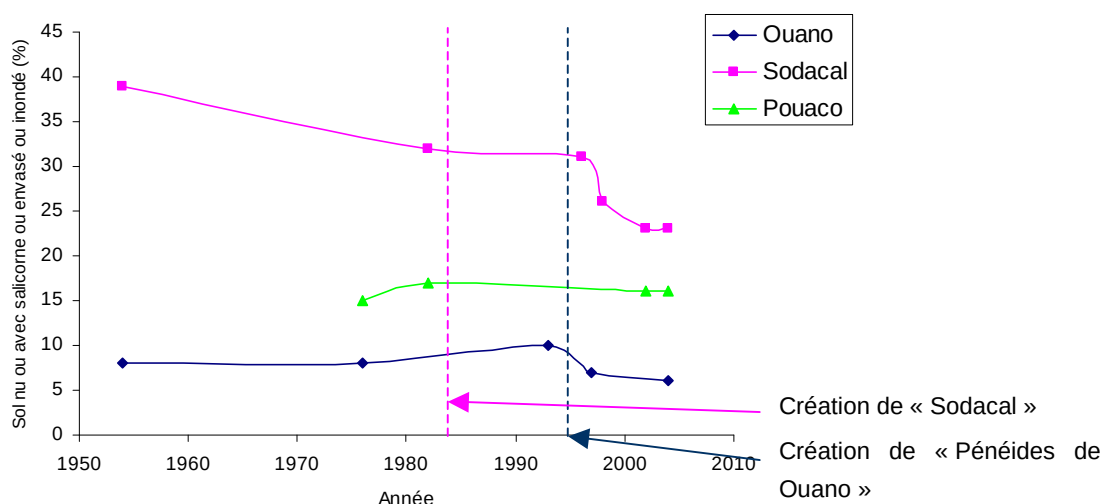


Figure 52 : Evolution de la superficie relative de la strate de sol nu ou avec salicornes et/ou envasé ou inondé des 3 sites entre 1954 et 2004.

5. DISCUSSION - PERSPECTIVES

5.1. Nature des impacts observés

L'analyse diachronique des photographies a mis en évidence des changements importants de la structure des mangroves à Sodacal et à Ouano depuis la construction des fermes situées à côté alors que celle de Pouaco, qui est toujours un site vierge, n'a guère évolué. Les variations de superficie des différentes strates de la mangrove de Pouaco sont minimales comparativement à celles observées à Ouano ou à Sodacal après construction. Sans influence d'activités anthropiques telles que l'aquaculture (sur site vierge et sur site avant construction de ferme aquacole), la structure de la mangrove reste globalement stable.

CHANGEMENTS DE LA STRUCTURE DES MANGROVES ET HYPOTHESES SUR LA TOPOGRAPHIE

Les mangroves soumises aux rejets des effluents de fermes aquacoles ont nettement développé leur strate de Rhizophora qui ont progressé vers l'intérieur des terres, particulièrement en face des moines de sortie des bassins. Une densification de cette strate s'est également produite probablement liée à l'augmentation de nutriments disponibles à la sortie des bassins.

Les impacts et notamment le développement des Rhizophora denses ne sont pas visibles dès le début du fonctionnement de la ferme et même 4 ans après dans le cas de Ouano puisqu'on ne note pas de changements significatifs. Etant donné l'absence de photographie entre 1997 et 2004, il est impossible de se prononcer quant à la période des modifications les plus notables. Peut être est ce tout simplement une évolution continue et non un changement radical de la structure.

Parallèlement, on a observé le remplacement progressif des Avicennia par les Rhizophora qui peut s'expliquer de la façon suivante :

Plus le sol est salé et sec plus il est difficile de puiser de l'eau pour les racines de palétuviers. La croissance des palétuviers est ainsi habituellement plus lente sur des zones occasionnellement immergées (du à un niveau topographique plus élevé par exemple) que sur des endroits régulièrement inondés (niveau du sol plus bas). C'est une des raisons pour laquelle les Avicennia spp. qui sont généralement plus tolérants au sel que les Rhizophora spp. ont tendance à remplacer ces derniers sur des sols moins souvent immergés. A contrario, l'avancement progressif des Rhizophora sur la strate d'Avicennia peut être lié à l'apport d'effluents provenant des bassins qui rend le sol plus humide dans la mangrove interne et donc plus propice à la colonisation des Rhizophora moins tolérants aux sols asséchés et sur salés. C'est probablement la raison pour laquelle à Ouano, les Rhizophora se sont développés en sortie de bassins 3, 4 et 5, centre du croissant de lune de mangrove probablement topographiquement plus bas. A contrario, le développement d'Avicennia denses en sortie de bassins 7 et 8 peut s'expliquer par la présence d'un sol plus asséché et plus salé qu'ailleurs lié à son niveau topographique haut.

Un envasement important a été noté au niveau des zones proches des bassins de La Sodacal empêchant une évacuation correcte des effluents. Face à ce phénomène, La Sodacal a construit d'une part des canaux le long des bassins, d'autre part une digue et d'un canal dans la mangrove suivant les voies naturelles de drainage. De nos jours, l'envasement semble persister. Une des

hypothèses pourrait être que les zones en sortie de bassins présente un niveau topographique trop bas (naturellement ou par érosion sous l'action des effluents) pour permettre le drainage efficace des boues, même à marée basse. Des données relatives à la topographie de la mangrove auraient permis de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

Par ailleurs, il a été noté une importante zone de *Rhizophora* morts se situant à l'est de la fin de la digue artificielle sur le site de Sodacal (Figure 53). Sur la base des informations fournies par l'équipe de Sodacal, il est possible que ces arbres soient morts après le passage du cyclone Franck en février 1999. L'analyse des photographies aériennes mise à disposition par le gérant, laisse en effet supposer que des vents violents aient couché les arbres dans une direction prédominante sud-est à nord-ouest (Figure 54). Cependant, quelques petits patches d'arbres morts avaient déjà été observés sur la même zone à partir des photographies aériennes datant de 1996 et 1998. Un autre phénomène (naturel ou anthropique) a peut être eu lieu avant le cyclone, affaiblissant déjà une partie de cette zone.



Figure 53 : Trouée dans la forêt de Rhizophora de Sodacal.



Figure 54 : Photographie aérienne de la trouée à l'est de la digue artificielle (Source : Sodacal).

Il est possible qu'un problème de drainage des effluents et boues, lié d'une part au fonctionnement de la ferme et d'autre part au niveau topographique bas de la zone en question, se soit cumulé à celui du cyclone, engendrant un affaiblissement des arbres avant le passage du cyclone. De plus, aucune repousse n'a été observée sur la zone. Rappelons le principe schématisé dans la figure 55, évoqué dans les chapitres sur les stress éco-physiologiques d'une mangrove et les impacts potentiels du fonctionnement de fermes aquacoles, qui pourrait expliquer en partie l'origine de cette trouée :

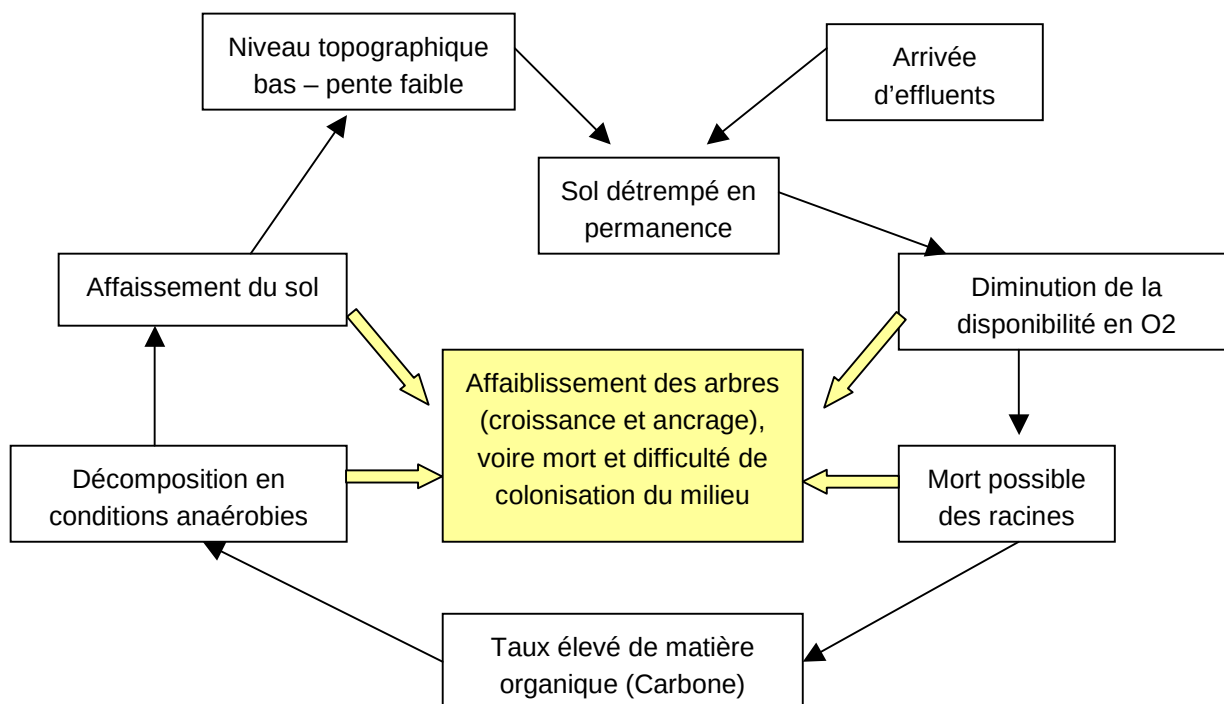


Figure 55 : Incidences d'un sol détrempé sur l'ancrage, la croissance et la survie de la mangrove.

En somme, des deux sites exploités étudiés in situ, Sodacal semble être celui qui est le plus perturbé mais il est difficile d'évaluer in situ la part de perturbation liée au rejet des effluents des bassins aquacoles. La trouée observée dans la strate de Rhizophora semble associée au passage du cyclone Franck de 1999 bien que d'autres facteurs anthropiques cumulés à un niveau topographique probablement bas aient pu jouer un rôle dans le processus de dégradation de cette zone.

Les trouées observées dans les Rhizophora à côté de la ferme de Ouano sont d'origine inconnue. Une étude plus approfondie pour déterminer l'origine de ce phénomène doit être envisagée.

5.2. Pertinence et limites des méthodologies utilisées

5.2.1. Mesures in situ

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les paramètres mesurés qui sont le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, l'azote total et le phosphore total dans le sol, l'eau et les feuilles, s'avèrent complémentaires pour comprendre les causes d'un éventuel impact. Ces analyses ont permis de mettre en évidence des différences entre les 3 sites étudiés. Toutefois, les différentes analyses et observations de terrain restent aujourd'hui difficiles à interpréter du fait de la forte variabilité observée entre les sites. D'autres observations et analyses seront nécessaires pour conforter ou non les premières observations.

- Les mesures montrent que les potentiels d'oxydo-réduction sur les deux premiers centimètres de sédiment sont significativement différents entre les sites.
- ⇒ Le fait que Pouaco présente des potentiels rédox de surface sur toutes ses stations plus élevés que ceux de Ouano et Sodacal et un eH moyen sur les stations intermédiaires également plus élevé que sur Ouano et Sodacal peut s'expliquer par le fait que Pouaco est souvent plus asséché que les deux autres sites. Comparativement aux deux autres sites, l'assèchement est lié soit au fait que ce site est topographiquement plus haut que les 2 autres, soit au fait qu'il ne reçoit pas d'effluent en amont.
- Les taux d'azote dans les sédiments de Pouaco sont significativement plus élevés que ceux de Ouano et Sodacal.
- ⇒ Il est possible que ce taux élevé s'explique par le fait que le sol qui concentre un taux élevé d'azote organique lié au système racinaire très développé des palétuviers, est peu lessivé à Pouaco du fait de marées faibles ou d'une situation topographiquement haute. A Ouano et à Sodacal où les conditions sont plutôt anaérobies, il est probable qu'une grande partie de l'azote se présente sous forme d'ammonium très mobile donc facilement lessivé par les flux d'eau (marée, effluent). Le dosage des différentes formes d'azote pourrait peut être permettre de confirmer l'hypothèse.
- Les taux de phosphore mesurés dans les sédiments sont ceux habituellement rencontrés dans les mangroves vierges
- ⇒ Les concentrations en phosphore dans le sol sont généralement influencées par ceux de la roche mère. Les sédiments des bassins aquacoles montrent aussi des concentrations en

phosphore élevées (de 5 à 10 fois les concentrations mesurées sur des tannes sans activité aquacole). D'autres mesures ainsi que des informations sur la géologie des sites devraient à l'avenir permettre l'interprétation de ce type d'analyse.

- Les données de phosphore et d'azote n'indiquent pas nettement une accumulation de nutriments dans les sols de Ouano et Sodacal qui serait due aux rejets des effluents puisque les valeurs obtenues près des sorties de bassin ne sont pas plus élevées que celles des autres stations le long des radiales sur ces sites (les concentrations d'azote sont maximales dans les zones à Rhizophora, celles de phosphore diminuent globalement de la frange maritime vers les bassins). Une analyse sur les premiers centimètres du sol fournirait peut être plus d'explications.
- Les taux de phosphore et d'azote dans les feuilles mettent en évidence une assimilation plus importante de ces nutriments sur Ouano et Sodacal comparativement à Pouaco.

ANALYSE DES FEUILLES ET LAI

L'indice foliaire LAI est une mesure globale du développement de la canopée dans les mangroves. Les mangroves dont les valeurs de LAI sont élevées (> 5) ont en général une haute productivité primaire alors que celles avec des valeurs plus petites présentent souvent une faible productivité primaire. Les canopées de mangrove bien développées en zone équatoriale humide ont des LAI compris entre 4,5 et 7, celles qui sont moins développées atteignent maximum 4.

Encore une fois, l'interprétation isolée des LAI n'indique pas forcément un impact de l'aquaculture sur la mangrove puisque de tels écosystèmes peuvent présenter naturellement une canopée très développée (Clough et al, 1997b). Du fait d'un nombre limité de sites d'étude et d'échantillonnages dans chaque site, il est difficile de savoir quelle est la part des différents facteurs (climat, salinité du sol, arrivée d'eau douce, etc.) pouvant influencer le développement de la canopée.

Généralement, la photosynthèse augmente avec la quantité d'azote contenue dans les feuilles jusqu'à un niveau maximum au-delà duquel la photosynthèse n'augmente plus (Clough, 2005). Cependant les niveaux d'activité photosynthétique, et donc le pourcentage de carbone atmosphérique fixé par les feuilles, peuvent ne pas répondre à des niveaux d'azote plus élevés dans les feuilles lorsque d'autres facteurs tels que le climat, l'hydrologie, la salinité sont stressants pour les palétuviers. De plus, les niveaux élevés de photosynthèse n'engendrent pas forcément une croissance plus rapide et un meilleur développement de la canopée parce que ces autres facteurs cités précédemment peuvent freiner la croissance indépendamment de la fixation du carbone.

Dans le cadre de cette étude, il n'y a pas de relation nette entre les valeurs de LAI et la quantité d'azote dans les feuilles (Figure 56), suggérant que des facteurs autres que l'enrichissement en nutriments régulent la croissance et le développement de la mangrove. Il serait intéressant à l'avenir de valider cette hypothèse et de déterminer les facteurs limitant la croissance des mangroves en Nouvelle Calédonie.

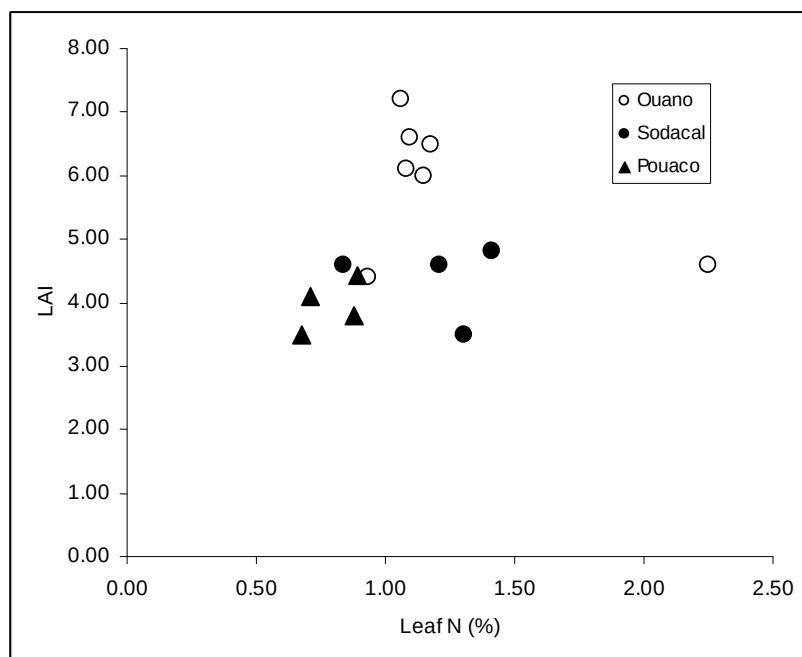


Figure 56: Relation entre le pourcentage d'azote dans les feuilles et les mesures de LAI sur les 3 sites.

5.2.2. Mégafaune

L'échantillonnage de la mégafaune n'a pas révélé de corrélation évidente entre sa densité globale et la présence d'effluents aquacoles. Les crabes réagissant peut être plus nettement à la présence des effluents malgré la grande variabilité intra-site de leur densité, ne se sont pas avérés être des bioindicateurs pertinents de l'état de santé de la mangrove.

Pourtant, Nielsen et al. (2003) ont montré que la densité de crabes *Uca* spp. était plus élevée dans un sol recevant des effluents comparativement à un sol de mangrove vierge de tout impact. Il est en effet admis que les crabes notamment *Uca* spp. jouent un rôle dans l'oxydation de la matière organique et la réduction des sulfates issus des effluents. Or dans le cadre de la présente étude, les résultats obtenus présentent une tendance inversée avec une plus forte densité de crabes sur le site vierge de Pouaco.

On ne peut donc à ce stade affirmer que l'utilisation des crabes comme bioindicateurs soit réellement inefficace. Il est possible que la méthode d'échantillonnage soit inadaptée engendrant :

- d'une part une sous estimation des densités liée à la fuite des individus lors de la collecte ;
- d'autre part une grande variabilité des résultats probablement également liée à une hétérogénéité de la zone.

La difficulté d'interprétation des résultats de densité serait plutôt liée à la méthode d'échantillonnage inappropriée.

Il serait intéressant de rechercher à améliorer la technique pour pouvoir réellement tester la capacité de bioindicateur du crabe. Les recherches se situeraient plutôt au niveau du plan d'échantillonnage et de la méthode de récolte afin de collecter des informations moins variables et plus significatives sur la densité de crabes.

Pour espérer obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité, plusieurs possibilités de modification du plan et de la méthode d'échantillonnage sont envisageables :

- augmenter le nombre de cadrats par station ;
- augmenter le nombre de stations ;
- augmenter la superficie de chaque cadrat ;
- augmenter la profondeur d'échantillonnage de chaque cadrat [Nielsen et al (2003) précisent que les galeries creusées par les crabes *Uca* spp. atteignent jusqu'à 30 cm de profondeur] ;
- encercler chaque cadrat avant de l'échantillonner pour limiter la fuite des organismes.

5.2.3. Utilisation des photographies aériennes

Dans le cadre de cette étude, la comparaison diachronique des interprétations des photographies aériennes a montré des impacts de l'aquaculture et particulièrement des effluents sur la mangrove. Le développement marqué des *Rhizophora* au niveau des sorties des bassins est un indicateur très net. Cette méthode se révèle être un outil efficace pour ce type d'étude.

Toutefois, une échelle minimale est nécessaire à une interprétation fiable, au-delà de laquelle la distinction entre certaines formations végétales est difficile.

La qualité des photographies prises en 2004 (couleur au 1/10 000^{ième}) est suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

Les essais de classification non supervisée n'ont pas été très concluants. En terme d'interprétation certains pixels correspondant à des formations végétales différentes ont été classés dans la même catégorie. Ainsi, la cartographie obtenue ne correspondait pas complètement à la précision souhaitée.

Plusieurs auteurs ont cartographié des mangroves à partir de classifications non supervisées sur des images satellitales issues de SPOT XS ou Landsat TM (Green et al, 2000). Sur 4 études citées, une seule a permis de différencier les espèces dominantes selon 4 classes et avec une validation basée sur des photographies aériennes. Les autres ont permis de discriminer 3 ou 4 classes selon leur niveau de densité. L'approche de Thollot (1992) à partir de données SPOT a également mis en évidence les principales formations végétales de mangrove en tenant compte de leur niveau de densité mais la précision n'est pas aussi élevée que celle obtenue par digitalisation de photographies aériennes.

Ainsi, la classification non supervisée n'est peut être pas la méthode la plus adaptée pour répondre aux objectifs de cette étude dont le but est de mettre en évidence, si elles existent, des modifications de la structure des différentes formations végétales.

Enfin, il est peut être envisagé à l'avenir d'utiliser des images issues de satellite de très haute résolution tels que Ikonos ou Quickbird dont la qualité et la précision atteint celles des photographies aériennes.

5.3. Orientations futures

Sur les mangroves jouxtant les fermes déjà existantes, il serait nécessaire d'étudier la topographie afin de mieux appréhender l'hydrologie du système qui représente un facteur clé de la colonisation, du développement et de la survie des palétuviers. Comme nous l'avons vu précédemment, l'apport d'effluents n'engendre pas forcément un impact négatif sur la mangrove si

les sols récepteurs sont relativement bien oxygénés. Or des sols bien aérés sont généralement ceux qui alternent phase d'immersion et phase d'assèchement au cours des marées, où tout au moins, qui se situent dans des zones à hydrodynamisme important même en constante immersion. A contrario, des eaux stagnantes qui empêcheraient toute aération du sédiment recevant des apports de nutriments, pourraient engendrer des impacts négatifs sur la survie des palétuviers.

Le fait d'étudier la topographie permettrait de mettre en évidence des points topographiquement bas susceptibles d'être constamment immergés.

Sur les sites qui pourraient faire l'objet d'une conversion des tannes en bassins aquacoles, il serait tout aussi important d'étudier la topographie de la mangrove qui pourrait devenir, à l'image de l'acidité des sols, un critère de sélection de sites potentiellement exploitables par l'aquaculture de crevettes.

En somme, sachant que la topographie et l'hydrologie sont les facteurs principaux influençant la distribution actuelle et la croissance des palétuviers, il s'avère difficile, sans étude de la topographie, de distinguer les influences de l'hydrologie naturelle des effets des effluents des bassins aquacoles.

Par ailleurs, la description de l'état de la végétation (densité, LAI, taille des internoeuds, taille et couleur des feuilles, taille et hauteur des racines aériennes, nombres de lenticelles sur les racines, etc.) associée à la mesure de tous les paramètres physico-chimiques peut orienter les hypothèses relatives aux impacts. Elle apporte en effet des éléments sur la croissance et la colonisation des palétuviers, répondant à d'éventuels stress éco-physiologiques. En revanche les analyser les uns indépendamment des autres n'est pas suffisant pour mettre en évidence un impact potentiel lié au fonctionnement des fermes aquacoles

D'autres observations et analyses seront nécessaires sur les sites étudiés ainsi que sur d'autres sites pour conforter ou non les premières observations réalisées dans le cadre de cette étude. Des analyses complémentaires sur les sols devraient aussi permettre de mieux les caractériser (texture, acidité potentielle, étude des différentes formes d'azote) mais aussi les zones d'envasement et permettre d'identifier les causes des changements observés.

Enfin, l'approche faunistique déployée dans le cadre de cette étude s'est avérée insuffisante pour établir une quelconque influence des effluents sur la distribution, la diversité et la densité des espèces mégabenthiques vivant dans les sédiments. Il serait nécessaire de pousser les investigations entreprises en modifiant les techniques d'échantillonnage notamment de crabes qui ont été reportés dans la littérature comme de possibles indicateurs du fonctionnement de la mangrove et de son état de santé.

Si l'on a pu observer des changements importants dans la structure des formations végétales sous influence du fonctionnement d'une ferme aquacole, il est probable que l'ensemble des communautés faunistiques subisse également des modifications en notamment terme de diversité (évolution de la richesse spécifique, remplacement d'espèces par d'autres plus adaptées aux changements des conditions environnementales sous influence du fonctionnement d'une ferme, etc.). Des modifications de l'habitat engendrent dans tout écosystème des changements de la composition faunistique à tous les niveaux (méiofaune, macrofaune, mégafaune vivant dans les sédiments, l'eau mais aussi les racines, les branches et les feuilles).

Jusqu'à présent, l'impact de l'aquaculture sur la biodiversité est quasiment inconnu et mériterait de faire l'objet d'investigations.

6. CONCLUSION

Les impacts de l'aquaculture de crevettes sur les mangroves de Nouvelle-Calédonie ont été pour la première fois étudiés dans le cadre du programme ZoNéCo. L'originalité de cette étude réside :

- d'une part dans la double approche complémentaire **globale** par l'analyse de photographies aériennes et **locale** par des mesures in situ de différents paramètres de plusieurs compartiments (eau, sol, feuille, faune) ;
- d'autre part dans une **approche comparative** du point de vue **temporel** (série chronologique de photographies aériennes) et **géographique** (3 sites dont un vierge).

Cette étude, qui a permis de mettre en œuvre plusieurs méthodologies et de tester leur pertinence sur les sites étudiés, a mis en évidence des impacts notables de la crevetticulture sur la mangrove, particulièrement par le biais de l'analyse de photographies aériennes.

En effet, la meilleure approche paraît être celle qui aborde la problématique du point de vue globale par une analyse diachronique des photographies aériennes qui mettent clairement en évidence une évolution de certaines strates végétales tant en superficie qu'en distribution géographique. La progression et la densification de la strate de *Rhizophora* vers l'intérieur des terres, particulièrement au droit de sortie des bassins aquacoles ont été identifiées. La comparaison avec le site témoin vierge qui n'a guère évolué sur le même laps de temps confirme ce fait. De plus, l'évolution de la structure de la mangrove sur un site exploité est bien plus remarquable après construction de la ferme qu'avant.

Les mesures des paramètres physico-chimiques, chimiques et biologiques montrent pour certains des différences significatives entre sites (eH , C_{sol} , N_{sol} , P_{sol} , $N_{feuille}$, $P_{feuille}$) mais mettent également en évidence une grande variabilité intra-site, voire intra-station, qui rend leur interprétation difficile. A ce stade, il est délicat d'attribuer ces différences à un quelconque impact de l'aquaculture du fait que ces paramètres peuvent également varier en fonction d'autres facteurs naturels tels que la topographie, l'hydrologie, les apports d'eau douce, la nature de la roche mère et des sédiments, la quantité de matière organique naturellement présente issue de la faune et de la flore en place. Ils donnent toutefois des indications.

Il serait nécessaire de multiplier les observations sur les sites déjà étudiés mais également sur d'autres sites, vierges ou non afin de :

- valider ou non les observations issues du travail de traitement de photographies aériennes (évolution de la structure des mangroves) ;
- valider statistiquement les mesures des paramètres physico-chimiques et chimiques indiquant des variations entre les sites ;
- collecter des données sur les facteurs qui ont trait à la topographie, l'hydrologie, la sédimentologie et au bassin versant ;
 - o sur les sites déjà exploités pour faciliter les interprétations des paramètres mesurés dans le cadre de cette étude et permettre de dissocier l'influence des conditions naturelles des impacts anthropiques ;
 - o sur des sites vierges pour prévoir les zones plus sensibles à la réception d'effluents (zone fréquemment immergée à faible capacité de drainage, points topographiquement bas, porosité des sédiments, etc.) et en tenir compte dans l'agencement des futures fermes ;

- rechercher les facteurs explicatifs de l'apparition des trouées (par une étude in situ plus poussée) ;
- rechercher les facteurs qui permettraient de comprendre la croissance et la densification des palétuviers dans les zones localisées (étude des nutriments par exemple) ;
- définir le pas de temps d'un suivi par photo-interprétation des mangroves (les évolutions de la mangrove de Ouano après construction de la ferme donnent quelques indications qu'il faut affiner) et plus généralement pour le suivi des mangroves soumises à une activité anthropique ;

Parallèlement, de nouvelles voies sont à explorer :

- développer une étude qui permettrait d'appréhender la capacité de rétention d'une mangrove sur un site dont on possède déjà des données sur les effluents de bassins (nature et quantité des différentes fractions) et sur l'eau de la baie en aval ;
- étudier de façon plus approfondie la biodiversité d'une mangrove (de la méiofaune à la mégafaune) et voir dans quelle mesure elle varie en fonction d'une modification de l'habitat (notamment le remplacement progressif des *Avicennia* par les *Rhizophora*) ;
- développer des traitements d'images satellitales, qui permettent d'élaborer des indices de végétation qui apporteraient des informations supplémentaires sur les modifications de la structure et de la densité des strates végétales.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Alongi, D.M., Trott, L.A., Wattayakorn, G., Clough, B.F., 2002.** Below-ground nitrogen cycling in relation to net canopy production in mangrove forests of southern Thailand. *Springer-Verlag, Marine Biology* 140 : 855–864.
2. **Al-Tahir, R., 1998.** Monitoring spatial changes of mangrove wetlands using aerial images. Department of Surveying and Land Information, The University of the West Indies, Trinidad and Tobago, Commission III, Working Group 5 : 5 p.
3. **Andersen, L., Boundy, K., Melzer, A., 2004.** Intertidal crabs as potentiel biomonitors in Port Curtis. Central Queensland University, Cooperative Research Centre for Coastal Zone Estuary and Waterway Management, technical report 12 : 24 p.
4. **Aquadev, 2000.** Inventaire des sites aquacoles. 10p. + annexes.
5. **Ball, M.C., 1988.** Ecophysiology of mangroves. *Trees* 2 :129-142.
6. **Boto, K., Saffigna, P., Clough, B., 1985.** Role of nitrate in nitrogen nutrition of the mangrove *Avicennia marina*. *Marine Ecology Progress Series* 21 :259-265.
7. **Boyd, C.E., 1995.** Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. Chapman and Hall editors, New York. 348 p.
8. **Calzadilla-Perez, A., Damen, M.C.J., Geneletti, D., Hobma, T.W., 2002.** Monitoring a recent delta formation in a tropical coastal wetland using remote sensing and GIS. Case study : Guapo River delta, Laguna de Tacarigua, Venezuela. *Environment, development and Sustainability* 4: 201-219.
9. **Castelain, B., 2004.** Evolution of shrimp farming in New Caledonia – Strategic choices and development policy in the Northern Province. The case of the Webuihoone shrimp farm. Présentation au colloque Aquaculture à Sydney.
10. **Clough, B.F., 2005.** ZoNéCo report – Field work related to the impact of aquaculture on 3 different sites of mangrove in New Caledonia (28 Sept – 14 Oct 2004). Rapport non diffusé : 10 p.
11. **Clough, B.F., Andrews, T.J., Cowan, I.R., 1982.** Physiological processes in mangroves. *In* : Clough, BF (Ed.), *Mangrove Ecosystems in Australia: Structure, Function and Management*. Australian National University Press, Canberra : 193-210.
12. **Clough, B.F., Boto, K.G., Attiwill, P.M., 1983.** Mangroves and sewage: A re-evaluation. *In* : Teas HJ (Eds.), *Biology and Ecology of Mangroves*. Tasks for Vegetation Science 8. Dr W. Junk, The Hague : 151-161.
13. **Clough, B., Dixon, P., Dalhaus, O., 1997a.** Allometric relationships for estimating biomass in multi-stemmed mangrove trees. *Australian Journal of Botany* 45 :1023-1031.
14. **Clough, B.F., Ong, J.E., Gong, W.K., 1997b.** Estimating Leaf Area Index and photosynthetic production in canopies of the mangrove *Rhizophora apiculata*. *Inter Research, Marine Ecology Progress Series*, vol 159 : 285-292.
15. **Dahdouh-Guebas, F., 2002.** The use of remote sensing and GIS in the sustainable management of tropical coastal ecosystems. Laboratory of General Botany and Nature Management, Mangrove Management Group, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, *Environment, Development and Sustainability* 4 : 93–112.
16. **Duke, N.C., Lawn, P., Roelfsema, C.M., Zahmel, K.N., Pederen, D., Harris, C., Steggles, N., Tack, C., 2003.** Assessing historical change in coastal environments – Port Curtis, Fitzroy Estuary and Moreton Bay Regions. The University of Queensland, Marine Botany Group, Centre for Marine Studies, Report to the Cooperative Research Centre for Coastal Zone Estuary and Waterway Management, July 2003.
17. **English, S., Wilkinson, C., Baker, V., 1997.** Survey manual for tropical marine resources. Australian Institute of Marine Science, chapitre 3 : 119 – 196.
18. **Flowers, T.J., Yeo, A.R., 1977.** The mechanism of salt tolerance in halophytes. *Annual Review of Plant Physiology* 28 :89-121.

19. **Frederiksen, T.M., Soresen, K.B., Finster, K., Macintosh, D.J., 1998.** Implications of shrimp pond waste in mangrove environments. *Aquaculture ASIA*, vol. III n°2, April-June 1998: 8-11.
20. **Fuchs, J., Martin, J. L. M., and Populus, J, 1998.** Assessment of tropical shrimp aquaculture impact on the environment in tropical countries, using hydobiology, ecology and remote sensing as helping tools for diagnosis. Rapport final du contrat Européen TS3-CT 94-00284. Rapport Interne de la direction des Ressources vivantes de l'IFREMER, DRV/RA/RST/98-05.
21. **Gautier, D., Amador, J., Newmark, F., 2001.** The use of mangrove wetland as a biofilter to treat shrimp pond effluents : preliminary results of an experiment on the Caribbean coast of Colombia. *Aquaculture Research*, 32 : 787-799.
22. **GFA, 2002.** Le développement de la filière crevette – estimations de 2003 à 2007. Rapport du Groupement des Fermes Aquacoles 2002.
23. **Green, E. P., Mumby, P.J., Edwards, A.J., Clarks, C.D., (Ed. A.J. Edwards), 2000.** Remote sensing handbook for tropical coastal management. Coastal Management Sourcebooks 3, UNESCO, Paris : 316 p.
24. **Hambrey, J., 1996.** The mangrove questions. Asian Shrimp Culture Council, Asian Shrimp News, n°26, 2nd quarter 1996 : 3-4.
25. **Hussenot, J., Martin, J.-L.M. 1995.** Assessment of the quality of pond sediment in aquaculture using simple, rapid techniques. *Aquaculture International* 3, 123-133.
26. **Lemonnier, H., Faninoz, S., 2001.** Effet des renouvellements sur la production et le devenir des déchets pour des élevages semi-intensifs de saison chaude. DRV/RA/FB2001-04 : 41p.
27. **Lemonnier, H., and Herlin, J., 1999.** NEW-CALEDONIA: a case of friendly shrimp aquaculture. WORLD AQUACULTURE '99" Bridging the gap 26 april – 2 may 1999, Sydney, Australia.
28. **Lemonnier, H., Martin, J.L.M., Brizard, R., Herlin, J., 2003.** Effect of water exchange rate on waste production in semi-intensive shrimp ponds during the cold season in New Caledonia. *Journal of the World Aquaculture Society* 34 n°1, march 2003 : 40-49.
29. **Mac Kinnon, A.D., Trott, L.A., Alongi, D.M., Davidson, A., 2002a.** Water column production and characteristics in mangrove creeks receiving shrimp farm effluent. *Aquaculture Research* 33 : 55-73.
30. **MacKinnon, A.D., Trott, L.A., Cappel, M., Miller, D.K., Duggan, S., Speare, P., Davidson, A., 2002b.** The trophic fate of shrimp farm effluent in mangrove creeks of north Queensland, Australia. *Elsevier Science Ltd, Estuarine, Coastal and Shelf Science* (55) : 655-671.
31. **Manson, F.J., Loneragan, N.R., Phinn, S.R., 2003.** Spatial and temporal variation in distribution of mangroves in Moreton Bay, subtropical Australia : a comparison of pattern metrics and change detection analyses based on aerial photographs. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences* 57: 653-666.
32. **Martin, J.L.M., Véran, Y., Guelorget, O., Pham, D., 1998.** Shrimp rearing : stocking density, growth, impact on sediment, waste output ; Their relationships studied through the nitrogen budget in earing ponds. *Aquaculture* 164 : 135-149.
33. **Martin, J.L.M., Lemonnier, H., Garen, P., 2004.** Influence des pratiques zootechniques et des paramètres environnementaux sur les performances de production, et sur la formation et le devenir des déchets dans les élevages de crevettes. In : Styli 2003. Trente ans de crevetticulture en Nouvelle-Calédonie. Nouméa-Koné, 2-6 juin 2003. Éd. Ifremer, Actes Colloq., 38. p 142-146.
34. **Mazda, Y., Magi, M., Nanao, H., Kogo, M., Miyagi, T., Kanazawa, N., Kobashi, D., 2002.** Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Kluwer Academic Publishers, Wetlands Ecology and Management* 10 : 1–9.
35. **Menasveta, P., 1997.** Mangrove destruction and shrimp culture systems. *World Aquaculture*, dec. 1997: 36-42.
36. **Murphy, J., Riley, J.P., 1962.** A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27 : 31-36.
37. **Nielsen O., Kristensen, E., Macintosh, D.J., 2003.** Impact of fiddler crabs (*Uca* spp.) on rates and pathways of benthic mineralization in deposited mangrove shrimp pond waste. *Elsevier Science B.V., Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 289 : 59-81.

38. **Paez-Osuna, F., Gracia, A., Flores-Verdugo, F., Lyle-Fritch, L.P., Alonso-Rodriguez, R., Roque, A., Ruiz-Fernandez, A.C., 2003.** Shrimp aquaculture development and the environment in the Gulf of California ecoregion. *Elsevier Science Ltd, Marine Pollution Bulletin* 46 : 806-815.
39. **Passioura, J.B., Ball, M.C., Knight, J.H., 1992.** Mangroves may salinise the soil and in so doing limit their transpiration rate. *Functional Ecology* 6 : 476-481.
40. **Perez, A.C., Damen, M.C.J., Geneletti, D., Hobma, T.W., 2002.** Monitoring a recent delta formation in a tropical coastal wetland using remote sensing and GIS. Case study : Guapo river Delta, Laguna de Tacarigua, Venezuela. Instituto de Geografía y Desarrollo Regional IGDR, Universidad Central de Venezuela, *Kluwer Academic Publishers, Environment, Development and Sustainability* 4 : 201–219.
41. **Pruder, G.D., 1992.** Marine shrimp pond effluent : characterization and environmental impact. In: Proceedings of the special session on shrimp farming (ed. by J. Wyban), The World Aquaculture Society, Baton Rouge L.A. : 187-194.
42. **Raimbault P., Slawyk G., Coste B., Fry J., 1990.** Feasibility of measuring an automated colorimetric procedure for the determination of seawater nitrate in the 0 to 100nM range : examples from field and culture. *Mar. Biol.*, **104** : 347-351.
43. **Reeburgh, W.S., 1983.** Rates of biogeochemical processes in anoxic sediments. *Annual review of earth and planetary Sciences* 11, 269-298.
44. **Rivera-Monroy, V.H., Torres, L.A., Bahamon, N., Newmark, F., Twilley, R.R., 1999.** The potential use of mangrove forests as nitrogen sinks of shrimp aquaculture pond effluents : the role of denitrification. *Journal of the World Aquaculture Society*, 30: 12-25.
45. **Robertson, A.I., Phillips, M.J., 1995.** Mangroves as filters of shrimp pond effluent: prediction and biogeochemical research needs. *Hydrobiologia*, 295: 311-321.
46. **Sato, K., Kanetomi, M., 2000.** Application of Remote Sensing with LANDSAT TM Data for Management and Control of Mangrove Forest - A Case Study in Okinawa. *ACRS 2000, proceedings*, 3 p.
47. **Smith, P.T., 1996.** Physical and chemical characteristics of sediments from prawn farms and mangrove habitats on the Clarence River, Australia. *Aquaculture* 146:47-83.
48. **Thollot, P., 1992.** Contribution des données satellitaires à la connaissance des ressources halieutiques côtières : les poissons de mangrove du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. In Bour, W., Loubersac, L. (Ed.) : « Pix'iles 90 », télédétection et milieux insulaires du Pacifique : approches intégrées. ORSTOM, Journées internationales Pix'iles 90 , 19-24 novembre 1990 : 233-244.
49. **Tovar, A., Morena C., Manuel-Vez, M.P., Garcia-Varga, M., 2000.,** Environmental implications of intensive marine aquaculture in Earthen ponds. *Elsevier Science Ltd, Marine Pollution Bulletin*, vol. 40, n°11 : 981-988.
50. **Trott, L., Alongi, D.M., 2000.** The impact of shrimp pond effluent on water quality and phytoplankton biomass in a tropical mangrove estuary. *Marine Pollution Bulletin* 40 : 947-951.
51. **Tuaán, V. A., Clough, B., Lö, T., Johnston, D., Phillips, M., Chanratchakool, P., 1994.** Mixed shrimp-mangrove farming practices : a manual for farmers. "Mixed Shrimp Farming-Mangrove Forestry Models in the Mekong Delta", ACIAR - MOFI Project FIS/94/12 : 29 p.
52. **Verheyden, A., Dahdouh-Guebas, F., Thomaes, K., De Genst, W., Hettiarachchi, S., Koedam, N., 2002.** High resolution vegetation data for mangrove research as obtained from aerial photography. *Kluwer Academic Publishers, Environment, Development and Sustainability* 4 : 113–133.
53. **Virly, S., 2004.** Evaluation de l'impact de l'aquaculture de crevettes sur les mangroves de Nouvelle-Calédonie : Choix des sites à étudier. Sabrina Virly Consultant pour le Programme ZoNéCo, juin 2004 : 7 p.
54. **Wolanski, E., Spagnol, S., Thomas, S., Moore, K., Alongi, D.M., Trott, L., Davidson, A., 2000.** Modelling and Visualizing the fate of shrimp pond effluent in a mangrove-fringed tidal creek. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50 : 85-97.

8.ANNEXES

Annexe 1 : Liste des cartes IGN au 1/10 000ième utilisées pour le géoréférencement des photographies aériennes des sites de Ouano, Sodacal, Pouaco et Pouanga.

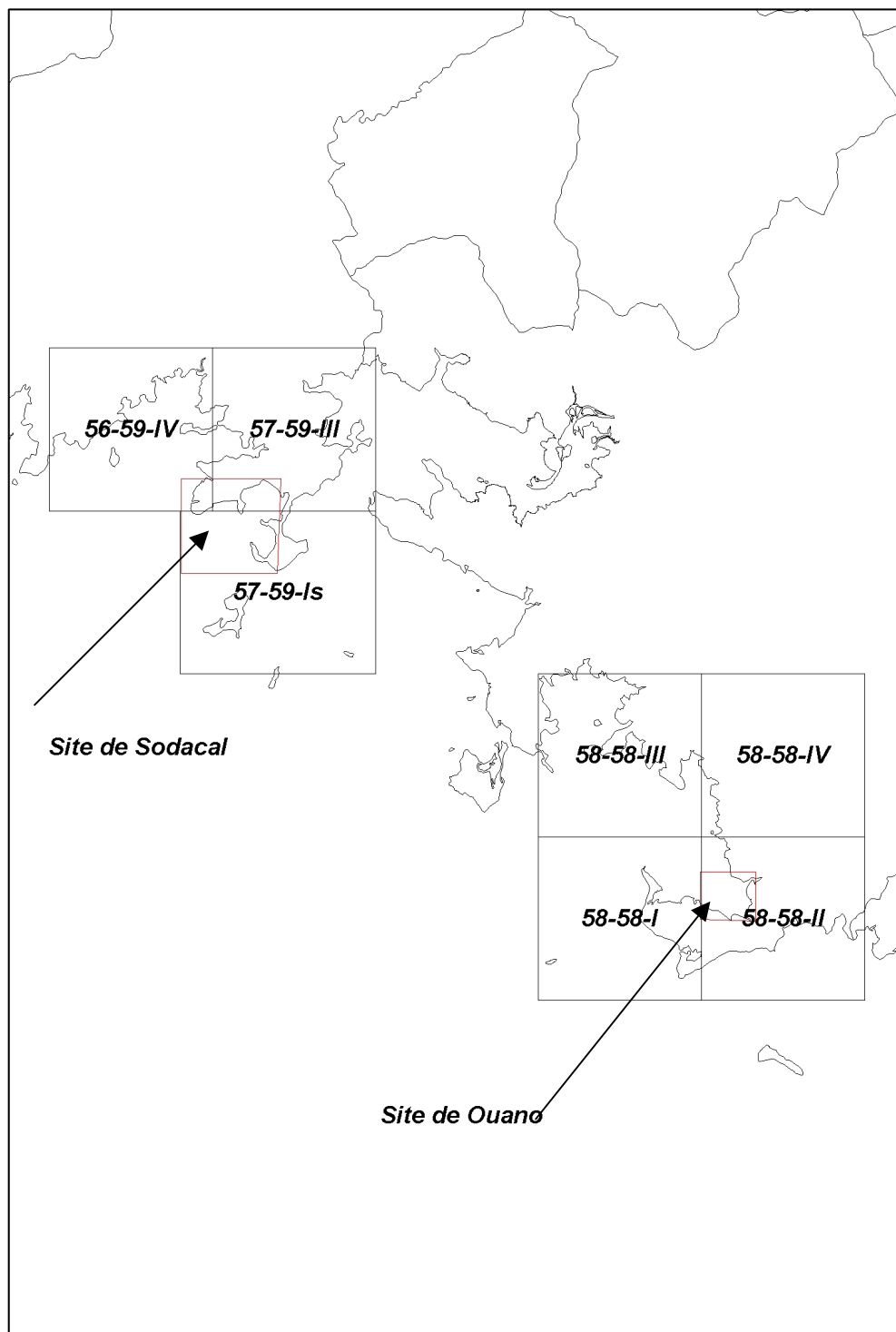
Annexe 2 : Coordonnées des stations des 3 sites (IGN72 - UTM58S)

Annexe 3 : Description détaillée de chacune des stations des 3 sites étudiés sur le terrain.

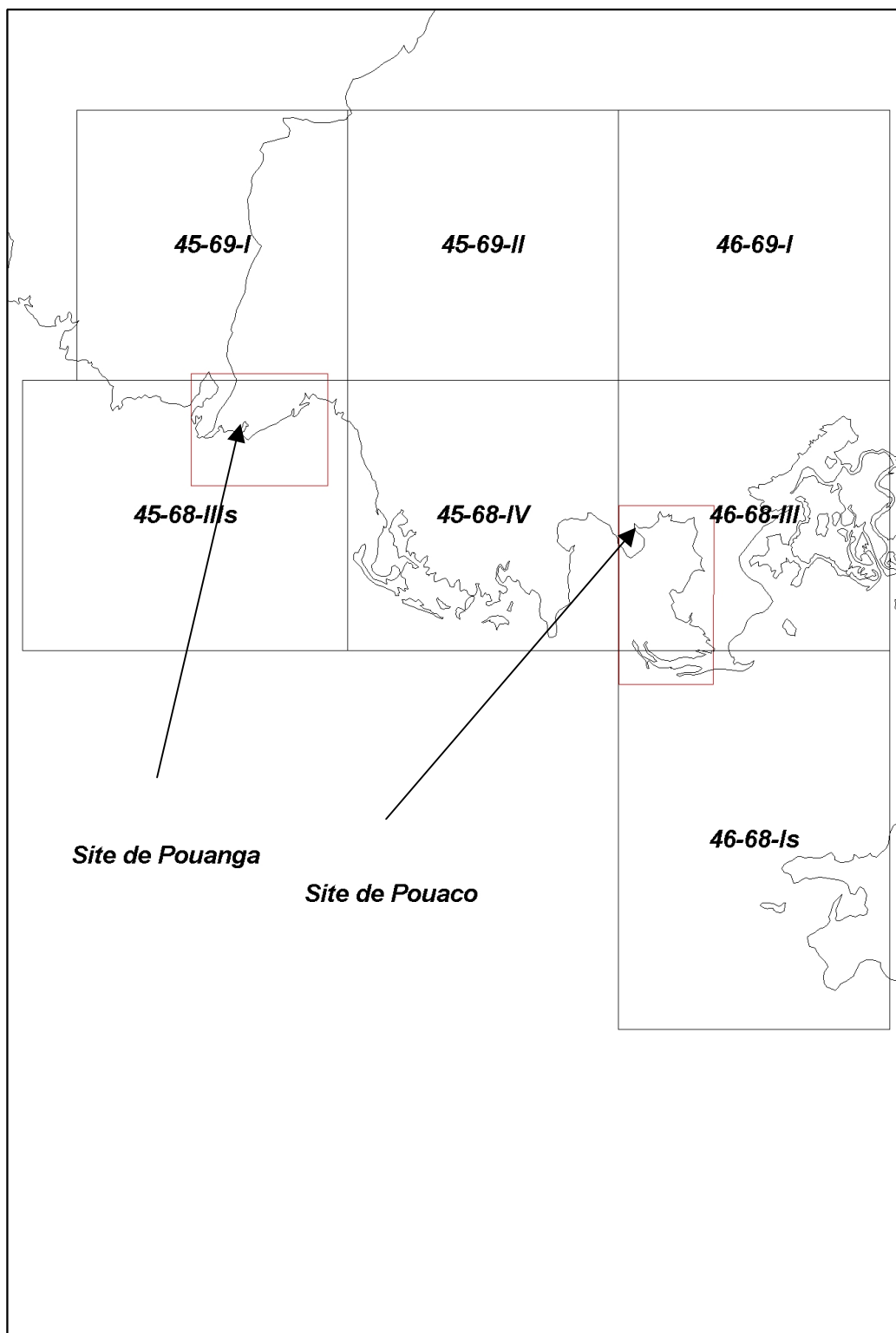
Annexe 4 : Tableau récapitulatif des mesures des paramètres physico-chimiques de chaque station.

Annexe 5 : Tableau récapitulatif des photographies aériennes archivées, géoréférencées et interprétées.

Annexe 1 : Liste des cartes DITTT au 1/10 000ième utilisées pour le géoréférencement des photographies aériennes des sites de Ouano, Sodacal, Pouaco et Pouanga.



Sites de la côte sud-ouest : Ouano et Sodacal



Sites de la côte nord-ouest : Pouaco et Pouanga

Annexe 2 : Coordonnées géographiques des stations des 3 sites (IGN72 - UTM58S) et types d'échantillonnage réalisé sur chaque station

NB : les stations sont listées par site, puis par radiale depuis l'intérieur des terres vers la côte.

Site	Radiale	Station	WP	Latitude (m)	Longitude (m)	LAI	Feuille	Sol	Eau	Faune
OUANO	1	OU3	545	586092	7582814		x			x
OUANO	1	OU10	560	585798	7582776			x	x	
OUANO	1	OU13	569	585829	7582787		x	x		
OUANO	1	OU14	568	585881	7582805		x	x		
OUANO	1	OU12	563	585796	7582876	x	x	x	x	
OUANO	1	OU11	567	585731	7582887	x	x	x	x	
OUANO	1	OU1	542	585712	7582956	x	x	x	x	
OUANO	2	OU4	546	586283	7583117		x	x		x
OUANO	2	OU7	547	586228	7583127	x	x	x		
OUANO	2	OU8	558	586227	7583106		x	x		x
OUANO	2	OU9	559	586210	7583066			x		
OUANO	2	OU6	553	586183	7583115	x	x	x	x	
OUANO	2	OU5	548	586086	7583117	x	x	x	x	
OUANO	2	OU2	543	585950	7583106	x	x	x	x	
SODACAL	1	SO4	573	571601	7594042			x	x	x
SODACAL	1	SO3	578	571516	7594048		x	x		
SODACAL	1	SO2	577	571470	7594091		x	x	x	
SODACAL	1	SO1	572	571361	7594030	x	x	x	x	
SODACAL	1	SO5	582	571141	7594077	x	x	x		
SODACAL	2	SO9	586	571694	7595150			x		x
SODACAL	2	SO8	593	571518	7595068		x	x		
SODACAL	2	SO7	589	571256	7594769	x	x	x		
SODACAL	2	SO6	580	570952	7594469	x	x	x	x	
POUACO	1	PO7	618	461020	7686529		x	x		x
POUACO	1	PO6	617	460809	7686512		x	x	x	
POUACO	1	PO1	594	460553	7686345	x	x	x	x	
POUACO	2	PO8	604	460940	7685740		x	x		x
POUACO	2	PO5	619	460879	7685643		x	x		
POUACO	2	PO3	606	460750	7685487	x	x	x		
POUACO	2	PO4	607	460725	7685508	x	x	x		
POUACO	2	PO2	600	460678	7685438	x	x	x	x	

Annexe 3 : Description détaillée de chacune des stations des 3 sites étudiés sur le terrain.

Les espèces végétales recensées sur les 3 sites sont **Salicornia australis**, **Avicennia cf officinalis**, **Rhizophora stylosa** et **Rhizophora mangle**.

OUANO

Transect 1 (OU3=545 ; OU10=560 et OU13=569 et OU14=568 ; OU12=563 ; OU11=567 ; OU1=542)

Station OU3 (545) Elle correspond à la zone la plus à l'intérieur des terres, au pied de la digue du bassin 4 (Figure 1). Elle est essentiellement composée de pré salé sur lequel poussent peu de Salicornes et quelques **Avicennia officinalis** de petite taille (1 à 2 m de haut) et éparses (densité des racines de 1/5 ; densité de la canopée de 1/5). Elle ne se situe pas dans l'alignement de la radiale 1 car la zone de pré salé au niveau de la radiale 1 est quasi inexistante. Sur la station OU3, la canopée est trop ouverte pour pouvoir mesurer un indice foliaire.

Station 10 (560) Elle correspond à la première des 3 stations, à la sortie du canal collecteur des bassins 1 et 2, le long du petit transect transversal dans la zone de transition entre **Rhizophora stylosa** et **A. officinalis** (Figures 2 et 3). La végétation est composée d'un mélange à part égale de **R. stylosa** de 1,5 à 2 m de haut et de petits **A. officinalis** inférieurs à 1,5 m de haut. La densité des racines est de 1/5. Le pré salé est quasi inexistant. La canopée est relativement ouverte (densité 2/5) empêchant une mesure fiable de l'indice foliaire.

Station OU13 (569) Elle correspond à la deuxième des 3 stations le long du petit transect transversal dans la zone de transition entre **R. stylosa** et **A. officinalis** avec prédominance de Rhizophora (Figure 4). Se situant à environ 30 m de la digue, il s'agit de petits Rhizophora de 1,8 m de haut en moyenne, dont la densité des racines est de 2/5 et celle de la canopée moyenne (3/5).

Station OU14 (568) Elle correspond à la troisième des 2 stations le long du petit transect transversal dans la zone de transition entre **R. stylosa** et **A. officinalis**. Les caractéristiques de la végétation sont similaires à celles de la station OU13 avec des arbres de plus petite taille (1,5 m).

Station OU12 (563) La végétation est essentiellement composée de **R. stylosa** de 3 à 5 m de haut en patchs (Figure 5) avec une canopée relativement bien développée (densité 3/5) et un système racinaire moyen (3/5). L'indice foliaire LAI est de 6,5 (cf paragraphe 4.4.2.2. Analyse de LAI, Tableau 6).

Station OU11 (567) Cette station est située à mi-distance entre la frange maritime et la digue des bassins (Figure 6). La végétation est essentiellement composée de **R. stylosa** de 3 à 5 m de haut avec une canopée bien développée (densité 4/5) dont l'indice foliaire atteint 6. Les racines sont denses (4/5) et les arbres sont dégarnis à leur base.

Station OU1 (542). La végétation de la frange maritime est essentiellement composée de **R. stylosa**, de 4 à 6 m de haut avec une canopée dense (5/5) et en bonne santé (Figures 7 et 8). Les arbres étaient en floraison au moment de l'échantillonnage avec quelques propagules de la précédente floraison. L'indice foliaire était de 6,1.



Figure 1 : Station OU3 (Pré salé avec petits *Avicennia* éparses)



Figures 2 et 3 : Station OU10 (0 gauche canal à gauche de la station ; Zone de transition *Avicennia* - *Rhizophora*)



Figure 4 : Station OU13 (Petits *Avicennia* et *Rhizophora* de densité moyenne)



Figures 5 et 6 : Station OU12 et Station OU11 dans la forêt de *Rhizophora*



Figures 7 et 8 : Station OU1 (Frange maritime avec *Rhizophora* denses)

TRANSECT 2 (OU4=546 ; OU7=547 ; OU8= 558 ; OU9=559 ; OU6=553 ; OU5=548 ; OU2=543)

- Station OU4 (546) Il s'agit un pré salé avec salicornes et quelques **A. officinalis** de taille inférieure à 1 m (Figures 9 et 10). La canopée est trop ouverte (1/5) pour pouvoir mesurer un indice foliaire.
- Station OU7 (547) C'est la première des 3 stations (OU7, OU8 et OU9) du petit transect transversal, positionnée dans une zone de transition entre **R. stylosa** and **A. officinalis** (Figure 11). Elle est composée à part égale de **R. stylosa** de taille moyenne (1,5 – 2 m) et de plus petits **A. officinalis** (<1,5 m). La canopée est moyennement dense (3/5) avec un LAI de 4,4.
- Station OU8 (558) C'est la seconde des 3 stations du petit transect transversal se situant également dans une zone de transition entre **R. stylosa** and **A. officinalis**. Les Rhizophoras dont la densité est moyenne (3/5) sont plus petits que ceux de la station OU7.
- Station OU9 (559) C'est la troisième des 3 stations du petit transect transversal se situant également dans une zone de transition entre **R. stylosa** et **A. officinalis**. Les Rhizophora sont moins denses (2/5) et plus petits que ceux de la station OU7.
- Station OU6 (553) Se situant à peu près à mi-distance entre la frange maritime et la digue du bassin 7, elle principalement composée de **R. stylosa** de 2 à 3 m de haut, avec quelques **A. officinalis** isolés (Figure 12). La végétation est dense au niveau du système racinaire aérien (4/5), sauf au niveau des chenaux principaux. En revanche, la canopée n'est pas très développée (densité 3/5) avec un LAI de 4,6.
- StationOU5 (548) Il s'agit essentiellement de grands **R. stylosa**, de 3 à 4 m de haut avec quelques spécimens plus ages et plus gros jusqu'à 6 m de haut (Figure 13). La canopée est bien fermée et très dense (5/5) avec un LAI de 7,2. En revanche, contrairement à la station OU6, le système racinaire relativement clairsemé (3/5) et très souvent immergé fait penser à une zone de drainage principale.
- Station OU2 (543) Située sur la façade maritime (Figure 14), elle est composée de **R. stylosa** de 3 à 5 m de haut présentant une canopée dense et en bonne santé (densité 5/5) avec un LAI de 6,6. Les arbres étaient en floraison au moment de l'échantillonnage avec quelques propagules de la précédente floraison.



Figures 9 et 10 : Station OU4 (pré salé bien développé et échantillonnage de la mégafaune en bordure du pré salé)



Figure 11 : Station OU7 (Récolte de feuilles d'Avicennia)



Figure 12 : Station OU6 (Essentiellement des *Rhizophora* avec système racinaire bien développé sauf ici au niveau d'un chenal)



Figure 13 : Station OU5 (*Rhizophora* à la canopée dense et au système racinaire moins dense)

Figure 14 : Station OU2 (Façade maritime de *Rhizophora* denses)



TRANSECT 1 (SO4=573 ; SO3=578 ; SO2=577 ; SO1=572 ; SO5=582)

- Station SO4 (573) Pré salé réduit, en grande partie immergé, particulièrement au niveau du moine de sortie du bassin V (profondeur 0,8 m). Les effluents du bassin V inondent uniformément la zone où se développent des algues sur le fond (Figures 15 et 16). Cette zone est essentiellement composée de petits **A. officinalis** éparses sur un sol vaseux dense et collant avec quelques touffes de salicornes (Figure 17).
- Station SO3 (578) Strate **d'A. officinalis** de petite taille (1 à 1,5 m de haut) sur un sol boueux et recouvert d'eau (Figures 18 et 19). La densité des arbustes est moyenne (3/5).
- Station SO2 (577) Zone de transition entre strate à **A. officinalis** et **R. stylosa**, entièrement immergée même à marée basse. Les Rhizophora qui se présentent en patch peu dense (2/5) sur un sol très vaseux (Figure 20), sont en bonne santé (état et couleur des feuilles caractéristique, croissance rapide d'après la longueur des inter nœuds).
- Station SO1 (572) Zone de vieux **R. stylosa** de 4 à 5 m de haut, abîmée en de nombreux endroits (Figures 21 et 22). Le système racinaire est développé en hauteur (des racines aériennes débutent à 2 m de haut) mais la canopée est relativement ouverte (densité 2/5) comme l'indique la faible valeur de LAI de 3,5. Des densités élevées de pneumatophores ou des pneumatophores très hauts sont généralement des indicateurs physiques de faible drainage naturel de la zone ou de stress possible en oxygène.
- Station SO5 (582) Elle correspond à la frange externe de la mangrove, composée de Rhizophora spp. (**R. stylosa** et **R. mangle** var. **samoensis**) dont la canopée est moyennement dense (3/5) comme le confirme la mesure de LAI de 4,6 (Figures 23 et 24).



Figures 15 et 16 : Moine de sortie de bassin V à côté de la station SO4 et développement d'algues sur la zone recevant les effluents.



Figure 17 : Station SO4 (Pré salé réduit et immergé composé d'Avicennia).



Figures 18 et 19 : Station SO3 (Zone d'Avicennia) immergée uniformément.



Figure 20 : Station SO2 dans une zone immergée à Rhizophora en patchs de taille moyenne.



Figures 21 et 22 : Station SO1 dans une forêt de *Rhizophora* âgés et clairsemés au système racinaire développé en hauteur.



Figures 23 et 24 : Station SO5 (Frange maritime composée de *Rhizophora* spp. relativement clairsemés).

TRANSECT 2 (SO9=586 ; SO8=593 ; SO7=589 ; SO6=580)

- Station SO9 (586) Cette station située en sortie du bassin C, est caractérisée par un pré salé envasé sur lequel se trouvent quelques îlots surélevés où poussent de façon éparse des ***Avicennia officinalis*** de taille inférieure à 1 m de haut (Figures 25, 26 et 27). La canopée est trop ouverte pour mesurer un indice foliaire de façon fiable.
- Station SO8 (593) Positionnée à environ 50 m des moines de sortie du bassin C, elle présente une végétation composée essentiellement d'***A. officinalis*** poussant sur des zones surélevées comme à la station SO9 (Figure 28). La densité est plus élevée qu'à la précédente station mais la canopée est trop ouverte pour pouvoir mesurer un LAI.
- Station SO7 (589) Située à mi-distance entre la façade maritime et les digues des bassins B et C, elle est proche d'une grande trouée (zone de *Rhizophora* détruite) à proximité d'un chenal naturel d'évacuation. La végétation est composée de grands ***R. mangle*** var. ***samoensis*** et de ***R. stylosa*** de 4 à 5 m de haut (Figures 29 et 30). La canopée est moyennement dense avec un LAI de 4,6.
- Station SO6 (580) Elle se situe entre la façade maritime où se trouve un chenal naturel accessible en bateau (Figure 31) et la fin de la digue construite par Sodacal. La végétation est composée de ***R. samoensis*** et ***R. stylosa*** de 3 à 4 m de haut (Figures 32 et 33). La canopée est moyennement dense (3/5) avec un LAI de 4,8.



Figures 25 et 26 : Station SO9 (zone envasée) et échantillonnage de la mégafaune.



Figure 27 : Sol de la station SO9, constitué de vase gris foncé et de racines d'*Avicennia*.



Figure 28 : Station SO8 (îlot d'Avicennia)



Figures 29 et 30 : Station SO7 (Forêt de grands Rhizophora).



Figure 31 : Chenal d'accès à la station SO6.



Figures 32 et 33 : Station SO6 (Façade maritime de Rhizophora).

POUACO

TRANSECT 1(PO7=618; PO6=617; PO1=594)

- Station PO7 (618) La station est positionnée en fin de strate de petits ***Avicennia officinalis*** de 0,5 à 1 m de haut éparses (densité 2/5), juste avant la zone de transition avec de petits *Rhizophora* (Figure 34). Le sol est particulièrement asséché, montrant des polygones de dessiccation à de nombreux endroits. Il semble que cette station soit relativement élevée topographiquement parlant (Figure 35). La canopée est trop ouverte pour pouvoir mesurer un LAI.
- Station PO6 (617) La station est située dans la strate à ***Rhizophora stylosa*** de 1,5 à 2 m de haut à la canopée ouverte (2/5) mais avec un système racinaire relativement dense (3/5) (Figures 35 et 36). Le prélèvement de sédiment à l'aide d'un carottier a été difficile du fait de cette densité de racines dans le premier horizon du sol. Aucune mesure de LAI n'a été possible. Comme à la station PO7, le niveau topographique de cette station est élevé engendrant un flux d'eau limité dans cette zone. Au moment de l'échantillonnage de cette station, la hauteur d'eau était de 15 cm, correspondant à la marée haute de coefficient 1,2.
- Station PO1 (594) Elle correspond à la frange maritime composée de ***Rhizophora stylosa*** de 3 à 4 m de haut (Figure 37). Le feuillage est moyennement dense (3/5) avec un LAI de 3,8.



Figures 33 et 34 : Station PO7 du transect 1 de Pouaco (Petits *Avicennia* sur sol asséché)



Figures 35 et 36 : Station PO6 du transect 1 de Pouaco (Petits Rhizophora).



Figure 37 : Station PO1 du transect 1 de Pouaco (Frange maritime de Rhizophora).

TRANSECT 2 (PO8=604; PO5=619; PO3=606; PO4=607; PO2=600)

- Station PO8 (604) Strate à ***Avicennia officinalis*** éparses et de petite taille (1,5 m de haut au maximum) sur sol desséché (Figure 38). La station se situe sur un sol plus humide que celui de l'ensemble de la zone.
- Station PO5 (619) Station située le long de la tranchée artificielle, composée de ***Rhizophora stylosa*** de 2 m de haut (Figure 39). La canopée est relativement ouverte (2/5) mais la densité des racines est plus élevée (3/5).
- Station PO3 (606) Station le long de la tranchée artificielle du côté sud, composée de ***Rhizophora stylosa*** de 2,5 à 3 m de haut, moyennement dense (3/5) présentant un état de santé mitigé (feuille mangées par les insectes). De nombreux mollusques gastéropodes ***Terebralia palustris*** (environ 10/m²) sont présents sur le sol vaseux aéré grâce aux galeries de crabes (en moyenne 60 trous de crabes /m²), entre les racines échasses assez denses (4/5). Le LAI moyen est de 4,1 confirmant une densité moyenne du feuillage (Figure 40).
- Station PO4 (607) Station faisant face à la station PO3, du côté nord de la tranchée artificielle, composée de ***Rhizophora stylosa*** de 2,5 à 3 m de haut, moyennement dense (3/5). La densité des racines est élevée (4/5) ne permettant pas le prélèvement de sédiment sur plus de 15 cm ; la canopée est en revanche relativement ouverte (2/5) avec un LAI de 3,5 (Figure 41).
- Station PO2 (600) Cette station est située à la fin d'un creek sur la frange maritime de ***Rhizophora stylosa*** de 4 m de haut dense (4/5) avec un LAI de 4,42. La densité est plus élevée que celle observée au niveau de l'autre station de la frange maritime PO1 (Figure 42).



Figure 38 : Station PO8 du transect 2 de Pouaco (*Avicennia courts*).



Figure 39 : Station PO5 du transect 2 de Pouaco (*Rhizophora* le long de la tranchée).



Figure 40 : Station PO3 du transect 2 de Pouaco (*Rhizophora* dense au feuillage clairsemé).



Figure 41 : Station PO4 du transect 2 de Pouaco (*Rhizophora* dense au feuillage clairsemé).



Figure 42 : Station PO2 du transect 2 de Pouaco (Frangée maritime de *Rhizophora* denses au bout d'un creek).

Annexe 4 : Tableau récapitulatif des mesures des paramètres physico-chimiques des sédiments de chaque station.

Site	Radiale	Station	BIOTOPE	Moy P (µg/g)	Moy N (mg/g)	Moy C (mg/g)	moy pH	Écartype P	ÉcartypeN	Écartype C	ecartype pH	C/N	redox moy
Ouano	radiale 1	OU1	FM	254	1,90	45,1	6,6	103	0,26	1,4	0,1	28	- 63,00
	radiale 1	OU11	RH	381	2,50	54,8	6,3	54	0,20	6,7	0,1	26	- 2,00
	radiale 1	OU12	RH	217	1,87	53,8	6,4	14	0,23	3,2	0,1	34	- 72,00
	radiale 1	OU10	SB	157	1,00	27,2	6,1	24	0,17	10,6	0,0	32	- 93,00
	radiale 2	OU2	FM	342	2,37	54,7	6,1	20	0,31	4,4	0,1	27	- 76,00
	radiale 2	OU5	RH	261	3,07	77,8	6,4	15	0,23	14,0	0,3	30	- 45,00
	radiale 2	OU6	RHAV	177	2,53	84,2	6,3	6	0,15	6,1	0,3	39	- 43,00
	radiale 2	OU8	RHAV	172	2,23	58,5	7,0	9	0,21	4,0	0,5	31	- 46,00
	radiale 2	OU4	SB	156	1,17	27,3	7,2	5	0,06	3,0	0,2	27	170,00
Pouaco	radiale 1	PO1	FM	369	2,87	84,8	7,3	20	0,46	8,1	0,2	35	74,00
	radiale 1	PO6	RH	424	4,80	135,6	7,1	36	0,44	4,0	0,5	33	24,00
	radiale 1	PO7	AV	280	3,97	98,1	6,9	9	0,21	1,8	0,2	29	- 72,00
	radiale 2	PO2	FM	485	3,73	84,9	7,0	32	0,25	4,5	0,4	27	115,00
	radiale 2	PO3	RH	431	5,40	136,9	7,5	18	0,10	4,2	0,1	30	42,00
	radiale 2	PO4	RH	486	5,57	147,5	7,6	26	0,49	15,6	0,2	31	66,00
	radiale 2	PO5	RH	387	5,83	162,7	6,5	17	0,32	12,4	0,1	33	16,00
	radiale 2	PO8	AV	425	5,40	103,1	6,4	20	0,89	6,6	0,2	22	230,00
Sodacal	radiale 1	SO5	FM	592	3,27	72,4	7,1	25	0,23	5,3	0,1	26	3,00
	radiale 1	SO1	RH	469	3,67	84,2	6,2	118	0,15	4,5	0,2	27	- 25,00
	radiale 1	SO2	RH	452	3,17	77,6	6,7	36	0,15	4,6	0,1	29	- 51,00
	radiale 1	SO3	AV	340	2,20	51,7	6,6	54	0,26	17,2	0,2	27	56,00
	radiale 1	SO4	SB	358	0,90	11,2	7,3	7	0,10	1,5	0,0	14	285,00
	radiale 2	SO6	FM	633	3,77	78,4	6,9	59	0,61	7,1	0,1	24	75,00
	radiale 2	SO7	RH	348	3,57	78,4	6,9	177	1,54	27,0	0,4	26	- 69,00
	radiale 2	SO8	AV	320	1,70	26,5	6,6	59	0,36	7,6	0,2	18	65,00
	radiale 2	SO9	SB	299	1,63	57,3	7,2	119	0,15	9,7	0,2	41	- 6,00

Annexe 5 : Tableau récapitulatif des photographies aériennes archivées, géoréférencées et interprétées.

Zone	Année	Plateforme	Type de photo	Nom de la photo	Echelle	Couleur	Origine	Nom de la photo géoréférencée
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-012	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-013	40 000	NB	DITTT	rectify 54 012-013
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-014	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-015	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-045	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-046	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-047	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1954	verticale	photo avion	54 012-048	40 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-3719	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-3720	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-3721	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-42	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-43	20 000	NB	DITTT	rectify76 IGN PAC 37-200-43
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-44	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-45	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-46	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-96	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-97	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-98	20 000	NB	DITTT	-
OUANO	1982	verticale	photo avion	82-85 IGN PAC 400-421	40 000	NB	IFREMER	-
OUANO	1982	verticale	photo avion	82-85 IGN PAC 400-422	40 000	NB	IFREMER	-
OUANO	1993	verticale	photo avion	93 GNR SPOT 74	15 000	couleur	IFREMER	rectify93 gnr spot 74
OUANO	1995	verticale	photo avion	95 GBK SPOT 4215	15 000	couleur	IFREMER	-
OUANO	1996	verticale	photo avion	la foa Ouano 1-10000 08-1996 run09_049	10 000	couleur	DPSI	-
OUANO	1996	verticale	photo avion	la foa Ouano 1-10000 08-1996 run09_050	10 000	couleur	DPSI	-
OUANO	1996	verticale	photo avion	la foa Ouano 1-10000 08-1996 run09_051	10 000	couleur	DPSI	rectify la foa Ouano 1-10000 08-1996 run09_051
OUANO	1997	verticale	photo avion	97 GNR SPOT 85	15 000	couleur	IFREMER	rectify97 gnr spot 85
OUANO	2004	oblique	photo hélico	H-Ouano-Yh067	-	couleur	IFREMER	-
OUANO	2004	verticale	photo avion	ouano2004-run1-6001	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifyouano2004-run1-6001
OUANO	2004	verticale	photo avion	ouano2004-run1-6002	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifyouano2004-run1-6002
POUACO	1954	verticale	photo avion	54 005-082	40 000	NB	DITTT	-
POUACO	1954	verticale	photo avion	54 005-083	40 000	NB	DITTT	-
POUACO	1954	verticale	photo avion	54 IGN PAC5_400-118	40 000	NB	DITTT	-
POUACO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200 191	20 000	NB	DITTT	-
POUACO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200 192	20 000	NB	DITTT	-
POUACO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200 193	20 000	NB	DITTT	-
POUACO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200 517	20 000	NB	DITTT	-
POUACO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200 518	20 000	NB	DITTT	-
POUACO	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200 519	20 000	NB	DITTT	rectify76 IGN PAC 37-200 519
POUACO	1982	verticale	photo avion	82 PAC 64 400-466	40 000	NB	DITTT	rectify82 PAC 64 400-466
POUACO	1982	verticale	photo avion	82 PAC 64 400-467	40 000	NB	DITTT	-
POUACO	2002	verticale	photo avion	02 SPP185-4-80C-002	8 000	couleur	DITTT	rectify02 SPP185-4-80C-002
POUACO	2002	verticale	photo avion	02 SPP185-4-80C-003	8 000	couleur	DITTT	rectify02 SPP185-4-80C-003
POUACO	2002	verticale	photo avion	02 SPP185-4-80C-004	8 000	couleur	DITTT	rectify02 SPP185-4-80C-004
POUACO	2002	verticale	photo avion	02 SPP185-4-80C-005	8 000	couleur	DITTT	-
POUACO	2004	verticale	photo avion	pouaco2004-run1-6128	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifypouaco2004-run1-6128
POUACO	2004	verticale	photo avion	pouaco2004-run1-6129	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifypouaco2004-run1-6129
POUACO	2004	verticale	photo avion	pouaco2004-run1-6130	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifypouaco2004-run1-6130

Zone	Année	Plateforme	Type de photo	Nom de la photo	Echelle	Couleur	Origine	Nom de la photo géoréférencée
POUANGA	1954	verticale	photo avion	54 005-103	40 000	NB	DITTT	-
POUANGA	1954	verticale	photo avion	54 005-104	40 000	NB	DITTT	-
POUANGA	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-187	20 000	NB	DITTT	rectify76 IGN PAC 37-200-187
POUANGA	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-188	20 000	NB	DITTT	-
POUANGA	1982	verticale	photo avion	82 PAC 64 400-468	40 000	NB	DITTT	rectify82 PAC 64 400-468
POUANGA	1982	verticale	photo avion	82 PAC 64 400-469	40 000	NB	DITTT	-
POUANGA	2004	verticale	photo avion	pouanga2004-run1-6132	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifypouanga2004-run1-6132
POUANGA	2004	verticale	photo avion	pouanga2004-run1-6133	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifypouanga2004-run1-6133
POUANGA	2004	verticale	photo avion	pouanga2004-run1-6134	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifypouanga2004-run1-6134
SODACAL	1954	verticale	photo avion	54 012-22	40 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1954	verticale	photo avion	54 012-23	40 000	NB	DITTT	rectify54 012-23
SODACAL	1954	verticale	photo avion	54 012-36	40 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1954	verticale	photo avion	54 012-37	40 000	NB	DITTT	rectify54 012-37
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-52	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-53	20 000	NB	DITTT	76 IGN PAC 37-200-53-moindou
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-54	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-55	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-760	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-761	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-762	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-87	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-88	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1976	verticale	photo avion	76 IGN PAC 37-200-89	20 000	NB	DITTT	-
SODACAL	1982	verticale	photo avion	82 PAC 64 400-416	40 000	NB	DITTT	82 PAC 64 400-416-moindou
SODACAL	1995	verticale	photo satellite	Spot	-	-	SMAI	-
SODACAL	1996	verticale	orthophoto	96 GBK xx-200-149-moindou	20 000	couleur	IFREMER	96 GBK xx-200-149-moindou
SODACAL	1998	verticale	orthophoto	98 SEFP xx-xxx-121-moindou	20 000	couleur	SEFP	98 SEFP xx-xxx-121-moindou
SODACAL	2001	oblique	photo hélico	sodacalDPSI101201-001	-	couleur	DPSI	-
SODACAL	2001	oblique	photo hélico	sodacalDPSI101201-002	-	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo satellite	Landsat9	-	-	SMAI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_092	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	orthophoto	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_093	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_094	8 000	couleur	DPSI	rectify Moindou Téremba1-8000 09-2002 run01_94
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_095	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_096	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_097	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_098	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_099	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_100	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_101	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_102	8 000	couleur	DPSI	rectify Moindou Téremba1-8000 09-2002 run02_102
SODACAL	2002	verticale	photo avion	Moindou Téremba 1_8000 09-2002 run 01_103	8 000	couleur	DPSI	-
SODACAL	2003	verticale	Quicklook	Ikonos Quickbird	-	-	internet	-
SODACAL	2003	verticale	photo satellite	Landsat9	-	-	SMAI	-
SODACAL	2003	verticale	Quicklook	Ikonos Quickbird	-	-	internet	-
SODACAL	2004	verticale	Quicklook	Ikonos Quickbird	-	-	internet	-
SODACAL	2004	oblique	photo hélico	H-Sodacal-Yh087	-	couleur	IFREMER	-
SODACAL	2004	oblique	photo hélico	vue canal ds mangrove et tâche mortalites	-	couleur	SODACAL	-
SODACAL	2004	oblique	photo hélico	vue mangrove U a H 01 avril 04	-	couleur	SODACAL	-
SODACAL	2004	oblique	photo hélico	vue tâches mortalites pres canal mangrove	-	couleur	SODACAL	-
SODACAL	2004	verticale	photo avion	Sodacal2004-run1-5995	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifySodacal2004-run1-5995
SODACAL	2004	verticale	photo avion	Sodacal2004-run1-5996	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifySodacal2004-run1-5996
SODACAL	2004	verticale	photo avion	Sodacal2004-run2-5997	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifySodacal2004-run2-5997
SODACAL	2004	verticale	photo avion	Sodacal2004-run2-5998	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifySodacal2004-run2-5998
SODACAL	2004	verticale	photo avion	Sodacal2004-run2-5999	10 000	couleur	ZoNéCo	rectifySodacal2004-run2-5999

