

UNIVERSITE PARIS.DIDEROT (Paris 7)

ECOLE DOCTORALE 382

Economies Espaces Sociétés Civilisations : pensée critique, politique et pratiques sociales.

DOCTORAT

Géographie et Environnement

MIALHE François

Le développement de l'aquaculture saumâtre dans l'Aire Pacifique

Evolution des paysages, dynamiques socio-économiques et impacts environnementaux dans deux territoires au Pérou et aux Philippines

Thèse dirigée par MERING Catherine

Thèse soutenue le 09 décembre 2010

Jury

Dabbadie, Lionel, CIRAD (Examineur)

Faret, Laurent, Université Paris Diderot (Examineur)

Gunnell, Yanni, Université Lyon II (Examineur)

Houet, Thomas, CNRS (Examineur)

Laffly, Dominique, Université Toulouse II Le Mirail (Rapporteur)

Landy, Frédéric, Université Paris 10 (Rapporteur)

Mering, Catherine, Université Paris Diderot (Directrice de Thèse)

Rhein, Catherine, CNRS (Examinatrice)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse, Catherine Mering, qui a accepté de m'encadrer et qui m'a, tout au long de ce travail, prodigué de précieux conseils, et fait profiter de sa grande expérience.

Comment aussi ne pas remercier mon co-directeur de thèse, Yanni Gunnell, d'avoir lui aussi accepté d'encadrer ce travail, et de m'avoir proposé des pistes d'investigations toujours très intéressantes.

Merci donc d'abord et avant tout à mes deux directeurs de thèse auprès desquels j'ai beaucoup appris et avec lesquels cela restera un honneur d'avoir travaillé.

Merci aussi à Lionel Dabbadie, pour m'avoir intégré dans la chaleureuse équipe de l'ATP et pour m'avoir fait partager son expérience de l'aquaculture et des Philippines. Merci aussi pour son aide logistique.

Merci à Malcolm Sarmiento, Directeur du BFAR, et à Remedios E. Ongtangco, Directrice du BFAR Region 3 d'avoir accepté de m'intégrer à leurs équipes. Un très chaleureux remerciement à toute l'équipe du FIMC et tout particulièrement à Jose A. Razon III, Samuel Z. Tavora Adalia, et à Augusto P. Hernandez.

Merci à Nicolas Becu et Jean-Christophe Gaillard, pour m'avoir initié, respectivement aux SMA, à Pampanga mais aussi au videoke.

Merci à l'Ecole Doctorale EESC, à l'UFR GHSS, au personnel et aux enseignants de l'Université Paris 7, en particulier Marianne Cohen, et au laboratoire PRODIG.

Merci aux pôliens et aux prodigiens pour les pauses cafés et autres moments agréables, Ababacar, Anais, Aniss, Aurélien, Benoit, Chantal, Claudia, Elodie, Elsa, Erika, Florence, Guillaume, Jean-François, José, Julien, Meriem, Milena, Monique, Nahossio, Nicolas, Olivierss, Oumar, Pauline, Pierre, Sako, Sonia...et tous les autres.

Un immense merci et la plus chaleureuse des pensées à tous les acteurs et amis rencontrés sur les terrains péruviens et philippins.

A Tumbes, des pensées particulières pour José Luis, Manuel Peña Ruiz, Ricardo, Lilia, Guillermo Trisollini, Patrice, Elia, Lourdes ... et les autres, dont j'ai oublié les noms, mais pas les visages.

Aux Philippines, peuple le plus accueillant du monde, et tout particulièrement à Bajun, à tous les June, et Dieu sait s'il y en a, Dodong, Mike, Carie, Jinggoy, Lisa, à tous les habitants de Sagrada, de Sapang Kawayan, de San Esteban, de Sasmoan, Minalin, Macabebe, Lubao et tous les autres barangays du delta pour leur nombreuses leçons de vie.

Une pensée particulière pour Kuya Gonzales June Coloma, du BFAR, pour tout son support, son incroyable gentillesse et son dévouement, sauf lors des grosses chaleurs. Une pensée particulière aussi pour Trina pour son aide et pour son intellect.

Merci aux membres de ma famille, qui ont tous contribué d'une manière ou d'une autre à ce travail, Michelle, Eric, Julie, Manou, Papo, Geneviève, Noël, Lucette, Michelle, Christine, Paule, Jean-Luc, Jeannette, Jacques, Amélie, Nicolas, Alexandre, Nathalie, Jérémie, Christelle, Paul, Camille, sans oublier bien-sûr Alexis-François Eric...

Merci enfin à tous les poteaux pour les plaisirs du quotidien, ingrédient essentiel d'une thèse, Aurélie, Fabyfabzz, Ben, Jeannot, Jeme, Jips, Pascalss, Gabs, Cécilien, Lucile, Auréliess, Trina, Marco, Patrick, Mumu, Viu, Mario, Joy, Olivier, Audrey, Clara, Cécile, Juliette, Tom, Céilia, Nils, Gwen, Juliens, Baudwin, Guillaume, Bog, Fabienss, Boris, Dimitri, François, Franky, Cheick, Saloum, Claire, Anne-Charlotte, Anne-Laure, ainsi qu'à tous les collègues des Robins.....

SOMMAIRE

| | |
|--|------------|
| INTRODUCTION GENERALE | 9 |
| CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'AQUACULTURE | 13 |
| 1.1 Les facteurs du développement de l'aquaculture..... | 13 |
| 1.2 Les impacts de l'aquaculture..... | 23 |
| 1.3 Quel avenir ?..... | 33 |
| Conclusion..... | 40 |
| PARTIE 1 LE TERRITOIRE DE TUMBES | 41 |
| CARACTERISTIQUES GENERALES DU TERRITOIRE PERUVIEN..... | 42 |
| CHAPITRE 2 CARTOGRAPHIE DES ETANGS AQUACOLES ET DES CHANGEMENTS PAYSAGERS PAR TELEDETECTION | 53 |
| 2.1 Utilisation de la télédétection et de la géomatique dans le domaine de l'aquaculture..... | 53 |
| 2.2 Objectifs, nomenclature et choix des images..... | 56 |
| 2.3 Méthodes..... | 70 |
| 2.4 Résultats préliminaires : les méthodes de détection des étangs..... | 97 |
| Conclusion..... | 112 |
| CHAPITRE 3 LES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL DU TERRITOIRE DE TUMBES | 115 |
| 3.1 L'étude des changements d'occupation du sol..... | 115 |
| 3.2 Identification des changements : étude de la cinématique..... | 118 |
| 3.3 Explication des changements : étude de la dynamique..... | 128 |
| Conclusion..... | 142 |
| CHAPITRE 4 INTERACTIONS ENTRE AQUACULTURE ET TERRITOIRES | 145 |
| 4.1 Le système aquacole..... | 145 |
| 4.2 Le rôle et l'impact des territoires sur le processus de développement de l'activité..... | 152 |
| 4.3 Les impacts socio-économiques du développement aquacole..... | 161 |

| | |
|---|------------|
| Conclusion..... | 189 |
| PARTIE 2 LE TERRITOIRE DU DELTA DE LA PAMPANGA | 191 |
| LE TERRITOIRE DU DELTA DE LA PAMPANGA, UNE INTRODUCTION SUR LE CADRE BIO-PHYSIQUE..... | 192 |
| CHAPITRE 5 METHODE ET RESULTATS PRELIMINAIRES DES ANALYSES PAR TELEDETECTION DU TERRITOIRE PHILIPPIN | 201 |
| 5.1 Matériel et méthode..... | 201 |
| 5.2 Méthodes de traitement..... | 207 |
| 5.3 Résultats..... | 215 |
| Conclusion..... | 230 |
| CHAPITRE 6 ÉTUDE DES CHANGEMENTS : RECONSTRUCTION PAYSAGERE ET IDENTIFICATION DES CHAINES DE CAUSALITE | 231 |
| 6.1 La période historique ancienne..... | 231 |
| 6.2 Les changements contemporains..... | 244 |
| Conclusion..... | 294 |
| CHAPITRE 7 LE SYSTEME AQUACOLE | 295 |
| 7.1 L'espace et les étangs..... | 295 |
| 7.2 Les systèmes de cultures..... | 298 |
| 7.3 Les systèmes de production..... | 319 |
| 7.4 La filière..... | 332 |
| 7.5 Le système social..... | 349 |
| Conclusion..... | 358 |
| CHAPITRE 8 VULNERABILITE ET DURABILITE DES <i>LIVELIHOODS</i> | 359 |
| 8.1 Le cadre des <i>livelihoods</i> | 359 |
| 8.2 Méthode..... | 369 |
| 8.3 Étude des <i>livelihoods</i> | 371 |
| 8.4 Analyse comparative..... | 390 |

| | |
|---|-----|
| 8.5 Adaptation et résilience..... | 401 |
| 8.6 Développement et <i>livelihoods</i> | 417 |
| Conclusion..... | 419 |
| | |
| CHAPITRE 9 SIMULATION AGENT ET CHANGEMENT D'OCCUPATION DU SOL DANS LE DELTA DE LA PAMPANGA | 423 |
| 9.1 Les systèmes multi-agents (SMA)..... | 423 |
| 9.2 CHANOS - <i>CHANGement d'Occupation du Sol</i> -, un modèle multi-agents sur les changements paysagers du delta de la Pampanga..... | 433 |
| Conclusion..... | 487 |
| | |
| SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE | 489 |
| | |
| BIBLIOGRAPHIE | 499 |
| | |
| LISTE DES FIGURES | 521 |
| | |
| LISTE DES TABLEAUX | 531 |
| | |
| TABLE DES MATIERES | 533 |

Introduction générale

Depuis les années 1950, l'aquaculture connaît des taux de croissance annuelle de ses productions supérieurs à 5 %, et même souvent 10 % (Figure Introduction 1). Ceci en fait l'activité de production alimentaire ayant le plus fort taux de croissance. La FAO définit l'aquaculture comme « l'élevage d'organismes aquatiques, y compris poissons, mollusques, crustacés et plantes aquatiques. L'élevage implique une forme d'intervention dans le processus d'augmentation de la production telle que la mise en charge régulière, l'alimentation et la protection contre les prédateurs » (Billard 2005). Depuis plusieurs années, cette activité est l'objet de débats sur l'exploitation que fait l'aquaculture des ressources sociales et environnementales des territoires sur lesquels elle s'implante. Emblématique des nouvelles préoccupations sur les impacts d'une activité humaine sur le milieu biophysique et sur les sociétés, son mode de fonctionnement, ses liens avec le territoire et son mode de développement font d'elle un objet d'étude privilégié pour réfléchir sur la relation entre nature et société. Cette interface nature-société se double d'une interface géographique dans le cas de l'aquaculture saumâtre en zone littorale. Au carrefour entre science, technologie et éthique, l'aquaculture est une activité complexe et un objet d'étude pour les sciences de l'environnement. Dans la mesure, en outre, où elle est entrée dans une phase de modernisation qui la conduit à adopter de nouvelles technologies, l'aquaculture s'expose encore davantage aujourd'hui à la critique.

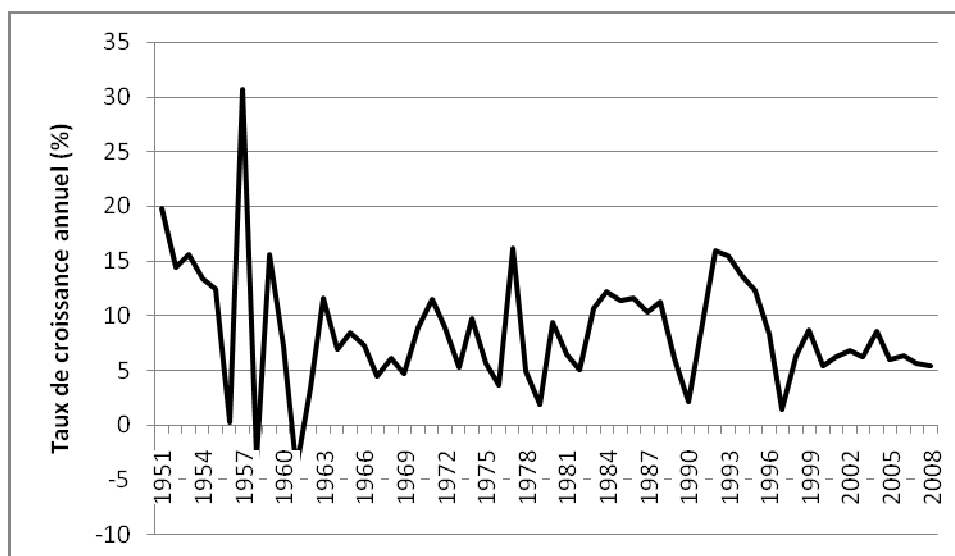


Figure Introduction 1 - Taux de croissance annuelle de la production aquacole globale (FAO)

En raison de sa globalité et de sa complexité, le phénomène aquacole peut s'apprécier suivant différentes approches, ce qui explique que plusieurs disciplines s'y intéressent telles la biologie, l'agronomie, l'écologie ou l'économie ; mais comme le montre la bibliographie, ces approches demeurent encore très sectorielles, ne permettant que rarement de saisir tous les aspects d'un territoire aquacole donné. Or, l'aquaculture constitue aussi un objet géographique, car les activités aquacoles sont non seulement localisées, voire inféodées à des déterminismes agro-écologiques bien précis, mais aussi capables d'insuffler des dynamiques territoriales en raison de leur mode de fonctionnement et de leurs besoins en ressources. L'une des spécificités de la géographie étant d'accorder une place centrale à la question des échelles spatiales et temporelles, elle s'avère donc particulièrement armée pour traiter de l'évolution d'une activité dans le temps et dans l'espace. Autrement dit, identifier et mettre en relation les

causes et les conséquences du développement aquacole constitue une problématique éminemment géographique. L'intégration du concept de territoire permet de localiser et d'ancrer définitivement l'aquaculture dans les réalités matérielles et idéelles locales. L'objet d'étude constitue alors un complexe aquaculture-territoire, d'autant plus difficile à aborder que chaque terme du binôme est intrinsèquement diversifié. C'est cette diversité qui nous a conduit à penser qu'il était pertinent d'analyser plusieurs terrains d'étude, afin de pouvoir saisir des tendances, dégager des dénominateurs communs qui montreraient, ne serait-ce que cumulativement, la manière dont les territoires de l'aquaculture se construisent et fonctionnent.

Jusqu'alors, les études portant sur les impacts de l'aquaculture se sont la plupart du temps penchées sur l'analyse de certains de ses impacts : les impacts sur les pêcheurs, les impacts sur la qualité physico-chimique des eaux réceptrices des effluents, les impacts sur la mangrove, les impacts sur la pauvreté, les impacts sur les foyers d'émigrations, pour n'en citer que quelques uns. Si, en conclusion de ces études, l'adoption d'une approche systémique est parfois prônée, elle est encore rarement développée. La présente étude souhaite démontrer, à l'appui de deux études de cas, qu'une telle approche est adaptée pour répondre à la problématique à laquelle seront confrontés de nombreux systèmes aquacoles dans l'avenir, celle de la durabilité, et qui suppose, selon nous, au préalable de connaître son objet d'étude, l'aquaculture, son environnement, le territoire, et leurs interrelations.

Le questionnement de départ a été le suivant : Quelles sont les causes et les conséquences du développement de l'aquaculture sur les milieux naturels et les territoires littoraux des pays du Sud ? Ce questionnement permet tout d'abord de limiter le cadre géographique d'analyse aux pays du Sud. Les conditions de production ainsi que la production elle-même présentent encore trop de différences entre pays du Nord et pays du Sud pour ne pas d'emblée aborder ces filières et ces environnements de production séparément. Néanmoins, l'impact de la globalisation sur la chaîne des produits nous a montré que toute analyse locale ou régionale se prolonge inévitablement hors du cadre géographique des lieux de production. En outre, nous avons tiré bénéfice d'un effort consacré à l'analyse géo-historique de l'aquaculture des terrains choisis, c'est-à-dire d'un retour aux origines culturelles ou politiques du développement agricole et aquacole des milieux deltaïques étudiés, ainsi que de ses étapes successives. Plusieurs concepts, présentés et discutés au fil des chapitres, se sont avérés utiles à l'analyse : le territoire tout d'abord, défini comme un système organisé de ressources sociales et naturelles, le développement durable, les *livelihoods*, l'adaptation, et la vulnérabilité.

En raison de leurs dimensions historiques et culturelles, les territoires péruvien et philippin se distinguent sous de nombreux aspects. L'identification des objets d'étude pouvait alors reposer sur un critère lié à la production, et plus précisément à son niveau d'intensité. Sous certains aspects, le niveau d'intensité d'une production est l'indice synthétique d'une multitude de facteurs propres au fonctionnement du système aquacole (capital, savoir-faire) et au contexte social et économique dans lequel l'activité s'inscrit (le territoire). L'hypothèse est donc qu'à un niveau d'intensité de production égale, deux systèmes ont une probabilité plus forte de présenter des similitudes que deux systèmes ayant des niveaux d'intensité inégaux. Le choix des terrains d'étude au Pérou et aux Philippines s'est fait suivant cette logique et ce critère, en sélectionnant des territoires à production aquacole respectivement de fort et faible niveau d'intensité. Il était également important de considérer des systèmes produisant la même espèce afin de rendre les comparaisons, voire les modélisations, plus pertinentes. Compte tenu de son caractère symbolique, le choix de la crevette est également apparu pertinent.

Les systèmes de production intensifs de crevettes se sont développés dans les années 1980 et nombre d'entre eux ont périclité depuis. La Thaïlande est le pays dont le secteur intensif est le

plus développé d'entre tous. En dépit des risques liés à la production, de nombreux autres pays connaissent un développement identique de leur production. Parmi ceux-là, le Pérou se trouve dans le peloton de tête des systèmes les plus productifs. En volume total, le secteur apparaît peu important au niveau mondial car les possibilités de développement de l'activité sont limitées par les facteurs géographiques. Cette contrainte constitue toutefois un avantage pour l'analyse dont l'objectif est d'embrasser le plus largement possible les causes et conséquences du développement. Pour ces différentes raisons, nous avons choisi d'étudier l'activité aquacole dans le département de Tumbes.

Par la suite, nous avons été conduit à choisir un terrain d'étude qui connaissait des niveaux d'intensité moins importants, c'est-à-dire des cas où aucun ou peu d'intrants sont apportés. Le choix du continent asiatique s'est rapidement imposé, en raison de deux critères : sa place prépondérante dans la production mondiale, et l'ancienneté des productions. Par la suite, les Philippines sont apparues comme un candidat naturel du fait de ses caractéristiques intrinsèques qui répondaient aux exigences initiales, mais aussi en raison des ponts historiques, politiques, géographique et culturels entre ce pays et le Pérou. Parmi les différents espaces potentiels, le delta de la Pampanga s'est avéré présenter des spécificités intéressantes d'un point de vue géographique : la proximité avec la métropole de Manille, et sa situation dans la zone d'extension des aléas du Pinatubo, volcan qui a connu, en 1991, une éruption paroxysmique après 400 ans de dormance. Ce territoire a donc constitué notre second terrain d'étude.

Par leurs différences et leurs similitudes, ces deux terrains se sont ainsi avérés à la fois intéressants et complémentaires. Hormis des habillages parfois quelque peu différents, la méthode mise en place a été adaptée aux deux terrains et aux deux objets d'étude : le territoire et l'aquaculture. Plusieurs outils et techniques ont été utilisés : télédétection, entretiens, questionnaires, observation participante, récolte de données d'archives, récolte de données de seconde main, le tout inséré dans une démarche systémique dans laquelle les allers et retours entre résultats devaient permettre d'enrichir les conclusions.

En raison du va-et-vient mentionné, l'ordre de présentation des chapitres ne suit pas exactement la chronologie des travaux ou des campagnes de terrain réalisés. La trame logique a toutefois été la même pour la partie 1 qui traite de la zone d'étude du Pérou et pour la partie 2 qui traite de la zone d'étude des Philippines. La présentation des méthodes et des résultats en télédétection débute chacune des parties. Ces résultats nous informent sur les évolutions du paysage, lesquelles sont révélatrices des changements sociétaux et environnementaux. Le souci a donc été de débiter l'étude par la construction et l'analyse d'une information qualifiable d'objective. Dans le cas des Philippines, l'analyse géohistorique du territoire, à travers un regard porté sur les événements du passé, s'est justifiée par la continuité historique avec le phénomène aquacole actuel, ce qui n'est pas le cas au Pérou où l'aquaculture à Tumbes est une activité *ex nihilo*. Une fois l'historique de l'aquaculture retracé, l'exposé s'attache à définir les systèmes aquacoles d'un point de vue agronomique. Cette étape permet d'appréhender l'objet d'étude sous ses différents aspects, sociaux, économiques et environnementaux. Par la suite, l'étude se focalise sur les relations entre les deux objets d'études, le territoire et l'aquaculture, et les impacts respectifs de l'un sur l'autre. Dans le cas du terrain philippin, l'accumulation de données, de connaissances, et les changements dans l'occupation du sol ont rendu possible une étape finale de modélisation, celle de l'élaboration d'un Système Multi-Agents.

Dans le détail, le plan de ce travail suit la trame suivante : nous avons d'abord cherché à identifier les racines de l'aquaculture, ses impacts actuels, et son devenir (**Chapitre 1**). Les trois chapitres suivants se sont intéressés au terrain d'étude péruvien. Le **Chapitre 2** présente la méthode et quelques résultats préliminaires de l'utilisation de la télédétection. Plusieurs résultats cartographiques de ces traitements ont ensuite été exploités de manière à révéler les

principales phases du développement aquacole ainsi que leurs causes sous-jacentes (**Chapitre 3**). La mise en perspective de l'aquaculture par le territoire a constitué l'objet principal du **Chapitre 4**. Les influences mutuelles que l'aquaculture et le territoire ont l'un sur l'autre ont été recherchées, identifiées, puis caractérisées. Les 5 chapitres suivants sont dédiés au territoire philippin. Le **Chapitre 5** présente les aspects spécifiques de la méthode employée en télédétection. Il présente aussi les données statistiques et cartographiques les plus pertinentes qui rendent compte de l'évolution spatiale de l'activité. Une perspective historique a ensuite permis de reconstruire la chaîne de causalité du développement aquacole dans le delta de la Pampanga (**Chapitre 6**). La mise en relation de facteurs plus récents pour expliquer les tendances qui se poursuivent actuellement a constitué la seconde partie de ce chapitre. Une perspective d'abord agronomique puis plus globale de la filière a contribué à caractériser puis à évaluer la performance des systèmes de culture et des systèmes de production (**Chapitre 7**). Une analyse de la pyramide des acteurs du territoire qui tirent tout ou partie de leurs ressources des produits de l'aquaculture a permis ensuite, sur la base de nombreuses enquêtes de terrain, de dresser une typologie détaillée des catégories d'acteurs, des réseaux économiques et sociaux, et de la géopolitique locale de la ressource (**Chapitre 8**). En choisissant la plus petite unité du système et en l'étudiant sous l'angle des vulnérabilités et des adaptations, cette approche a permis de faire le lien entre les différentes échelles. Enfin, le dernier chapitre (**Chapitre 9**) propose, à l'interface entre nature et société, une modélisation par Système Multi-Agents de deux circonscriptions aquacoles du delta de la Pampanga, avec pour objectif de mesurer qualitativement et quantitativement l'influence de plusieurs facteurs sur l'évolution du paysage et sur le fonctionnement du système — notamment la salinité de l'eau (variable environnementale et spatiale) et les comportements d'acteurs à travers des capacités cognitives et des modes de décisions variés (variables économiques, sociales, culturelles et également spatiales).

Chapitre 1 Etat de l'aquaculture

En 2009, la production alimentaire issue de l'aquaculture (poissons, mollusques et crustacés) a égalé celle de la pêche (Naylor *et al.* 2009). L'augmentation récente très importante ne doit pas occulter l'ancienneté de cette activité. On s'est attaché dans ce chapitre à décrire les systèmes aquacoles passés et présents, puis à identifier les causes de leur émergence. On s'est ensuite efforcé d'identifier puis de classer les différents impacts engendrés par cette activité sur les territoires. Enfin, après avoir défini les enjeux de l'aquaculture, on a examiné les différentes manières d'envisager les solutions d'une aquaculture et d'un développement durables des territoires littoraux.

1.1 Les facteurs du développement de l'aquaculture

1.1.1 La phase historique

1.1.1.1 Une datation difficile

Les auteurs n'arrivent pas à s'accorder sur la date précise des débuts de l'aquaculture. Elle aurait débuté en Chine, en Mésopotamie ou en Egypte, dans une fourchette de dates entre 3500 à 5000 B.P. (Beveridge et Little 2007, Biao et Kaijin 2007, Hoffmann 1996, Bush 2004)¹. Les difficultés de dater précisément les débuts de cette activité ont plusieurs causes : l'absence d'infrastructures spécifiques, la difficulté à distinguer un étang à vocation aquacole d'une retenue d'eau artificielle quelconque ou d'une parcelle de cultures inondées, la présence de nombreuses retenues artificielles à usage domestique, des outils et des techniques similaires à celles de la pêche et l'absence de preuves génétiques de domestication (Beveridge et Little 2007). Les éléments de datation les plus fiables sont des indices archéologiques, archéozoologiques et des traités. À ce jour, l'indice reconnu comme le plus ancien se trouve sur un bas-relief d'une tombe thébaine daté de 2000 ans avant J.-C. (Lacroix 1995) (Figure 1-1) qui représente une scène où des notables pêchent des tilapias enfermés dans un bassin aménagé.

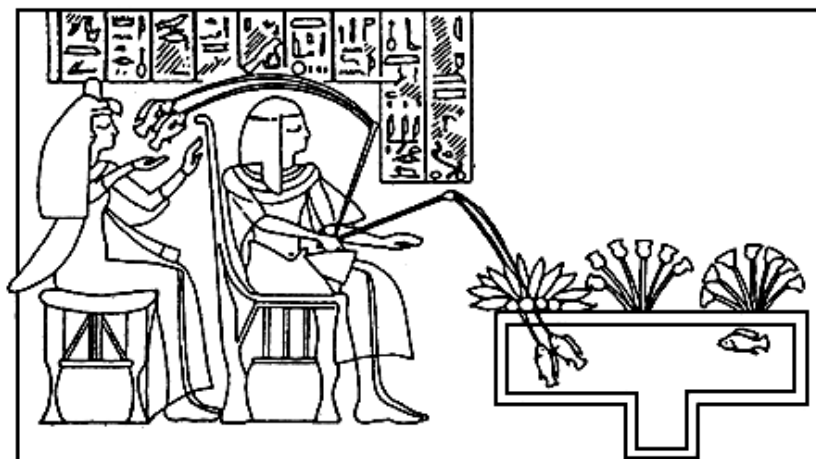


Figure 1-1 Représentation d'un étang aménagé, sur un bas-relief d'une tombe thébaine (2000 av J.-C.)

La question reste toutefois posée quand au milieu de croissance des tilapias. Ont-ils grossi *in situ* ou bien dans le milieu naturel ? En effet, on ne sait pas si les tilapias ont effectué tout ou

¹ Selon Bush (2004) l'aquaculture serait vieille de 3500 ans et aurait émergé durant la dynastie Zhou. Entre, 1135 et 1122 avant J.-C., Weng Fang, le fondateur de la dynastie aurait construit des étangs dans la province de Hunan afin d'y introduire des poissons ornementaux.

partie de leur cycle dans le bassin. La question de l'élevage reste donc entière car ce dernier suppose une intervention humaine sur le cycle de croissance et une domestication des animaux, c'est-à-dire un contrôle de la reproduction. La notion de proto-aquaculture est ainsi plus adaptée pour caractériser de tels systèmes où l'intervention humaine se limite à augmenter la biomasse en un lieu donné (transplantation d'œufs fertilisés, enfermement de poissons dans des lieux où ils peuvent pondre et être récoltés, aménagement de bassins...) (Beveridge et Little 2007).

L'Asie et l'Europe constituent les deux principaux foyers géographiques de l'aquaculture. En ce qui concerne l'Asie, la rédaction d'un traité « *Reproduction des poissons* » par Fan Li, en 475 avant J.-C., constitue le plus ancien document écrit relatif à l'élevage. Il s'agit d'une monographie de quelques pages qui détaille la manière de concevoir un étang, la propagation et la production des alevins de la carpe commune (*Cyprinus carpio*) (Beveridge et Little 2007). De nombreuses méthodes de production ont été développées en Chine, dont la polyculture et les systèmes intégrés. La polyculture est apparue il y a environ 1400 ans sous la dynastie Tang (Billard 2005). Les espèces les plus fréquemment associées étaient : les tortues (*Trionyx sinensis*), les carpes (*Ctenopharyngodon idella*), les poissons rouges (*Carassius auratus*), le lotus (*Nelumbo nucifera*), la Châtaigne d'eau chinoise (*Eleocharis dulcis*). Le traité *You Hou Bin*, écrit il y a 2200 ans en Chine, détaille quant à lui un système intégré associant poissons, plantes aquatiques et légumes (Beveridge et Little 2007). Le terme intégré signifie que les sous-produits (extrants) d'une activité constituent les intrants d'une autre activité, tels que les déchets agricoles, ou les lisiers servant d'alimentation aux espèces herbivores et de fertilisants ou, à l'inverse, l'utilisation des effluents aquacoles pour fertiliser les sols agricoles. Les activités profitent mutuellement de la présence de l'autre, à l'identique du mutualisme en écologie, et réduisent dans le même temps la quantité de déchets à traiter par la société. Le système étang / digue / mûrier en Chine de Sud en est un parfait exemple (Beveridge et Little 2007). Ce système présente, en outre, l'avantage de répondre à des besoins alimentaires (poissons) et économiques (fil de soie). Parmi les systèmes intégrés qui se sont pérennisés, la rizipisciculture, créée vers 200 après J.-C., reste le plus pratiqué d'entre tous (Beveridge et Little 2007). En Chine seulement, il occupe encore 500 000 ha (Stickney 2000). L'avantage principal est l'amélioration des rendements agricoles grâce à la consommation des adventices et des parasites par les poissons, et grâce à l'enrichissement des sols par les excréments. L'élevage d'espèces adaptées aux eaux saumâtres (*Chanos chanos*) sur les littoraux d'Asie du sud-est est plus récent et remonte à 1200-1400 après J.-C. (Valieva *et al.* 2001, Beveridge et Little 2007, Armitage 2002).

En Europe, les pionniers de l'aquaculture sont les Étrusques avec le système de la valliculture. Vers 400-500 avant J.-C., ils ont aménagé plusieurs lagunes littorales italiennes (le long de la mer Adriatique, de la mer Tyrrhénienne, de la Sicile et de la Sardaigne) en les endiguant afin d'y augmenter la biomasse de poissons (Bunting et Little 2005, Beveridge et Little 2007). À l'époque de la République, les Romains introduisaient des œufs, alevins ou poissons, dont des espèces allochtones, dans des retenues d'eau douce, des lagunes d'eau saumâtre et en mer (Kron 2008a). Ils ont été les premiers à pratiquer l'ostréiculture il y a un peu plus de 2000 ans (Beveridge et Little 2007, Stickney 2000). Des indices archéozoologiques ont permis d'identifier les principales espèces élevées : daurade royale (*Sparus aurata*), bar commun (*Dicentrarchus labrax*) et même, probablement le tilapia (*Oreochromis niloticus*) (Kron 2005, Kron 2008a). Les Romains ont aussi été les premiers à avoir développé des formes intensives d'aquaculture. De nombreux indices révèlent en effet qu'ils avaient développé des techniques permettant d'augmenter l'oxygène dissous grâce à des systèmes de circulation d'eau, qu'ils apportaient des suppléments alimentaires (poissons fourragers) et qu'ils utilisaient des étangs de nurserie (Kron 2008a). Le tilapia, d'origine africaine, aurait été, quant à lui, élevé sur

plusieurs sites tout autour de la Méditerranée à cette époque, en polyculture avec d'autres espèces (*Lates niloticus*, *Clarias gariepinus*) censées réguler sa population (Kron 2005).

1.1.1.2 Les causes du développement

Les causes des développements aquacoles dans l'histoire ont été regroupées dans plusieurs catégories : religion, crises environnementales, politique, économie. En plusieurs lieux, l'aquaculture s'est développée du fait de l'accomplissement de rites religieux. En Égypte ancienne, l'intérêt porté aux poissons par la bourgeoisie s'explique par l'utilisation des poissons dans les rites funéraires et dans les rites de naissances (Beveridge *et al.* 2007). Dans les pays bouddhistes, le lâchage dans le milieu naturel d'un animal captif est un acte d'auto-purification, et le lâchage d'un animal rare est un acte encore mieux considéré. Ceci explique les nombreuses mutations obtenues à la suite de la domestication puis de la sélection des poissons rouges (*Carassius auratus*) aux formes et couleurs inattendus ou étranges (Balon 1995). En Europe, au Moyen âge, les étangs piscicoles se sont multipliés afin d'assurer l'approvisionnement en poissons durant la période du carême (Hoffmann 1996).

L'impact des crises environnementales s'est particulièrement fait ressentir sur les pêcheries continentales européennes à l'époque médiévale. Plusieurs facteurs ont engendré ces crises environnementales : la surpêche, l'amélioration des arts de pêche, la construction de moulins à eau, la déforestation des bassins versants ont contribué à réduire la quantité de poissons dans les cours d'eau, provoquant ainsi un contexte favorable au développement aquacole (Hoffmann 1996). Ainsi, les moulins à eau perturbent la circulation hydrologique de surface, notamment en rendant les débits instables, ce qui a un impact direct sur les possibilités de déplacement des poissons et sur leurs habitats. En France, dès 1289, durant le règne de Philippe IV, une préface concernant la pêche alerte sur les risques liés à la surpêche et à l'absence de sélectivité des arts de pêche utilisés (Hoffmann 1996). Les conséquences ont été très importantes dans toute l'Europe au point que de nombreuses espèces (esturgeon, saumon, truite) avaient disparu des étals dès le début du 16^{ème} siècle. La construction active d'étangs commença au 11^{ème} siècle et augmenta rapidement durant les 12^{ème} et 13^{ème} siècles (Hoffmann 1996). À l'époque médiévale, la possession d'étang est aussi devenue un moyen ostentatoire de faire état de sa richesse (Hoffmann 1996). Sur le plan politique, l'augmentation de la disponibilité en poissons a, par exemple, servi à réduire le risque de révolte populaire en Chine durant la dynastie Tang (Bush 2004).

Le caractère fortuit a aussi joué un rôle, même si un environnement local favorable peut fortement augmenter la probabilité d'apparition. Ainsi, l'aquaculture d'eau saumâtre en Indonésie aurait été développée d'abord par des bagnards qui, pour survivre, ont dû s'adapter aux ressources du milieu (Beveridge et Little 2007). En Chine, c'est à cause du nom de l'Empereur, Li, identique à celui de la carpe commune, qu'il a été interdit d'élever cette dernière et que la polyculture de carpes s'est alors développée² (Beveridge et Little 2007).

Le développement a aussi été la conséquence d'une rentabilité accrue de l'activité du fait d'une demande en hausse suite à une croissance démographique. En Chine, l'augmentation de la population a nécessité d'aménager les fonds de vallées en les surélevant avec de la terre déblayée plus loin. Ces lieux excavés ont alors été propices à l'aménagement d'étangs (Beveridge et Little 2007). En Europe aussi, le développement de l'aquaculture s'est réalisé dans les zones les plus propices, comme les plaines d'inondation où même la pâture était difficile (Hoffmann 1996) ; ou en Bohême, où plus de 700 étangs couvraient 1800 km² entre le 15^{ème} et 16^{ème} siècle (Beveridge et Little 2007). En Asie du Sud-est, les Chinois ont tenu un

² Les espèces de carpes nouvellement élevées ont été : *Hypophthalmichthys molitrix*, *Aristichthys nobilis*, *Ctenopharyngodon idellus*, *Mylopharyngodon piceus*, *Cirrhina molitorella*, dont les alevins furent extraits de la Yangtze et la Pearl (Hishamunda et Subasinghe 2003).

rôle de premier plan dans la diffusion des pratiques aquacoles, en introduisant par exemple plusieurs espèces d'élevage (*Osphronemus gouramy*, *Helostoma temmincki*, *Trichogaster pectoralis*, *Barbodes gonionotus*, et *Osteochilus hasselti*) (Beveridge et Little 2007). La distance, et donc des facteurs de proximité, ont ainsi parfois favorisé la diffusion des innovations.

À l'inverse, plusieurs facteurs ont historiquement contribué à mettre fin à l'aquaculture : la surproduction, l'augmentation des rendements agricoles, et les changements socioculturels. En Europe, l'activité commença à péricliter à la fin du 16^{ème} siècle. En Bohême, la surproduction et la paupérisation des fermiers, mais aussi la multiplication des guerres et le développement de l'agriculture, ont amorcé son déclin ; tandis qu'en France, c'est la sécularisation de l'église par Napoléon en 1803 qui serait responsable de l'abandon progressif des étangs par le déclin de la consommation de poisson, accordant ainsi au facteur économique un rôle premier (Beveridge et Little 2007).

1.1.2 La phase contemporaine

1.1.2.1 Au niveau mondial

L'aquaculture a connu une croissance exponentielle de ses productions à partir des années 1950 (Figure 1-2). L'augmentation s'est accélérée à partir du milieu des années 1980 et au début des années 2000. Entretemps, deux périodes ont connu une réduction temporaire du taux de croissance : une première au début des années 1990 et une seconde en 1997/1998 durant laquelle on peut supposer l'existence d'un lien avec le phénomène d'El Niño. À partir de 2000, l'augmentation a été très forte, passant d'environ 40 millions de tonnes en 2000 à près de 70 millions de tonnes en 2007. Quelle que soit la période considérée, la production asiatique domine largement les autres productions continentales.

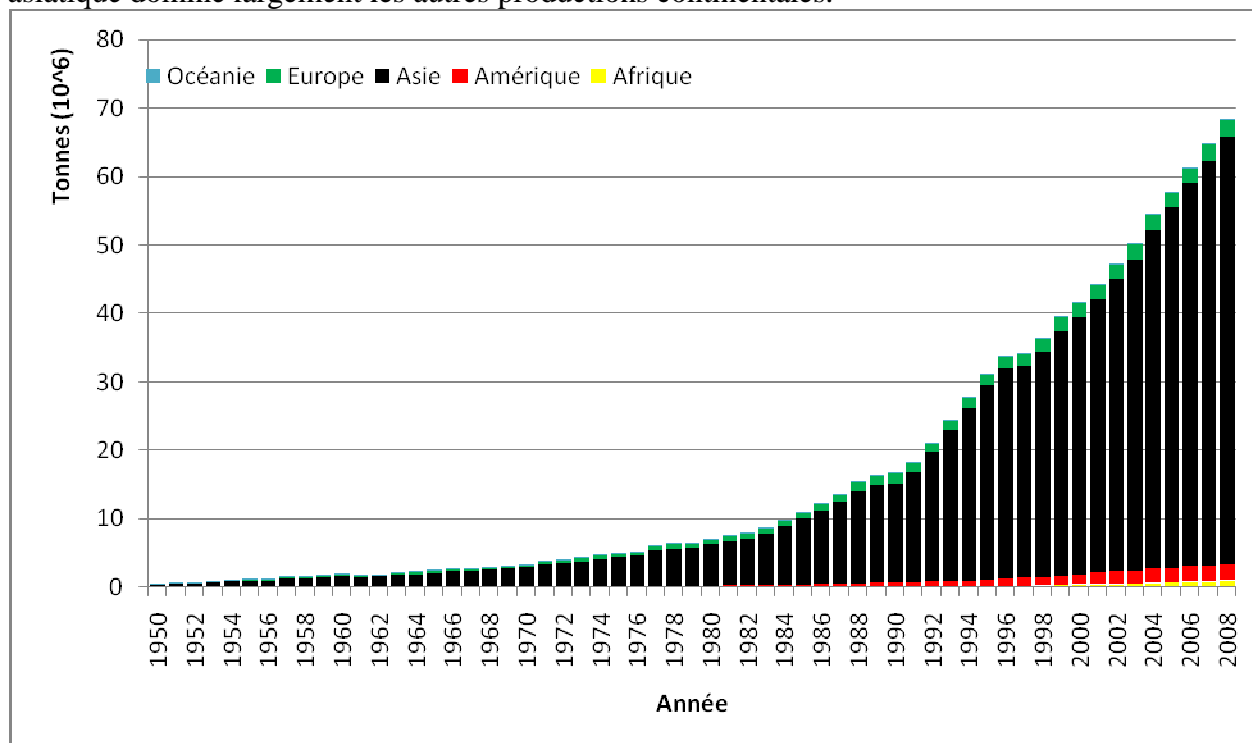


Figure 1-2 - Production aquacole mondiale par continent (FAO FISHSSTATSPUS)

Afin de rendre compte des évolutions de la production à une échelle spatiale plus fine, des cartes représentant les productions nationales ont été créées à partir des données de la FAO³. La première planche (Figure 1-4) confirme ce qui a été dit à propos des deux foyers de l'aquaculture, l'Europe et l'Asie, car c'est là que les productions sont les plus importantes. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, ces deux continents étaient les deux principaux lieux de production. Les chiffres officiels accordent à la France les volumes les plus importants. L'outil statistique, probablement mieux développé que dans d'autres pays, peut expliquer la sous-estimation des autres productions nationales. Le démarrage des activités en Amérique du sud date des années 1970 et a touché la plupart des pays à l'exception de la Bolivie, du Paraguay, de l'Uruguay et de la Colombie. L'Afrique a démarré plus tard et plus timidement, l'Égypte et le Nigéria faisant figure d'exceptions. En 2005, la plupart des pays du monde produisent des organismes aquatiques à l'exception de certains pays enclavés, ou bien extrêmement pauvres, ou encore situés dans des zones désertiques ou sujets à des troubles politiques (Yémen, Mauritanie, Somalie, Éthiopie, Centrafrique, Mongolie, Afghanistan, Congo).

La Figure 1-3 permet de constater la domination des productions en eau douce et en eau marine. Les productions en milieu saumâtre se sont développées plus tard, à partir des années 1980. Plusieurs raisons expliquent ce retard : il s'agit d'un milieu parfois difficile à aménager avec des infrastructures peu développées et donc une accessibilité moindre, mais aussi sous influence de plusieurs aléas (érosion, cyclones, tsunamis, sécheresse). Malgré leur faible contribution aux volumes globaux, les systèmes de production en eau saumâtre concentrent un nombre élevé de problèmes, conséquence d'une concentration spatiale des exploitations le long du trait de côte et d'une forte diversité des activités.

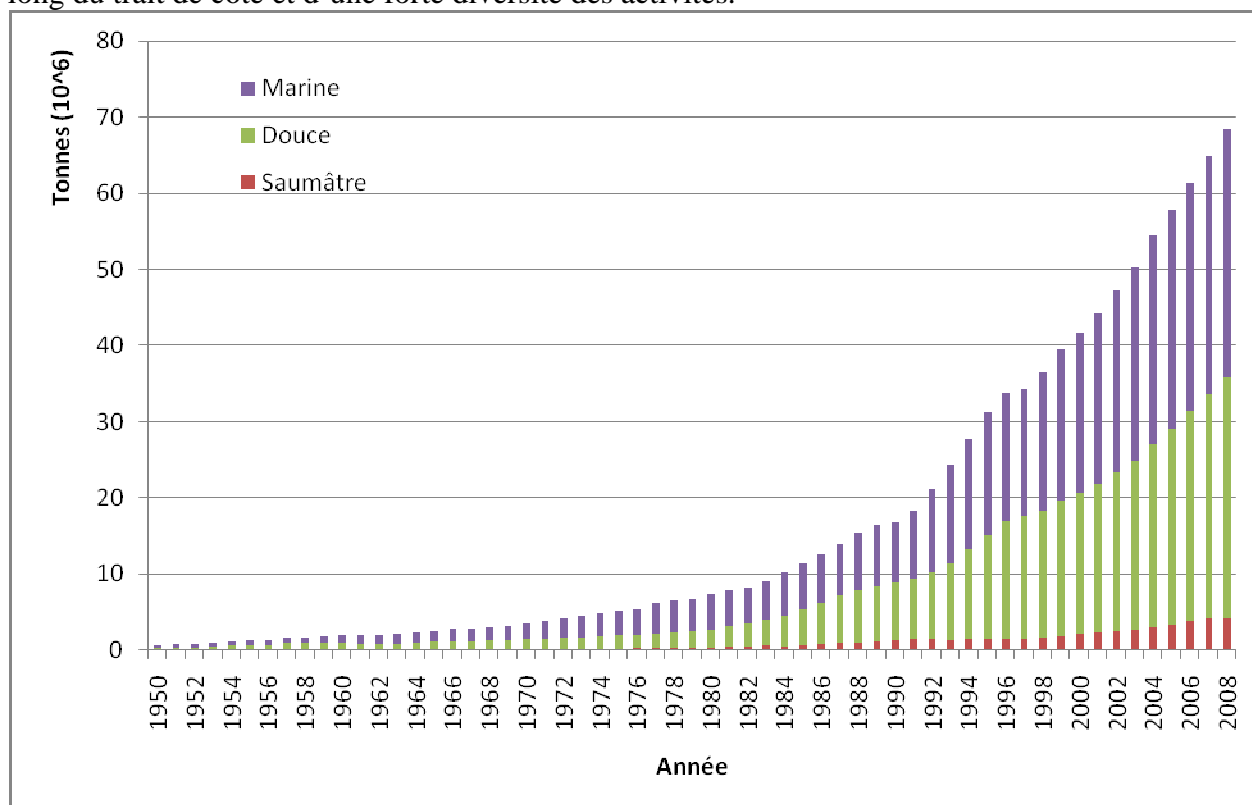


Figure 1-3 - Production aquacole en fonction du type d'eau (FAO FISHSTATSPUS)

³ <http://www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstat/fr>

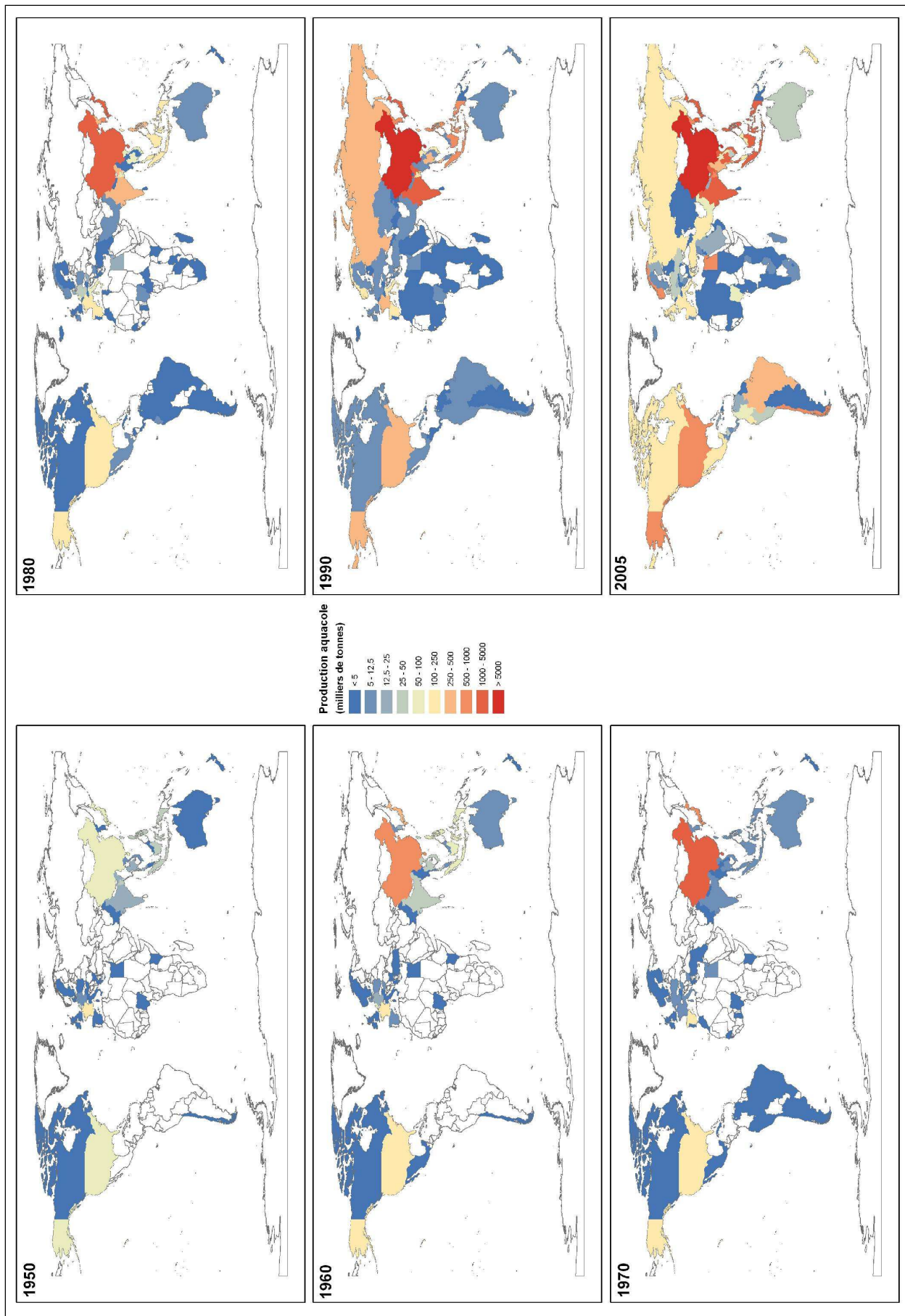


Figure 1-4 - Évolution des productions aquacoles nationales entre 1950 et 2005 (FAO FISHSTATSPUS)

La Figure 1-6 permet de constater l'évolution du rapport des différents types d'aquaculture en fonction de la salinité des eaux (marine, saumâtre et douce) par pays dans la zone intertropicale. Un premier élément est que le nombre de pays aquacoles en Afrique et en Amérique, surtout en Amérique centrale et dans les Caraïbes s'est accru. Alors que le continent américain a surtout vu la production saumâtre et marine augmenter, les principaux systèmes aquacoles africains sont des systèmes en eau douce. Les changements qualitatifs sont globalement moins importants en Asie. On constate toutefois que plusieurs pays du Sud-est asiatique possèdent un rapport *équilibré*, c'est-à-dire une part relativement importante de chaque type de production.

1.1.2.2 Un cas particulier, la crevetticulture

La pénéculture, ou élevage de crevettes péneïdes, date de 800 avant J.-C. en Chine (Treece 2000). Durant des siècles, les fermiers asiatiques ont élevé de façon involontaire des crevettes dans les étangs saumâtres. L'élevage moderne n'a débuté que dans les années 1930 lorsque des scientifiques japonais ont commencé des opérations en écloséries avec la crevette kuruma (*Penaeus japonicus*) (Weidner et Rosenberry 1992). Le Japon fut d'ailleurs pendant longtemps le seul gros marché de vente des crevettes. Taïwan a été le plus gros producteur entre 1970 et 1987 (Hue et Scott 2008). L'inconvénient de la production taïwanaise est qu'elle est concentrée sur un cycle de culture annuel seulement, obligeant les marchands japonais à stocker les produits une partie de l'année (Kongkeo et Davy 2010). La crise économique japonaise de 1985, qui a provoqué une hausse du coût de l'électricité, a eu des répercussions sur le coût de stockage. Le Japon a alors décidé de stimuler la production dans plusieurs pays subtropicaux (Kongkeo et Davy 2010), dont la Thaïlande. Alors que la crevetticulture extensive y était pratiquée depuis le début du 20^{ème} siècle (*P. merguensis* et *Metapenaeus spp.*), l'introduction du secteur agro-industriel dans la chaîne de production, et un important soutien du département des pêches, a permis au secteur de prendre un essor durable (Lebel *et al.* 2002, Belton et Little 2008, Kongkeo et Davy 2010). Le prix des crevettes d'élevage a augmenté de façon substantielle durant les années 1980 du fait d'une demande soutenue des pays du Nord et des volumes par captures stagnants (Neiland *et al.* 2001).

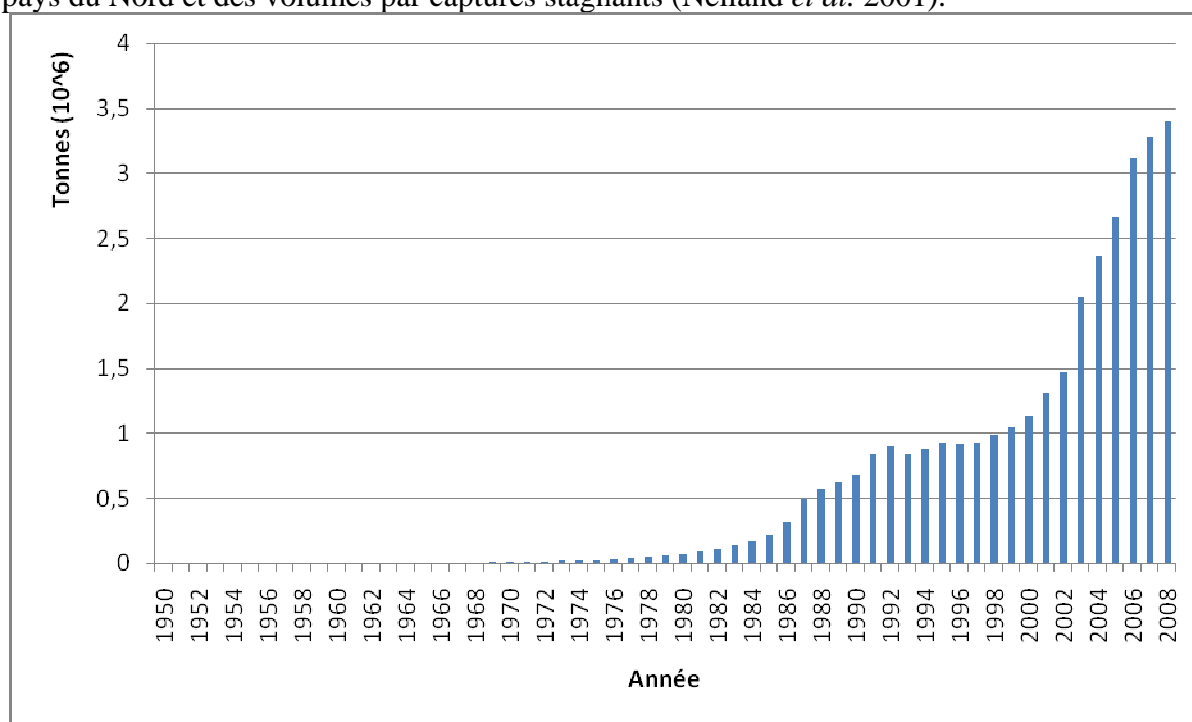


Figure 1-5 - Production crevetticole mondiale (FAO FISHSTATSPUS)

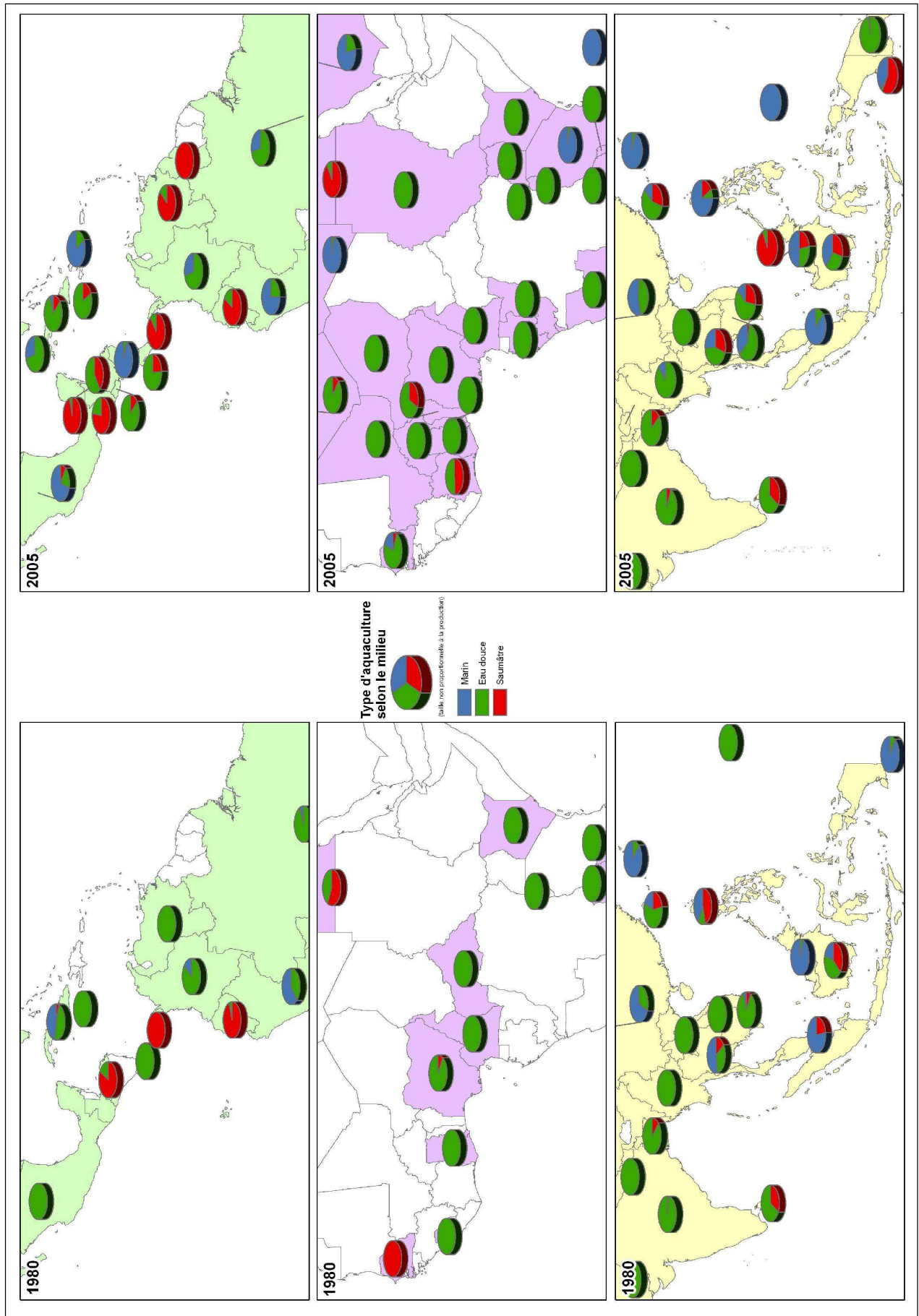


Figure 1-6 - Types d'aquaculture pratiqués dans la zone intertropicale (FAO FISHSTATSPPLUS)

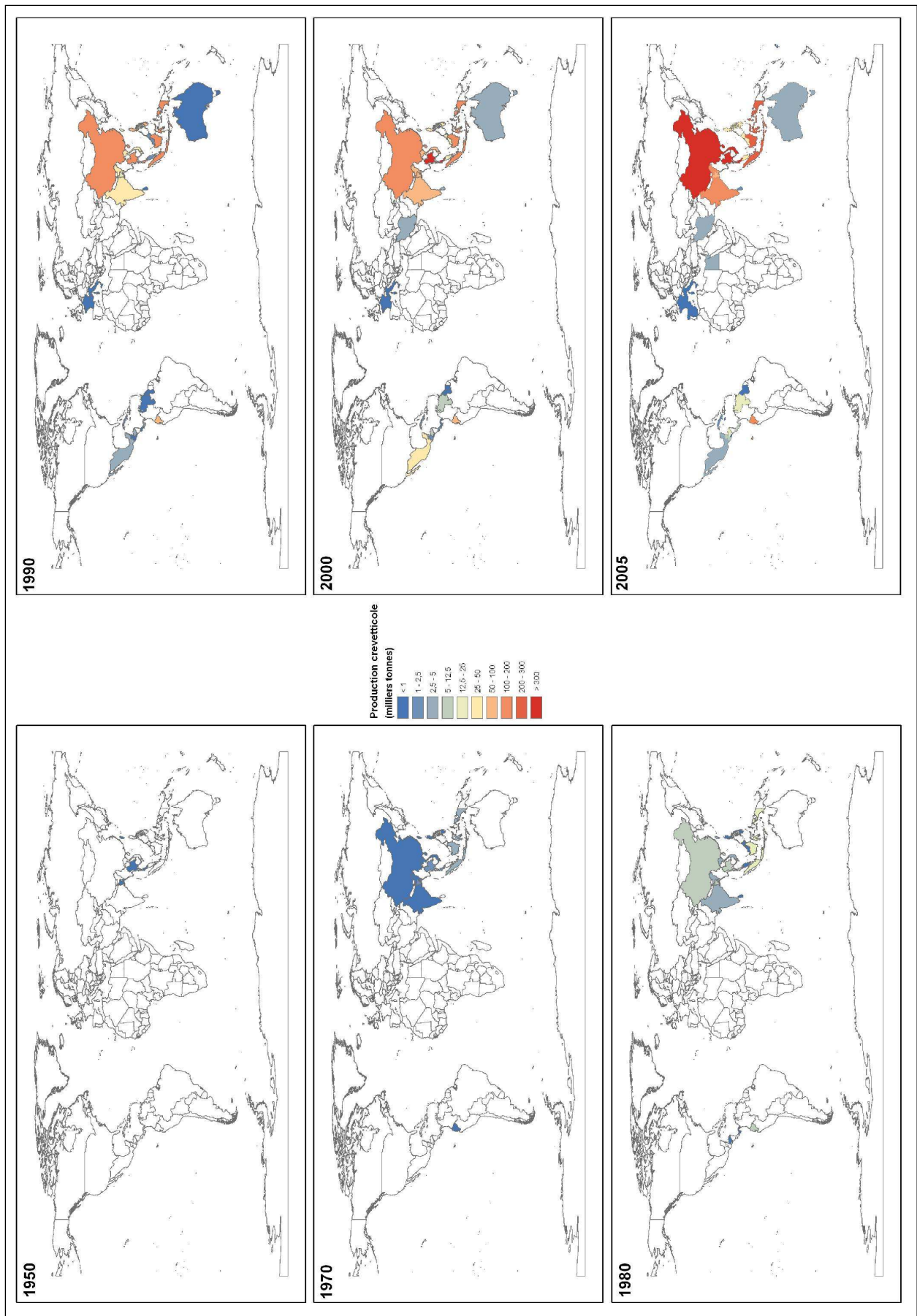


Figure 1-7 - Évolution des productions crevettecoles nationales entre 1950 et 2005 (FAO FISHSTATPLUS)

1.1.2.3 Les causes du développement contemporain

La globalité du phénomène aquacole rend difficile l'analyse de la totalité des causes développement. Afin de faciliter ce travail, les facteurs ont été regroupés en quatre catégories : les problèmes du secteur de la pêche, le rôle du marché, le rôle des institutions, et la globalisation des échanges.

Du fait d'une surexploitation, certaines pêcheries connaissent des crises depuis longtemps (Morato *et al.* 2006). Pourtant, à partir des années 1970 jusqu'à aujourd'hui, un nombre plus important que par le passé sont entrées en crise, et dans un court laps de temps, ce qui fait l'originalité de la période. Les principales raisons sont: la surexploitation des stocks, la ratification du traité de Montego Bay et la crise pétrolière des années 1970. Ces trois facteurs ont conjointement fragilisé le secteur. Après une période d'augmentation continue des captures, la décennie 1970 a été marquée par une stabilité des captures. L'augmentation simultanée de la population mondiale a entraîné une réduction des quantités de poisson par tête (McGoodwin 1994). La crise pétrolière de 1973 a affecté le secteur en augmentant drastiquement le coût de la capture (Goss *et al.* 2000, Huitric *et al.* 2002). En 1982, le traité de Montego Bay a eu quant à lui pour conséquence pour certains pays une réduction de l'aire maritime qu'ils avaient l'habitude d'exploiter (Skladany et Harris 1995) tel que la Thaïlande qui a perdu 768000 km² (Huitric *et al.* 2002). La reprise des captures enregistrée dans les années 1980 est le résultat des améliorations technologiques et de la définition de nouvelles espèces cibles, certaines étant situées en bas de la chaîne alimentaire (McGoodwin 1994). Malgré ces efforts, les volumes ont à nouveau stagné dans les années 1990 autour de 90 millions de tonnes.

Alors même que la pêche voyait ses captures stagner, la demande pour les produits aquatiques et les produits à haute valeur ajoutée (fruits, légumes, poissons) connaissait une augmentation dans les pays du nord et dans les villes des pays du sud, stimulant l'établissement de l'industrie agroalimentaire (Belton et Little 2008). En Thaïlande, le développement de ce secteur, en particulier à travers le conglomérat Charoen Pokphand, a provoqué un afflux de sous-produits (pailles de riz, huiles, résidus de distillerie, de brasserie, entrailles de poulet, sang, os) utilisables en aquaculture (Belton et Little 2008).

Plusieurs types d'institutions ont joué un rôle central dans la diffusion des pratiques aquacoles entre les années 1960 et 1990 (Walters *et al.* 2008). Les institutions financières, au premier rang desquelles la Banque Mondiale et la Banque Asiatique pour le Développement (ADB), considéraient l'aquaculture capable de générer des emplois dans les zones rurales, de fournir des revenus aux travailleurs temporaires ou permanents et enfin de fournir des protéines animales (ADB 2005). Là où l'aquaculture était déjà présente, les projets consistaient à intensifier et à améliorer l'efficacité de la production aquacole grâce au développement d'écloseries et de services, tel que le crédit (ADB 2005). La Banque Mondiale a fourni des prêts pour le développement de la crevetticulture dans les années 1970 à la Thaïlande, au Bangladesh, à l'Indonésie, et aux Philippines, dans les années 1980 à la Chine, l'Inde, le Venezuela, la Colombie, le Brésil (Hue et Scott 2008). Jusqu'en 2004, l'ADB a financé 25 projets avec une composante aquacole majeure (ADB 2005). A l'aide de la Banque de Thaïlande, elle a catalysé l'investissement privé (Goss *et al.* 2000). Les Etats ont aussi joué un rôle important dans certains cas. Le gouvernement vietnamien a par exemple aidé financièrement les riziculteurs à se convertir à la crevetticulture dans la province de Ca Mau (Binh *et al.* 2005). En 1972, le gouvernement thaï a offert une assistance financière aux exploitants et a encouragé le département des pêches à faire la promotion de systèmes de production plus intensifs (Goss *et al.* 2000). Au Sri Lanka, en 1980, l'ADB a financé un projet gouvernemental de production d'alevins destinés aux pêches continentales (Amarasinghe et Nguyen 2010). En Chine, les fermes se sont multipliées après la révolution

de 1949 et plus de 82 000 fermes aquatiques ont été construites sur 2.05 millions d'hectares (Hishamunda et Subasinghe 2003). C'est aussi grâce à la recherche que les techniques de reproduction en captivité des carpes ont été mises au point à la fin des années 50, libérant les fermiers des problèmes d'approvisionnement (Hishamunda et Subasinghe 2003). Les succès des écloséries Thaï au milieu des années 1980 ont permis de stimuler la production intensive faisant du facteur technique un élément central, non seulement de la réussite de la production, mais plus encore de l'intensification (Lebel *et al.* 2002).

Enfin, la globalisation des échanges a permis une accélération des transferts technologiques, très importants notamment au moment des épizooties. Les pratiques d'élevage et d'autres maillons importants de la filière ont eux aussi tiré un bénéfice des transferts de savoirs. L'intégration politique et économique des pays du Sud a eu plusieurs vertus, celle de réduire les coûts de transaction et de favoriser les échanges et la coopération.

Les problèmes du secteur de la pêche et la demande soutenue de la part des consommateurs apparaissent comme les points de départ de la croissance exponentielle aquacole. La promotion aquacole par les institutions internationales, ainsi que les avancées en recherche et développement (avancées zootechniques et génétiques) ont aussi joué un rôle de première importance. L'impulsion a été relayée par les Etats, à travers par exemple la facilitation d'accéder aux terres, à travers des subventions ou par la modification du cadre législatif. Les intentions des Etats étaient parfois d'intensifier les productions, parfois de les étendre spatialement. Du point de vue des territoires, la plupart des facteurs de développement apparaissent donc exogènes, ce qui peut être une des raisons des impacts négatifs engendrés par l'activité. Autrement dit, les facteurs exogènes n'ont pas ou peu d'emprise avec la réalité locale et sont donc susceptibles de ne pas être totalement adaptés. Enfin, compte tenu des termes du marché et de la productivité des terres converties, en particulier des terres littorales, le développement apparaît comme une rationalisation de l'occupation du sol. Toutefois, de simples analyses coûts-bénéfices ont montré qu'en soustrayant de la richesse produite le coût des externalités, la rentabilité aquacole n'est plus assurée de manière systématique (Gunawarneda et Rowan 2005).

1.2 Les impacts de l'aquaculture

Cette partie est consacrée à l'identification des impacts de l'aquaculture sur les territoires. Une typologie des impacts a été établie, en les distinguant selon qu'ils sont apparus durant la phase d'installation ou durant la phase de production. La Figure 1-8 présente les interrelations entre les différents types d'impacts et leur inscription dans l'espace.

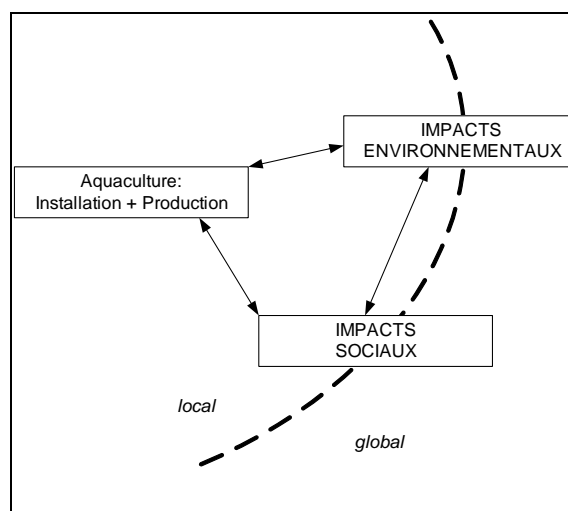


Figure 1-8 - Relations générales entre les impacts produits par l'aquaculture

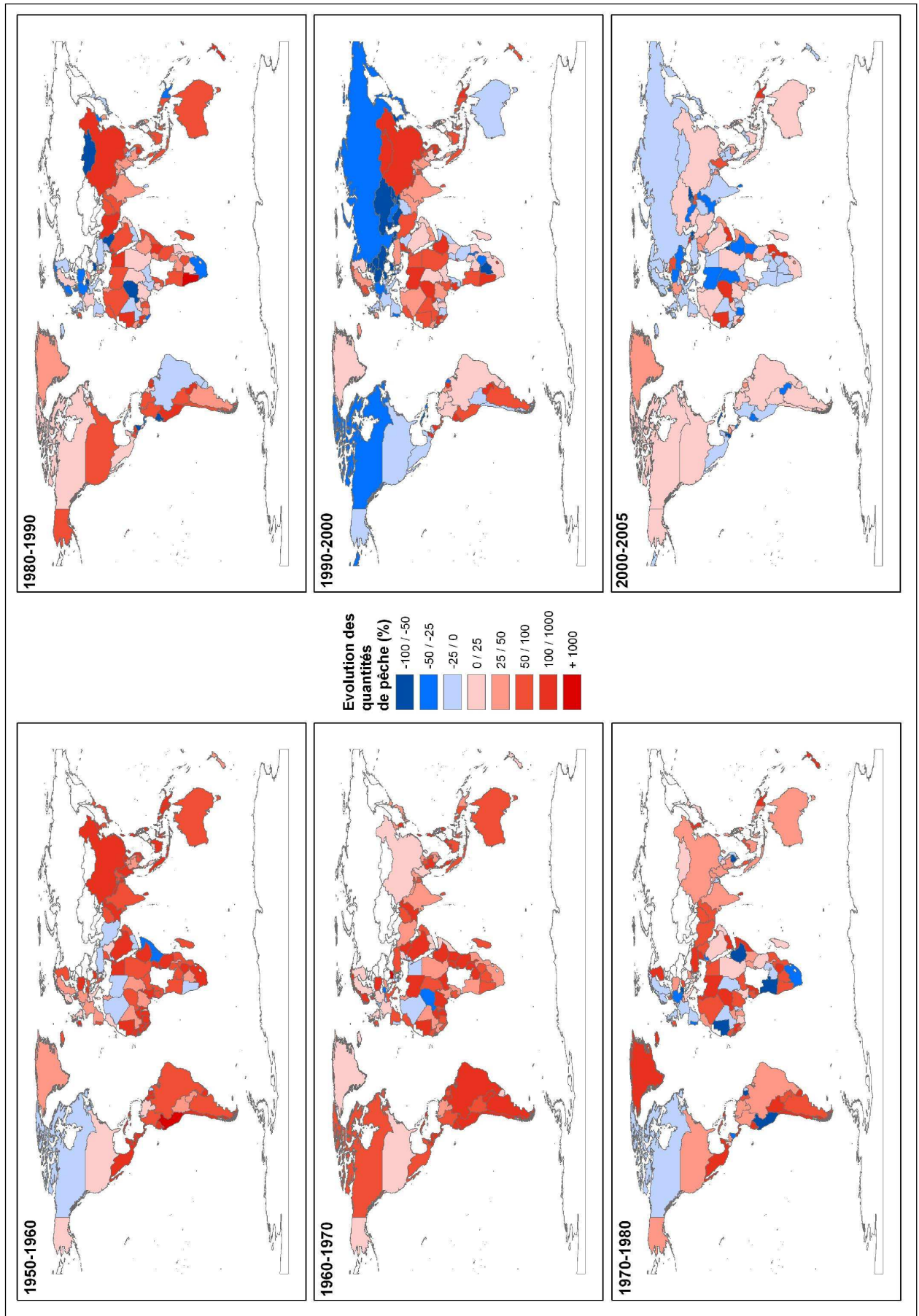


Figure 1-9 - Évolution des quantités pêchées (FAO FISHSTATSPUS)

1.2.1 Les impacts négatifs en phase d'installation

La notion d'impact recouvre plusieurs autres notions, comme celle d'externalité. En théorie, une externalité négative apparaît lorsqu'une décision de production ou de consommation par un agent économique a un effet négatif involontaire sur l'utilité ou le profit d'un tiers et que celui qui produit l'effet n'offre pas de compensation au tiers affecté (Whitmarsh et Palmieri 2008). Un impact recouvre aussi la notion de changement, définie simplement comme un état changeant. Si selon les cas, l'un ou l'autre de ces termes semble plus adapté, le terme d'impact, plus général, a été conservé.

1.2.1.1 Les processus

Durant la phase d'installation, plusieurs processus sont capables de déclencher des impacts. L'occupation du sol en est un car elle modifie la physionomie du paysage mais aussi les biens et services écosystémiques disponibles. Les autres processus sont liés au foncier, à son domaine politique, au statut juridique ou économique des terres, aux prix de la terre.

1.2.1.2 Les impacts sociaux et environnementaux

Le Tableau 1-1 résume l'ensemble des impacts associés au développement aquacole. Certains sont la conséquence directe de l'installation de fermes alors que d'autres sont des conséquences indirectes.

| Type | Caractéristiques | Référence |
|---------------------------|---|---|
| Accessibilité | En conséquence de la fragmentation opérée dans l'espace, l'accessibilité globale est réduite | |
| Acidification | Les sols de mangrove sont riches en pyrite (sulfure de fer - Fe ₂ S), à fort potentiel acide. L'exposition de la pyrite durant l'excavation des étangs entraîne leur oxydation, aboutissant à la formation d'acide sulfurique, ceci augmentant l'acidité des sols jusqu'à un pH minimum de 3. De telles conditions augmentent à leur tour la solubilité du fer, de l'aluminium et du manganèse, et donc la phytotoxicité générale. L'acidité engendre du stress chez l'animal et le rend donc vulnérable aux maladies et aux parasites en raison d'une réduction des réponses immunitaires | Islam 2003, Kautsky <i>et al.</i> 2000, Marius 1985 |
| Esthétique | Le paysage produit est parfois inesthétique | |
| Foncier | Privatisation des terres et hausse du prix de la terre | Rönnbäck <i>et al.</i> 2002, Hue et Scott 2008, Luttrell 2006 |
| Migrations de populations | Migrations du fait de la perte d'habitat et de la perte/dégradation des ressources (financières, alimentaires) Migrations domestiques ou internationales de travailleurs sans qualification | Primavera 2006, Adger <i>et al.</i> 2002 |
| Mobilité | Modifie les mobilités quotidiennes, entre lieu de vie et lieu de travail | Hein 2002 |
| Modification du paysage | Réduction des communs, des possibilités de pâturage, de fourrage et autres activités (séchage de filets...) | Hein 2002 |
| Modification hydrologique | Modification de la section mouillée, et donc des débits Modification de la pénétration des ondes de marées | Auda <i>et al.</i> 2008, Hein 2002 |
| Morale | Injustice quant à la répartition de la richesse produite localement et exportée | Tobey <i>et al.</i> 1998, Belton et Little 2007 |
| Réduction des ressources | Réduction en bois de chauffe et bois d'œuvre Réduction des ressources par tête pouvant affecter pauvreté et vulnérabilité | Hein 2002, Luttrell 2006 |

Tableau 1-1 Impacts de l'aquaculture durant la phase d'installation

1.2.1.3 L'exemple de la mangrove

L'augmentation de la production aquacole globale est d'abord et avant tout la conséquence d'une augmentation des superficies plus que d'une augmentation des rendements (Lebel *et al.* 2002), ce qui a évidemment un rôle négatif sur les écosystèmes et en particulier sur la mangrove. L'importance de la mangrove pour les littoraux tropicaux s'explique par la diversité des biens et services écosystémiques qu'elle fournit aux territoires, parmi lesquels l'habitat et le refuge pour de nombreux organismes, le filtre et le stockage des sédiments, le recyclage des nutriments, l'atténuation de l'érosion et la réduction des impacts des cyclones. La mangrove est également une source d'alimentation pour les populations et un support à de nombreuses activités artisanales (Lal 2001, Iftekhhar et Islam 2004). Alors que l'écosystème mangrove a occupé jusqu'à 75% des côtes tropicales, il n'occupe maintenant plus que 25% environ de celles-ci (Rönnback *et al.* 1999). Selon des estimations récentes, la surface totale de mangrove est passée de 19,8 millions d'hectares dans les années 1980 à moins de 15 millions (Walters *et al.* 2008). À elle seule, l'aquaculture serait responsable de 52% des destructions récentes (Walters *et al.* 2008) et depuis les années 1980, c'est la crevetticulture qui est la première responsable de ces destructions (Primavera 2005)⁴.

La Figure 1-10 montre les évolutions des superficies de mangrove et des productions aquacoles de deux types : la production de crevettes et la production en eau saumâtre, entre 1980 et 2005 (FAO). De ce tableau, on peut dégager plusieurs types de relations même si deux éléments poussent à la prudence des interprétations : (i) le fait que les superficies de mangrove sont des estimations à partir de modèles de régression et (ii) le fait que les données statistiques des volumes de production aquacoles ne sont pas toujours fiables. On constate que dans certains pays, comme en Chine, la production aquacole a fortement augmenté alors que le déboisement de la mangrove est très peu important, ce qui peut être le résultat d'une faible réserve de mangrove ou alors d'une politique efficace de conservation. Une telle situation pourrait aussi être la conséquence d'un type d'aquaculture connaissant des productions importantes sur une faible superficie (cas de la Thaïlande). Un autre cas de figure est celui d'une évolution positive des deux facteurs, production et déboisement, mais d'un déboisement relativement peu marqué (Inde, Vietnam) ce qui peut être le résultat d'une production plus extensive occupant une superficie de mangrove plus grande à production égale. Ceci peut être aussi lié au fait que ces pays disposent de superficies boisées relativement importantes, la mangrove n'étant donc pas le facteur limitant. Un troisième cas de figure réunit les pays qui comptent de très importantes superficies déboisées relativement aux volumes de production aquacoles (Indonésie, Malaisie). Le caractère très extensif apparaît comme un facteur probable dans le cas de l'Indonésie. L'augmentation des productions aquacoles s'y développe au détriment de grandes superficies de mangrove. Toutefois, ce facteur n'est pas satisfaisant pour expliquer, à lui seul, l'importance du déboisement. Dans le cas de l'Indonésie, qui est le pays comptant le plus de mangrove (Figure 1-11), l'intensité du déboisement peut ainsi s'expliquer par la politique de transmigration qui rend les ressources de mangrove accessibles à de nouvelles populations. Des activités autres que l'aquaculture sont donc responsables du déboisement. Le dernier cas de figure est celui des pays dont la

⁴ Les impacts du développement de cette dernière sur la mangrove ont été relevés dans de nombreux pays, au Kenya (Rasowo 1992, Abuodha et Kairo 2001), en Équateur (Southgate 1992, Twilley *et al.* 1998, Ocampo-Thomason 2006), en Colombie (Thomas *et al.* 2005), au Honduras (Dewalt *et al.* 1996), aux Philippines (Primavera 1998, Primavera 2006), au Mexique (Ruiz-Luna et Berlanga-Robles 1999, Paez-Osuna *et al.* 2003), en Inde (Hein 2000, 2002), au Sri Lanka (Dahdouh-Guebas *et al.* 2002), au Bangladesh (Deb 1998, Islam 2003, Samarakoon 2004, Islam et Wahab 2005), en Thaïlande (Barbier et Cox 2002, Huitric *et al.* 2002, Muttitanon et Tripathi 2005, Barbier 2006), au Vietnam (Tong *et al.* 2004, Binh *et al.* 2005, Béland *et al.* 2006), en Indonésie (Armitage 2002).

superficie de mangrove augmente. Dans le cas du Bangladesh, la mangrove y serait toutefois dans un état sanitaire globalement moins bon (Iftekhar et Islam 2004).

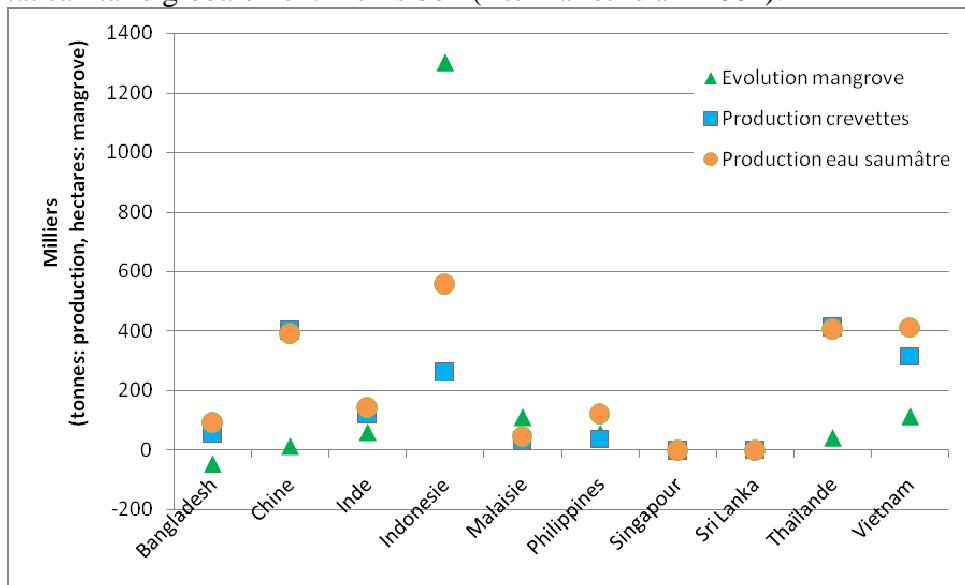


Figure 1-10 - Évolution des productions aquacoles et des superficies de mangrove déboisées entre 1980 et 2005 (FAO)

À l'échelle mondiale, les autres causes de dégradation ou de destruction de la mangrove sont l'utilisation à des fins commerciales du bois, le détournement en amont des eaux douces, la conversion des terres à d'autres activités, le pâturage, ainsi que les impacts liés aux engrais et produits phytosanitaires agricoles et à l'extension des marais salants (Hein 2002, Walters *et al.* 2008). L'élevage de poissons a été le premier responsable de la destruction de la mangrove, tel celui de *Chanos chanos* aux Philippines (Jin-Eong 1995), relayé à partir des années 1980 par la crevetteculture (Primavera 2005).

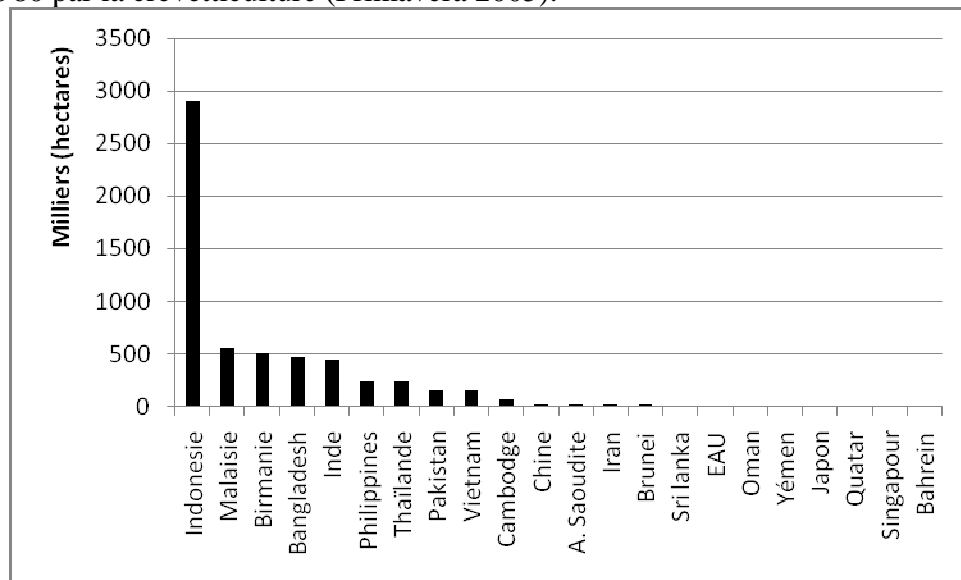


Figure 1-11 - Superficies de mangrove en 2005 en Asie (FAO)

En Thaïlande, Barbier et Cox (2002) ont identifié les facteurs de développement de l'aquaculture en zone de mangrove grâce à des modèles intégrant le prix des crevettes, le coût du travail, la distance aux marchés, le prix de l'aliment, la croissance de la population, le revenu par tête et le nombre de fermes déjà présentes dans la mangrove. Ces auteurs se réfèrent donc à plusieurs facteurs de production ainsi qu'au marché mais ne considèrent pas la

terre. Pourtant, les faibles coûts d'implantation en zone de mangrove, outre des coûts de production relativement faibles expliquent aussi que l'aquaculture s'y soit développée préférentiellement (Kautsky *et al.* 2000). La faiblesse de ces coûts s'explique par la localisation géographique souvent excentrée et peu demandée, par les facilités accordées par les états pour accéder au foncier, souvent de statut juridique public, et enfin par le statut marginal des occupants de ces terres qui sont le plus souvent des pêcheurs ou des collecteurs de ressources diverses. Le littoral est souvent le milieu de vie de populations pauvres qui exploitent prioritairement les ressources de la mer et de la mangrove en accès libre (Campbell *et al.* 2006). Il leur est donc difficile de s'opposer à la privatisation des terres, souvent appuyée par les gouvernements durant les années 1980. Cet appui institutionnel se caractérisait alors soit par des facilités juridiques d'accès au foncier, soit par des subventions aux exploitants, comme en Thaïlande (Huitric 2002) pour l'achat des intrants et pour l'aménagement de la ferme. Cette intervention des institutions publiques a artificiellement augmenté la rentabilité de l'activité et par là même le processus de déforestation (Barbier 2006). Dans le cas où les terres appartenaient au domaine public, les coûts de la location sont restés à des niveaux très bas, comme aux Philippines où ce coût s'est établi à US\$ 2 par hectare (Primavera 2005). Ces prix sont la conséquence d'une évaluation incomplète et d'une vue imparfaite des bienfaits de la mangrove pour le territoire (Rönneback *et al.* 1999). En dépit de ces avantages, l'installation en zone de mangrove comporte aussi des risques qu'ont connus de nombreux exploitants. En effet, la déforestation provoque l'oxydation de la pyrite contenue dans le sol, qui à son tour provoque l'acidification des eaux par libération des métaux lourds, perturbe la réponse immunitaire des organismes face aux pathogènes (Kautsky *et al.* 2000). Les impacts directs de ces processus sur les territoires sont nombreux. La conséquence directe est une dégradation et une réduction des habitats, de la biodiversité et de la palette de biens et services écosystémiques (Whitmarsh et Palmieri 2008)⁵. Certaines franges de la population sont donc marginalisées tandis que d'autres, au contraire, tirent profit de la situation. Dans bien des cas, en effet, ce sont des personnes de l'extérieur qui tirent les plus grands bénéfices au dépend des locaux. De cette situation résulte une augmentation de la vulnérabilité des territoires avec une hausse concomitante du risque de conflit, de pauvreté, et d'inégalité. Au Bangladesh, 4 millions de foyers sont dépendants des produits de la mangrove (Iftekhhar et Islam 2004).

1.2.2 En phase de production

La production provoque des impacts différents de ceux cités précédemment. L'activité aquacole peut affecter les ressources, en qualité et en quantité, qu'elles soient localisées *in situ* ou à distance du site de grossissement. Des impacts spécifiques sont parfois associés à des types particuliers de productions selon le niveau d'intensité des productions, les espèces cultivées / élevées, les pratiques employées ainsi que la structure et le fonctionnement du territoire et des écosystèmes. La plupart des impacts sont classés selon qu'ils sont liés aux intrants (aliment, prophylaxie, thérapie, fertilisants, produits phytosanitaires...) ou aux pratiques (gestion de l'eau, nettoyage des étangs...).

1.2.2.1 Les impacts écologiques néfastes

Les principales catégories d'impacts écologiques sont regroupées dans le Tableau 1-2.

⁵ Selon une étude réalisée en Malaisie, la disparition d'un hectare de mangrove y provoque la disparition de 100 kg de poissons *in situ*, ainsi que de 600 kg de poissons et 600 kg de crevettes dans les eaux côtières proches et dépendant de plusieurs services de la mangrove (Naylor *et al.* 2000).

| Impact | Caractéristiques | Références |
|--------------------------|--|---|
| Alimentation | <p>Le besoin en protéines des animaux aquatiques est élevé en raison de la viscosité du milieu, qui nécessite des masses musculaires importantes.</p> <p>L'alimentation provoque des impacts sur les pêcheries minotières, où sont pêchés les poissons fourragers et sur les eaux réceptrices des effluents qui reçoivent la part non consommée des farines de poisson.</p> <p>L'utilisation croissante de farines (riches en acides aminés et en acides gras) va de pair avec l'augmentation des productions d'organismes carnivores (saumon, crevettes, truites), qui ont besoin de régimes riches en protéines et en nutriments. En 1997, sur 96 millions de tonnes débarquées par pêche de capture, 66 ont été directement consommées et 30 ont été utilisées pour la fabrication de farine et d'huile poisson. Compte tenu du prix élevé de ces farines, l'alimentation représente généralement le principal coût de production (environ 60% du coût de production), ce qui empêche d'augmenter la rémunération du travail.</p> <p>Ces farines sont très digestes et ne donnent donc pas lieu à beaucoup de matière organique rejetée. Toutefois, la partie non consommée, riche en azote et phosphore, entre dans le réseau trophique naturel, ce qui peut provoquer toute une séquence d'effets : eutrophisation du milieu, efflorescences d'algues toxiques, augmentation de la turbidité, diminution de l'oxygène dissous et altération des sédiments et des organismes benthiques. En moyenne, les poissons n'assimilent que 30 % de l'azote présent dans l'aliment. Dans le cas des élevages intensifs de crevette, seuls 24 % des composés azotés et 13 % des composés phosphatés issus de l'aliment sont assimilés, le reste étant excrété dans l'eau, déposé sur le fond ou transmis dans le milieu.</p> | <p>Billard 2005, Naylor <i>et al.</i> 2000, Primavera 2006, Deutsch <i>et al.</i> 2007, Shpigel et Neori 2007, Shimoda <i>et al.</i> 2005</p> |
| Antibiotiques | <p>Les antibiotiques sont utilisés en prophylaxie et en thérapie. Ils se diffusent par l'intermédiaire d'aliments non-consommés et des excréments, ce qui provoque la prolifération de pathogènes résistants, modifie la structure écologique des communautés benthiques microbiennes, et contribue à l'apparition d'efflorescence algales.</p> | <p>Tobey <i>et al.</i> 1998, Kautsky <i>et al.</i> 2000, Primavera 2006</p> |
| Extraction d'eau | <p>Le pompage des eaux souterraines sert à réguler les volumes d'eau entrants ainsi que la salinité des eaux des étangs de grossissement. Ils provoquent la subsidence des deltas et des plaines littorales ou la salinisation des aquifères littoraux.</p> | <p>Kongkeo 1997, Primavera 2006</p> |
| Pêche post-larves | <p>Deux impacts directs de cette pêche, pratiquée le long des littoraux et dans les chenaux : la surexploitation des stocks sauvages, et la capture de nombreuses espèces non ciblées. Après avoir été triées, seules les espèces cibles sont conservées (ex. <i>P. monodon</i>, <i>P. vannamei</i>). Aux Philippines, seulement 15% des prises sont des alevins recherchés de <i>C. chanos</i> tandis qu'en moyenne, pour chaque spécimen de <i>P. monodon</i>, entre 330 et 475 crevettes appartenant à d'autres espèces sont capturées. Cette activité a aussi été jugée responsable de la transmission de pathogènes au milieu d'élevage.</p> | <p>Islam 2003, Primavera 2006, Hoq <i>et al.</i> 2001, Bhattacharya et Sarkar 2003</p> |
| Rejets | <p>Les élevages aquacoles rejettent dans le milieu extérieur de la matière organique fécale, des produits du métabolisme, et des aliments non consommés. Une grande proportion des aliments est en effet non consommée : sur 100 grammes ingérés, les bivalves en rejettent 75 grammes, les saumons 70 à 75 grammes, et les crevettes près de 80 grammes.</p> <p>En ce qui concerne les éléments dissous, les principales substances polluantes sont des composés azotés, des phosphates et de la matière organique. Les composés azotés et phosphatés sont des facteurs limitant de l'activité, mais des densités trop élevées stimulent la productivité primaire et accélèrent l'eutrophisation naturelle. Les composés phosphatés sont</p> | <p>Billard 2005, Chen et Fornshell 2000, Shpigel et Neori 2007</p> |

| | | |
|-----------------------------|---|---|
| | présents à l'état soluble (orthophosphate) et sous forme particulaire. Les orthophosphates proviennent des urines et de la conversion microbienne des phosphates contenus dans les fèces et dans l'aliment non consommé. | |
| Richesse floristique | Les rejets, en modifiant la qualité physico-chimique des eaux ainsi que le photopériodisme en cas de turbidité, modifient les peuplements végétaux (herbiers, mangrove...) aux environs des exploitations. Plusieurs services écosystémiques disparaissent en conséquence, suite à la disparition des herbiers par exemple : la stabilisation des sédiments fins de la zone intertidale grâce aux réseaux de racines et de rhizomes, la réduction de la vitesse des courants et donc de la mise en suspension des sédiments et son rôle dans le réseau trophique. | Moberg et Rönnbäck 2003 |
| Salinisation | La salinisation concerne à la fois les sols aquacoles et les réserves souterraines. Le développement de l'aquaculture saumâtre dans des zones dulcicoles provoque l'introduction d'une grande quantité de sels dans les sols. En Thaïlande, la crevetticulture s'est développée à grande distance de la côte (70 km et plus dans l'hinterland), en zone traditionnellement dédiée à la riziculture irriguée. L'apport d'eau salée se fait par l'intermédiaire de camions citernes provoquant la salinisation des terres agricoles adjacentes. | Lebel <i>et al.</i> 2002, Flaherty <i>et al.</i> 2000, Hamed 2008, Twilley 1989 |

Tableau 1-2 - Principaux impacts écologiques de l'aquaculture

Le niveau de pollution engendré par l'aquaculture dépend à la fois des espèces élevées, des méthodes de culture, des densités de stockage, du type d'aliment et de l'hydrographie du site (Feng *et al.* 2004). Les systèmes intensifs, en opérant isolément du milieu naturel, dont les caractéristiques ne sont pas ou peu prises en compte dans le processus de production (Folke et Kautsky 1992), s'avèrent être les plus dégradants et destructeurs. À titre de comparaison, les 40 000 ha de fermes intensives thaï produisent en déchets azotés l'équivalent de ce que produiraient 3,1 à 3,6 millions de personnes, et en déchets phosphatés l'équivalent de 4,6 à 7,3 millions d'habitants (Lebel *et al.* 2002).

1.2.2.2 Les impacts sociaux

Le développement aquacole modifie la vie des acteurs du secteur mais aussi la vie de ceux qui subissent les conséquences directes et indirectes de la production. Les impacts sociaux ont été classés à travers cinq perspectives : les emplois, l'aspect financier, l'identité des acteurs, les externalités socio-économiques et l'alimentation.

| Domaine | Caractéristiques / étude de cas | Références |
|----------------|--|---|
| Emplois | La qualité et le nombre des emplois sont concernés. Les exploitations intensives emploient un plus grand nombre de salariés que les exploitations plus extensives car les tâches y sont plus nombreuses. La crevetticulture extensive et semi-intensive s'est appuyée, et s'appuie encore dans certains pays, sur la récolte de post-larves sauvages. Au début des années 1990, plus de 150 000 personnes exerçaient cette activité au Bangladesh sur les 210 000 que comptait l'ensemble du secteur aquacole. En Thaïlande, dans les fermes intensives et semi-intensives, le travail est mieux rémunéré. En 1994, le nombre d'emploi directs s'établissait à 97000 et le nombre d'emplois indirects à 53000. Ces derniers occupaient des postes à plusieurs maillons de la chaîne de production (écloseries, agrochimie, conditionnement, export...), d'autant plus longue que la production est intensive et que les produits sont destinés à être exportés. Les exigences liées à l'exportation (rapidité d'acheminement, respect des conditions sanitaires) impliquent l'intervention de métiers spécifiques (mise en application des normes sanitaires) et des infrastructures de qualité. Le développement de l'activité et ses corollaires : les besoins d'infrastructures de qualité et l'arrivée de travailleurs immigrés, s'exprime donc aussi à travers un besoin plus fort de services et fournit donc des emplois indirects. | Huitric <i>et al.</i> 2002, Deb 1998, Lebel <i>et al.</i> 2002, Hishamunda et Ridler 2006 |

| | | |
|---------------------------------------|--|--|
| Richesse et revenus | <p>Les salaires aquacoles sont souvent plus élevés que les salaires agricoles. En Andhra Pradesh, les salaires aquacoles sont deux fois plus élevés que le salaire moyen. Les exploitants aquacoles enregistrent aussi des bénéfices importants, jusqu'à 10 fois plus élevés que les exploitants rizicoles. L'aquaculture permet parfois à des agriculteurs, connaissant des difficultés de trésorerie, de diversifier leurs activités et de diluer une partie du risque.</p> <p>En dépit de la césure culturelle, l'accumulation de richesses par une frange de la population a permis à d'autres activités situées sur le territoire d'en profiter : l'artisanat, les commerces et les services. Elle permet aussi de soutenir la demande en produits alimentaires de qualité. A partir d'un certain niveau de revenus, le surplus financier n'est plus affecté à l'achat de biens de première nécessité mais à des produits alimentaires de qualité sur le plan nutritionnel, ce qui peut alors, par exemple, favoriser la demande intérieure des produits aquacoles, initiant ainsi un cycle vertueux.</p> <p>L'importance des profits est souvent corrélée avec le niveau de risques en cas de mauvaise récolte. Les cas d'endettements, suivis de banqueroute, sont nombreux et concernent autant les petits que les gros exploitants.</p> <p>Un problème majeur est l'accaparement des richesses et la dissipation de la rente produite localement par différents acteurs : propriétaires, entreprises agro-industrielles (Charoen Pokhand CP - Thaïlande). Le groupe CP est par exemple connu pour externaliser une partie des risques en maintenant volontairement une structure de petits propriétaires.</p> | Kumaran <i>et al.</i> 2003, Belton et Little 2008, Edwards 2000, Lebel <i>et al.</i> 2002, Ahmed et Lorica 2002, Goss <i>et al.</i> 2000 |
| Acteurs | <p>Un phénomène récurrent est la migration d'ouvriers en provenance de foyers où le marché du travail est saturé ou bien où le travail est mal rémunéré : migrations domestiques ou internationales (ouvriers birmans en Thaïlande).</p> <p>Au contraire, pour des questions de confiance, les exploitants favorisent parfois les locaux ou des personnes de la même origine géographique ou ethnique. L'aquaculture permet aussi parfois aux populations locales de se fixer.</p> <p>L'aquaculture ne fait parfois que prolonger les inégalités déjà constatées entre ceux qui bénéficient de passe-droits (officiels) et qui détiennent le pouvoir économique et les autres : en Indonésie par exemple où les populations d'origine chinoise sont les plus gros propriétaires fonciers, les Indonésiens d'origine malaise sont des propriétaires de tailles moyenne et faible, tandis que les indigènes Kaili sont les travailleurs journaliers.</p> <p>Les postes réservés aux femmes sont moins nombreux. Certaines opérations leurs sont réservées dans les usines de traitement et de conditionnement des animaux récoltés. On les retrouve aussi à la vente au détail aux Philippines, par exemple. En Andhra Pradesh elles jouent un rôle central dans la construction d'étangs, la collecte, le triage et le comptage des alevins, la récolte, la pesée des crevettes et l'étêtage. En Tanzanie, l'algoculture est une importante source de revenus réservée presque exclusivement aux femmes, mais demeure très faiblement rémunérée.</p> | Barbier 2006, Deb 1998, Lebel <i>et al.</i> 2002, Anyanwu <i>et al.</i> 2007, Frankenberger 2002, Armitage 2002, Primavera 2006, Kumaran <i>et al.</i> 2003, Rönnbäck <i>et al.</i> 2002 |
| Externalités socio-économiques | <p>Les externalités produites par l'aquaculture affectent les activités de plusieurs secteurs, tel que la pêche ou la collecte de ressources naturelles diverses. En devenant salariés, les acteurs perdent l'accès libre et illimité à certains biens et services. Dans certains cas, l'aquaculture intensive a contribué à rendre les pauvres plus pauvres.</p> <p>Les inégalités économiques se sont aussi parfois accrues entre des acteurs aquacoles qui s'enrichissent et des locaux auxquels on hôte l'usage des ressources de subsistance. En de nombreux endroits, la crevetticulture a contribué à une différenciation socio-économique et à un accroissement des inégalités.</p> | Kent 1995, Irz <i>et al.</i> 2007, Luttrell 2006, Hue et Scott 2008 |
| Alimentation | Selon la FAO, la sécurité alimentaire est le droit de chaque personne | Hishamunda |

d'avoir accès à des aliments suffisamment nutritifs pour se garantir une vie saine, et possède trois dimensions : l'accessibilité, la disponibilité, et la stabilité. L'insécurité alimentaire est ainsi apparue progressivement comme un problème à la fois d'accès et de disponibilité. La plupart des projets aquacoles se sont penchés sur le problème d'accessibilité en favorisant les espèces à haute valeur ajoutée (crevette) au détriment des espèces vivrières à faible valeur ajoutée (*low-cost/low-value*) avec l'idée que les revenus générés permettraient l'acquisition de biens alimentaires sur le marché. Cela reposait sur la condition d'une meilleure répartition de la richesse créée et de prix sinon constants du moins sujets à une inflation raisonnable. Certains cas ont pourtant montré que la production d'espèces à haute valeur ajoutée s'était fait au détriment des volumes d'espèces *low cost*, entraînant alors une hausse du prix de ces dernières et les rendant donc moins accessibles. Dans un tel modèle, l'aquaculture ne répond ni à l'insécurité alimentaire (faibles revenus) ni à l'insécurité nutritionnelle (exportation des protéines). On retrouve un tel exemple au Bangladesh, où la Banque mondiale a fait la promotion de la carpe indienne auprès des aquaculteurs. Cela n'a pourtant eu aucun effet sur les revenus des fermiers et a même réduit les volumes des poissons introduits naturellement dans les étangs, à faible valeur ajoutée, qui permettaient aux plus pauvres l'accès aux protéines (Lewis 1997). Au Bangladesh toujours, les nationaux n'ont accès qu'aux sous-produits de l'industrie, tels que les rostrés des crevettes, les crevettes malades ou celles dont la cuticule est molle (Deb 1998). Un autre problème lié à la définition même de la sécurité alimentaire est lié à la stabilité de la production. Les multiples risques qui pèsent sur l'activité : aléas naturels, épizooties, réduisent sa capacité à approvisionner les marchés de manière totalement stable.

2006, Deb
1998, Lewis
1997

Tableau 1-3 – Principaux impacts sociaux de l'aquaculture

Le constat, globalement négatif, pour les expériences d'aquaculture littorale ne doit pas faire oublier que la majorité de la production aquacole alimentaire concerne des carpes herbivores ou omnivores, situées en base de chaîne alimentaire, à faible impact écologique et produisant des biens à faible prix donc accessibles à une large population (Ahmed et Lorica 2002). Dans les pays où les captures de poissons sont en régression, l'aquaculture apparaît comme le seul moyen de répondre à la demande croissante en biens alimentaires (Anyanwu 2007). De plus, l'aquaculture est parfois intégrée à d'autres industries. Ainsi, en Thaïlande, l'aquaculture d'eau douce s'est développée suite au développement de l'agro-industrie, car elle recycle et valorise les sous-produits de cette dernière (Belton et Little 2009).

Le constat doit faire la distinction en fonction des espèces élevées. La crevette est le symbole, et à juste titre, d'un développement non durable. L'expression *boom and bust* est d'ailleurs employée pour caractériser son mode de développement. Dans de tel cas, à travers les externalités négatives produites, l'aquaculture est même responsable de son propre déclin. Une extension incontrôlée des exploitations et l'importance des effluents rejetés donnent une durée de vie très limitée aux exploitations, en moyenne 5 à 10 ans en Thaïlande (Kautsky *et al.* 2000). L'activité n'est pourtant pas toujours la première responsable des impacts négatifs. La thèse soutenue ici est que qu'il faut accorder une très grande importance à la situation préexistante au niveau du territoire, ainsi qu'aux évolutions nationales ou internationales. On doit en effet s'interroger sur les raisons qui sont à l'origine d'une aquaculture responsable de tels impacts. On a identifié les facteurs suivants :

- l'aquaculture a exploité les inégalités socioéconomiques préexistantes pour produire à bas coût ;
- l'aquaculture a profité de la bureaucratie et du clientélisme préexistant pour accorder des passe-droits et pour occuper illégalement des terres publiques ;

- l'aquaculture a bénéficié de la pauvreté des communautés littorales aux revendications inaudibles ;
- l'aquaculture a profité d'une vision rationnelle à court terme de l'exploitation des écosystèmes ;
- l'aquaculture a été une alternative au déclin de la pêche, qui lui-même s'explique par un comportement de prédation sans gestion associée ;
- l'aquaculture a enfin bénéficié de l'adoption de l'économie de marché par de nombreux pays du sud et d'un choix de développer les activités d'exportation.

1.3 Quel avenir ?

Au regard de la croissance qu'a connu le secteur ces trente dernières années, il est certain que les productions continuent à s'accroître à l'avenir. En effet, les facteurs qui ont stimulé la production aquacole (démographie, marché, crises des pêches, innovations, intégration) sont toujours d'actualité. La problématique de l'avenir de l'aquaculture est présentée en trois temps : l'identification des enjeux, puis celle des solutions et enfin la définition de la durabilité. En effet, l'enjeu majeur pour le secteur est de concilier l'augmentation de la production et des superficies de production ainsi que la croissance des rendements, avec les exigences environnementales et sociales qui, elles-aussi, s'accroissent qualitativement et quantitativement. Toutefois, la manière dont les acteurs répondent à ces enjeux varie en fonction du constat établis, c'est-à-dire en fonction des objectifs des individus et des groupes et de l'état des connaissances.

1.3.1 Les enjeux

La hausse des besoins alimentaires, du fait de la démographie humaine et la stagnation des pêches de capture, suffit à conclure de la nécessité d'augmenter la disponibilité de produits aquatiques qui peut se réaliser, grâce à une occupation plus large de l'espace ou à une croissance des rendements. L'enjeu alimentaire consiste à ce que chaque être humain dispose d'une alimentation en quantité et en qualité nécessaire. Dans les pays du Sud, la malnutrition se manifeste par des carences en vitamines, minéraux et autres micronutriments qui provoquent des morts prématurées, des maladies chroniques et qui empêchent un développement cognitif normal (Bouis 2003). Sur le plan nutritionnel, un des bénéfices majeurs de la consommation de poissons est la présence d'acides gras polyinsaturés qui préviennent, en particulier, les maladies artérielles (Jenkins *et al.* 2009). Un objectif est donc de réserver une partie de la production à la demande locale en produisant des espèces à bas coûts ou bien en augmentant la part redistribuée de la richesse créée. Ce partage de la richesse peut se faire au niveau des exploitations ou à ceux de différents maillons de la chaîne du produit : de la fabrication des intrants à la commercialisation des produits en passant par la transformation. Si ces orientations s'inscrivent dans une perspective plus ou moins longue, du fait des changements majeurs qu'ils impliquent dans la sphère politique et économique, dans une perspective plus courte ce sont les enjeux écologiques qui priment car les dégradations et les destructions environnementales présentent le risque de réduire de façon irréversible le développement futur. C'est d'autant plus nécessaire que l'inertie économique provoque la reproduction de systèmes de production tant que ceux-ci sont rentables et en l'absence de contraintes juridique ou économique fortes. Cela suppose non seulement d'améliorer les méthodes de production (indice de conversion, circuits fermés...) mais aussi d'adapter la production à la capacité naturelle de recyclage du milieu. Pour les exploitations à venir, cela suppose aussi d'améliorer la méthode de sélection des sites de production. A un degré moindre, l'aquaculture peut aussi aider à la conservation des écosystèmes (repeuplement et pacage marin), des espèces et du patrimoine génétique (Bell *et al.* 2006).

La définition des enjeux pose néanmoins deux problèmes : l'incertitude inhérente aux systèmes complexes quant à leurs évolutions futures, et les intentions différentes entre acteurs et groupes d'acteurs en raison de l'hétérogénéité sociale. En effet, l'hétérogénéité sociale est source de richesse en termes d'innovations, de création, mais elle peut aussi constituer un frein lorsqu'il s'agit de définir puis de hiérarchiser les enjeux.

1.3.2 Les constats et la nature des solutions

Les solutions doivent réduire les impacts négatifs identifiés précédemment tout en prenant en compte les enjeux qui auront été définis. Cela suppose donc d'identifier les causes des impacts négatifs. L'ADB (2005) considère les facteurs suivants comme responsables des échecs de l'aquaculture en matière de développement : le manque d'accès au crédit, en particulier pour les plus pauvres du fait d'un manque de garanties, le risque élevé des opérations et donc d'une banqueroute, une mauvaise gestion de l'eau, une mauvaise sélection de sites, de mauvaises pratiques liées au manque de savoir-faire et d'expérience des exploitants, l'existence d'institutions inefficaces et des politiques inappropriées. Hue et Scott (2008) considèrent que les crises sont la conséquence des faibles niveaux d'éducation des exploitants, du manque d'expérience, de l'absence de support technique, et du manque d'accès au capital pour améliorer les systèmes. Généralement, on reconnaît que l'aquaculture n'a pas directement bénéficié aux plus pauvres (Irz *et al.* 2007). L'accès au capital humain et financier représente donc un enjeu majeur au niveau politique.

La crevetticulture est la forme d'aquaculture qui a cristallisé les oppositions les plus fortes autour du bilan et des solutions à apporter (Tableau 1-4). Béné (2005) a relevé deux approches dominantes, les partisans d'une approche politique des problèmes et des solutions, dont le cadre d'analyse est influencé par la *political ecology*, et les partisans d'une approche technique, dont les arguments reposent essentiellement sur l'adoption de meilleures pratiques (*best management practices*).

| Question / thème | Approche politique | Approche technique |
|---|--|---|
| Le problème | Problèmes sociaux et dégradations environnementales | Durabilité des exploitations et dégradations environnementales |
| Mettre l'accent sur | Les causes des problèmes | Les solutions du problème |
| Conclusions | Les causes sont politiques... mais sont vagues sur les solutions | Les solutions sont techniques... et n'évoquent jamais les problèmes politiques ou sociaux |
| Système à promouvoir | Extensif | Intensif |
| Perceptions des acteurs : | | |
| a. qui doit être aidé ? | Les petits exploitants pauvres | Les grands exploitants |
| b. qui doit-on blâmer en ce qui concerne l'environnement ? | Les grands exploitants | Les petits exploitants |
| c. qui doit-on blâmer pour le désordre ? | Les politiciens locaux et les institutions internationales | Tous ceux qui s'opposent à l'industrie de la crevette (ONG...) |

Tableau 1-4 - Deux approches différentes des causes et des solutions à apporter aux problèmes de la crevetticulture (Béné 2005)

Les différentes approches synthétisées dans le Tableau 1-4 correspondent à deux façons de se représenter le système. L'une est holiste, multidimensionnelle, et préconise de remonter dans le temps de manière à identifier les racines des problèmes. Une telle perspective amène les partisans de cette approche à identifier les facteurs politiques comme sources du problème. Cette approche caractérise, par exemple, les opposants à l'économie de marché. Elle pose

néanmoins deux problèmes : d'une part remonter la chaîne de causalité accroît considérablement le nombre de facteurs en jeu, avec les risques de déboucher sur une impression de complexité trop forte, d'autre part poser le problème seulement sur le plan politique empêche d'entrevoir d'autres solutions qui pourraient pourtant améliorer la situation à court terme dans la mesure où les solutions politiques s'inscrivent dans des délais plus longs, du fait du temps pour négocier et légiférer. À l'opposé, les partisans de l'approche technique considèrent que les problèmes sont le fait des petits exploitants qui n'emploient pas les bonnes pratiques et que la diffusion de ces dernières ne peut se faire efficacement que grâce aux grands exploitants. Les informations du Tableau 1-4 révèlent donc une opposition courante entre les défenseurs de solutions techniques et les défenseurs de solutions politiques. La technique et la politique constituent pourtant deux domaines, non exclusifs l'un et l'autre, dans lequel des innovations doivent être expérimentées et réalisées. Outre la diversité des champs dans laquelle les solutions doivent s'envisager (politique et technique/technologique), les échelles nous apparaissent constituer une seconde dimension tout aussi importante (Figure 1-12).

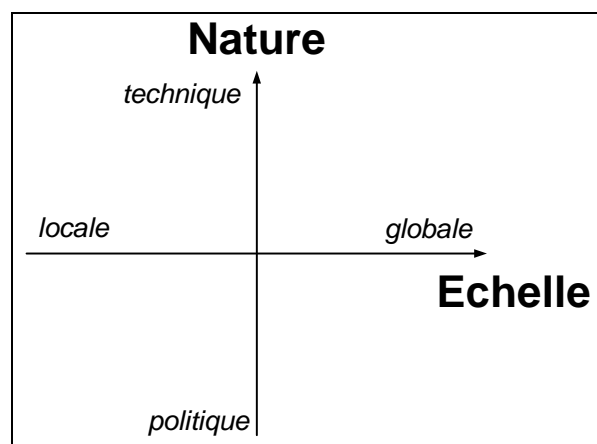


Figure 1-12 – Les deux dimensions des solutions à apporter

L'axe des échelles est un continuum de niveaux depuis les individus jusqu'aux ensembles les plus larges et les plus complexes. L'intégration de la dimension spatiale permet d'élaborer des solutions adaptées au fonctionnement des systèmes écologiques, sociaux, et socio-écologiques (systèmes qui connaissent des interactions et des rétroactions entre eux), qui s'inscrivent tous dans des échelles variées tout en étant interdépendants. L'intégration de cette dimension permet aussi d'accorder un degré de responsabilité à chaque niveau, en particulier à celui des usagers, en raison de leur capacité à gérer les ressources naturelles (Ostrom 2009). En prenant comme modèle la théorie des avantages comparatifs, cela consisterait aussi à allouer à chaque niveau des droits et des devoirs dont ils sont les meilleurs dépositaires (Dowsley 2008). Le temps constitue la seconde notion rattachée à la dimension d'échelle. Les solutions sont en effet rattachées à des temps plus ou moins courts selon la nature des objets considérés et selon le produit de leur interaction.

1.3.3 L'aquaculture durable

Dès la fin des années 1980, plusieurs rapports d'ONG internationales ainsi que des articles scientifiques ont alerté sur les risques d'une extension sauvage des exploitations de crevettes et de leurs répercussions sur l'environnement biophysique et social (Bailey 1988, Twilley 1989, Primavera 1995, DeWalt *et al.* 1996, Béné 2005). La durabilité a été évoquée dès 1992 par Folke et Kautsky (1992) alors que les impacts environnementaux ont été débattus pour la première fois, à Hawaï, en 1988 (Stickney 2007). Les nombreuses critiques ont finalement débouché sur l'arrêt des projets de crevetticulture financés par l'ADB à partir de 1996 (Béné

2005). Un frein majeur pour les bailleurs de fond a été l'absence de preuves tangibles d'une réduction de la pauvreté. Ils ont alors considéré l'aquaculture comme une activité commerciale identique à beaucoup d'autres (Béné 2005). Plusieurs états ont suivis cette orientation. Parmi les exemples fameux, celui du gouvernement indien qui a réduit de façon drastique les possibilités de développement spatial de l'aquaculture⁶. La médiatisation des impacts environnementaux de l'aquaculture et des méthodes de production que l'opinion a pu juger négativement ont, elles aussi, servi de tremplin au développement d'une aquaculture durable.

L'aquaculture durable doit d'abord réduire ses externalités environnementales négatives, car ces dernières compromettent la subsistance actuelle et future des usagers. Dans la mesure où la production aquacole dépend largement des services écologiques fournis par le milieu (Folke et Kautsky 1992, Kautsky *et al.* 2000), cela suppose de reconnaître que plus un système de culture mime les fonctions de l'écosystème naturel hôte, moins cela nécessite de ressources et d'intrants pour assurer son fonctionnement (Folke et Kautsky 1992). Cela suppose donc de s'écarter d'une gestion occidentale des systèmes aquacoles qui recherche l'optimisation économique à court terme au prix d'une vulnérabilité sociale et écologique sur le moyen et long terme.

La réflexion sur la durabilité de l'aquaculture doit s'appuyer sur l'expérience passée et s'inspirer des idées et des initiatives suivantes :

- Constitution et diffusion des connaissances. En Thaïlande par exemple, la résilience et la capacité d'adaptation du système de production est la conséquence des actes de l'Etat qui a appuyé la recherche et le développement, a amélioré les infrastructures et a donc permis une réduction des coûts de transports, fourni des services divers aux aquaculteurs (diagnostic, analyses...) et organisé des séminaires (Kongkeo et Davy 2010).
- L'utilisation des biotechnologies. Comme en agriculture⁷, les biotechnologies peuvent permettre des solutions innovantes. Parmi les avantages connus dans le secteur agricole, on peut relever : la libération de temps libre grâce à la réduction du temps consacré aux travaux des champs, ce qui offre aussi l'avantage de maintenir une activité de production en dépit d'une faible main d'œuvre (Herring 2004), l'augmentation ou le maintien des rendements dans les zones aux conditions agro-écologiques moins favorables, la baisse de la mortalité des espèces élevées et la baisse des impacts sur l'environnement (réduction de l'érosion des sols, augmentation de la biodiversité) grâce à une moindre utilisation des produits sanitaires (Pray et Naseem 2007). À l'opposé, l'inconvénient majeur des biotechnologies est que la plupart des variétés développées sont des variétés marchandes, fourragères, employées par les plus gros exploitants et adaptées pour les systèmes intensifs (Herring 2004), ce qui provoque un nombre très limité de recherches sur les cultures vivrières pratiquées par

⁶ En 1991, l'Inde a émis une note dans le cadre de sa politique de protection de l'environnement visant à protéger son littoral, en particulier de l'érosion, et en faveur du maintien de la diversité biologique. À quelques exceptions près (les industries qui ont un besoin impératif d'accès aux eaux marines telles que les éclosiers), toute opération aquacole dans l'espace intertidal est interdit ainsi qu'à l'intérieur d'une bande de 500 mètres à partir de la laisse des plus hautes eaux, appelée Coastal Regulation Zone (CRZ) (Ramachandran *et al.* 2005). La décision de la Cour Suprême indienne, prise le 11 décembre 1996, a déclaré que l'aquaculture faisait partie intégrante des activités interdites dans la CRZ, et qu'à ce titre aucun étang ne devait y être creusé, exception faite pour les étangs 'traditionnels' à usage multiples, les étangs déjà construits devant alors être démolis (Béné 2005).

⁷ En agriculture, les biotechnologies sont employées pour créer des espèces résistantes aux maladies, augmenter les rendements, biofortifier les produits, en particulier en oligo-éléments (vitamine A, fer, iode, zinc), réduire l'emploi d'insecticides et créer des espèces résistantes aux herbicides (Herring 2008). Jusqu'à présent, les traits les plus développés sont la tolérance aux herbicides (29%) et la résistance aux insectes (21%) (Herring 2004, Pray et Naseem 2007).

des exploitants à la limite de la solvabilité (Herring 2004). La principale critique que l'on peut porter sur les biotechnologies est donc liée aux orientations de la recherche plutôt qu'à la technologie elle-même. En aquaculture, les recherches ont jusqu'à maintenant permis d'augmenter les taux de croissance, d'améliorer les indices de conversion, d'améliorer les résistances aux pathogènes (grâce à la sélection en particulier), et d'aider à la conservation de espèces (Prasad et Kumar 2009)⁸.

- Favoriser l'intégration des intrants et des extrants, ce qui revient à favoriser le recyclage des sous-produits d'une activité dans une autre activité.
- Augmenter le rendement des ressources naturelles utilisées, à travers par exemple des circuits fermés (Bush *et al.* 2010).
- Utiliser le marché pour améliorer la distribution des bénéfices, à travers par exemple la certification. Dans l'industrie aquacole, les standards sont très nombreux, supérieurs à 30, et vont du commerce équitable à la production biologique (Bush *et al.* 2010). Le fonctionnement de la plupart des systèmes de certification est le suivant : un producteur peut vendre un produit certifié lorsqu'il répond au cahier des charges du standard en question, ce qui lui permet d'obtenir un gain supplémentaire (premium) rajouté au prix du produit. Une injustice réside dans le fait que le consommateur doit payer plus cher un bien produit dans de bonnes conditions pour la seule raison que d'autres biens sont produits dans de mauvaises conditions et moins chers. Ces réglementations par le marché remportent un large consensus parmi les acteurs de la filière mais aussi parmi les ONG. Ces derniers ont, en effet, abandonné l'idée que l'état puisse être un régulateur agissant en faveur de l'intérêt collectif et se tournent, en conséquence, vers les gros acheteurs et les consommateurs pour qu'ils intègrent dans leurs logiques marchandes et consuméristes des facteurs sociaux, écologiques et éthiques dans leurs actes d'achat (Vandergeest 2007). Dans un tel système, les plus grands perdants sont les petits fermiers du fait que les firmes préfèrent traiter avec un nombre restreint de partenaires, plus grands, mieux à même d'assurer la traçabilité et de répondre dans les temps aux besoins (Islam 2007). Ce processus peut alors aboutir à ce que les petits paysans, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas la possibilité de répondre aux exigences du marché, soient forcés de vendre leur produits à moindre coût sans *premium*, dans un processus qui tendrait à les marginaliser en augmentant les inégalités (Béné 2005). Le risque est réel car l'application des recommandations dans les directives (Best Management Practice : BMP⁹) édités par les institutions tel que la FAO, la Banque Mondiale, l'ADB, montrent une nette tendance à favoriser les grandes exploitations (Béné 2005).
- Taxes pigouviennes (pollueur-payeur), qui sont des taxes destinées à internaliser les coûts marginaux. Dans un système où le pollueur internalise les coûts, ceux qui produisent dans de bonnes conditions ne sont à priori pas pénalisés. Les résultats ne semblent toutefois pas garantis. Des modèles ont permis de constater que la mise en place d'une taxe sur l'aliment n'a pas d'effets significatifs sur le secteur, du fait d'une demande inélastique des farines animales (Arquitt *et al.* 2005). Autrement dit, l'aquaculture est tellement dépendante des farines que même une augmentation du

⁸ Par sélection, des animaux triploïdes ont aussi été créés, rendant les animaux stériles, monosexués ou hautement monozygotes (Beaumont et Hoare 2003), recherches dont a profité l'élevage du tilapia par exemple.

⁹ Les recommandations apportées par les BMP permettent en général de réduire les impacts environnementaux en recommandant des techniques et des méthodes de production et de certification, ou encore une réduction de l'utilisation des antibiotiques, l'application de quantités de pesticides et d'aliments adaptés, et enfin une meilleure gestion de l'eau. L'application de ces recommandations permet in fine de vendre des produits auréolés d'une certification. Les BMP incluent aussi les préconisations en termes de localisation spatiale des activités. L'approche est donc à la fois proactive, réactive, intégrative mais avant tout technique et technologique.

prix de ces dernières ne réduirait pas son utilisation par l'aquaculture. Ce qui est vrai pour l'aliment composé ne l'est pas pour toutes les externalités produites directement ou indirectement.

La diversité des systèmes de production empêche de définir un modèle d'aquaculture durable unique. Une aquaculture durable est avant tout une aquaculture responsable qui doit limiter l'exploitation des ressources naturelles et augmenter le partage des richesses, soit directement, en favorisant l'accès des petits exploitants à la production, ou en rémunérant mieux le travail sur l'exploitation ou dans la filière ; soit indirectement, à travers la production d'espèces à bas coûts, avec l'exigence sous-jacente que l'activité reste rentable et capable de se reproduire.

1.3.4 La durabilité pour les territoires littoraux

La durabilité de l'aquaculture se joue aussi à un autre niveau, celui du territoire. L'objectif global est de favoriser le processus d'intégration dans plusieurs dimensions. En ce qui concerne spécifiquement l'espace littoral, la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) constitue un cadre politique d'intégration capable de considérer la spécificité aquacole.

Costanza *et al.* (1997) estiment la valeur globale des biens et services écologiques rendus par les écosystèmes littoraux à \$US 12,57 trillions/an, dont \$US 1,65 trillions/ an pour les seuls marais maritimes. Les littoraux attirent les investissements et les individus. Plus de 1,2 milliards de personnes vivent à moins de 100 km d'une côte, soit 23% de la population mondiale, et on estime que cette part passera à 50% en 2030 (Adger *et al.* 2005). Dans l'espace intertropical, les espaces littoraux sont des lieux où la pauvreté est relativement forte. Un facteur d'appauvrissement parmi d'autres est la périssabilité du poisson, qui empêche de spéculer en jouant sur l'offre pour augmenter les prix, au contraire des céréalières par exemple (Campbell *et al.* 2006). La concentration de pauvres serait aussi due à la difficulté des activités et de la vie en général, poussant les plus riches à opter pour d'autres lieux de vie et de travail (Campbell *et al.* 2006). L'attraction récente du fait de la découverte de plusieurs ressources et de la situation provoque une mixité des populations et des activités. Un des enjeux sera ainsi de faire cohabiter des populations ayant des objectifs, des représentations, des modes de vie et des niveaux de vie très différents ; lesquelles différences se cristallisent parfois autour de conflits d'usage du fait d'une distribution inégale des ressources entre plusieurs groupes d'usagers le long des franges littorales (Brugère 2006).

La GIZC est l'adaptation des principes du développement durable au domaine littoral. L'élaboration d'un concept propre au littoral correspond à une reconnaissance de la spécificité des milieux littoraux. Au niveau international, l'acte fondateur de la GIZC est la conférence de Rio en 1992, et plus particulièrement le chapitre 17 de l'Agenda 21 consacré au domaine littoral et marin. La conférence de Rio a consacré le passage de la GIZC de la sphère scientifique à la sphère des politiques publiques et des recommandations internationales les concernant (Billé 2004). Sa définition est la suivante (Cicin-Sain et Knecht 1998):

“Integrated coastal management (ICM) can be defined as a continuous and dynamic process by which decisions are taken for the sustainable use, development, and protection of coastal and marine areas and resources. ICM acknowledges the interrelationships that exist among coastal and ocean uses and the environments they potentially affect, and is designed to overcome the fragmentation inherent in the sectoral management approach. ICM is multi-purpose oriented, it analyzes and addresses implications of development, conflicting uses, and interrelationships between physical processes and human activities, and it promotes linkages and harmonization among sectoral coastal and ocean activities.”

Cette définition fait état d'un processus dynamique et continu. Il admet donc des changements d'orientation à la suite d'évaluations régulières. Le concept met donc l'accent sur l'adaptation par l'apprentissage (Olsen *et al.* 1997), l'adaptation aux enjeux et aux contraintes, à l'élaboration des savoirs, à leur confrontation et à leur diffusion. Malgré des nuances, les

définitions d'autres auteurs (Skourtos *et al.* 2005, Vallega 1999, Billé 2004) rejoignent la définition donnée plus haut. L'ensemble des définitions s'accordent à relever les principes suivants comme majeurs :

- besoin de surmonter la fragmentation inhérente à l'approche sectorielle classique ;
- promotion des liens et l'harmonisation entre les usages localisés sur la bande terrestre et ceux qui s'effectuent dans les espaces purement maritimes ;
- processus continu, grâce en particulier aux évaluations ;
- approche holiste des problèmes et des solutions ;
- promouvoir la participation des acteurs et des parties prenantes ;
- faire de l'intégration la notion centrale (Cicin-Sain et Knecht 1996) :
 - intégration intersectorielle, entre les différents secteurs d'activités et entre leurs autorités régulatrices ;
 - intégration politique intergouvernementale, entre les différentes unités de gouvernements afin d'harmoniser les actions locales avec les politiques régionales et nationales (verticale) et entre les différents départements (horizontale) ;
 - intégration spatiale entre les différents écosystèmes, marins et continentaux ;
 - intégration internationale, entre pays liés par des relations de dépendance et d'interdépendance, en particulier économiques ;
 - intégration scientifique, entre disciplines différentes et entre les sphères scientifiques et décisionnelles.

On pourrait ajouter à cette liste l'intégration temporelle et celle des représentations ou des modèles mentaux. En effet, un territoire se construit de façon continue et repose sur un rapport de forces entre les éléments présents et passés, matériels et idéels. L'histoire d'un territoire affecte donc l'identité des habitants, la culture, les référentiels, les représentations et donc les actions présentes des acteurs. La diversité des acteurs ne doit pas seulement s'exprimer à travers les intérêts différents mais doit aussi s'exprimer à travers les différences des modèles mentaux du territoire. L'extraction de ces informations peut, par exemple, se faire au moyen de méthodes participatives de concertation (Rey-Valette *et al.* 2006). En tout état de cause, l'intégration est au cœur d'un projet de GIZC et présente les avantages (i) de casser l'approche classique *top-down*, (ii) de favoriser les échanges et les points de vue différents, et (iii) de s'affranchir des limites administratives et de raisonner en fonction de limites fonctionnelles dictées par des zonages écologiques.

L'intégration de l'aquaculture s'exprime de diverses manières :

- en amont, par la nécessité d'améliorer la sélection des sites d'implantation (prise en compte des facteurs biophysiques, sociaux, économiques et culturels).
- par la mise en place d'outils réglementaires afin de contraindre économiquement ou juridiquement les exploitations à adopter des modes de production durables (par exemple, principe du pollueur-payeur : internalisation des externalités produites par les exploitations ; si l'on estime qu'il y a des coûts sociaux pour dépolluer les eaux souillées par les effluents aquacoles, on peut alors reporter ces coûts sur les producteurs (Whitmarsh et Palmieri 2008)).
- par la reconnaissance de l'interdépendance du secteur et du territoire, qui doit alors déboucher sur une aquaculture responsable.

Conclusion

Ce premier chapitre avait un triple objectif : celui de montrer pourquoi l'aquaculture est une activité ancienne mais qui se développe depuis peu avec une intensité sans précédent ; celui de décrire les effets collatéraux de ce développement ; et enfin celui de montrer à la fois la continuité du phénomène mais aussi son adaptation aux enjeux actuels et à venir. On a ainsi montré que les facteurs historiques de développement sont différents des facteurs du développement contemporain, ces derniers étant plus utilitaristes que les premiers. Durant la récente et courte période de développement, certains systèmes de production ont produit des impacts sur les territoires et apparatus soit dès l'installation, soit durant la phase de production. Une typologie de ces impacts a été établie afin de rendre compte à la fois du nombre et de la diversité de ces impacts. Leur multiplication dans le temps et dans l'espace a eu pour conséquence d'alerter plusieurs acteurs, bailleurs de fonds, ONG, politiques, consommateurs. Des constats différents quant aux origines des impacts produits ont été établis. Les différences de ces constats s'expriment à travers un panel de solutions elles-aussi variées, à dominante politique ou technique en fonction des approches et des représentations. Une autre dimension importe en plus de la nature des solutions, celle du niveau dans laquelle s'inscrit la solution, de l'individu aux ensembles les plus complexes. La durabilité a ensuite été définie à propos des deux principaux objets de cette étude, les systèmes de production aquacole et le territoire.

PARTIE 1

L'AQUACULTURE ET LE TERRITOIRE DE TUMBES

Caractéristiques générales du territoire

Localisation géographique

La zone d'étude est située dans l'extrême nord du Pérou (NO : -80,6° long. ; -3.4° lat. et SE : -80.2° long. et -3.6° lat.), dans le département de Tumbes (Figure introduction Pérou 1). Elle est bordée à l'ouest et au nord par l'Océan pacifique, à l'est par l'Equateur (Province d'El Oro), et au sud par le département de Piura. Elle ne comprend que la partie littorale septentrionale du département de Tumbes.

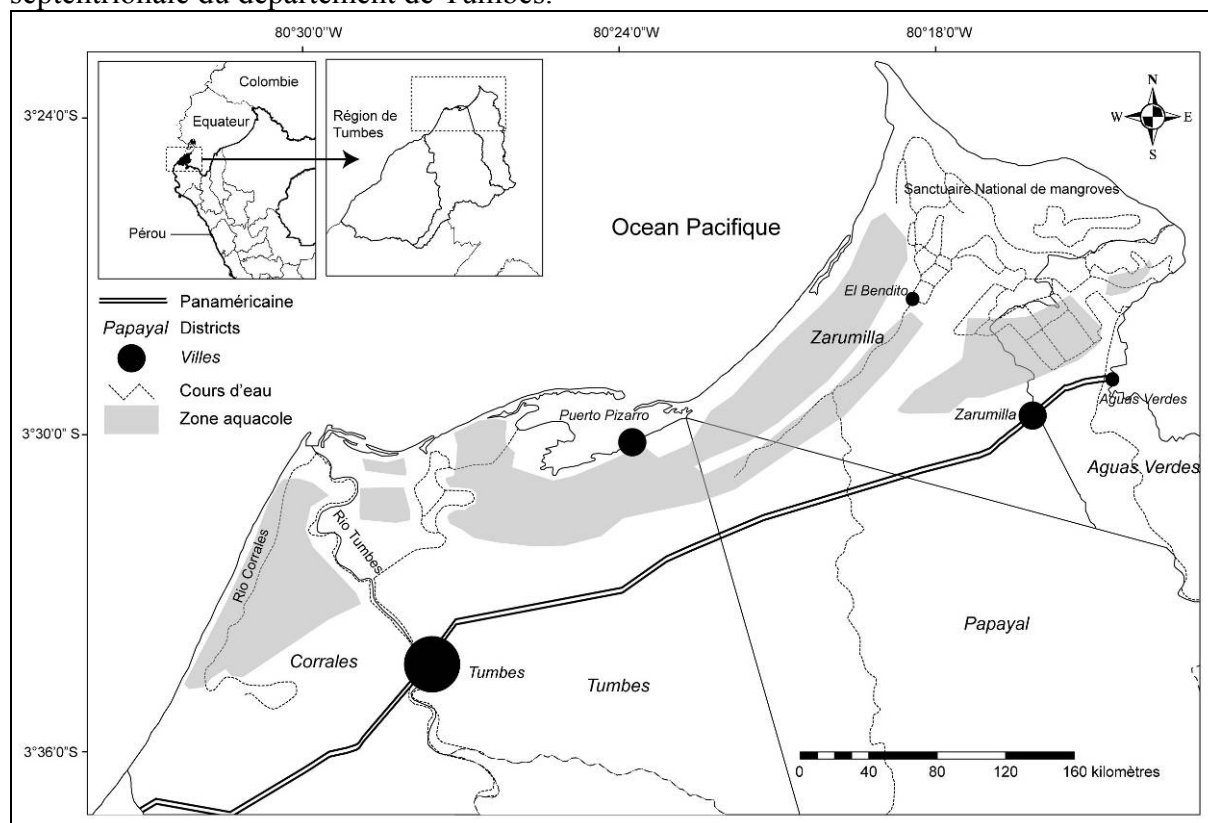


Figure introduction Pérou 1- Carte de localisation du territoire de Tumbes

Géomorphologie

L'espace étudié connaît une zonation géomorphologique étagée. Depuis le trait de côte, on trouve successivement : un delta, une plaine côtière de plusieurs kilomètres de large constituée de sédiments fins, puis une plaine littorale fluvio-marine qui lie l'ensemble précédent à une zone montagneuse plus en retrait, dont le principal massif est le Cerros de Amotape. Le delta du fleuve Tumbes présente une forme triangulaire caractéristique. Formé à l'Holocène, il est constitué par des sédiments fins en son centre et par des franges sableuses marines sur ses marges littorales qui s'organisent en plages, cordons littoraux et flèches, sous l'effet de la houle et des courants marins. Au sud, il est bordé par des falaises formées de roches tertiaires. Les qualités agronomiques du delta sont exploitées à des fins agricoles depuis des temps anciens, avant même l'époque Inca. Les pentes faibles et l'altitude peu élevée en font une zone inondable en cas de crue du fleuve. Le parcours de ce dernier sur le delta décrit des méandres. Des traces dans le paysage d'anciens méandres nous indiquent en outre que la trajectoire du cours d'eau sur le delta est dynamique, conséquence probable des importantes crues passées.

Le deuxième ensemble remarquable, la plaine côtière, s'étend de l'extrémité nord de la zone d'étude à la ville de Tumbes au sud, et s'étale sur quelques kilomètres à l'est. Cette formation est principalement composée de matériel d'origine marine, principalement des sables. Elle correspond à une progradation progressive et homogène du trait de côte sous l'effet de l'accumulation de sédiments marins. Son relief légèrement et régulièrement ondulé s'explique par la succession parallèle d'anciens cordons sableux et de chenaux. Les anciens cordons sont composés de sables tandis que les chenaux intermédiaires présentent une granulométrie plus fine, argilo-limoneuse.

La troisième unité morphosédimentaire, un peu plus à l'est, correspond à une zone d'interface alluviale et marine. C'est une plaine présentant une légère inclinaison en direction de la mer ; les altitudes y sont encore faibles, inférieures à 100 m. Elle présente de petites falaises mortes face à la mer. Sur le plan géologique, on retrouve une succession stratigraphique de sédiments marins et alluviaux, composés d'argile, de limon et de sable. Le drainage superficiel est de type dendritique. Cette unité se localise dans la partie basse de la rive droite du rio Tumbes et s'étend jusqu'à la frontière équatorienne. C'est une zone d'érosion hydrique qui, en époque de fortes précipitations, apporte des nutriments et sédiments à l'écosystème de mangrove.

En arrière de cette plaine, on retrouve un espace collinéen de faible altitude (de 100 à 200 m), qui s'étend de la frontière avec l'Équateur jusqu'au lit du Bocapan au sud (quelques kilomètres au sud de Tumbes) et jusqu'à la zone d'interface alluviale et marine mentionnée plus haut. En raison d'un faible taux de recouvrement par la végétation et d'une météorisation qui peut être intense, l'érosion hydrique est importante. Cet espace contribue lui-aussi largement aux cycles biogéochimiques locaux.

Climat

La zone se situe à l'interface de deux climats : au nord, un climat équatorial chaud et humide sous influence du courant marin équatorial en provenance du nord, et au sud, un climat semi-désertique sous influence de l'anticyclone du pacifique sud qui détermine un régime pluviométrique aride à sub-aride. Cette partie du département de Tumbes connaît ainsi une variabilité interannuelle des précipitations selon l'influence prédominante d'un des deux climats sur l'autre. Les précipitations sont toutefois concentrées sur quelques mois, entre décembre et avril, tandis que le reste de l'année est sec.

Le diagramme des écart-types des précipitations moyennes annuelles (Figure introduction Pérou 2) montre des années marquées par des précipitations très largement supérieures à la moyenne en 1983 et en 1998. Ces pics sont l'expression des épisodes El Niño¹. Dans le département de Tumbes, les précipitations cumulées d'un épisode El Niño peuvent atteindre

¹Cette perturbation climatique, globale, trouve son origine dans l'affaiblissement périodique des alizés qui provoque le déplacement de masses d'eaux chaudes, centrées en temps normal sur l'archipel indonésien, en direction des côtes occidentales de l'Amérique. El Niño n'a pas de fréquence bien établie. Toutefois, des analyses sédimentaires couplées à des analyses de restes archéologiques ont montré que c'est un phénomène récurrent sur les côtes péruviennes, et déjà actif durant le Pléistocène ainsi qu'au début et durant le milieu de l'Holocène (Keefer *et al.* 1998). La récurrence du phénomène provoque une dépendance et une adaptation de nombreux éléments biotiques, en particulier forestiers, du système naturel local, comme les formations de forêt sèche qui couvrent de grandes superficies dans le nord du Pérou. La présence d'une forêt de mangrove serait, elle aussi, dépendante de ce phénomène (Linneweber 2002). Si de ce point de vue, il permet un accroissement temporaire de biomasse et donc s'avère bénéfique pour les populations (Hocquenghem et Ortlieb 1992), il s'accompagne aussi parfois d'aléas pouvant s'avérer destructeurs : inondations, apport d'eau provoquant des chocs osmotiques chez des espèces végétales halophiles, enfouissement sous des sédimentaires. Durant l'épisode de 1982-83, la thermocline s'est enfoncée à partir d'octobre 1982 et les températures ont augmenté de 6,2 °C en surface et de 9 °C à 50 m de profondeur (Rodbell *et al.* 1999). Ceci a entraîné de violentes précipitations de convection de la zone côtière jusqu'à une altitude d'environ 3000 m, provoquant des crues soudaines de tous les cours d'eau côtiers.

2000 mm, le record annuel étant de 3174 mm lors du Niño de 1983, et le record mensuel de 1708 mm. En se basant sur des analyses sédimentaires et une datation par spectrométrie de masse par accélérateur, Rodbell *et al.* (1999) ont aussi mis en évidence un accroissement de la fréquence du phénomène au cours du temps. Au cours des 17^{ème} et 18^{ème} siècles, Hocquenghem et Ortlieb (1992) ont relevé les événements majeurs El Niño ayant affecté la côte péruvienne : 1624, 1686, 1701, 1720, 1728, 1747 et 1791. En dehors de ces années exceptionnelles, les précipitations oscillent entre 100 mm et 400 mm par an. Pour la station météorologique de Tumpis, localisé à mi-chemin entre Zarumilla et Tumbes, la moyenne des précipitations annuelles entre 1987 et 2006 est de 457 mm. Durant la même période, l'évaporation moyenne annuelle mesurée est de 1542 mm. Les températures sont tropicales, elles oscillent entre 30 et 34 °C durant l'été (février à avril) tandis que les minima sont atteints entre juin et août, autour de 19 °C, pour une moyenne annuelle de 24 °C. Au vu de ces données et si l'on s'en réfère à la classification climatique de Köppen, le climat local est de type BSh², c'est-à-dire semi-aride. Dans un tel contexte, l'irrigation est nécessaire pour allonger la période culturale et permettre un cycle végétatif complet.

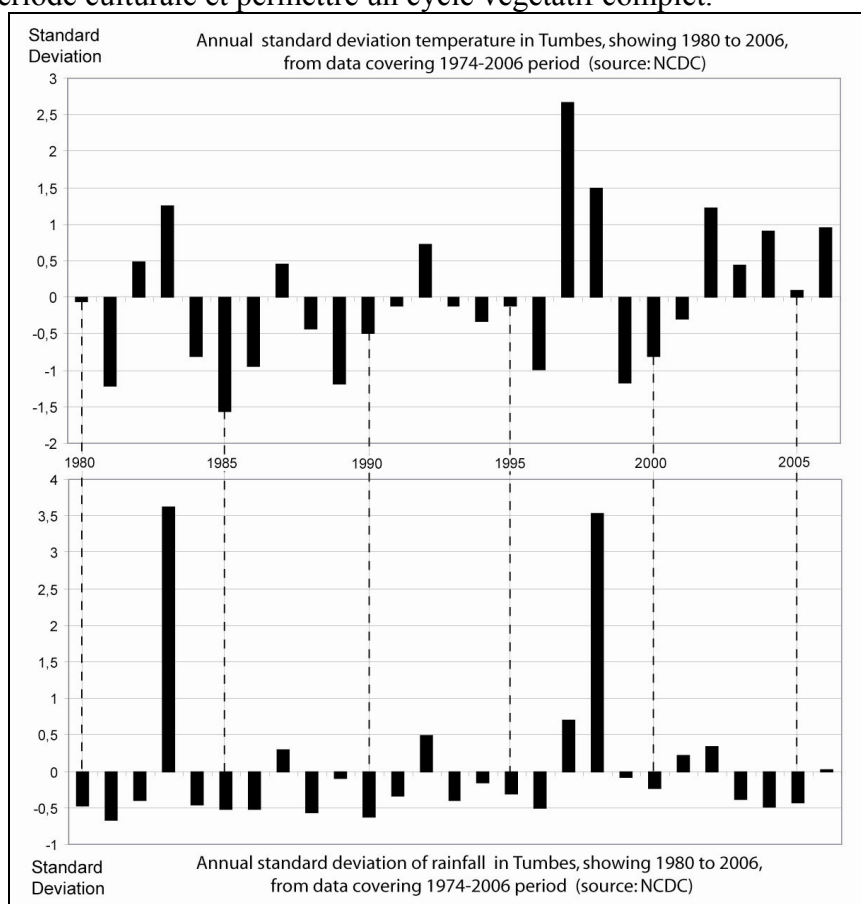


Figure introduction Pérou 2 - Ecarts-types des températures et des précipitations moyennes annuelles

Hydrologie

Les deux cours d'eau principaux sont le Tumbes, qui passe par la ville du même nom, et le Zarumilla, qui s'écoule à proximité de la frontière équatorienne. Le Tumbes prend sa source en Équateur, dans les montagnes de Zaruma, localisées dans les Andes occidentales équatoriennes. Sa longueur est de 180 km, dont 130 km en territoire péruvien. Le régime des

² Le B indique un climat sec avec une évaporation supérieure aux précipitations, le S un régime pluviométrique de type steppique, et le h une température moyenne annuelle supérieure à 22 °C. On retrouve des climats de classe identique en Australie, en Espagne (Murcia), à Hawaï ou encore en Namibie.

débits est monomodal. Au cours de l'année, le débit du fleuve fluctue entre un maximum atteint durant la saison des crues (mars-avril), environ 330 m³/s, et un minimum durant les périodes d'étiage (septembre à novembre), aux alentours de 25 m³/s (station El Tigre sur une période de 39 ans : 1963-2002) (Figure introduction Pérou 3). La période d'étiage s'inscrit sur plusieurs mois du fait des faibles précipitations et des ponctions réalisées à des fins d'irrigation. Durant cette période, la plupart des cours d'eau littoraux sont à sec³ et le Tumbes est le seul qui fasse exception. Des débits très élevés accompagnent les épisodes El Niño : 4558 m³/s enregistré le 12 avril 1965 et 2500 m³/s enregistré le 13 février 1998 (Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI 2002). Ce sont toutefois des extrêmes rarement atteints, la moyenne annuelle étant d'environ 120 m³/s. Le diagramme des moyennes annuelles (Figure introduction Pérou 4) nous montre d'importantes variations interannuelles. L'année El Niño de 1983 présente un pic très au-dessus du reste de la série avec une moyenne supérieure à 500 m³/s. Le Niño de 1997-1998 est moins marqué du fait qu'il soit à cheval sur les deux années et du fait d'une absence d'enregistrement durant 7 mois de l'année 1997. Les sédiments transportés par le Tumbes sont composé à 30% par des sables, à 65% par des limons et à 5% par des argiles (INEI 2000). Ce fleuve est le seul de toute la côte péruvienne à être navigable toute l'année. Son bassin versant est de 5656 km², dont 1885 km² seulement au Pérou. Le fleuve Zarumilla, qui est le plus septentrional du pays, a un bassin versant de taille plus réduite, environ 1800 km². Il se jette dans le chenal nommé Algarrobo, à proximité des eaux du golfe de Guayaquil, après un parcours de 50 km dont une grande partie correspond à la limite administrative entre le Pérou et l'Équateur. Il est à sec la majeure partie de l'année. En amont de Zarumilla, une partie de ses eaux s'infiltrent et alimentent une nappe phréatique. Une étude conduite par le département péruvien des ressources naturelles (INRENA) a eu comme objet les ressources hydrogéologiques de la région. L'étude a révélé la présence de cinq unités hydrogéologiques : affleurements rocheux, dépôts alluviaux, dépôts alluvio-colluviaux, terrasses marines et dépôts marins récents. L'aquifère le plus exploité correspond aux dépôts quaternaires constitués principalement de sable et de limons⁴. L'aquaculture exploite les eaux souterraines presque exclusivement par le biais de puits tubulaires ce qui s'explique par la présence de métaux lourds dans les eaux fluviales, notamment du Tumbes⁵.

³ Le fleuve Zarumilla a été à sec entre 1995 et 1997. C'est durant cette période que l'irrigation par pompage des eaux souterraines a pris son essor. Cette période correspond à la période précédent El Niño de 1998.

⁴ Parmi les modes d'extraction principalement utilisés, on relève les puits tubulaires, d'une profondeur moyenne de 20 à 40 mètres (et jusqu'à 90 m), et des puits ouverts d'une profondeur de 2 à 10 m (jusqu'à 25 m). Les premiers exploitent les aquifères profonds tandis que les seconds exploitent les nappes phréatiques. L'utilisation principale est l'irrigation, suivie par les usages domestiques (respectivement 364081 m³ et 343902 m³). L'étude révèle aussi que les niveaux piézométriques dans la vallée du Tumbes s'échelonnent entre 0,8 et 18 mètres. La conductivité des eaux varie entre 0,3 dS/m et 1,77 dS/m, ce qui représente un degré faible à modéré de sels dissous. Les rendements des puits sont variables : entre 20 et 50 l/s pour les puits tubulaires et de 2 à 13 l/s pour les puits ouverts.

⁵ En effet, dans la partie équatorienne amont du bassin versant du Tumbes, plusieurs gisements d'or sont exploités et constituent des sources polluantes de cyanure, mercure et de divers métaux. Cependant, les impacts du cyanure se limitent aux environs de la source d'émission tandis que l'alcalinité des eaux permet une adsorption importante des métaux lourds avec les sédiments, de sorte que les contaminants métalliques ne se déplacent pas en solution mais avec les sédiments (Tarras-Wahlber et al. 2001). Certaines études ont montré toutefois que les concentrations de cyanure excèdent les concentrations permises, en particulier durant la saison sèche, et que les impacts des contaminants sur la vie aquatique sont réels, caractérisés par une réduction des genres et des espèces jusqu'à l'amont immédiat de Tumbes (Tarras-Wahlber et al. 2001). De plus, ces métaux sont bio-disponibles et sont donc susceptibles de s'accumuler dans les tissus des organismes aquatiques. D'autres études ont révélé la présence d'arsenic, de plomb, de cadmium, de cuivre et de zinc dans les eaux du Tumbes.

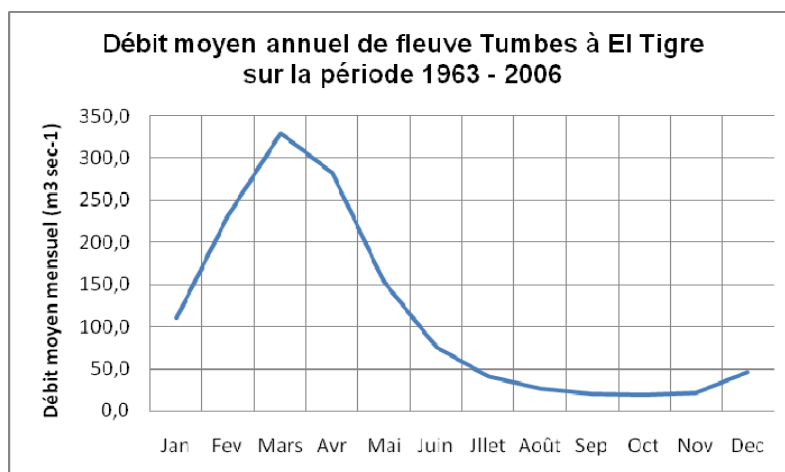


Figure introduction Pérou 3 - Diagramme des débits moyens annuels du fleuve Tumbes à la station El Tigre entre 1963 et 2006 (source : Ministerio de agricultura)

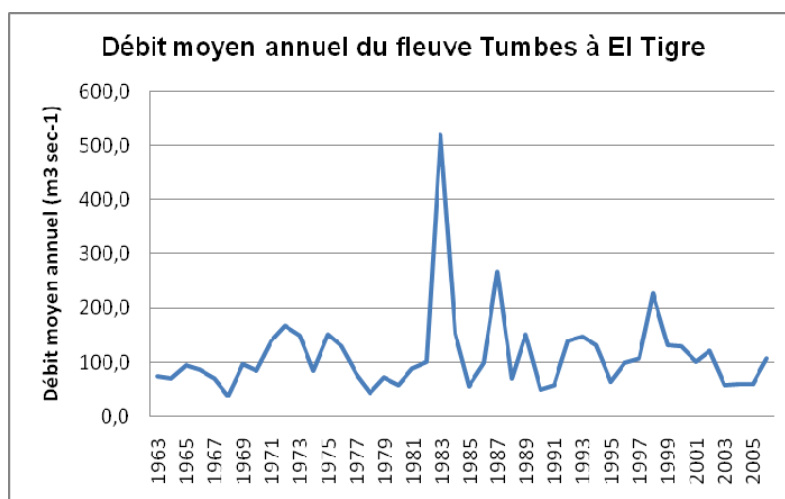


Figure introduction Pérou 4- Diagramme du débit moyen annuel du fleuve Tumbes à la station El Tigre entre 1963 et 2006 (source : Ministerio de Agricultura)

L'histoire des territoires

Les éléments historiques et archéologiques connus jusqu'ici permettent de reconstituer de façon partielle seulement l'histoire du territoire local. On dispose néanmoins d'informations sur la place qu'occupait Tumbes durant le règne Inca⁶ et au début de la période espagnole.

Des populations étaient établies à Tumbes bien avant l'arrivée des Espagnols en 1528, et bien avant même l'asservissement du continent par les Incas. Des indices archéologiques attestent ainsi la présence de populations durant l'époque pré-céramique et céramique dans cette partie du Pérou⁷ (Hocquenghem 1998). Les peuples établis à Tumbes et aux alentours étaient appelés les Tumpis. L'origine de ces populations est encore débattue. Certains soutiennent qu'ils sont originaires du sud du continent tandis que d'autres pensent qu'ils viennent d'Amazonie (INEI 2002). Historiquement, cette culture fut rattachée successivement à la

⁶ On sait aussi que plus au nord, en Équateur, les Incas pratiquaient la mariculture il y a 400 ans par obstruction de la communication entre les lagons et la mer afin de confiner les eaux renfermant des post-larves (PL) de crevettes (Twilley 1989).

⁷ La période céramique dans cette partie de l'extrême nord du Pérou débute avec la civilisation Mochica autour de 100 ap. J.-C. alors que généralement la période céramique se réfère à la période qui débute à -1000 av. J.-C., correspondant au début des céramiques en Amérique du sud, durant la civilisation Cupisnique. La période pré-céramique concerne elle la période 1800-1000 av. J.-C. (Hocquenghem 1991).

civilisation Mochica puis au Grand Chimu avant d'être intégrée à l'Empire Inca à partir du règne de Pachacutec, c'est-à-dire entre 1438 et 1471. C'était une population tournée vers la mer qui comprenait, outre des agriculteurs et des artisans, de nombreux navigateurs (Arce 1976). Les moyens de navigation étaient constitués de radeaux surmontés par des voiles de coton qui permettaient de parcourir des distances de quelques kilomètres. Durant l'époque Inca, le long du fleuve Tumbes furent ainsi construits deux canaux de 140 kilomètres de long qui permettaient, en leur temps, d'irriguer 150 000 ha dans les bas-fonds du fleuve. Les premiers systèmes d'irrigation sont pourtant plus anciens. On sait que dans cette partie du Pérou, l'irrigation date de la fin du pré-céramique, peu avant que se développe la culture du maïs (Hocquenghem 1998). Le long du Tumbes, l'irrigation était une nécessité pour satisfaire les besoins d'une population estimée à 80 000 habitants durant le règne Inca, auxquels il fallait ajouter les besoins des nombreux militaires en poste le long des routes (Arce 1976). Les populations exploitaient aussi les produits de la mangrove et pratiquaient l'agro-sylvo-pastoralisme dans les forêts sèches (INRENA 2007).

Les échanges économiques entre Tumbes et les Andes étaient très nombreux. En attestent les nombreux restes de coquillage trouvés sur les sites archéologiques andins (Hocquenghem et Pena-Ruiz 1994). Les transactions concernaient d'autres ressources littorales telles que le poisson séché, les algues, qui s'échangeaient contre des ressources non disponibles localement tel que les minéraux, la laine ou les plumes (Arce 1976). Les coquilles de mollusques (*Spondylus princeps*, *Spondylus calcifer*, *Anadara frandis*, *Ostrea*, *Strombus peruvianus*, *Conus fergusonii*) et d'escargot étaient les objets de transaction à la plus haute valeur marchande. Certains restes d'espèces du genre *Anadara* ont été retrouvés dans des sites pré-céramiques des montagnes d'Amotape, au sud de Tumbes, attestant de sa fonction ancienne, celle de monnaie d'échange (INRENA 2007). Ces ressources étaient, en effet, considérées comme des biens ayant une valeur d'échange élevée. Elles étaient considérées comme des objets d'offrandes par les peuples andins et en particulier les Incas (Hocquenghem et Peña Ruiz 1994). Ces mollusques vivent aujourd'hui dans les eaux chaudes qui bordent Tumbes et plus au sud, là où les eaux se refroidissent sous l'effet du courant de Humboldt, au niveau de Mancora, ainsi qu'au sein de la mangrove de Tumbes. Le plus important d'entre tous est *Spondylus princeps* (appelé *mullu* par les Incas, l'aliment des ancêtres) qui est un objet cérémonial (Hocquenghem et Peña Ruiz 1994)⁸.

Sous le règne Inca, Tumbes avait donc une position stratégique : c'était à la fois un port dans lequel mouillait la flotte Inca et une ville reliée à la route royale qui joignait Cuzco à Quito. Le port était un port de commerce qui permettait des transactions avec le nord du sous-continent et l'Amérique centrale.

Peu après l'arrivée des Espagnols, un chef local, Chilimasa, s'opposa à Pizarro et à ses hommes. Il ne fut vaincu qu'après l'arrivée d'un contingent espagnol en provenance de Panama. Le combat a eut lieu dans la mangrove, ce qui conféra à la bataille le nom de *Bataille de la mangrove*, celle-ci ayant aidé à prolonger la résistance pendant 15 jours (Arce 1976). Alors que les Espagnols sont arrivés dans une contrée avancée sur le plan technique, en peu de temps, la population indigène a été décimée par les maladies ; les zones de cultures ont été abandonnées et l'organisation sociale, culturelle et économique, ainsi que les modes de gestion des ressources, se sont peu à peu démantelés (INRENA 2007). Durant cette colonisation espagnole, certains témoignages rendent compte de l'environnement naturel de Tumbes. Le fleuve était alors qualifié de *crystallin*, peuplé de nombreux caïmans et longé par de *majestueux* arbres, tandis que les cultures principales étaient le maïs, le riz, le cocotier ainsi

⁸ Un atelier de taille était situé près de l'ancien Tumbes, sur la rive gauche de l'actuel fleuve. Ils étaient taillés selon des formes anthropomorphiques, zoomorphiques et phytomorphiques ; certains dans l'atelier de Cabeza de Vaca à proximité de l'ancien Tumbes, ce qui conférait à cette dernière un statut particulier dans l'empire Inca, souligné par la connexion établie par une route entre la ville et la route de l'Inca, reliant Cuzco à Quito.

que des vergers, en particulier d'orangers (Arce 1976). Les palétuviers étaient aussi appelés *arbol a ostras*, littéralement arbres à huîtres ; lesquels bivalves avaient alors une valeur à la fois alimentaire et marchande.

Plus tard, au début du 19^{ème} siècle, on utilisait la monnaie équatorienne à Tumbes, reflétant les échanges nombreux avec l'Équateur et en particulier Guayaquil. Il y avait encore peu d'industries développées, à part celles du pétrole et du tabac (Arce 1976). Plus tard, pour développer la zone et en particulier l'activité portuaire et le cabotage, il fut décidé de construire une ligne de chemin de fer, inaugurée en 1908, et reliant Tumbes au village de pêcheurs de Puerto Pizarro. Ce dernier ne commença à être peuplé qu'à partir de 1904. Le lieu était nommé précédemment *palizada*, faisant référence aux troncs et branches charriés et déposés lors des épisodes pluvieux. La voie ferroviaire a été interrompue en 1948 en raison de son inefficacité, mais a contribué à la pérennisation du village de Puerto Pizarro, qui existe encore aujourd'hui.

À partir du premier quart du 20^{ème} siècle, la culture du tabac commença à péricliter en raison des fort taux d'imposition et du faible potentiel économique. Le riz et la banane ont ainsi peu à peu commencé à se développer. Un pas décisif de ce développement a été franchi en 1941 lorsqu'un système d'irrigation a été élaboré, irriguant 4721 hectares grâce à la déviation (située juste à l'amont de Tumbes) d'une partie des eaux du fleuve Tumbes sur la rive gauche. Sur le plan agricole, la réforme agraire de Velasco a été localement mis en application en 1974, cinq ans donc après avoir été promulguée au niveau national.

Ce bref historique a permis de rendre compte des différentes influences culturelles qui ont affecté le territoire de Tumbes, espagnoles, équatoriennes (particulier *guayaquileñas*), andines et plus récemment liméennes, et d'identifier quelques unes des principales activités économiques. Ceci permet ainsi de se représenter les espaces avec lesquels la région de Tumbes est historiquement, culturellement et économiquement liée. On a pu aussi constater que l'intégration de Tumbes aux différents empires, sa capacité de résistance et d'adaptation, mais aussi l'accession à un statut de ville d'importance est due pour partie à ses ressources à la fois nombreuses et uniques ainsi qu'à sa localisation. Ses ressources malacologiques uniques (*Spondylus princeps*) lui ont permis d'acquérir le statut de place incontournable dans l'empire Inca. A d'autres moments, les ressources l'ont desservi. L'entrée des Espagnols sur le continent par le port de Puerto Pizarro trouve en effet une partie de son explication dans la configuration de la côte. Plus tard, l'attraction d'investissements nationaux et surtout internationaux (États-Unis) s'explique par la présence de ressources telle que le pétrole, dont l'exploitation démarra en 1862 pour s'achever en 1940 avec la fermeture de la raffinerie de Zorritos. Enfin, sa localisation à proximité de l'Équateur en fait une ville stratégique, d'autant que la situation entre le Pérou et l'Équateur a parfois connu des moments de tensions, en particulier en 1941 et en 1995.

Organisation politique et démographie

L'indépendance du pays a été proclamée le 14 janvier 1821. La municipalité de Tumbes a été créée le 2 janvier 1857, puis la province le 20 décembre 1901, et enfin le département en 1942, au lendemain de l'affrontement avec l'Équateur. Tumbes est aujourd'hui un des 25 départements péruviens et a son propre gouvernement régional depuis 2003. La présence d'un gouvernement est liée à la volonté politique au niveau national d'augmenter l'autonomie régionale.

Le département est composé de trois provinces : Zarumilla, Tumbes et Contralmirante Villar, et 12 districts. Au recensement de 2005, le département était peuplé de 191 713 habitants (0,73 % de la population nationale) pour une superficie de 4669 km² (0,36 % du territoire national), ce qui en fait un département densément peuplé (41 hab/km²) au regard de la

moyenne nationale (20 hab/km²) (INEI)⁹. Le taux de croissance annuel, bien qu'ayant régulièrement diminué au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle reste élevé, supérieur à 2% en 2001, ce qui représente un gain annuel de plus de 4400 personnes.

La province de Tumbes est la plus peuplée du département. Cela s'explique par la présence de la capitale qui, à elle seule, réunit plus de la moitié de la population régionale. Vient ensuite la province de Zarumilla, qui profite de sa situation frontalière avec l'Équateur voisin. Entre 1981 et 2005, l'augmentation brute de la population départementale a été de 83 649 habitants, soit une augmentation de 77%. Plus de 67% de cette population supplémentaire a été absorbée par la seule province de Tumbes. Une échelle d'observation plus fine peut nous apporter des informations plus détaillées. L'analyse à l'échelle du district permet, par exemple, d'identifier plus précisément les zones qui ont vu leurs populations augmenter durant les dernières décennies. Parmi les douze districts du département, six nous intéressent particulièrement ; il s'agit de ceux qui sont localisés à proximité de Tumbes, tous en contact avec le littoral : La Cruz, Corrales, Tumbes, Papayal, Aguas Verdes et Zarumilla. On y relève des taux de croissance bien plus élevés que pour les autres districts (Casitas a même un taux de croissance négatif). La population a doublé dans les districts hors zone d'étude tandis qu'elle a triplé dans les districts de la zone d'étude. Notons que le seul district de Zorritos, situé hors de la zone d'étude mais sur le littoral, compte pour 44% de l'augmentation du total hors zone d'étude. Dans les districts de la zone d'étude, les densités sont plus de 20 fois plus élevées que dans le reste du département, respectivement 225 et 10 hab/km². Des six districts étudiés, seul celui de Papayal a une densité relativement faible, de 25 hab/km². Les densités les plus fortes se trouvent dans le district de Tumbes, avec des valeurs avoisinant les 600 individus au km². La ville de Tumbes est, en effet, la seule agglomération de population d'importance de tout le département et cumule en conséquence de nombreuses fonctions, administratives, économiques et éducatives. Ces données démographiques mettent en lumière une dualité entre le littoral et l'hinterland. Si l'on examine les taux de fécondité, on constate qu'ils sont plus faibles sur la côte qu'à l'intérieur des terres. La croissance démographique n'est donc pas le fait de l'accroissement naturel mais s'explique principalement par le solde migratoire positif, double conséquence de l'attractivité économique du littoral et de l'exode rural de l'hinterland. Comme c'est le cas pour le pays dans son ensemble, voire pour le continent, les taux d'urbanisation sont très élevés. Dans le département, la population urbaine rassemble 87,6% de la population régionale, dont une importante majorité se concentre dans les villes de Tumbes, Aguas Verdes et Zarumilla. Cette sur-représentation de l'habitat urbain transparaît dans la proportion des emplois tertiaires, qui est parmi les plus élevées du pays et qui est donc la marque d'une société de services.

L'agriculture

Les systèmes agricoles ont évolué au cours du temps. Si la riziculture est aujourd'hui dominante, cela n'a pas toujours été le cas. La riziculture s'est en effet développé sur le tard, prenant le relais de la culture du tabac lorsque celle-ci n'était pas ou très peu rentable. La banane a été introduite aussi dans la seconde moitié du 20^e siècle et présente une dynamique d'extension bien moins marquée que celle du riz.

En ce qui concerne la riziculture, principale culture de la zone, on compte de manière agrégée 6963 exploitations qui occupent 31558 hectares (soit une moyenne de 4,53 ha). Plus de 68 % de ces fermes sont localisées dans la province de Tumbes, 26,5 % à Zarumilla, et 5 % seulement à Contralmirante Villar. La structure foncière est de type *minifundio*, c'est-à-dire constitué de toutes petites exploitations. En effet, les données officielles nous révèlent que 61 % des fermes ont une taille inférieure à 3 ha, 33 % entre 3 et 9,9 ha, et donc seul 6 % d'entre

⁹ Instituto Nacional de Estadística Informatica

elles ont une aire supérieure à 10 ha (Ministerio de la Agricultura). Plusieurs facteurs permettent d'expliquer cette distribution de la terre : la réforme agraire tout d'abord, qui a consisté à redistribuer la terre aux *peones*, c'est-à-dire aux ouvriers agricoles travaillant dans les *haciendas*, unités caractéristiques des structures foncières en *latifundio* ; ensuite, le mode de transmission privilégié des terres, c'est à dire l'héritage par subdivision. Ces deux facteurs conjointement permettent d'expliquer le niveau de fragmentation élevé des terres.

L'importance de cette activité dans l'économie du département se mesure par le nombre de jours de travail, qui s'élève à 840 000 par an. Si l'on considère qu'une année pleine comporte 250 jours de travail, cela correspond à du travail à l'année pour 3360 personnes. La distribution de ces jours de travail ne se fait toutefois pas sur l'année complète, ce qui augmente le nombre d'emplois saisonniers.

Au regard des chiffres sur les superficies agricoles, on peut qualifier la décennie 1990 d'âge d'or de la riziculture à Tumbes. Durant celle-ci, les superficies ont augmenté de 51%, la production de 84% et les rendements de 76% (Ministerio de Agricultura). Encore récemment, la superficie a augmenté grâce à la pose de nouveaux systèmes d'irrigation sur la rive droite du fleuve (Puerto El Cura). Plusieurs facteurs permettent de comprendre cette situation. Certains ne sont pas liés directement à la riziculture. Pour partie, celle-ci bénéficie des pertes du secteur de la banane occasionnées durant les phénomènes El Niño. Ainsi, plusieurs cultivateurs de banane, après la destruction de leurs cultures, passent à la riziculture pour des raisons de coûts de production et de retours sur investissement plus sûrs dans le cas du riz.

Une autre explication tient à l'utilisation quasi systématique durant la petite campagne (Figure introduction Pérou 5) de semences améliorées et certifiées (IR-43). Ceci a permis des augmentations de productions du simple fait que jusqu'à la récolte en 1989, une seule culture de riz était pratiquée de janvier à avril en rotation avec du soja, alors que la campagne 1989-1990 vit pour la première fois une double culture annuelle (Inrena 2007). Toutefois, les coûts supplémentaires associés à la culture de ces variétés pour pallier aux maladies et aux nuisibles rendent l'utilisation de ces semences coûteuses. Durant le premier cycle, aussi appelé *gran campaña* (grande campagne), seuls sont utilisées les variétés traditionnelles qui ont les faveurs des agriculteurs en raison de leur prix car les consommateurs sont sensibles à leur goût. On a dit que les rendements moyens s'étaient largement accrus durant la décennie 1990. Ils sont aujourd'hui, en moyenne, supérieurs à 7,45 t/ha/ cycle. Bien que les prix à la sortie du champ n'aient cessé d'augmenter, passant de 0,2 à 0,8 sol/kg. L'augmentation parallèle des coûts n'a pas provoqué une augmentation significative de la rentabilité.

Du fait d'une distribution erratique de l'eau, dans le temps et dans l'espace, environ 90% des exploitations sont irrigués. L'irrigation se fait, soit par l'intermédiaire de pompes (le plus souvent à diesel et beaucoup plus rarement électriques) qui pompent les eaux du fleuve, soit par l'intermédiaire des canaux de dérivation. Le principal canal de ce type est situé sur la rive gauche, le canal *Bocatoma del Caserio La Peña* dans le district de San Jacinto, d'une longueur de 24,5 km et d'un débit potentiel de 8 m³/s qui permet d'irriguer 7000 ha par gravité. Outre le riz et la banane, ces systèmes d'irrigation offrent la possibilité de cultiver plusieurs variétés de fruits en légumes, à la fois dans les vallées mais aussi dans la plaine littorale.

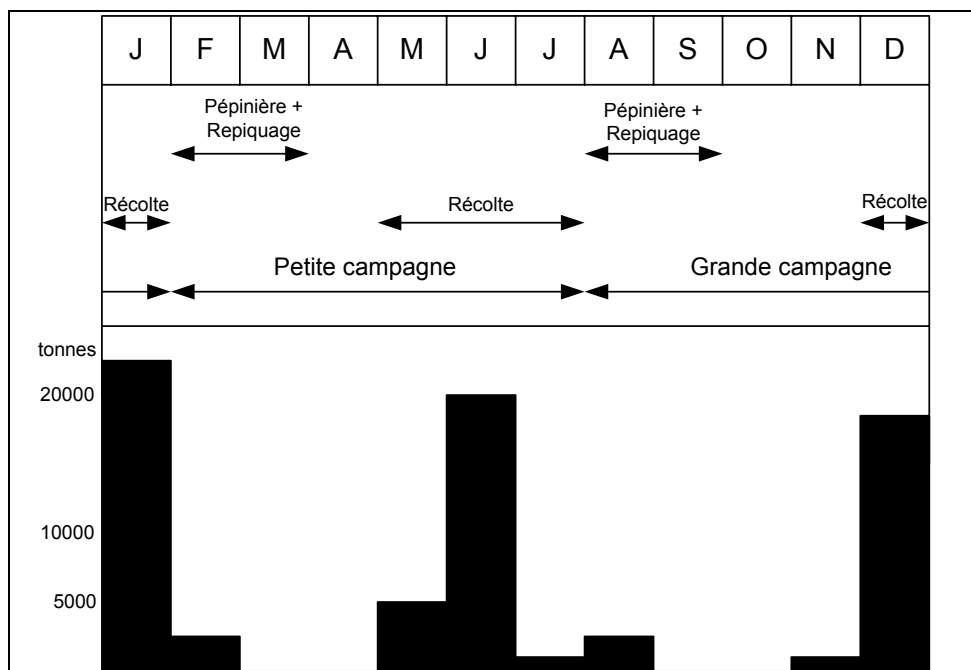


Figure introduction Pérou 5 - Calendrier agricole

| Superficie de riz semée (hectares) sur la période 1999-2003 | | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|-----|------|------|
| Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil |
| 3287 | 1884 | 106 | 0 | 0 | 502 | 2392 | 2445 | 155 | 5 | 2 | 335 |

Tableau introduction Pérou 1 - Superficies rizicoles

| Production moyenne de riz cargo (tonnes) sur la période 99-03 | | | | | | | | | | | Total | |
|---|------|-----|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | |
| 2566 | 140 | 0 | 1657 | 18498 | 23298 | 2743 | 2 | 2 | 4731 | 19129 | 1410 | 74176 |

Tableau introduction Pérou 2 - Productions rizicoles

La pêche

L'autre secteur primaire qui anime l'économie locale est le secteur de la pêche qui comprend la capture de poissons et de crustacés et la collecte de mollusques. Le département de Tumbes est le quatrième du pays en terme de volume de poissons capturés¹⁰, avec pour ports principaux Puerto Pizarro, Zorritos, Bocapan, Cancas, Punta Sal, Grau et La Cruz. Les variations interannuelles des volumes capturés sont très corrélées avec El Niño. En époque El Niño, les captures se raréfient du fait de l'arrivée d'eaux chaudes peu nutritives en provenance d'Asie du Sud-Est, qui provoquent une migration des poissons vers des eaux plus froides et plus riches en sels nutritifs. En 1992, par exemple, les captures se sont fortement raréfiées, et la part de l'activité dans le PIB départemental a fortement baissé, passant de 16,6 % en 1991 à seulement 5,4 % en 1992.

Les espèces capturées localement sont nombreuses. L'Instituto del Mar del Peru (IMARPE) en a recensé 74 qui sont exploitées commercialement le long du littoral de la province de Tumbes (dont 46 démersales et 28 pélagiques¹¹). Sur les 4231 tonnes débarquées en 2006, 88% étaient des espèces de poissons, 10% des espèces de mollusques et 2% des espèces de crustacés. Il n'y pas d'estimation fiable de la flotte dans le département. Afin de donner un

¹⁰ Après, en ordre décroissant, Piura, Ancash et Lima.

¹¹ Les espèces les plus représentées appartiennent aux familles suivantes : *Carangidae*, *Serranidae*, *Stromateidae*, *Scombridae*, *Alopiidae*, *Pomadasyidae*, *Centropomidae*, *Polynemidae*, *Sciaenidae*, *Lobotidae*, *Malacanthidae*, *Ophidiidae*, *Triakidae*, *Sphiridae*, *Mugilidae*.

ordre de grandeur, on sait par contre qu'il y a 250 embarcations enregistrées à Puerto Pizarro, toutes de type artisanale. Les embarcations de type industriel sont très peu nombreuses dans le département ; on n'en compte par exemple qu'une seule dans la province de Tumbes. Cela reflète en partie le manque d'infrastructures de transformation des produits de la pêche, concentrées plus au sud, autour de Chimbote ou de Paita. Les produits de la pêche à Tumbes sont ainsi préférentiellement échangés directement avec le consommateur. Le secteur de la transformation n'est pourtant pas totalement absent. Il y a, en effet, cinq usines de transformation et de stockage dans le département : trois à La Cruz et deux à Corrales, pour lesquelles les principaux produits sont la crevette d'élevage et les calamars (en provenance de Piura pour l'essentiel). A Puerto Pizarro, il y a 440 pêcheurs réguliers, ce qui fait de la pêche la principale source de revenu pour le village dont la population est évaluée entre 2000 et 3000 habitants. Dans le cas de la pêche dans la mangrove, l'INRENA estime la population de pêcheurs à plus de 100 (dont 60 pratiquent la capture de crabes, 50 la collecte de mollusques). On peut relever d'autres occupations en lien avec les ressources naturelles, comme celle du pâturage, d'ovins et surtout de caprins, toutes deux réalisées dans le cadre d'exploitations familiales la plupart dans les zones de forêts sèche ou dans l'*algarrobal*.

L'influence d'El Niño sur l'économie du département est très forte. En 1998, le taux de croissance du PIB départemental s'est réduit de 5%. Ce phénomène climatique affecte tous les secteurs économiques même si les activités du secteur primaire sont les plus affectées. En termes de PIB, les services sont le secteur le plus productif (environ 60% du PIB), suivi de la pêche (entre 10 et 15 % du PIB), de l'agriculture (entre 10 et 15 % du PIB également), de l'industrie (7 à 8 %) et de l'administration (7 %).

Chapitre 2 Cartographie des étangs aquacoles et des changements paysagers par télédétection

2.1 Utilisation de la télédétection et de la géomatique dans le domaine de l'aquaculture

Dans le domaine de l'aquaculture, l'information géographique est utilisée pour l'analyse, la gestion et l'aménagement. L'utilisation de la télédétection s'explique entre autres par les résolutions spatiale, temporelle et spectrale adaptées à l'étude des objets aquacoles. Elle s'explique aussi par la multiplication récente des images, multispectrales, hyperspectrales ou radar. En matière de gestion, on compte plusieurs intérêts tels que la possibilité de stocker et de manipuler une base de données comportant des données variées (par exemple le cadastre aquacole et des informations liées à la production), ou celle d'analyser les relations topologiques entre objets spatiaux. Dans le domaine de l'aménagement, l'apport principal de l'information spatiale réside dans son support d'aide à la décision. Les SIG sont en effet capable de traiter un nombre important de couches d'informations et de produire des supports cartographiques d'aide à la décision.

2.1.1 L'analyse

L'inventaire, ou cartographie, des ressources constitue le principal domaine d'application des recherches sur le milieu tropical littoral (Green et Mumby 2000). Il consiste à identifier et répertorier les ressources. Sa précision dépend des résolutions spatiale et spectrale des images utilisées. Les avantages de la télédétection sur les autres méthodes d'inventaire sont ses capacités d'acquisition synoptique et répétitive. L'inventaire permet de produire des cartes d'occupation du sol. L'intérêt de cartographier les ressources d'un territoire aquacole s'explique par :

- les interrelations écosystémiques et l'existence de services écologiques dont dépend l'aquaculture (par exemple la biofiltration fournie par la forêt de mangrove qui améliore la qualité des eaux et le recyclage des nutriments),
- l'apparition potentielle de conflits en cas de compétition pour l'accès aux ressources,
- les externalités aquacoles dont on peut vouloir estimer les impacts à travers l'état des ressources (état physiologie, superficies...).

L'analyse peut aussi concerner des séries temporelles. La difficulté principale du suivi temporel est de conserver la même qualité de détection des objets d'une image à l'autre. Ce type d'analyse renseigne sur la vitesse et la localisation des extensions aquacoles. La diachronie peut aussi concerner les ressources environnantes ce qui permet alors de caractériser les dynamiques paysagères.

Les études qui portent sur les modifications des paysages littoraux par l'aquaculture sont bien représentées dans la littérature scientifique (Terchunian *et al.* 1986, Green *et al.* 1996, Ruiz-Luna et Berlanga-Robles 1999, Dahdouh-Guebas *et al.* 2002, Alonso Pérez *et al.* 2003, Ruiz-Luna et Berlanga-Robles 2003, Bird *et al.* 2004, Tong *et al.* 2004, Hernandez-Cornejo *et al.* 2005, Muttitanon et Tripathi 2005, Binh *et al.* 2005, Thomas *et al.* 2005, Béland *et al.* 2006, Ramasubramanian *et al.* 2006, Thu et Populus 2007). La plupart des études ont cherché à évaluer les surfaces de mangroves détruites suite à la construction d'étangs. Certaines régions ont été plus étudiées que d'autres, telle que la Thaïlande, le Mexique, l'Équateur ou le

Vietnam. Les méthodes les plus utilisées sont la cartographie des occupations du sol puis la détection des changements. Dahdouh-Guebas (2002) a par exemple réussi à quantifier la réduction des aires de mangroves avant de tirer des conclusions sur la durabilité des systèmes aquacoles, en prenant en compte les services rendus par cet écosystème. Thu et Populus (2007) ont analysé les rythmes de déforestation de la mangrove au Vietnam entre 1965 et 2001. Outre cette approche quantitative, une approche qualitative, basée sur l'identification des facteurs explicatifs des changements (sociaux, historiques, politiques), a permis d'expliquer la dynamique constatée (Thu et Populus 2007). Ce travail supplémentaire vise à enrichir les résultats obtenus grâce à la télédétection en intégrant des facteurs qui ne sont pas extractibles des images satellites mais qui sont néanmoins nécessaires à l'interprétation des changements constatés.

2.1.2 L'aide à la décision

Le développement des outils d'aide à la décision est la double conséquence d'une complexification des problématiques, suite à la globalisation, et d'une disponibilité plus grande des données. Certains de ces outils utilisent la dimension spatiale, tels que les systèmes d'aide à la décision spatiale (Spatial Decision Support Systems - SDSS). Un DSS est un « système informatique, intégré, interactif et flexible, supportant toutes les phases de la prise de décision avec une interface agréable, des données et un savoir expert » (Fabbri 1998). Plusieurs DSS ont été développés en aquaculture (voir par exemple El-Gayar et Leung 2000) mais à l'échelle de l'exploitation le plus souvent. L'intérêt des SDSS est de rendre les décisions plus pertinentes grâce à la dimension spatiale. Alors que les DSS sont plutôt utilisés pour optimiser la gestion des exploitations, les SDSS sont destinés à améliorer la localisation des exploitations sur un territoire. Le couplage des bases de données spatiales avec des algorithmes de décision a ouvert la voie à des analyses intégrant les relations spatiales entre les phénomènes, la simulation des conditions futures, l'élaboration de scénarii (Stimson 2006). Les outils d'aide à la décision sont particulièrement utiles lorsqu'un problème complexe se pose : conflits, baisse de la production, dégradation environnementale, choix de localisation. La complexité des phénomènes rend difficile d'identifier à la fois les causes du problème et les solutions (Stimson 2006). Les SDSS ont précisément pour objectif d'aider à définir les problèmes, à produire et évaluer les résultats de décisions alternatives, et de sélectionner une des alternatives à partir de critères disponibles. Un des défis est de proposer des outils d'aide à la décision accessibles c'est-à-dire dont les résultats peuvent être compris et discutés par tous les acteurs, par exemple à travers des cadres participatifs.

Un des principaux problèmes en aquaculture est d'optimiser la localisation de nouvelles infrastructures aquacoles. Nath *et al.* (2000) ont identifié les enjeux liés à l'emploi plus systématique de l'information géographique ainsi que les moyens par lesquels le SIG peut se rendre utile à l'industrie aquacole. Le point de départ consiste à reconnaître que l'aménagement du territoire est un problème à résoudre (Beveridge *et al.* 1997), le problème étant l'affectation des ressources. Trop souvent en effet, le développement aquacole s'est fait sans organisation ni coordination produisant alors des erreurs de localisation suivies de conflits ou de mauvaises productions. Les conséquences des erreurs de localisation font dire à certains auteurs que ces erreurs sont le principal obstacle à la durabilité de l'aquaculture (Deb 1998, Rajitha *et al.* 2006, Kapetsky 2007). La sélection de sites adaptés est donc cruciale autant pour les exploitants pour assurer un niveau maximum de rentabilité que pour la société pour éviter les conflits (Kapetsky et Travaglia 1995).

Parmi les SDSS, les analyses multicritères (AMC) sont les plus fréquemment utilisées dans les travaux récents. Elles permettent d'évaluer des alternatives en présence d'un grand nombre de critères (Hossain *et al.* 2007). En aquaculture, elles permettent d'identifier les zones propices au développement aquacole. Ils sont considérés comme une alternative aux méthodes

d'évaluation économique traditionnelles, tel que l'analyse coûts-bénéfices ou les analyses du moindre coût (Fabbri 1998), et s'avèrent plus globales du fait qu'elles intègrent des contraintes écologiques et sociales. L'évaluation multicritères au sein d'un SIG aide donc à résoudre des situations conflictuelles au sein desquelles la dimension spatiale intervient dans le conflit entre les groupes ou les individus (Hossain *et al.* 2009).

Aguilar-Manjarrez et Ross (1995) ont réalisé un travail pionnier en la matière, avec pour objectifs l'évaluation de plusieurs plans de gestion des ressources et de résolution des conflits entre acteurs. Hossain *et al.* (2009) ont réalisé une AMC dans un SIG afin d'identifier les plans d'eau adaptés à l'élevage de carpes en fonction de facteurs biophysiques (sol, eau) et socio-économiques (infrastructures, distances, main d'œuvre) dans l'aire urbaine de Chittagong (Bangladesh). Salam *et al.* (2003) ont construit un modèle à partir de 36 critères (facteurs et contraintes). L'objectif du modèle était d'identifier les sites potentiels de développement de l'aquaculture en classant les pixels suivant leur aptitude, d'une très bonne aptitude à une inaptitude (*very suitable, unsuitable*). D'autres études ont employé des méthodes proches : Buitrago *et al.* (2005) dans le cas du développement de l'ostréiculture au Venezuela, Pérez *et al.* (2007) à propos du développement de l'aquaculture marine à Tenerife, Hossain *et al.* (2007) sur l'aptitude des sites adaptés à l'élevage de tilapia, Simms (2002) sur l'élevage de mollusques (*Mya arenaria*), Karthik *et al.* (2005) pour la crevetticulture en Inde. Une limite de ces travaux est de ne pas considérer les coûts d'opportunité, c'est-à-dire les coûts et l'utilité liée à un usage de l'espace autre que l'aquaculture. L'objectif de ces travaux est en effet d'accompagner le développement de l'aquaculture et non pas celui du territoire. L'avantage d'une activité plutôt qu'une autre n'est donc pas recherché. Seule l'aptitude de la zone à une occupation aquacole est estimée. Salam *et al.* (2003) comparent la rentabilité socio-économique de l'élevage de crevettes à celle d'autres élevages (tilapia) et à celle de la riziculture. Ce type d'approche comparative, bien que restreint encore au domaine agricole, devrait être plus systématique. De même les contraintes placées dans les modèles sont trop limitées. Elles se résument généralement à exclure la mangrove des sites potentiels. Les relations verticales et horizontales entre les écosystèmes ne sont pas prises en compte. On ne considère pas non plus des indices paysagers tels que le continuum, la fragmentation, la densité ou la succession. Adopter une vision holiste du territoire dans ces modèles devrait permettre d'identifier la totalité des bénéfices potentiels qu'apporte, par exemple, un plan d'eau à la société : aquaculture, irrigation, usage domestique et industriel, milieu récepteur d'effluent, purificateur, récréation, transport, régulation des flux de nutriments, habitat faunistique ou floristique (Yan *et al.* 1998). Les modèles ne prennent pas non plus en compte l'effet de l'ajout d'une nouvelle exploitation, qui pourtant change la donne et provoque de nouvelles contraintes sur le système. Chaque exploitation utilise, par exemple, des services écologiques pour le traitement biologique des eaux usées qu'elle rejette dans le milieu. Cet ajout devrait donc s'accompagner d'une augmentation des zones considérées comme non-développables car proposant les services en question. Les améliorations possibles sont donc encore nombreuses.

2.1.3 La gestion

L'information géographique peut aussi permettre de répondre à des problèmes qui s'inscrivent dans le court terme. La disposition d'une information spatialisée régulièrement actualisée permet de prendre une décision rapidement et d'optimiser la production, comme dans le cas de l'agriculture de précision. La rapidité du traitement de l'information doit s'accompagner de l'exhaustivité de la base de données (écologie, géomorphologie, occupation du sol, hydrologie, démographie, ethnobiologie, etc...). Sur ce point précis, les SIG ont prouvé leur capacité à intégrer des données de natures très diverses, qualitatives ou quantitatives, spatialisées ou non. Les outils d'aide à la décision décrits plus haut sont mieux adaptés au

moyen et long terme, en s'inscrivant dans une démarche d'aménagement à la différence de la gestion dont les enjeux se situent plutôt dans le court terme : conflits, production, pollutions, foncier. Pour Dahdouh-Guebas (2002), l'ensemble composé de la télédétection, des SIG et des relevés de terrain est un outil effectif de gestion du territoire. La télédétection est ainsi un outil qui permet de rendre compte de plusieurs de ces facteurs sous forme par exemple d'indices : biomasse, surface foliaire, concentration de l'eau en chlorophylle, salinité des sols... Cette liste est continuellement enrichie par les apports des nouveaux satellites et les nouveaux produits réalisés à partir des données issus de ces instruments.

En conclusion, l'information géographique est utilisée de manière croissante dans plusieurs domaines concernant le secteur aquacole. Les problèmes à résoudre sont encore néanmoins nombreux et liés au choix des échelles, à l'absence de vision holiste du territoire, à la qualité des données et aux méthodes.

2.2 Objectifs, nomenclature et choix des images

2.2.1 Objectifs

Les méthodes ont été développées en rapport à plusieurs questions initiales :

- Quelle est la variation dans le temps et dans l'espace des étangs aquacoles ? Comment et pourquoi les détecter ?
- Quels ont été les changements d'occupation du sol ?
- Quels ont été les impacts de l'aquaculture sur le milieu ?
- Quelles informations secondaires peuvent être déduites des cartes d'occupation du sol ?

Ces questions se réfèrent à deux échelles d'analyse : celle des systèmes aquacoles et celle du territoire, la première étant imbriquée dans la seconde. Pour pouvoir répondre à ces questions, trois sous-objectifs ont été identifiés : un inventaire des infrastructures aquacoles, la réalisation de cartes d'occupation du sol, et la production de cartes de changements d'occupation du sol grâce à la diachronie.

2.2.1.1 L'inventaire des infrastructures aquacoles

L'inventaire consiste à localiser les étangs d'élevage dans l'espace et à extraire des informations sur la géométrie des objets. La localisation spatiale de ces étangs revêt plusieurs intérêts. Elle permet tout d'abord de dévoiler une partie de la structure spatiale des espaces et donc les interactions horizontales. La gestion est le principal champ concerné par ce type d'information. Pour des questions plus politiques, il faut prendre en compte la trame spatiale administrative, c'est-à-dire considérer les limites administratives à l'intérieur desquelles les étangs se localisent. Choisir comme cadre spatial d'analyse une unité administrative peut s'avérer pertinent dans la mesure où les données gouvernementales sont souvent produites à l'échelle des unités administratives, ce qui facilite alors les recoupements d'informations. Une analyse des étangs en fonction des unités administratives peut faciliter le travail des gestionnaires, d'abord intéressés par ce qui se produit dans les limites de leurs juridictions. La richesse des informations produites sera fortement accrue par l'intégration de données annexes telles que celles qui sont liées à l'occupation du sol.

2.2.1.2 Occupation du sol

Les cartes d'occupation du sol révèlent plusieurs types d'informations. L'occupation du sol correspond aux états de surface (par exemple forêt dense, savane, bâti peu dense, etc.) tandis

que l'utilisation du sol se réfère à la classification des espaces dans le système anthropique (par exemple forêt domaniale, forêt classée, espace périurbain, etc.). Dans le premier cas, la sémantique est structurelle, alors qu'elle est fonctionnelle dans le second cas. Les résultats des traitements d'images en télédétection permettent d'obtenir des informations sur la couverture du sol en s'appuyant sur une nomenclature composée d'éléments dont on connaît la signature spectrale. Le passage à des cartes d'utilisation du sol nécessite une seconde interprétation qui passe par une connaissance accrue du terrain. En recoupant les informations des cartes produites avec des informations d'une autre nature : climat, pratiques agricoles, types de sols, etc., il est possible de déduire d'autres informations. Sur un espace donné, lorsque les données météorologiques sont connues et font état d'une sécheresse hydrique devant entraîner des stress hydriques chez les végétaux, l'observation d'un couvert végétal à forte activité chlorophyllienne permet alors de déduire soit la pratique d'une irrigation, soit la présence de réserves souterraines. Par un raisonnement logique sur les relations de cause à effet, il est donc possible d'obtenir des informations secondaires. Certaines de ces informations peuvent être utilisées comme indicateurs environnementaux : relation entre la présence de plantes invasives et la pollution aquatique, entre l'érosion et la dégradation des sols, entre la réduction d'une couverture végétale et la baisse des aquifères, etc. On peut aussi analyser et évaluer les répercussions des politiques publiques (aménagement du territoire) ou des décisions individuelles sur le milieu, *a fortiori* lorsqu'on peut précisément dater ces dernières. Le spectre d'exploitation des cartes d'occupation du sol est donc d'autant plus grand que ne l'est la connaissance d'un territoire.

2.2.1.3 Diachronies

La diachronie permet de constater les changements à partir d'un couple de cartes. On peut choisir de les réaliser sur des temps plus ou moins courts. Sur un temps long, cela permet de mettre en évidence les tendances principales tandis qu'une diachronie réalisée sur un pas de temps plus court permet de révéler des changements plus subtils. Notre emploi de la diachronie se justifie ici par le fait que le milieu littoral est le lieu de nombreuses interactions entre des phénomènes terrestres et marins qui s'inscrivent dans des temporalités très variées (Bodiguel 1997). La houle, les marées, les retraits de nappe, les surcotes, le transfert sédimentaire s'inscrivent dans des temporalités et à des fréquences différentes. En cas d'évènements extrêmes liés au passage d'un cyclone, des pluies de mousson ou d'un tsunami, la configuration littorale peut radicalement changer dans un court laps de temps. Le paysage littoral compte donc parmi les paysages les plus changeants qui soient. À ces évènements naturels s'ajoute l'anthropisation du milieu, conséquence de l'attrait grandissant du littoral. Les changements d'origine anthropique se multiplient et, dans certains cas, amplifient ou atténuent certains phénomènes naturels (érosion, transfert sédimentaire, etc.). Les analyses diachroniques permettent d'identifier et de quantifier ces changements qui doivent être, par la suite, expliqués à travers des chaînes de causalité.

2.2.2 Le choix des images

Pour répondre aux objectifs initiaux, le choix des images doit être le plus pertinent possible. La sélection qui s'opère doit considérer (i) la date d'acquisition, (ii) la résolution spatiale, (iii) la résolution spectrale, et (iv) l'emprise spatiale de l'image.

Une première exigence était de disposer d'images couvrant une période la plus longue possible et à des saisons différentes. La seconde exigence était de disposer d'images dont la résolution spatiale (taille des pixels) permette la reconnaissance des étangs aquacoles qui ont des tailles variables, d'une exploitation à l'autre et d'un site à l'autre, mais qui oscillent entre moins d'un hectare à plus de 100 ha. Les photographies aériennes et les images

multispectrales à moyenne, haute et très haute résolution (Landsat MSS, TM, ETM+, SPOT5) sont les meilleures candidates. L'exigence spectrale est de couvrir le visible et l'infrarouge. Enfin, le dernier critère de sélection est lié à l'emprise spatiale des images, qui devaient couvrir totalement la zone d'étude. Cette dernière a été délimitée en définissant un masque d'étude. Restreindre les analyses à une zone d'étude permet de réduire les temps de traitement et d'améliorer la précision des résultats. Les éléments qui ont servi à délimiter la zone d'étude sont : la frontière avec l'Équateur au nord, la route panaméricaine à l'est et au sud, et la mer à l'ouest. Ces choix se justifient différemment. Les limites administratives, qu'elles soient inter ou intra-étatiques, ne correspondent pas toujours à des discontinuités biophysiques. Certains écosystèmes ou géosystèmes¹ peuvent ainsi être séparés par des frontières humaines qui impliquent des modes de gestion et des décisions d'aménagement du milieu différents, influant sur la dynamique des paysages. L'appartenance d'un site à une entité administrative engendre ainsi une spécificité des dynamiques spatiales et temporelles observables. Aussi, la zone d'étude voit se prolonger au nord les écosystèmes de mangrove dans un continuum biophysique alors que l'on change de contexte national. Ce changement s'exprime à travers des cadres normatifs, sociaux, culturels et économiques différents, qui de concert, affectent le développement de l'aquaculture et l'évolution des territoires. Si ces facteurs ne sont pas les seuls à conditionner les changements paysagers observés, ils sont toutefois assez nombreux pour engendrer des particularismes. Du fait que le travail de terrain n'ait été réalisé que du côté péruvien, la frontière internationale a donc servi de limite septentrionale à notre zone d'étude. Le choix de la panaméricaine se justifie par la séparation géomorphologique et biogéographique dans lequel cet axe s'inscrit, entre un littoral aux ressources abondantes, pour la plupart exploitées par l'homme, et des formations végétales (savane herbacée, forêt sèche, *algarrobal*), à l'intérieur des terres, aux ressources limitées.

Le jeu d'images sélectionné comporte des données issues à la fois de capteurs embarqués depuis des satellites et des avions. Les images satellites couvrent l'ensemble de la zone d'étude. En ce qui concerne les photographies aériennes, un jeu de photographies acquises en 1962 a été obtenu auprès des services des Forces Armées Péruvienne de Las Palmas. Ce jeu couvre l'ensemble de la zone. Les images satellites obtenues proviennent de quatre capteurs différents : Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM) et Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), tous trois sur des satellites Landsat², et le capteur Haute Résolution Géométrique (HRG) équipant le Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT 5)³. Le jeu complet de données satellitaires se compose ainsi de trois images MSS, une image TM, deux images ETM+, et trois images SPOT 5 acquises entre 1977 et 2007, soit un pas de temps de 30 ans (Tableau 2-1).

¹ Concept introduit en France par Georges Bertrand en 1968 (Bertrand, G., 1968, Paysage et Géographie Physique Globale, Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 93 (3), pp. 249-272) associant une vision à la fois systémique des problématiques, et une intégration des savoirs issus de plusieurs disciplines ou sous-disciplines (par exemple géomorphologie, climatologie, biogéographie, géographie humaine).

² Les images Landsat ont été obtenues depuis deux sources, (i) DGI-INPE (Divisão de Geração de Imagens & Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)[<http://www.dgi.inpe.br/>] et (ii) Université du Maryland (USA) Global Land Cover Facility [<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>].

³ Les images du satellite SPOT 5 ont été obtenues dans le cadre du programme ISIS du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).

| Source / Capteur | Date | Résolution spatiale (mètre) | Résolution spectrale (μm) |
|-------------------------|------|--------------------------------|--|
| Photographies aériennes | 1962 | | |
| Landsat MSS | 1977 | 79 | MSS1 : 0,5-0,6 MSS2 : 0,6-0,7 MSS3 : 0,7-0,8 MSS4 : 0,8-1,1 |
| <i>Idem</i> | 1982 | 79 | <i>Idem</i> |
| <i>Idem</i> | 1983 | 57 | <i>Idem</i> |
| Landsat TM | 1991 | 28,5 | TM1 : 0,45-0,52 TM2 : 0,52-0,6 TM3 : 0,63-0,69 TM4 : 0,76-0,9 TM5 : 1,55-1,75 TM7 : 2,08-2,35 |
| Landsat ETM+ | 2000 | 28,5 et 14,25 | <i>Idem landsat TM</i> ETM+ pan : 0,52-0,9 |
| Spot 5 | 2003 | 10 et 2,5 | XS1 : 0,5-0,59 XS2 : 0,61-0,68 XS3 : 0,79-0,89 SWIR : 1,58-1,75 Pan : 0,49-0,69 |
| Spot 5 | 2004 | 10 et 2,5 | <i>Idem</i> |
| Spot 5 | 2007 | 10 et 2,5 | <i>Idem</i> |

Tableau 2-1 - Matériel utilisé

2.2.3 Nomenclature des paysages

Les images satellites sont une représentation de l'espace dont le niveau d'abstraction dépend des résolutions spatiale et spectrale. Partant de ce constat, l'enjeu est de faire le lien entre la réalité et les informations présentes sur les images. Cela suppose d'élaborer une nomenclature issue de la réalité de manière à ce que les thèmes qui la constituent permettent d'interpréter l'information spectrale des classes produites par la classification non supervisée. Dans la pratique, il est impossible d'établir une correspondance parfaite entre une classe thématique et une classe spectrale, car (i) les thèmes varient dans le temps et/ou dans l'espace, au niveau de leur propriétés physiques ; et car (ii) de nombreux pixels se trouvent à l'interface de plusieurs thèmes rendant la réponse spectrale contrastée.

2.2.3.1 Identification des éléments du paysage

Une première étape consiste à présenter les éléments du paysage les plus fréquemment rencontrés sur le territoire. La Figure 2-1 permet de localiser la plupart des photographies prises au sol (Figure 2-2 et Figure 2-3).

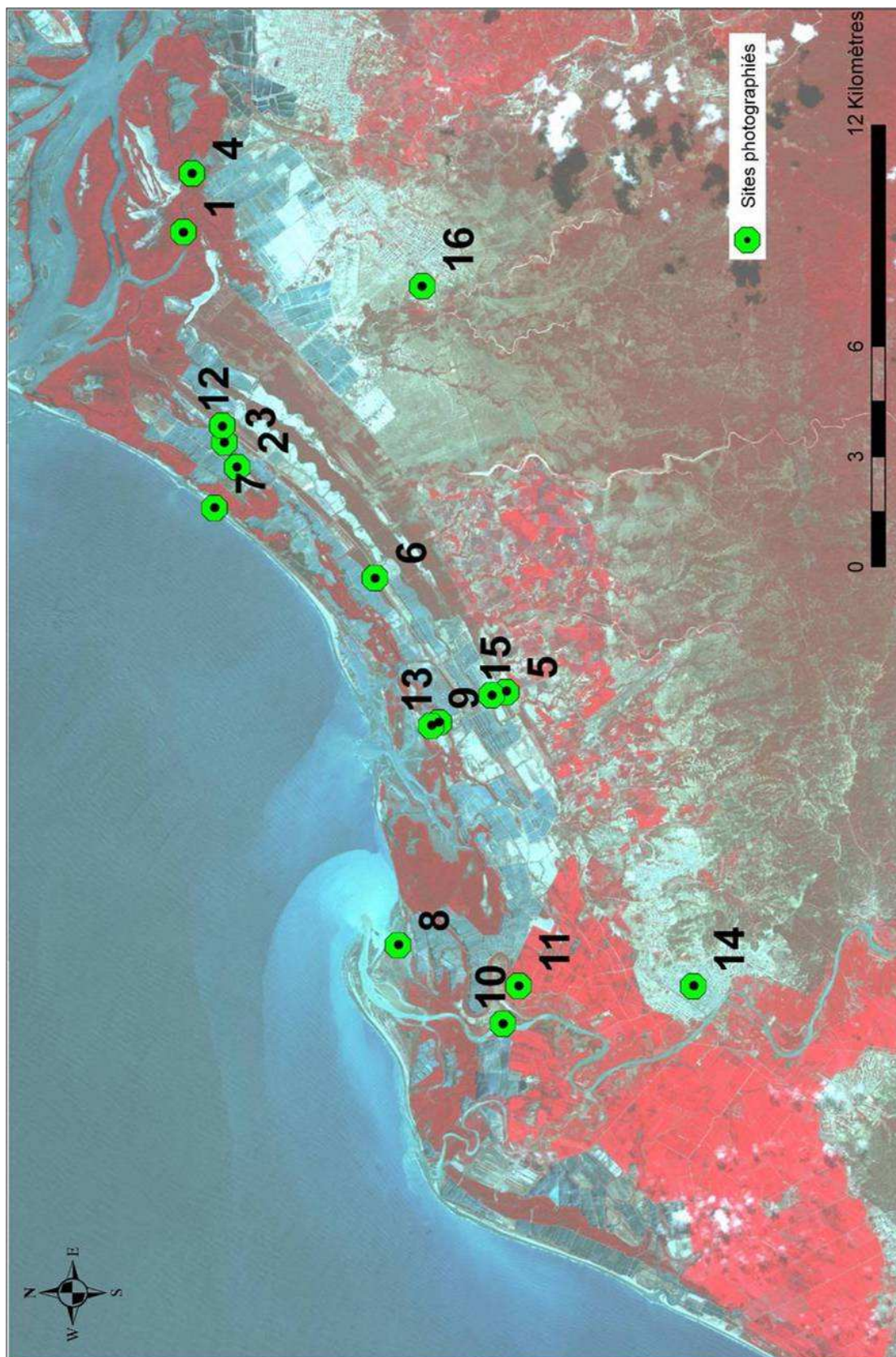


Figure 2-1 - Localisation des sites photographiés

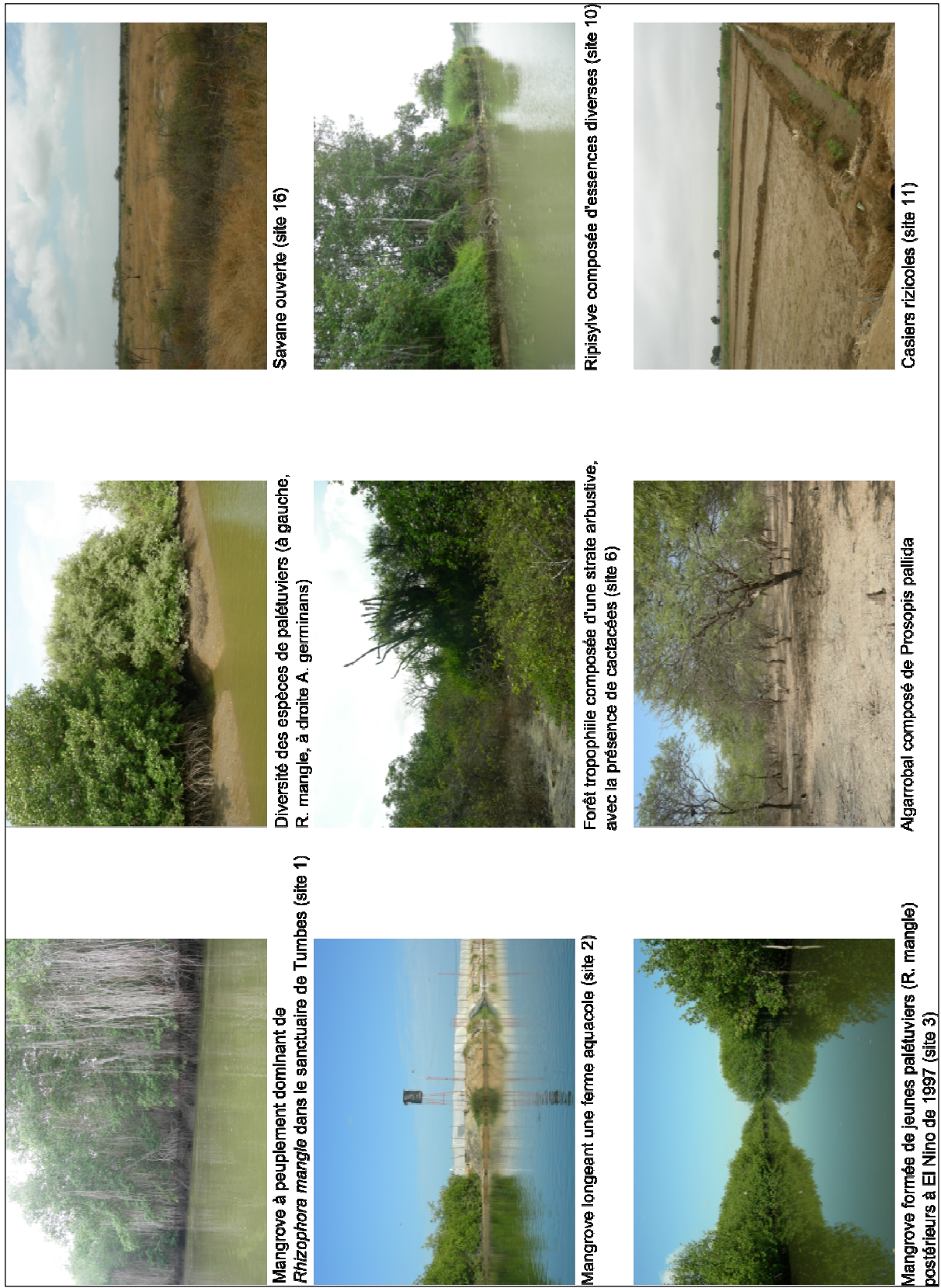


Figure 2-2 – Photographies de la zone d'étude



Figure 2-3 - Photographies de la zone d'étude (suite)

2.2.3.1.1 La mangrove

Une forêt de mangrove recouvre une grande partie de la zone supra-tidale⁴. Les principales espèces rencontrées sont *Rhizophora mangle* (nom vernaculaire - *mangle rojo*), *Laguncularia racemosa* (*jeli de mangle*), *Conocarpus erectus* (*jeli*) et *Avicennia germinans* (*jeli salado*) avec une prédominance de *R. mangle*. On trouve aussi des espèces arbustives tel que *Scutia spicata*, *Acacia macracantha* et du *Prosopis pallida* (Ferreira 1983). La mangrove a été reconnue en 1997 par la convention Ramsar comme zone humide d'importance internationale, du fait, en particulier, des séjours d'espèces migratrices d'oiseaux en son sein. On en trouve de larges ensembles continus dans la partie orientale, en particulier au sein du sanctuaire. Elle est présente aussi sous forme de patches dans le reste du territoire, et en particulier le long des exploitations aquacoles.

2.2.3.1.2 La forêt tropophile

En arrière de la mangrove, et jusqu'aux contreforts andins, s'étend une forêt sèche, 'trophophile', adaptée aux conditions de sécheresse. Une forêt tropophile « (i) se dit d'un taxon ou d'un groupement présentant des phénophases contrastées, liées à l'alternance brutale de saisons sèche et humide, et/ ou (ii) d'une formation végétale tropicale présentant des espèces sempervirentes et des espèces caducifoliées dont la défeuillaison n'est jamais complète ni simultanée » (Da Lage et Métailié 2000). Durant la saison sèche, la plupart des espèces perdent leur appareil chlorophyllien, signe d'une adaptation physiologique (Gentry 1995). Cet écosystème, appelé localement *bosque seco*, est parmi les écosystèmes forestiers les plus menacés à l'échelle du globe⁵. La menace principale est son utilisation par l'homme car son bois est facile à brûler (Linares-Palomino et Ponce Alvarez 2005). Composée d'arbres et d'arbustes⁶ d'une hauteur de 5 à 10 m, c'est une forêt fermée, accompagnée d'un tapis herbacé décidu. On la retrouve en arrière de la mangrove, où elle forme des ensembles fragmentés du fait d'une exploitation agro-pastorale extensive et d'une déforestation suite à l'occupation par les étangs aquacoles. L'existence d'une telle forêt est conditionnée par le phénomène d'El Niño qui apporte des pluies d'été (décembre à mars) et permet le maintien des formations de forêt tropophile dont l'*algarrobal* fait partie.

2.2.3.1.3 L'*algarrobal*

L'espèce dominante de l'*algarrobal* est l'arbre emblématique du nord du Pérou, l'*algarrobo*⁷ (*Prosopis pallida*). Cette formation végétale s'étend de Tumbes au nord jusqu'à Trujillo sur une superficie approximative de 7000 km² (Ferreira 1983). La forêt d'*algarrobo* est une savane arbustive d'un point de vue phytogéographique et écologique constituée d'un peuplement monospécifique à *Prosopis pallida*. Outre *P. pallida*, on trouve dans cette formation *Capparis angulata*, des cactacées, des arbustes épineux (*Cercidium praecox*), *Parkinsonia aculeata*.

⁴ Un tel continuum forestier est unique à l'échelle du pays. On trouve une relique de mangrove plus au sud, dans le département de Piura, à San Pedro de Vice (5°30' S), qui s'étend sur environ 300 ha. Celle-ci aurait été reliée à la mangrove de Tumbes aux époques préhistoriques. La disparition de la forêt pourrait être la conséquence des déforestations anthropiques au fil des siècles.

⁵ On trouve des formations de forêts sèches dans plusieurs pays sud américains, tel que l'Équateur, la Colombie, le Brésil, la Bolivie, le Venezuela, ou le Paraguay (Gentry 1995).

⁶ Parmi les espèces les plus représentées à proximité du littoral : *Prosopis pallida*, *Ceiba trischistranda*, *Tabebuia* sp., *Cochlospermum vitifolium*, *Carica* sp., *Erythrina* sp., *Ficus* sp., *Cordia* sp., *Ficus padifolia*, *Loxopterygium huasango*, *Caesalpinia paipai*.

⁷ *Algarrobo* est le nom que les Espagnols ont donné à l'arbre quand ils sont arrivés au 16^{ème} siècle, en raison de la ressemblance de ses fruits avec ceux du caroubier et des arbres méditerranéens.

Les formations sont de tailles modestes et éparpillées sur l'espace littoral, à la différence de l'hinterland où les formations sont continues. Le taux de recouvrement du sol par les arbres n'est pas total et fluctue au rythme des saisons : il augmente rapidement lors d'épisodes pluvieux et se réduit fortement durant les périodes de sécheresse.

2.2.3.1.4 La savane ouverte

En retrait de la forêt sèche, une savane herbacée occupe de grandes portions du territoire. Aucun élément bibliographique ne permet de caractériser la genèse de cette savane. On peut toutefois émettre l'hypothèse d'un milieu dégradé, initialement couvert par de la forêt sèche. En certains endroits, s'y développe de la riziculture pluviale. Une exploitation pastorale est aussi déduite de la présence de haies.

2.2.3.1.5 La ripisylve

En certains endroits, les rives du fleuve Tumbes se peuplent de formations boisées composées d'essences diverses. La nature de ces compositions floristiques est liée au degré de salinité, qui s'élève en direction de la côte.

2.2.3.1.6 L'agriculture

La majeure partie du delta du Tumbes est occupé par de l'agriculture irriguée : riziculture et bananeraies. Ces dernières sont situées à proximité du cours d'eau tandis que la riziculture occupe le reste de l'espace deltaïque. Les systèmes de cultures s'organisent autour de deux cultures annuelles, laissant ainsi une partie de l'année les sols à nus.

2.2.3.1.7 La plage

Une partie de la zone côtière est constituée de formations de sable. Ces sables sont transportés par les différents cours d'eau qui se jettent dans le Golfe de Guayaquil avant d'être repris, déposés et remobilisés de manière continue par la houle marine. Malgré ces phénomènes d'accrétion et d'érosion, c'est un milieu qui a récemment été conquis par l'aquaculture dans certaines portions du territoire. On relève en leur sein des espèces adaptées aux sols sableux et salins qui composent le *gramadal*⁸, tapis herbacé plus ou moins dense (pousses par rhizomes) qui contribue à stabiliser les plages.

2.2.3.1.8 Les zones humides : la slikke

On retrouve dans la zone intertidale des milieux dont les cycles d'inondations suivent le cycle des marées. La conjonction des cycles inondation-exondation, les taux d'humidité des sols et la salinité empêchent l'installation d'un couvert végétal. On retrouve aussi dans le paysage des vasières en bordure des cours d'eau secondaires dont les écoulements sont partiellement constitués par les rejets aquacoles.

2.2.3.1.9 Le bâti

Le bâti regroupe les infrastructures et les habitations. Les matériaux de construction varient d'une zone habitée à l'autre et d'un quartier à l'autre. Ainsi, les villages et les quartiers les plus défavorisés sont construits à partir de matériaux de fortune (bambous, bois, tôle) tandis que les centres villes et les quartiers résidentiels sont constitués d'habitations construites à partir de matériel plus résistant (briques, parpaings).

⁸ Parmi les espèces halophytes de ce *gramadal* : *Distichlis spicata*, *Typha angustifolia*, *Sporobolus virginicus*, *Paspalum vaginatum*.

2.2.3.1.10 Les sols nus

Les sols nus regroupent l'ensemble des milieux non végétalisés, parfois salinisés (Figure 2-3 – site 15).

2.2.3.1.11 Les étangs

Les étangs parsèment l'espace littoral sur toute la longueur de la zone d'étude. Bien que leurs superficies varient, un de leur point commun est de présenter des formes géométriques. Ils sont en production la majeure partie de l'année. Les assecs n'occupent en effet qu'un temps limité de sorte que le substrat n'est visible qu'une partie de l'année. Les digues sont de tailles variables d'une exploitation à l'autre. Toutefois, la plupart d'entre elles sont conçues de manière à permettre à des véhicules de s'y déplacer afin de pouvoir accéder à l'étang en divers points.

2.2.3.2 Définition de la nomenclature

La nomenclature permet de regrouper les éléments décrits dans plusieurs catégories. Ce regroupement est nécessaire car les différences spectrales des éléments paysagers identifiés sont trop faibles pour pouvoir être exploitées sur les images dont on dispose. De plus, toutes les informations que l'on peut tirer de ces différences spectrales ne sont pas essentielles à l'étude. Il faut en effet toujours adapter le niveau de détail de la nomenclature aux informations que l'on souhaite extraire et aux types de changements que l'on souhaite identifier.

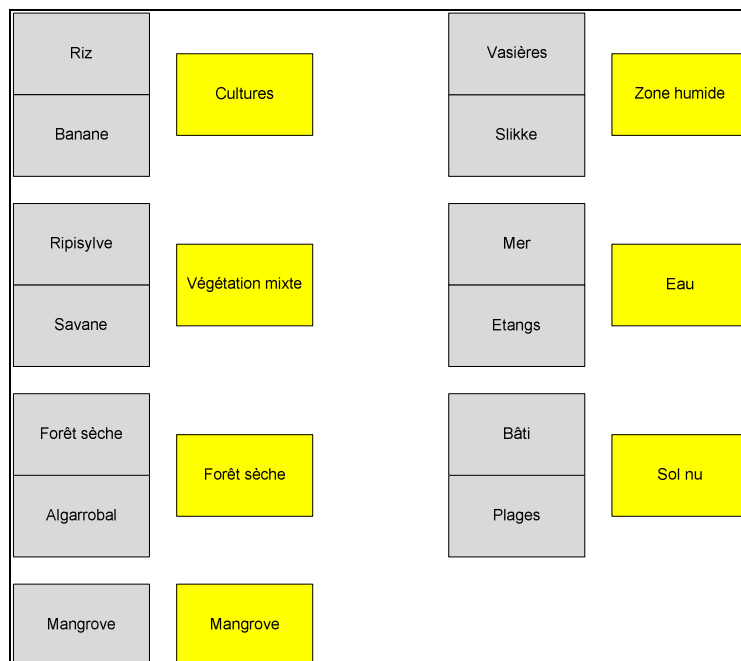


Figure 2-4 - Regroupement des éléments du paysage (cases grises) dans l'établissement de la nomenclature (cases jaunes)

A partir des 13 éléments du paysage, une nomenclature a été élaborée, composée de 7 classes thématiques (Figure 2-4). La classe des cultures regroupe les cultures du riz et de la banane. On cherche ici seulement à connaître les superficies et la localisation des zones cultivées, rendant inutile la distinction riz / banane. La classe de végétation mixte regroupe des formations végétales différentes, d'un double point de vue, floristique et structurel. Ce regroupement se justifie par le rôle à priori secondaire que tiennent ces formations dans la structure et l'évolution du paysage. Il se justifie aussi par les surfaces limitées de ripisylve, qui se limitent à quelques patches le long des cours d'eau (en particulier le long du Tumbes) ;

et par le fait que les formes allongées et l'agencement (localisation riveraine) induisent des réponses spectrales contrastées. La forêt sèche regroupe la forêt sèche proprement dite et l'*algarrobal*. La mangrove constitue une seule et même classe. Cela s'explique par ses propriétés spectrales, son emprise spatiale, ses intérêts écologique, social et économique et par les liens qu'elle entretient avec l'aquaculture. Les zones humides regroupent les slikkes maritimes, estuariennes et fluviales. Cette classe inclut aussi les espaces de terre ferme situés à proximité des plans d'eau avec lesquels ils peuvent se confondre sur les images satellites, engendrant alors une réponse spectrale sous influence de ces deux états de surface. La classe de l'eau regroupe tous les plans d'eau, sans distinction des paramètres physico-chimiques internes, de hauteur de la lame d'eau et de nature du substrat sous-jacent. Enfin, la classe des sols nus regroupe tous les éléments non végétalisés et non recouverts par une lame d'eau. Ainsi, le bâti et tous les types de sols nus, sans distinction, ont été assimilés à une seule et même classe.

2.2.3.3 Correspondance entre classe thématique et classe spectrale

Les éléments des classes de la nomenclature ont des propriétés physiques qui les distinguent les uns des autres sur le plan spectral. Ce sont ces différences qui sont exploitées lors des traitements en télédétection. Les propriétés physiques et les qualités texturales des éléments paysagers qui ont permis de les distinguer ont ainsi été identifiées.

2.2.3.3.1 Photographies aériennes

La mise en correspondance des photographies aériennes et de la réalité s'appuie sur plusieurs critères : niveau de gris (ou tonalité), texture, forme et agencement relatifs (Figure 2-5). Les photographies aériennes sont des images panchromatiques, c'est-à-dire qu'elles sont sensibles à toutes les longueurs d'onde dans le visible. L'image finale apparaît en niveaux de gris, lesquels sont la synthèse des valeurs enregistrées dans le visible. On dit qu'un niveau de gris est élevé lorsque la valeur est proche des valeurs maximales ce qui, sur un plan spectral, signifie des valeurs élevées dans le visible et donc dans les différentes longueurs d'onde composant le spectre du visible. Au regard des propriétés physiques des thèmes de la nomenclature, on cherche à établir un premier niveau de correspondance entre le niveau de gris et ces thèmes. On sait, par exemple, que la signature spectrale d'un sol nu dans le visible est à la fois croissante et élevée. On en déduit que le niveau de gris d'un sol nu sur une image panchromatique est relativement élevé. La texture correspond à une répétition dans l'espace d'une certaine trame. Lorsque cette répétition se reproduit sur un espace suffisamment grand pour pouvoir être repérée visuellement, on peut alors reconnaître différents types de texture (granuleuse, lisse, tachetée, marbrée, etc.). Par extension, si l'on connaît la trame spatiale d'une classe thématique, il devient alors possible d'établir une correspondance entre une texture et une classe thématique. La forme est liée à l'inscription spatiale d'un objet : un lac, une route, un cours d'eau ont des formes particulières que l'on peut reconnaître sur les images malgré des niveaux de gris qui peuvent être différents. Enfin, les agencements, dits relatifs, sont liés aux associations spatiales d'objets. Ainsi, les relations de voisinage peuvent être un critère d'identification d'un élément par rapport à un autre. On peut donc déduire la nature d'un objet en fonction de son voisinage.

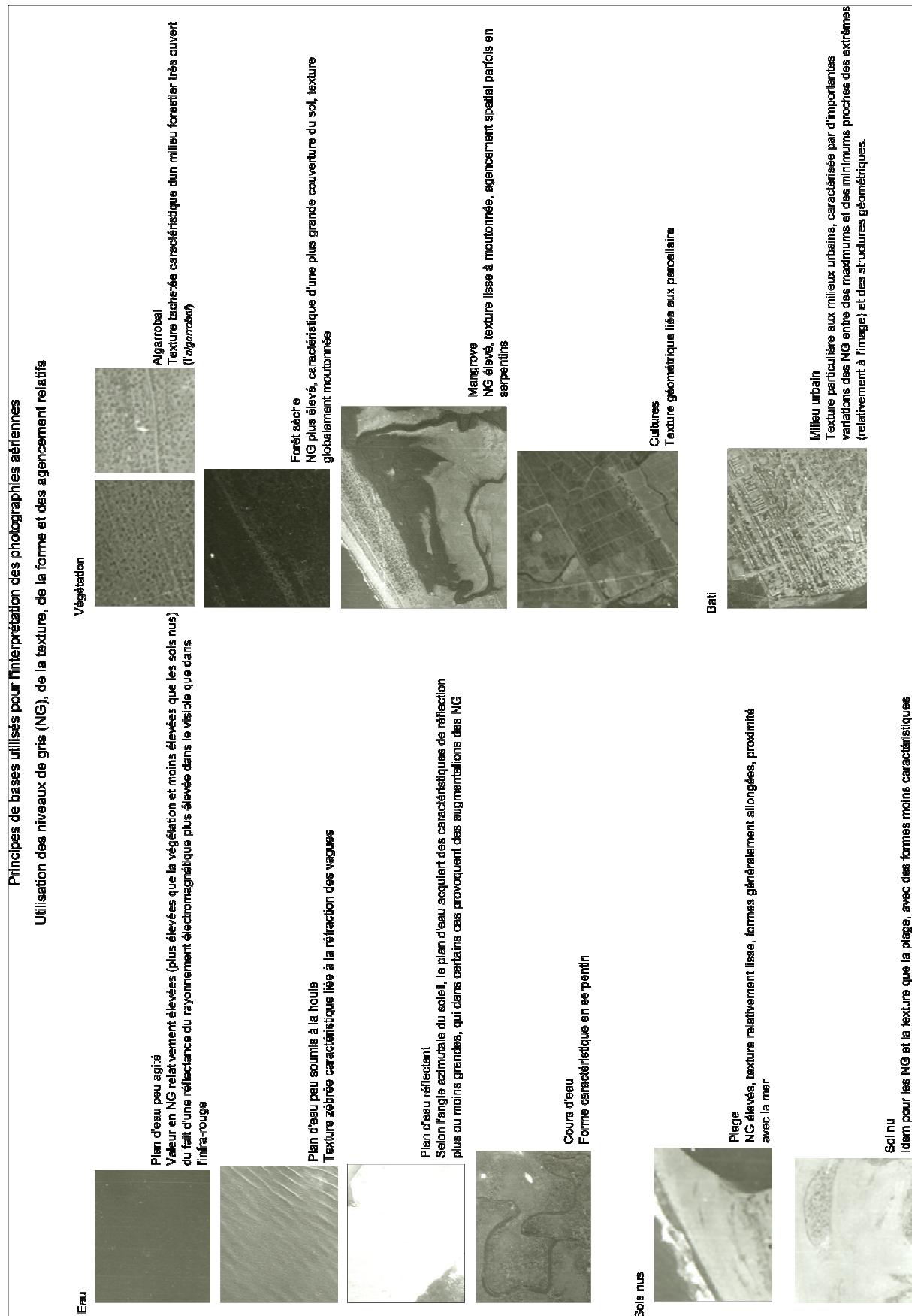


Figure 2-5 - Méthode de correspondances entre les critères d'interprétation et les classes et sous-classes de la nomenclature

2.2.3.3.2 Images multispectrales

Les images multispectrales à haute résolution renseignent sur la réflectance des objets de surface dans le spectre du visible et de l'infrarouge. Les différentes réponses dans ces longueurs d'onde permettent ainsi de distinguer les objets. Les principales différences concernent trois types d'objets : l'eau, la végétation et les sols. A l'intérieur de ces types, il existe un grand nombre de sous-types (par exemple eau profonde/eau peu profonde, végétation saine/végétation sénescence, ou sol nu calcaire/sol nu argileux) qui présentent aussi des différences spectrales entre eux, mais dont les variations sont plus faibles qu'entre les types principaux (Annexe 1). Du fait de l'intérêt particulier à détecter les étangs aquacoles, une première partie s'attache à décrire les aspects importants à considérer pour une telle tâche. Par la suite, les différences spectrales exploitées pour établir des cartes d'occupation du sol ont été identifiées.

a) Etangs aquacoles et télédétection

L'identification d'un étang aquacole suppose d'exploiter les propriétés physiques de l'eau, et en particulier sa signature spectrale dans la partie du spectre électromagnétique où elle montre les plus fortes variations, c'est à dire, dans le visible et dans le proche infrarouge où la réflectance décroît. Dans la nature, plusieurs facteurs modifient cette réponse théorique: (i) les propriétés du fond des plans d'eau, (ii) la présence d'éléments flottants à la surface, (iii) la présence de corps en suspension ou en solution dans la colonne d'eau. Dans le cas où la hauteur de la lame d'eau est réduite, le fond peut en effet perturber le signal électromagnétique enregistré par le capteur. La perturbation spectrale dépend alors des propriétés physiques du sol. Un sol calcaire blanc perturbera plus le rayonnement électromagnétique (REM) qu'un sol organique foncé comme cela peut être le cas pour des étangs en production depuis plusieurs années et rarement curés, dans lesquels donc sont présents sur le fond une couche de matière organique. Le REM enregistré varie aussi en fonction des éléments en suspension (par exemple éléments minéraux ou matière organique) ou du phytoplancton présents à l'intérieur de la colonne d'eau. La perturbation sur le REM engendrée par la présence d'éléments minéraux s'assimile à la perturbation produite par le substrat, c'est-à-dire qu'une eau riche en élément minéraux en suspension montre une signature spectrale avec des valeurs plus élevées dans le visible et l'infrarouge (avec des nuances selon les propriétés des éléments considérés). La présence d'une biomasse, c'est-à-dire de phytoplancton ou d'algues, dans la colonne d'eau a comme effet d'augmenter la réflectance dans la bande spectrale du vert et dans le proche infrarouge. Enfin, les plantes aquatiques submergées, émergentes ou flottantes (par exemple *Hydrilla verticillata*, *Typha* spp., *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Wolffia* spp.) perturbent aussi le signal, de sorte qu'en conditions naturelles, les zones d'eau ne présentent jamais une réponse uniforme et identique à celle de l'eau enregistrée en situation expérimentale. Une couverture complète du plan d'eau par des plantes peut modifier considérablement la réflectance d'un plan d'eau au point de ne plus pouvoir reconnaître la signature spectrale caractéristique de l'eau. Un autre facteur influence la part d'énergie radiative réfléchi : l'angle d'incidence. En effet, si l'on assimile un plan d'eau à une surface plane, en théorie le pourcentage de réflexion croît quand l'angle d'incidence par rapport au plan horizontal diminue. A l'inverse, quand la hauteur angulaire du soleil au dessus du plan augmente, la réflexion diminue. Toutefois, les plans d'eau ne sont ni lambertiens ni spéculaires. La rugosité de surface créée par les vagues engendre une forte variabilité de la réflexion sur un même plan d'eau. A haute résolution spatiale, la mesure radiométrique d'un plan d'eau n'est donc pas homogène.

Au regard de ces éléments, on peut ainsi avancer qu'il n'existe pas sur les images à haute résolution spatiale de signature spectrale propre aux étangs aquacoles. Il n'est donc *a priori*

pas possible d'établir une méthode qui permette de détecter les étangs aquacoles et de les distinguer des autres plans d'eau à partir de seuls critères électromagnétiques. Pour pouvoir les différencier on pourrait cependant établir un lien entre l'intensité de la production et certains paramètres physico-chimiques des eaux qui influencent la REM. En effet, l'apport de fertilisants et d'aliments composés à l'intérieur d'un étang en production intensive a pour objectif de provoquer une augmentation de la biomasse de phytoplancton pour augmenter la biomasse des organismes élevés. Cette augmentation de biomasse végétale répond à des besoins physiologiques des animaux à un moment précis. Pour éviter une situation d'eutrophisation, les systèmes s'appuient généralement sur un renouvellement fréquent de l'eau. Sur le plan du bilan radiatif, les eaux des étangs ainsi que celles des chenaux et des canaux environnants devraient donc présenter des réponses spectrales caractéristiques, influencées par la biomasse, différentes de celles des plans d'eau adjacents qui n'ont pas collecté les effluents aquacoles. Ainsi, une calibration basée sur les eaux non réceptrices d'effluents aquacoles serait un préalable pour une identification reposant uniquement sur la réponse spectrale. Cela suppose néanmoins que l'aquaculture soit la seule source d'enrichissement du milieu et que les rejets soient constants. La présence de fertilisants d'origine agricole limiterait, par exemple, les possibilités de corrélation entre l'aquaculture et la signature spectrale de l'eau. Dans le cas des exploitations extensives voire semi-intensives, les différences spectrales entre les eaux réceptrices et les eaux non-réceptrices sont moins marquées du fait d'un apport parcimonieux voire nul de fertilisants et d'aliments composés. Toutefois, dans la pratique, de nombreuses exploitations à faible ou moyenne intensité de production peuvent présenter des biomasses importantes dans la colonne d'eau, soit en raison d'une mauvaise gestion de l'eau (par exemple changements d'eau à contretemps), soit par la présence d'une végétation naturelle sur les digues ou sur le fond du bassin associée à une mauvaise gestion de la fertilisation ou l'absence d'un nettoyage régulier de l'étang. Une première conclusion est donc que la réponse spectrale n'est pas un critère suffisant pour distinguer un étang d'un plan d'eau quelconque.

Une alternative repose sur l'utilisation conjointe de la réponse spectrale et d'indices de forme des objets détectés. En effet, les étangs aquacoles ont le plus souvent des formes géométriques caractéristiques qui permettent de les identifier visuellement. Cette méthode ne peut toutefois s'appliquer qu'avec des images satellites à haute ou très haute résolution spatiale, et selon la taille des étangs qui peut varier, d'un site à l'autre, de moins d'un hectare à plusieurs dizaines voire centaines d'hectares. Les analyses de la texture peuvent aussi s'avérer un moyen efficace du fait des possibilités qu'elles offrent de détecter les contours des objets, en l'occurrence les digues des étangs. Des méthodes orientées objets apparaissent donc comme plus adaptées à la problématique.

b) Liens entre propriétés physiques des éléments du paysage et information spectrale

La nomenclature adoptée comporte quatre classes de végétation, la mangrove, les cultures, la forêt sèche et la végétation dite mixte. De manière générale, la végétation se caractérise par une réflectance faible dans le visible, avec un léger pic dans le vert, puis élevée dans le proche infrarouge, avant de se réduire à nouveau (Annexe 1). Toutefois, selon les propriétés des individus et plus encore des formations végétales, des écarts parfois importants entre la signature enregistrée et la signature théorique peuvent être relevés. Les cultures de riz et de banane présentent la particularité de posséder un pic dans le proche infrarouge supérieur aux formations végétales à l'état naturel. Les apports d'eau et de fertilisants ont, en effet, pour objectifs d'optimiser le cycle de croissance des végétaux cultivés. La réponse dans le proche infrarouge étant liée à la structure interne des feuilles, un niveau élevé dans cette longueur d'onde est corrélé à un état sain. Dans l'infrarouge moyen, la réponse est faible car cette

longueur d'onde correspond à une bande d'absorption de l'eau. À la différence des cultures, la mangrove se caractérise par un pic moyennement élevé dans le proche infrarouge et des valeurs faibles dans l'infrarouge moyen. En ce qui concerne la forêt sèche, les valeurs dans l'infrarouge sont plus faibles à la fois dans le proche infrarouge et dans l'infrarouge moyen. En effet, en raison du stress hydrique subi par ce type de végétation, la structure des feuilles et la teneur en eau particulière, provoque un affaiblissement des niveaux de réflectance dans ces longueurs d'onde. Enfin, la végétation mixte présente des variations de la réponse qui ne sont pas seulement la conséquence des propriétés des végétaux. En effet, le taux de couverture du sol par la savane n'est jamais total de sorte que le sol perturbe la signature spectrale enregistrée par interférence. De plus, la superficie réduite des formations végétales comme la présence dans le voisinage d'un autre état de surface (par exemple de l'eau), interfère ici aussi et engendre ce que l'on appelle des mixels, c'est-à-dire des pixels dont les niveaux de réflectance sont influencés par plusieurs états de surface.

Caractérisés par des réflectances plus élevées dans le visible et dans le proche infrarouge (Annexe 1), les sols nus se détectent aisément. Bien que la réflectance varie en fonction de la granulométrie et de la texture, ces différences n'ont pas ici été exploitées.

La signature spectrale des zones humides présente une courbe à peu près similaire à celle des sols nus, à des niveaux toutefois moins élevés. La présence d'eau à l'intérieur de ces sols interfère avec la signature propre aux sédiments. L'eau a donc tendance à réduire la réflectance dans les bandes d'absorption de l'eau (infrarouge en particulier).

2.3 Méthodes

La partie méthodologique débute par les prétraitements appliqués aux images, se poursuit par la méthode utilisée pour détecter les étangs aquacoles, puis se conclut par les méthodes de cartographie et de diachronie de l'occupation du sol.

2.3.1 Les prétraitements

2.3.1.1 Images multispectrales

Compte tenu de la variété des sources utilisées, il a fallu réaliser au préalable une correction géométrique (Annexe 1). Ces corrections sont nécessaires lorsque l'étude comporte une analyse des changements d'occupation du sol. En effet, les analyses de changement supposent que les images soient parfaitement calées entre elles. Il existe plusieurs méthodes de correction géométrique. Une image maîtresse servant de référence pour le calage des autres images a d'abord été sélectionnée (Figure 2-6). Une fois l'image maîtresse sélectionnée, un certain nombre de points amers identiques ont été identifiés sur les deux images, l'image maîtresse et l'image à recalculer avant d'appliquer une méthode de transformation polynomiale de degré deux, accompagnée d'une méthode d'interpolation afin d'attribuer une valeur à chaque pixel de l'image transformée. La transformation géométrique correspond à l'application d'un modèle de déformation (Girard et Girard 1999). Le choix du degré de transformation impose un nombre minimum de points de contrôle suivant la formule : points amers $> (\text{degré}+1)^2$, soit, ici, au minimum 10 points amers.

La transformation globale est accompagnée d'erreurs inhérentes appelées "écart quadratique moyen" (erreur résiduelle) ou "Root mean square" (RMS), qui détermine l'erreur moyenne de la correction géométrique en nombre de pixels. Le Tableau 2-2 résume les erreurs quadratiques moyennes de chaque image, une valeur de 0,5 est généralement admise comme un maximum lorsque l'on se réfère à la résolution spatiale de l'image de référence (Hui 2008). Une erreur quadratique moyenne de 0,5 correspond ainsi à une erreur de 5 mètres

environ dans notre cas où l'on a utilisé une image multispectrale SPOT5 comme image maîtresse.

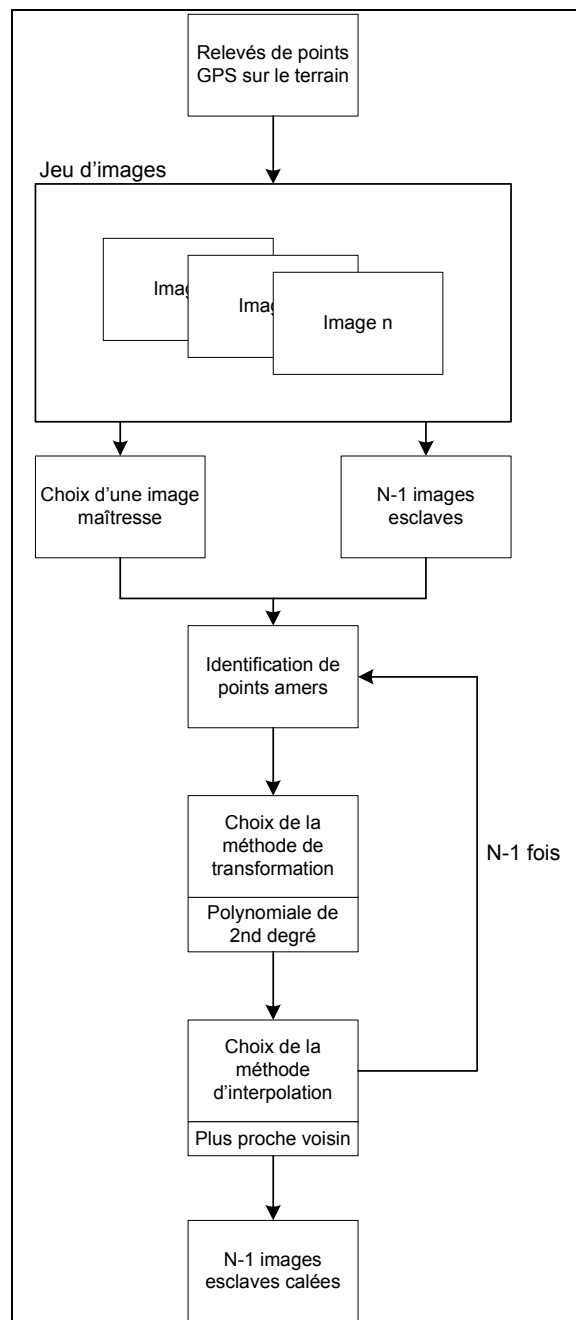


Figure 2-6 - Organigramme des étapes pour la correction géométrique

| Image | Nombre de points de contrôle | Écart quadratique moyen |
|------------------|------------------------------|-------------------------|
| Landsat MSS_1977 | 23 | 0,444064 |
| Landsat MSS_1982 | 18 | 0,471381 |
| Landsat MSS_1983 | 20 | 0,602474 |
| Landsat TM | 20 | 0,499527 |
| Landsat ETM+ | 17 | 0,246883 |
| Spot 5 2003 | 11 | 0,102056 |
| Spot 5 2004 | 15 | 0,074806 |

Tableau 2-2 - Écart quadratique moyen des corrections géométriques

2.3.1.2 Photographies aériennes

Pour pouvoir obtenir une carte d'occupation du sol d'après les photographies aériennes, il a fallu au préalable les géoréférencer. Plutôt que de les géoréférencer une par une, il a été décidé de les mosaïquer au préalable. Si cela limite le nombre de géoréférencements ultérieurs, cela facilite aussi le processus de recherche des correspondances entre les photographies aériennes et l'image maîtresse qui, du fait de l'éloignement dans le temps, 45 ans (1962 et 2007), ne présentent que peu de points communs. La Figure 2-8 présente les principales étapes à savoir : le mosaïquage manuel dans un logiciel de traitement d'image (Photoshop) suivi d'un géoréférencement dans un autre logiciel de traitement d'image (ENVI).

2.3.2 L'inventaire des étangs aquacoles

La méthode d'inventaire élaborée s'est appuyée sur une chaîne d'opérations associant des techniques variées (Figure 2-7). La première étape consiste à détecter les étangs sur les images satellites en fonction de leurs caractéristiques spectrales. La seconde étape exploite les qualités morphologiques des objets. Enfin, une vérification terrain a permis de valider ou pas les résultats issus des deux étapes précédentes.

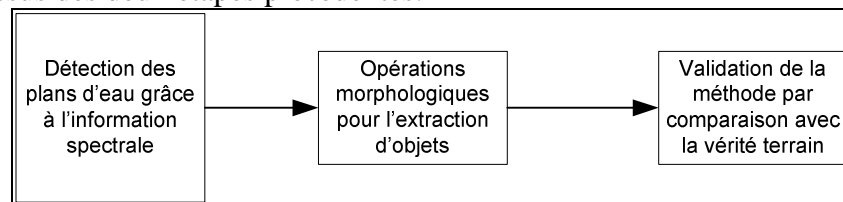
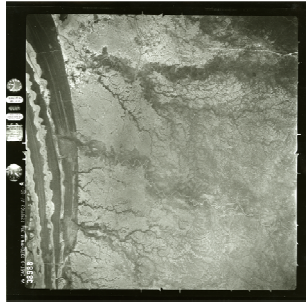
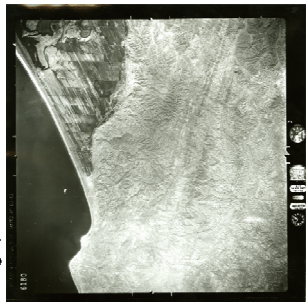


Figure 2-7 - Organigramme des traitements effectués sur les images multispectrales

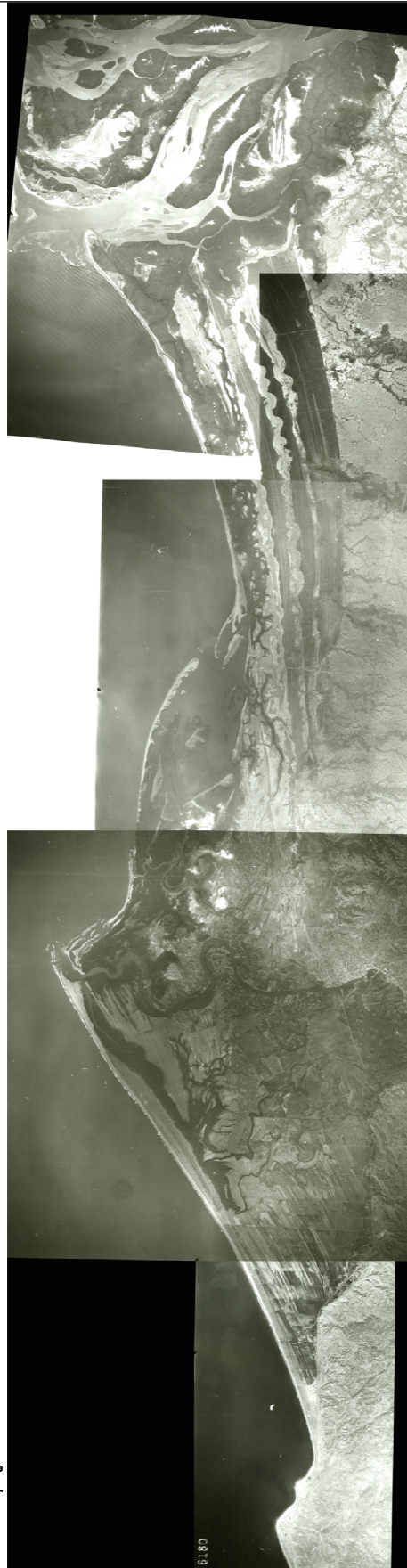
Détailler une méthode présente l'avantage de pouvoir la reproduire. Trop souvent, les différents travaux utilisent des méthodes, des catégories ou des classes non-reproductibles car non détaillées, limitant ainsi les possibilités de comparaison (Brannstrom *et al.* 2008). L'explication de chaque étape effectuée réduit ces contraintes. Plusieurs articles font état des méthodes de détection des plans d'eau (Frazier et Page 2000, Ouma et Tateishi 2006, Hui 2008). Ceci permet alors de constater qu'en fonction du niveau de précision désiré, la tâche s'avère plus ou moins délicate.

Préparation des photographies aériennes

1. Scans des photographies



2. Mosaïquage manuel



3. Géoréférencement sur image SPOT

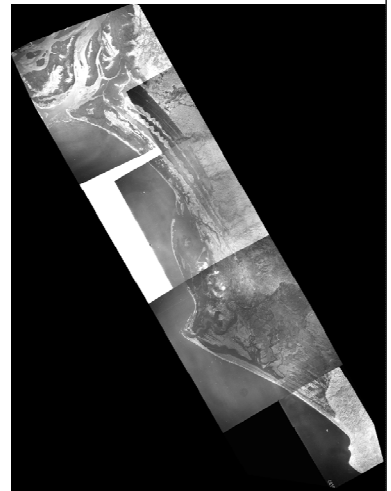


Figure 2-8 - Préparation et géoréférencement des photographies aériennes

2.3.2.1 Détection des étangs grâce à l'information spectrale

Lors de la première étape, quatre méthodes de détection des étangs ont été testées sur trois zones tests (Figure 2-9) des images multispectrales : (i) une classification non-supervisée par nuées dynamiques, (ii) une classification supervisée par maximum de vraisemblance, (iii) un seuillage d'un canal d'absorption de l'eau et (iv) un seuillage d'un indice d'eau.). Les trois zones tests ont été choisies car elles présentent un taux de recouvrement par les étangs élevé. Les sites retenus ont des tailles de 1402 ha (site A), 2048 ha (site B) et 1660 ha (site C).

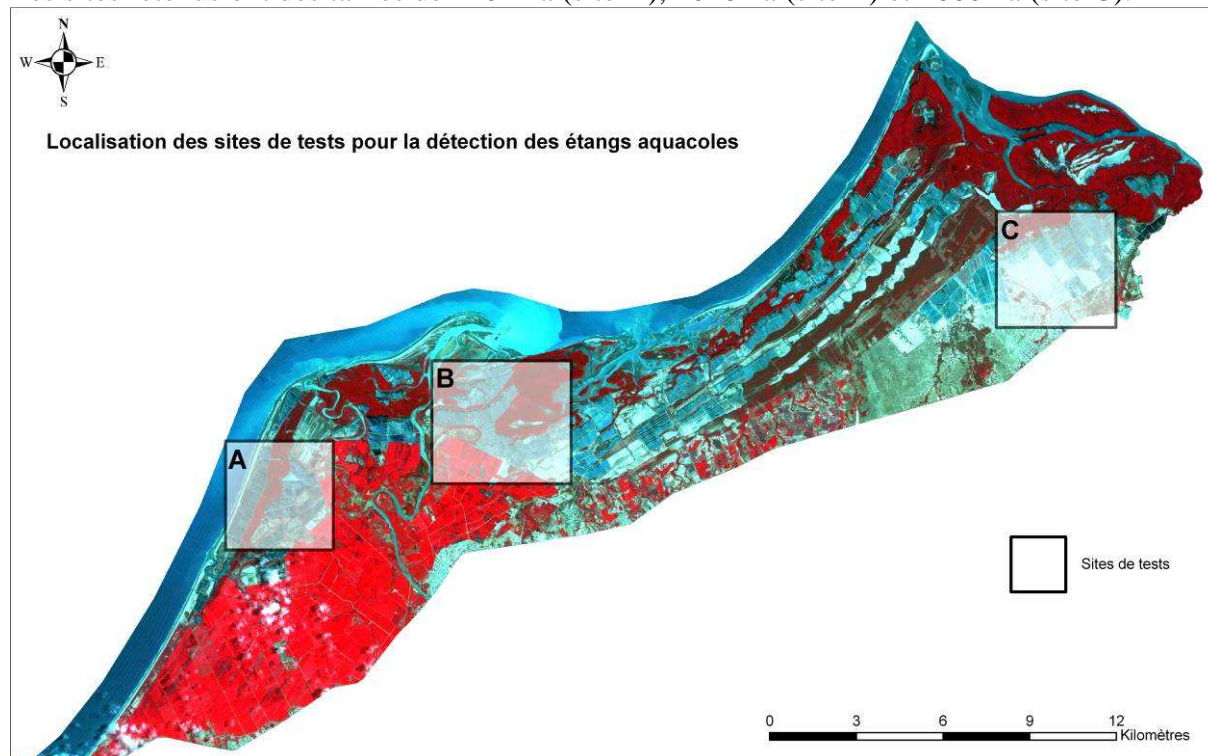


Figure 2-9 - Localisation des zones tests (image Spot 5 de 2007)

Parmi les quatre méthodes, une distinction a été établie entre les méthodes automatiques ou semi-automatiques de classification et celles qui reposent sur le seuillage d'un canal ou d'un indice. La première catégorie comprend la classification non-supervisée par Nuées Dynamiques (K-means) et la classification supervisée par maximum de vraisemblance. La seconde catégorie comprend les techniques de seuillage manuel d'un des canaux d'absorption de l'eau (correspondant aux bandes comprises dans les longueurs d'onde infrarouge, c'est-à-dire TM4, TM5, TM7 pour les satellites Landsat, et XS3 et XS4 pour le satellite Spot 5) et de l'indice normalisé de l'eau (NDWI).

La première méthode débute par une analyse en composantes principales (ACP) (Annexe 1) de l'image multispectrale. Deux critères entrent alors en jeu pour définir les néo-canaux utilisés dans la classification non supervisée : la valeur propre de chaque néo-canal ainsi que la nature de l'information portée par chaque néo-canal qui peut se déduire d'une interprétation visuelle. On constate ainsi dans le Tableau 2-3 que les deux premiers néo-canaux d'une ACP réalisée sur une des images multispectrales portent 97,7% de la variance globale. On a aussi constaté que le premier néo-canal porte l'information liée à l'humidité des états de surface car les valeurs radiométriques extrêmes correspondent à des plans d'eau et à des sols nus (Figure 2-10). Le second néo-canal porte l'information concernant la présence ou l'absence d'une couverture végétale. La classification non supervisée n'utilisera ainsi que ces deux néo-canaux. Une interprétation identique des néo-canaux a été effectuée pour chaque image et pour chaque zone test. Une fois la classification effectuée, l'interprétation des signatures

spectrales des classes produites a permis d'identifier les classes de l'eau. Sur l'exemple donné (Figure 2-10), deux classes étaient candidates. Celle qui présente des valeurs plus élevées dans l'infrarouge a toutefois été exclue car appartenant à la classe des zones humides. À la fin, on obtient donc une image binaire sur laquelle les plans d'eau ont la valeur 1, tandis que les autres pixels n'appartenant pas à cette classe ont la valeur 0.

| Néo-canal | Valeur propre | Pourcentage de la variance totale |
|-----------|---------------|-----------------------------------|
| ACP1 | 1924 | 75 |
| ACP2 | 582 | 22,7 |
| ACP3 | 44 | 1,7 |
| ACP4 | 7 | 0,3 |
| ACP5 | 5 | 0,2 |
| ACP6 | 2 | 0,1 |

Tableau 2-3 - Résultats statistiques de l'ACP effectuée sur l'image multispectrale

La seconde méthode, la classification supervisée par maximum de vraisemblance nécessite au préalable d'identifier sur l'image initiale des données tests (en vert sur la Figure 2-10). L'algorithme sélectionné produit ensuite une image avec deux classes représentées : une classe 'eau' (rouge) et une classe 'non classée' (noir).

La troisième méthode utilise un des canaux d'absorption de l'eau, l'infrarouge moyen (TM5). Le seuillage s'effectue manuellement. C'est une technique par laquelle on recherche de manière empirique les seuils les plus adaptés pour répondre au problème posé. Elle nécessite aussi une connaissance des informations de l'image. Sur la Figure 2-10, l'histogramme du canal TM, et les valeurs conservées (en rouge) permettent de constater que le seuillage effectué est un seuillage bas, c'est-à-dire qu'il conserve les valeurs basses de l'image.

L'indice original NDWI utilise les bandes du proche infrarouge (0,86 µm) et de l'infrarouge moyen (1,24 µm) (Gao 1996), qui, dans le cas d'une image Landsat, donne l'équation suivante :

$$NDWI = (TM4 - TM5) / (TM4 + TM5) \quad (1)$$

L'indice utilisé dans le présent travail s'appuie sur une logique similaire mais sur des bandes différentes, les bandes du vert (TM2 ou XS1) et de l'infrarouge moyen (TM5 ou XS4). Cet indice a été utilisé dans d'autres études (McFeeters 1996) et s'appuie sur l'équation suivante :

$$NDWI = (TM2 - TM5) / (TM2 + TM5) \quad (2)$$

Les pixels de l'image produite portent des valeurs qui s'échelonnent entre -1 et +1. Un seuillage haut (Figure 2-10) permet de conserver les plans d'eau, caractérisés par un indice élevé.

Présentation des 4 méthodes de détection des étangs aquacoles sur les images multispectrales

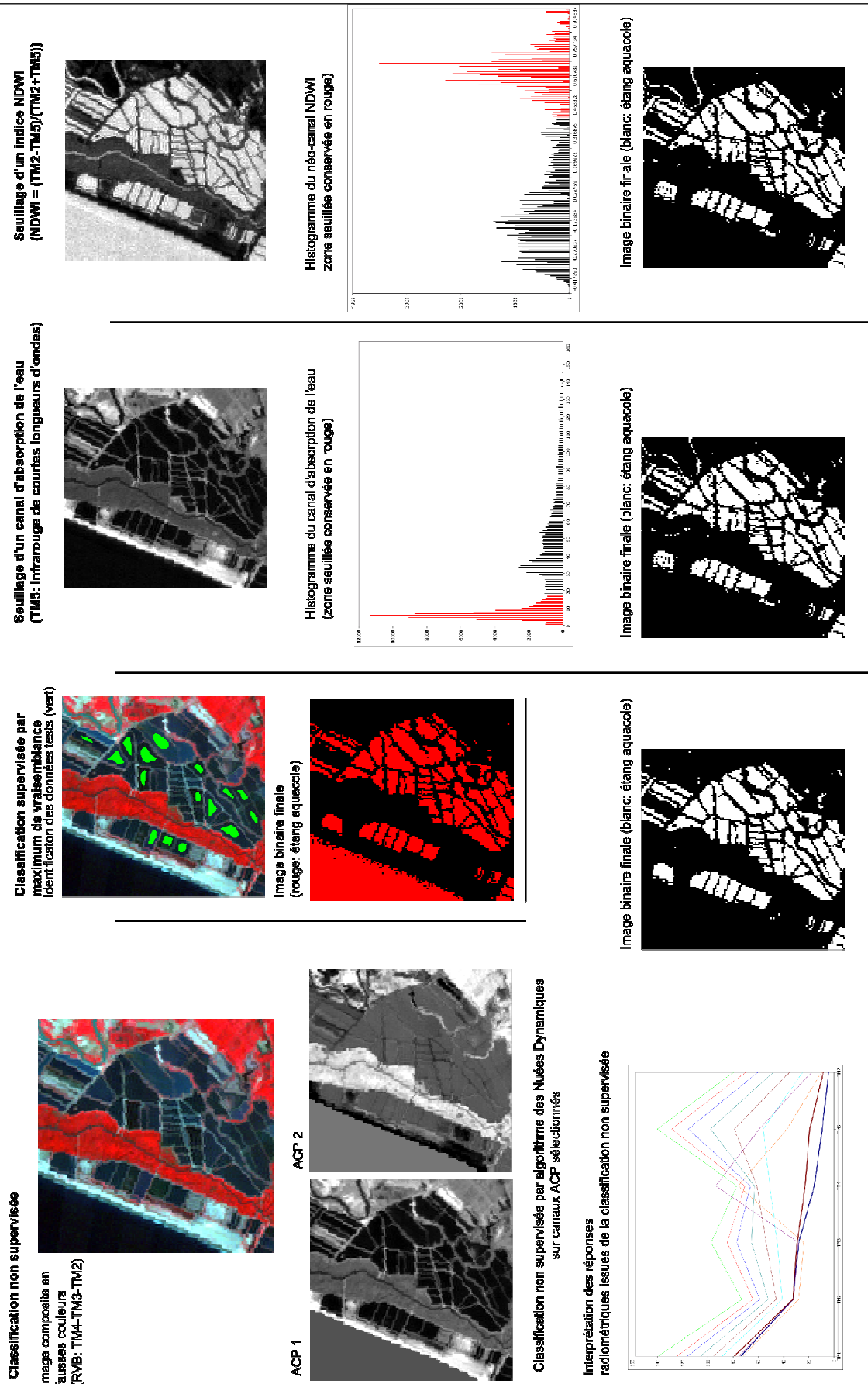


Figure 2-10 - Méthodes de détection des étangs aquacoles sur les images multispectrale

2.3.2.2 Création d'une image « objets »

Pour chaque image multispectrale, douze images binaires ont été obtenues (trois images pour chacune des quatre méthodes). Pour mesurer la précision de la détection, les superficies des étangs détectés ont été comparées avec la superficie réelle des étangs, ce qui a nécessité de passer d'une approche image à une approche objets. En effet, seuls des objets peuvent avoir leurs aires comparées à la réalité. La méthode utilisée pour obtenir des objets s'appuie sur des principes de morphologie mathématique (Serra 1982). La morphologie mathématique est définie comme « une théorie essentiellement non linéaire, utilisée en particulier en analyse d'images, dont le but est l'étude des objets en fonction de leur forme, de leur taille, des relations avec leur voisinage (en particulier topologiques), de leur texture, et de leurs niveaux de gris ou de leur couleur » (Bloch 2008). Notre objectif est d'obtenir une carte finale débarrassée des entités autres que les étangs de production aquacole et de convertir les agrégats de pixels en objets.

Pour ce faire, une méthode en quatre étapes a été élaborée.

- La première opération appliquée est une ouverture par reconstruction (Figure 2-12)(Annexe 2) : elle consiste à éroder l'image source et à reconstruire l'image finale à l'intérieur de l'image source par l'intermédiaire d'une dilatation géodésique qui permet d'éliminer les plus petites entités sans affecter le contour des objets non supprimés totalement par l'érosion. L'élément structurant sélectionné a été le même pour toutes les images, à savoir le disque. Seul le rayon du disque a été changé, celui-ci ayant été plus grand pour les images à très haute résolution (4 contre 2 pour les images à haute résolution).
- La seconde opération consiste en une séparation de régions convexes et chevauchantes (Figure 2-12). Son application requiert de fixer la valeur de la force du filtre entre 0 et 100, ce qui permet de préciser le niveau au-dessus duquel une concavité crée une séparation entre deux particules. La détermination de ce facteur s'est faite de manière empirique, en comparant les séparations créées des séparations voulues. L'application de cet opérateur permet de diviser un objet en deux objets distincts. Cela s'avère particulièrement utile lorsque deux étangs sont joints par une liaison de quelques pixels seulement qu'il est alors possible de supprimer automatiquement. L'inconvénient d'utiliser cette opération si tôt dans la démarche est que des petits trous à l'intérieur des objets suffisent parfois à diviser l'objet.
- La troisième opération, le bouchage de trous, consiste à remplir les trous à l'intérieur des objets sur une image binaire (Figure 2-12). Cette fonction remplit alors les trous éventuels résultant d'un changement local de la réponse spectrale au sein de l'étang.
- La quatrième et dernière opération consiste à calculer une série d'attributs pour chaque objet, un objet étant défini par un ensemble connexe de pixels (voisinage de von Neumann) (Figure 2-12). De nombreuses mesures sont alors calculées : texturales, morphologiques et de teinte. Un nombre restreint de mesures a été utilisé afin d'éliminer les entités non désirées. Les paramètres les plus pertinents sont la superficie, la circularité, la compacité et le rectangle englobant minimum (Minimum Bounding Rectangle - MBR).

| Paramètre | Formule | |
|-------------|-----------------------|---|
| Superficie | $n p$ | Où p est un pixel |
| Circularité | $(4 \pi * S) / (P^2)$ | Où S est la superficie, PC le périmètre de Crofton |
| Compacité | $16 * S / (P^2)$ | Où P est le périmètre |
| MBR | $S / S (mbr)$ | Où $S (mbr)$ est la superficie du rectangle englobant minimum |

Tableau 2-4 - Paramètres morphologiques employés

La circularité permet de mettre en évidence la déviation de forme d'un objet par rapport au cercle. La mesure relative au rectangle englobant minimum met en évidence la déviation de forme d'un objet par rapport à un rectangle. La circularité, la compacité et la mesure relative au rectangle englobant minimum permettent de distinguer les objets ayant une forme se rapprochant d'une forme rectangulaire des objets plus sinueux et montrent parfois une corrélation entre elles. Elles s'avèrent performantes pour distinguer les étangs ayant une forme géométrique simple d'autres entités aux formes plus complexes, tel que des cours d'eau. La combinaison des traitements spectraux et morphologiques a ainsi permis d'aboutir à une cartographie des étangs aquacoles.

2.3.2.3 Estimation de la qualité de détection

2.3.2.3.1 Construction de la base de donnée de référence vérité terrain

Pour pouvoir estimer la qualité de la détection des étangs, il a été nécessaire d'obtenir une carte dite de réalité terrain présentant les étangs aquacoles avec leurs superficies. L'enregistrement de points GPS aux extrémités des plans d'eau pourrait sembler *a priori* la méthode la plus fiable d'estimation des superficies. Il existe cependant plusieurs limites à cette méthode. D'abord, elle consomme beaucoup de temps. En second lieu, sa précision dépend des conditions de réception des informations de localisation et donc du nombre de satellites. Il faut en effet un nombre élevé de satellites pour obtenir une erreur de positionnement inframétrique ou de quelques mètres seulement. Enfin, selon la configuration des étangs, il peut être nécessaire de relever des points à l'intérieur même des étangs, ce qui n'est pas une tâche aisée. Une fois ce constat fait, une méthode qui apparaît pertinente repose sur l'utilisation d'images (satellites ou photographiques). Les avantages de l'image satellite sur les points GPS sont ainsi multiples : coût inférieur, temps d'acquisition moindre, vue synoptique.

Les images qui ont servi de référence sont celles disponibles dans la base GoogleEarthtm issues du satellite Quickbird qui ont une résolution de 60 cm en mode panchromatique et 2,44 m en mode multispectral (bleu, vert, rouge et proche infrarouge). Les informations disponibles dans GoogleEarthtm indiquent que les images qui couvrent notre zone d'études correspondent à des images multispectrales fusionnées avec la bande panchromatique, produisant ainsi une image finale de résolution 70 cm. La première étape a donc consisté à les extraire, partie par partie (Figure 2-11 et Figure 2-13).

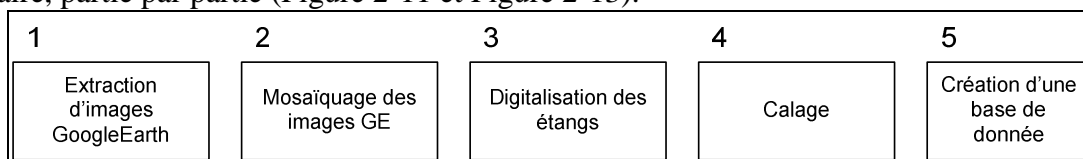


Figure 2-11 - Organigramme des étapes de construction de la base de données vérité terrain

Méthode de nettoyage des images binaires produites à partir des images multispectrales

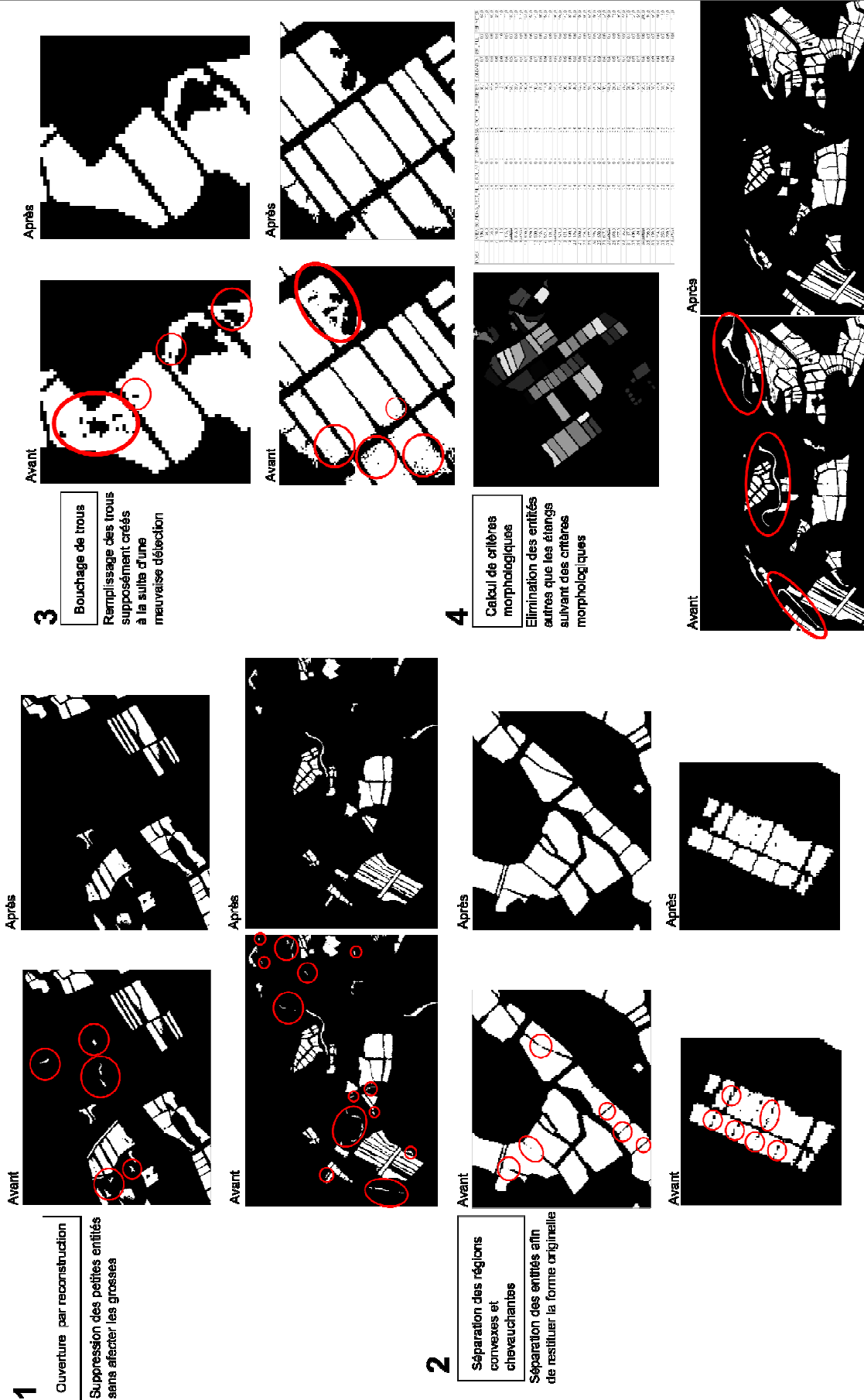


Figure 2-12 - Méthode de nettoyage des images binaires produites à partir des images multispectrales

Méthode de construction de la base de données dite de vérité terrain

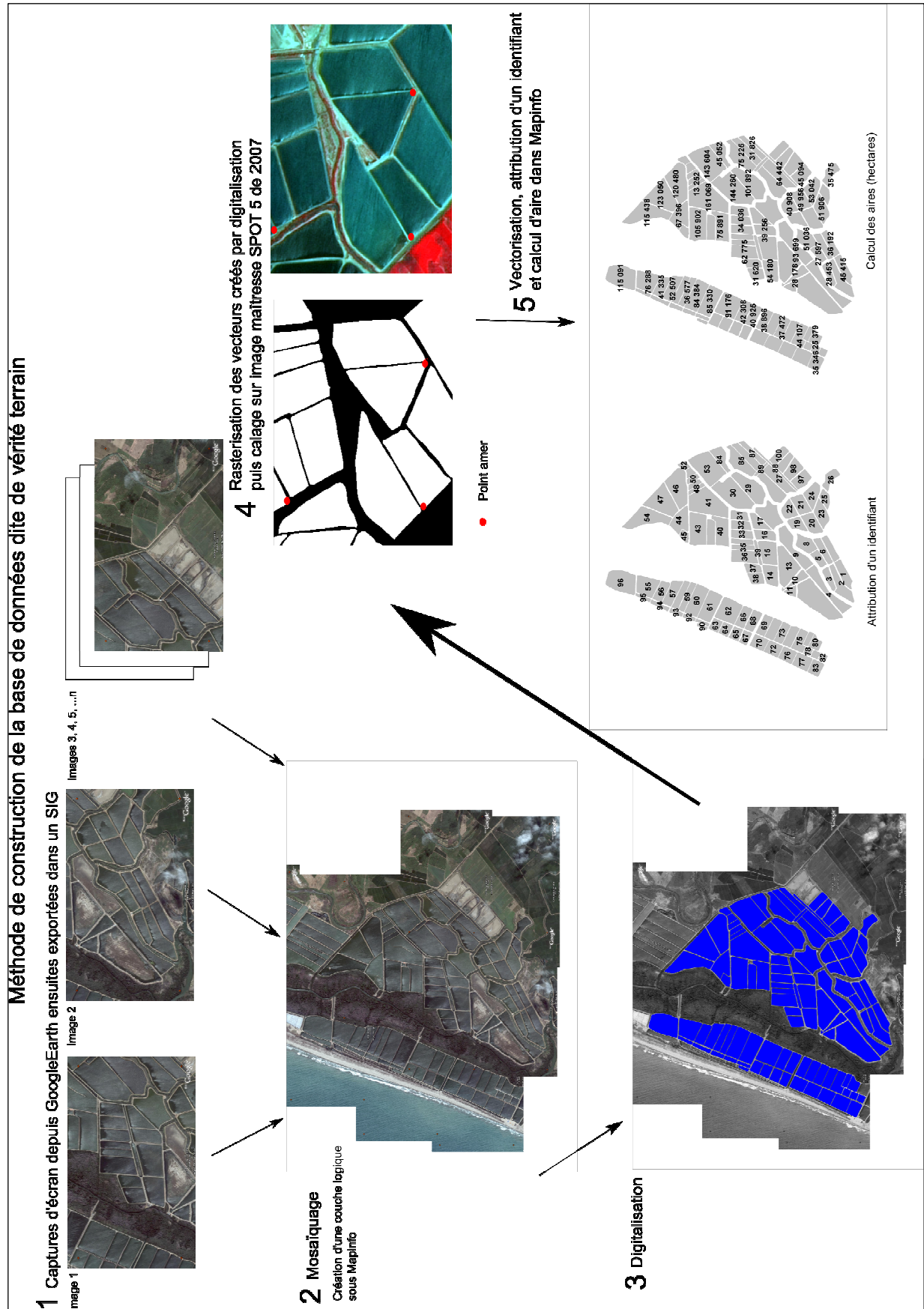


Figure 2-13 - Méthode de construction de la base de données vérité terrain

L'exportation s'est faite grâce à un logiciel intégré à Mapinfo, Gescene, dont la principale caractéristique est d'exporter les images depuis GoogleEarthtm en format JPEG tout en conservant les informations liées aux coordonnées géographiques. L'opération de mosaïquage est ainsi facilitée par la création d'une couche logique. Il est alors possible de digitaliser les étangs repérables sur les images à partir d'une interprétation visuelle qui reste une méthode très robuste. Une fois la digitalisation accomplie, il convient d'obtenir une image avec des coordonnées projetées afin de réaliser des calculs géométriques précis. Un logiciel de traitement d'image (ENVI) a été utilisé pour la réalisation de cette étape, après avoir rastérisé la couche vectorielle précédemment construite. Le calage s'est fait sur l'image SPOT 5 de 2007 fusionnée avec la bande panchromatique, c'est-à-dire sur une image avec une résolution de 2,5 m. Les mêmes transformations et interpolations ont été pratiquées que lors des corrections géométriques des images multispectrales. Au total, 21 points de calage ont permis d'obtenir un écart quadratique moyen de 0,94, c'est-à-dire inférieur à 2,5 mètres. Après vectorisation, la dernière étape a consisté à intégrer les vecteurs dans un SIG afin de construire la base de données. Chaque objet possède ainsi dans une table attributaire un identifiant et une superficie (Figure 2-13). L'étape suivante consiste alors à intégrer dans la base de données les résultats issus des traitements spectraux que l'on pourra alors comparer aux superficies des objets appartenant à la réalité terrain.

2.3.2.3.2 Intégration des données 'traitements' dans la base de données

La méthode d'intégration s'est réalisée en quatre étapes (Figure 2-14). La première consiste à repérer les étangs dont les superficies seront intégrées dans la base de données. Les étangs sélectionnés doivent répondre à deux critères : seuls les étangs remplis sur l'image multispectrale sont conservés, ce qui permet d'exclure les étangs qui ne peuvent apporter d'informations quant à la qualité de la détection, et seuls les étangs détectés dont les formes sont proches de la réalité sont finalement conservés, ce qui permet d'exclure les étangs mal détectés pour des raisons propres à la méthode de détection. Cette information liée à la qualité de la détection n'est pas perdue car on garde en mémoire ce nombre d'étangs mal détectés. Ce critère reste un des deux critères d'évaluation de la qualité de détection. La seconde étape consiste à repérer les identifiants des étangs ayant été finalement conservés à l'aide de la base de donnée géographique précédemment construite. On peut alors, dans une troisième étape, calculer la superficie des étangs. Ce calcul a été réalisé avec ENVI après segmentation de l'image afin de calculer les superficies sur des objets et non pas sur des pixels. Enfin, lors d'une quatrième et dernière étape, les résultats ont été intégrés dans la base de données initialement constituée des seuls objets de référence.

2.3.2.3.3 Méthodes statistiques d'évaluation de la qualité de détection

L'estimation de la qualité de détection, et donc le choix de la méthode la plus adaptée, s'est appuyée sur deux critères de sélection : (i) le nombre d'étangs détectés, et (ii) l'écart moyen relatif entre la superficie des étangs détectés et celle de la réalité terrain. Le premier critère résulte, comme on l'a dit précédemment, du rapport entre le nombre d'étangs détectables et le nombre d'étangs détectés (après donc élimination des étangs dont les formes détectées s'éloignent par trop de la forme réelle). Le second critère a été construit en normalisant l'écart entre l'aire de référence et l'aire détectée. Le Tableau 2-5 donne un aperçu de la construction de ce critère.

Intégration des données 'traitements' dans la base de données

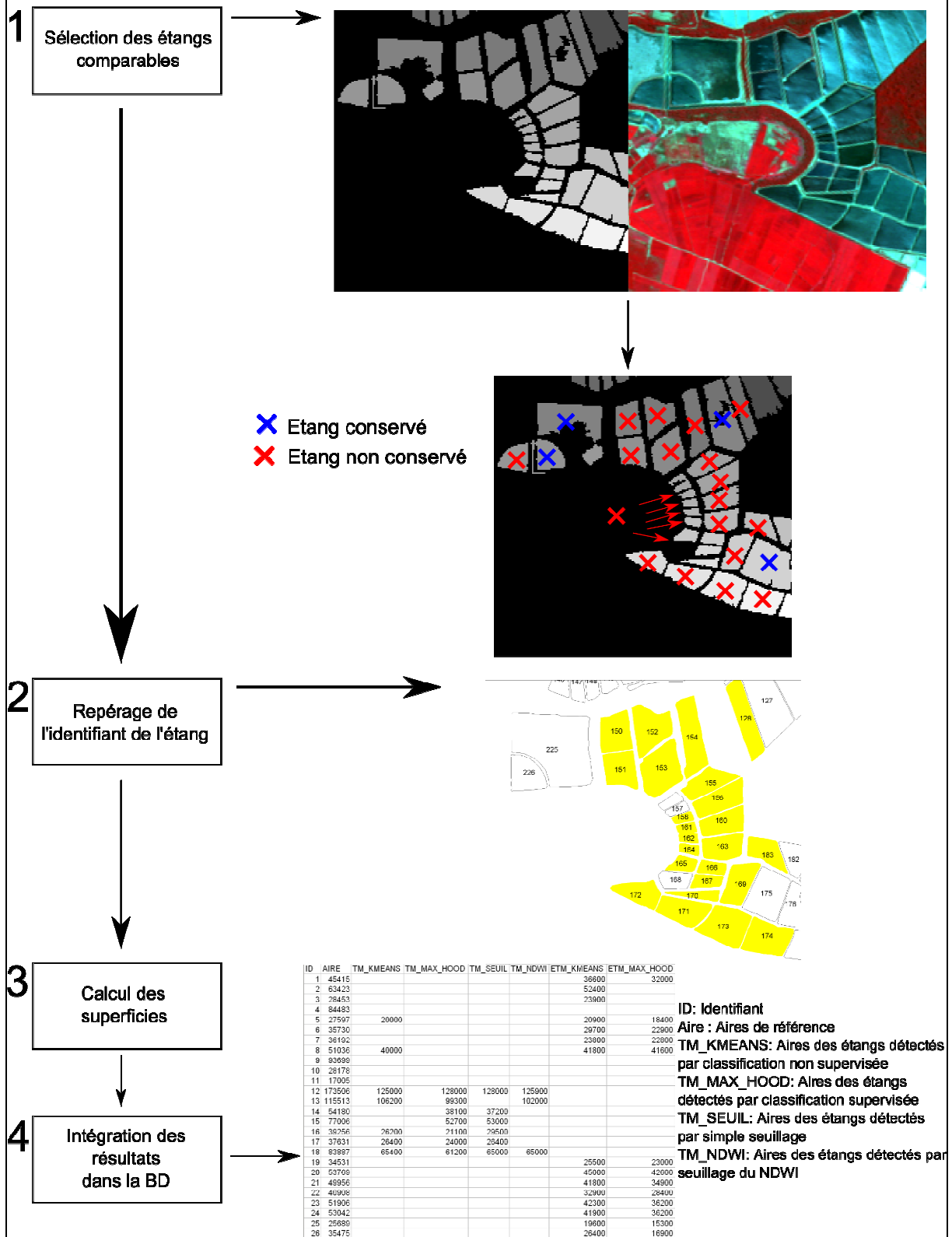


Figure 2-14 - Méthode d'intégration des données 'traitements' dans la base de données

| Aire de référence | | Aires détectés sur images ETM+ (4 méthodes) | | | | Ecart relatif | | | |
|----------------------------|-------|---|------------|-------|-------|---------------|------------|-------|------|
| ID | Aire | Max | | | | Max | | | |
| | | Kmeans | Livelihood | Seuil | NDWI | Kmeans | Livelihood | Seuil | NDWI |
| 1 | 45415 | 36600 | 32000 | 34100 | 36300 | 19,4 | 29,5 | 24,9 | 20,1 |
| 2 | 63423 | 52400 | — | 50800 | 51100 | 17,4 | no data | 19,9 | 19,4 |
| 3 | 28453 | 23900 | — | 20200 | 22400 | 16,0 | no data | 29,0 | 21,3 |
| 4 | 84483 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 5 | 27597 | 20900 | 18400 | 20200 | 20700 | 24,3 | 33,3 | 26,8 | 25,0 |
| 6 | 35730 | 29700 | 22900 | 24600 | 27400 | 16,9 | 35,9 | 31,2 | 23,3 |
| 7 | 36192 | 23800 | 22800 | 23600 | 23700 | 34,2 | 37,0 | 34,8 | 34,5 |
| 8 | 51036 | 41800 | 41600 | 43300 | 41900 | 18,1 | 18,5 | 15,2 | 17,9 |
| Ecart moyen relatif | | | | | | 20,9 | 30,9 | 26 | 23,1 |

Tableau 2-5 - Exemple de calculs des écarts moyens relatifs pour chacune des méthodes de détection

Les calculs ont été réalisés au sein de la base de données principale, ce qui a permis d'attribuer à chaque objet l'écart relatif à la valeur de référence. Ainsi, il a été possible de réaliser des cartes sur lesquelles les étangs ont été représentés sous forme d'objets avec une couleur correspondant à une classe d'écart relatif (classe de 0 à 10%, classe de 10% à 20% etc.).

2.3.2.3.4 Méthodes par approche-objet

Les techniques de traitements d'images issues de la morphologie mathématique (Apheliontm) (Annexe 2) ont été testées sur une image à très haute résolution spatiale enregistrée depuis GoogleEarthtm ainsi que sur une image panchromatique SPOT 5 à 2,5 m de résolution spatiale. L'exploitation d'images enregistrées depuis GoogleEarthtm s'explique non seulement par la très large couverture terrestre offerte par le logiciel mais aussi par la gratuité de ces images. L'utilisation de telles méthodes nécessite d'élaborer en amont un plan de travail à partir du problème à résoudre, sensiblement différent de celui développé précédemment, qui était d'identifier les pixels dont la signature spectrale est celle de l'eau. En effet, la résolution spatiale fait qu'il est inutile de développer des approches classiques, basées sur l'analyse multispectrale. Les changements texturaux, plus importants à très haute résolution, rendent en effet relativement inefficaces une telle approche. Précédemment, la méthode s'est appuyée sur d'autres critères, en particulier morphologiques, mais dans un second temps seulement. Ici, la méthode s'appuie dès le début sur les informations non seulement spectrales, mais aussi topologiques, texturales, et morphologiques.

Compte tenu des caractéristiques de forme et de taille des objets à détecter, le problème à résoudre est la détection des digues des étangs. Ces digues constituent en effet un obstacle que l'on peut assimiler à un contour. Les contours dans une image proviennent soit de discontinuités de la réflectance (texture, ombre), soit de discontinuités de hauteur (bords de l'objet) ; les digues appartiennent à ce second cas. On compte généralement trois types de contours : la marche, le toit et la pointe (Figure 2-15).

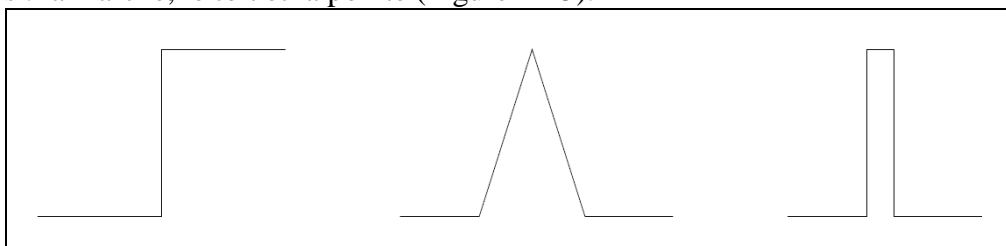


Figure 2-15 - Les différents types de contours

La plupart des techniques de détection de contours reposent sur l'étude des dérivées de la fonction d'intensité dans l'image (Figure 2-16).

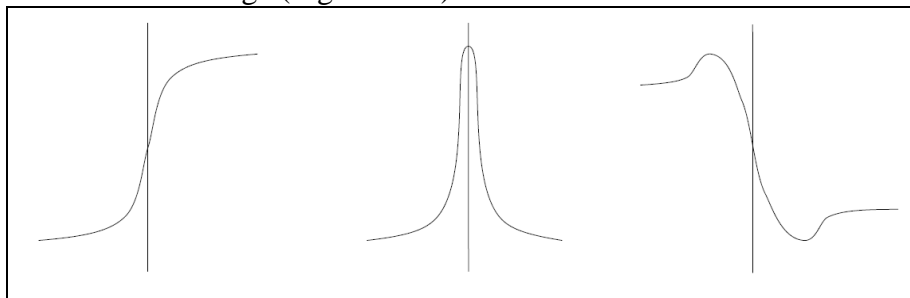


Figure 2-16 - La fonction d'intensité au voisinage d'un contour en marche et ses dérivées première et seconde

Plusieurs techniques, telles que celle de la détection du gradient, sont ainsi employées pour détecter les contours. La détection du gradient peut se faire par filtrage ou par masques. La détection par filtrage implique généralement de passer successivement un filtre passe-bas (pour réduire le bruit) puis un filtre passe-haut pour mettre en évidence les contours. Le principe repose sur la recherche d'un extremum de la dérivée première (ou d'un passage à 0 de la dérivée seconde) (Figure 2-16). On peut aussi utiliser des filtres de dérivation (par exemple Sobel, Roberts, Gradient, Prewitt) qui permettent de mesurer le gradient. Un autre moyen de mesurer le gradient consiste à utiliser les opérateurs morphologiques:

- en soustrayant l'image érodée de l'image dilatée
- en soustrayant l'image érodée de l'image originale
- en soustrayant l'image originale de l'image dilatée

Toutes les techniques citées plus haut montrent généralement de meilleures performances après élimination du bruit. Quelle que soit la méthode employée, la qualité de la détection est très liée à la qualité des contours de l'image. Il est ainsi préférable de réaliser des prétraitements visant à diminuer le bruit. Des étapes de post-filtrages sont aussi souvent nécessaires pour produire des images comportant l'information désirée. Parmi les filtres de prétraitement, on recherche ceux qui diminuent le bruit tout en préservant les discontinuités tel le filtre médian. On peut aussi utiliser des filtres alternés séquentiels qui conduisent à une bonne réduction du bruit grâce à une élimination progressive des pics et des creux de faible surface (Annexe 2). Une fois les contours détectés, une segmentation utilisant l'algorithme de la ligne du partage des eaux (LPE) (Beucher 1990) est appliquée sur l'image afin d'obtenir des objets individualisés et séparés les uns des autres suivant les contours préalablement détectés. Par la suite, des requêtes sur divers attributs morphologiques permettent de ne retenir que les étangs aquacoles. Lors de cette dernière étape, il est nécessaire de connaître les caractéristiques géométriques des étangs pour les distinguer des autres objets. La chaîne des opérations est représentée sur la Figure 2-17 :

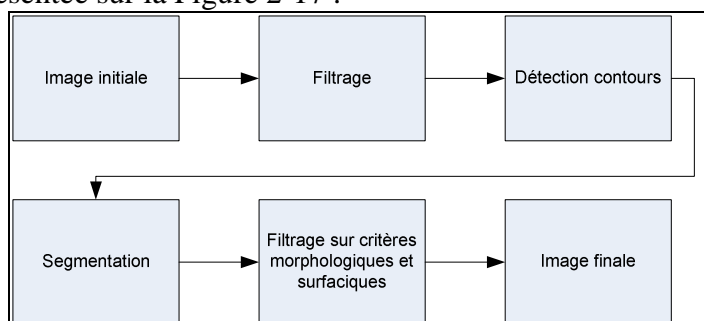


Figure 2-17 - Chaîne de traitement par morphologie mathématique

2.3.3 Les cartes d'occupation du sol

À toutes les dates, les cartes d'occupation du sol ont été réalisées suivant la même méthode (Figure 2-19). La méthode employée implique 4 étapes principales : une analyse en composante principale sur la totalité des canaux, la sélection des néo-canaux portant le plus d'information, une classification non-supervisée par Nuées Dynamiques, et enfin l'interprétation des classes obtenues à l'aide de la nomenclature précédemment établie. Ici, la présentation détaillée de la méthode est faite à travers les traitements d'une image en particulier, à savoir l'image Landsat TM de 1991 (Figure 2-18).

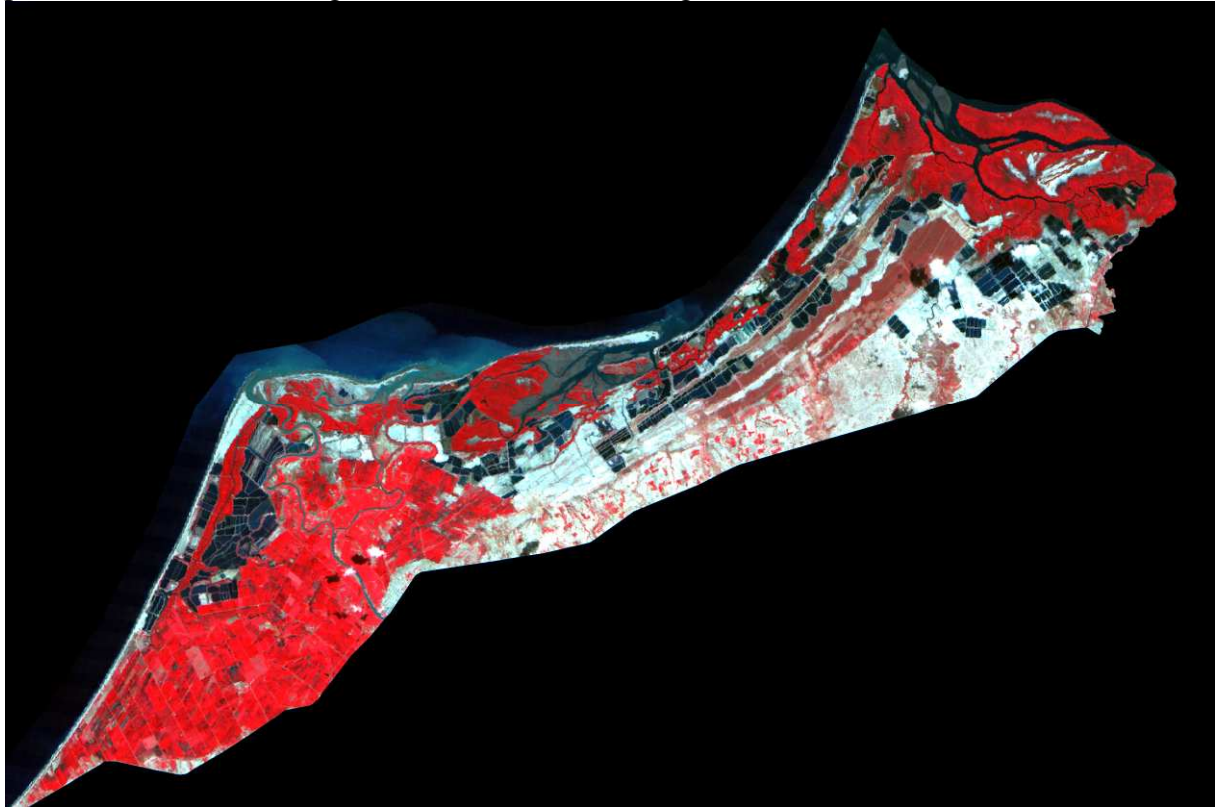


Figure 2-18 - Composition en fausses couleurs de l'image TM de 1991 (RVB: TM5-TM4-TM3)

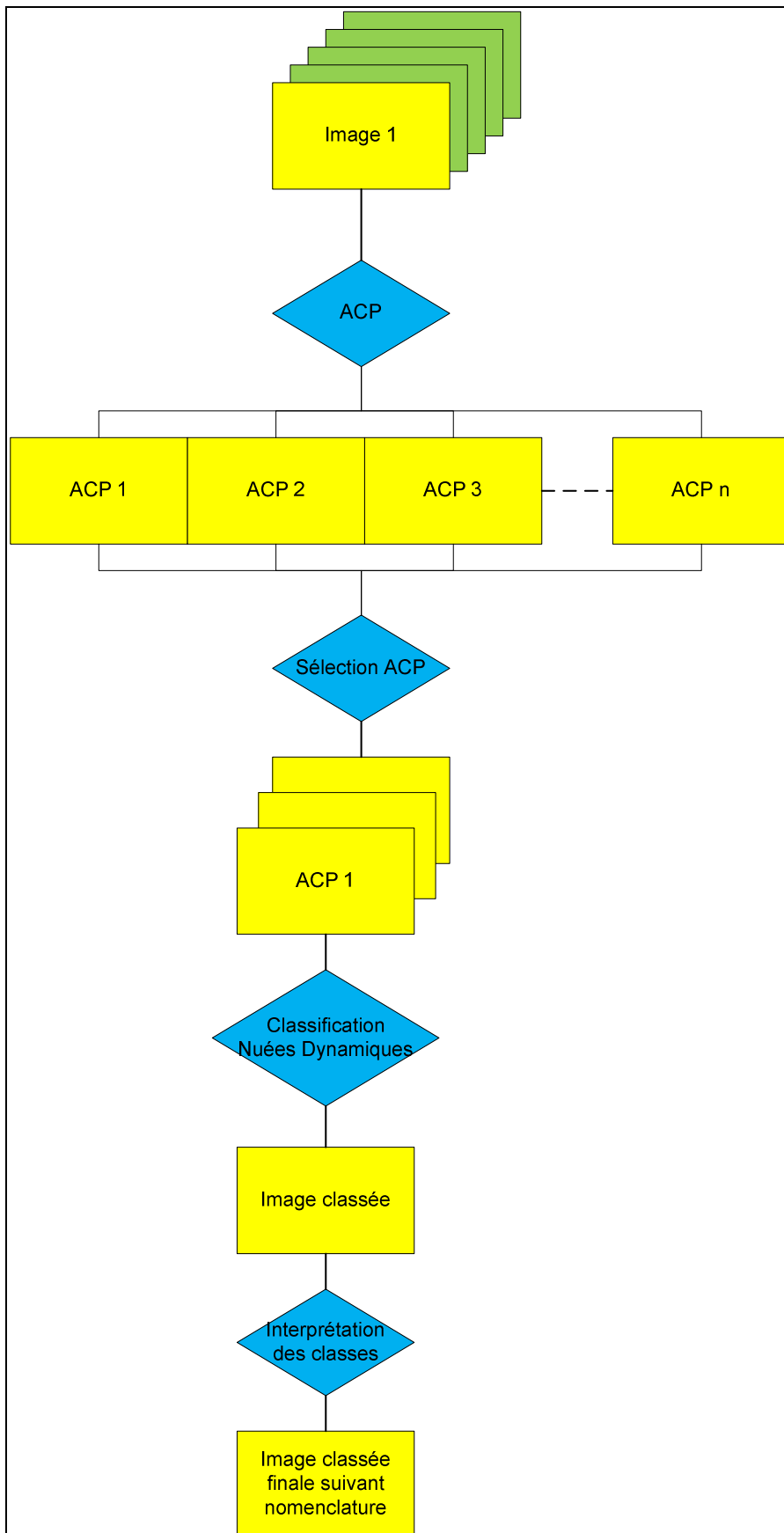


Figure 2-19 - Organigramme de la méthode de cartographie de l'occupation du sol

2.3.3.1 L'analyse en composantes principales

La première opération a consisté à réaliser une ACP à partir de cette image satellite, ce qui a permis d'obtenir six néo-canaux. Les avantages génériques de l'ACP sont (i) qu'elle permet de réduire le nombre de bandes et donc les temps de traitement ; mais aussi et surtout (ii) qu'elle permet une meilleure distinction des objets par une augmentation des contrastes entre les pixels. Les statistiques issues de l'ACP attribuent à chaque néo-canal une valeur propre qui correspond à la part de la variance totale portée sur chacun des canaux, soit la part d'information totale représentée par chaque axe (Tableau 2-6).

| Numéro de canal | Valeur propre | Pourcentage |
|-----------------|---------------|-------------|
| 1 | 4830,3 | 83,2 |
| 2 | 750,4 | 12,9 |
| 3 | 191,8 | 3,3 |
| 4 | 24,8 | 0,4 |
| 5 | 8,8 | 0,2 |
| 6 | 2,2 | 0,0 |

Tableau 2-6 - Valeur propre des néo-canaux issus de l'ACP sur l'image Landsat TM de 1991

Le pourcentage final représenté dans le Tableau 2-6 représente la part de la variance totale des données contenue dans chaque canal. Ainsi, on constate que les trois premiers canaux concentrent 99,4% de la variance totale, et que les deux premiers portent à eux seuls 96,1% de cette variance globale. Afin de pouvoir définitivement valider la sélection de canaux, s'ajoute, à cette étape statistique, une étape de d'interprétation visuelle de l'information portée par chaque néo-canal. Les trois premiers néo-canaux ont été reproduits ci-dessous (Figure 2-20 à Figure 2-22).

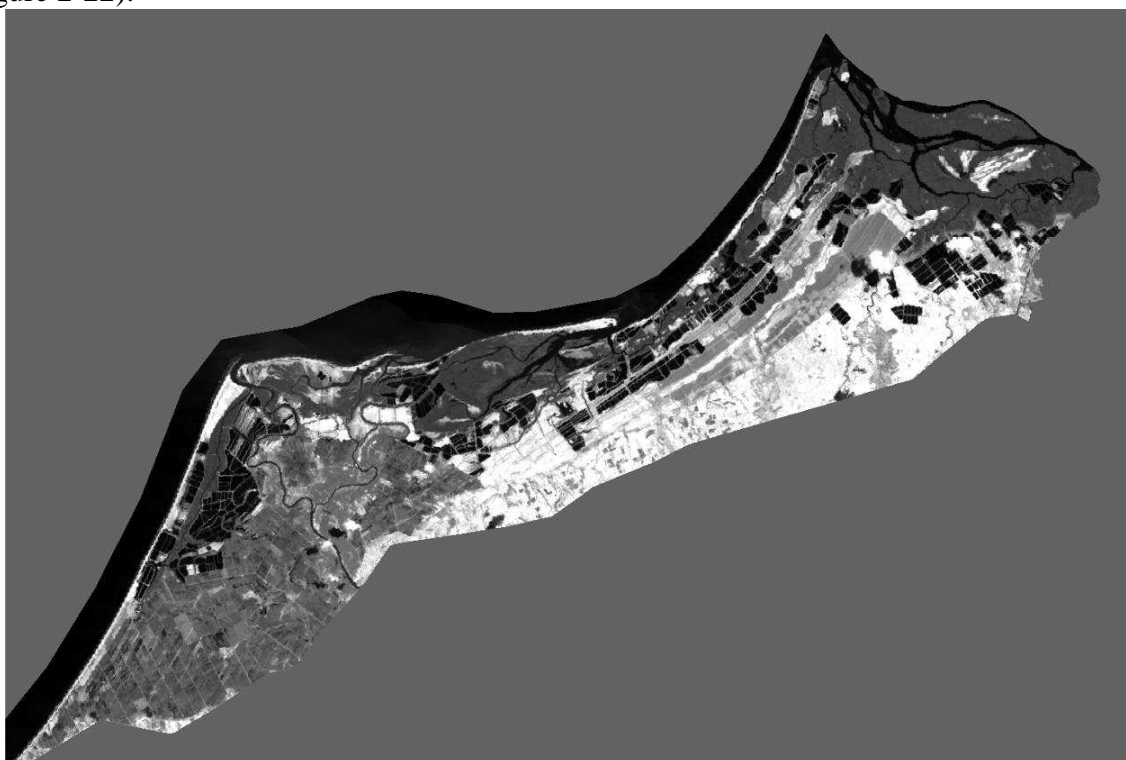


Figure 2-20 - Image en niveaux de gris de la première composante principale (ACP 1)

La première composante (Figure 2-20) oppose les pixels selon un gradient d'humidité, allant des valeurs négatives correspondant à de l'eau jusqu'à des maxima correspondant à des états de surface secs.

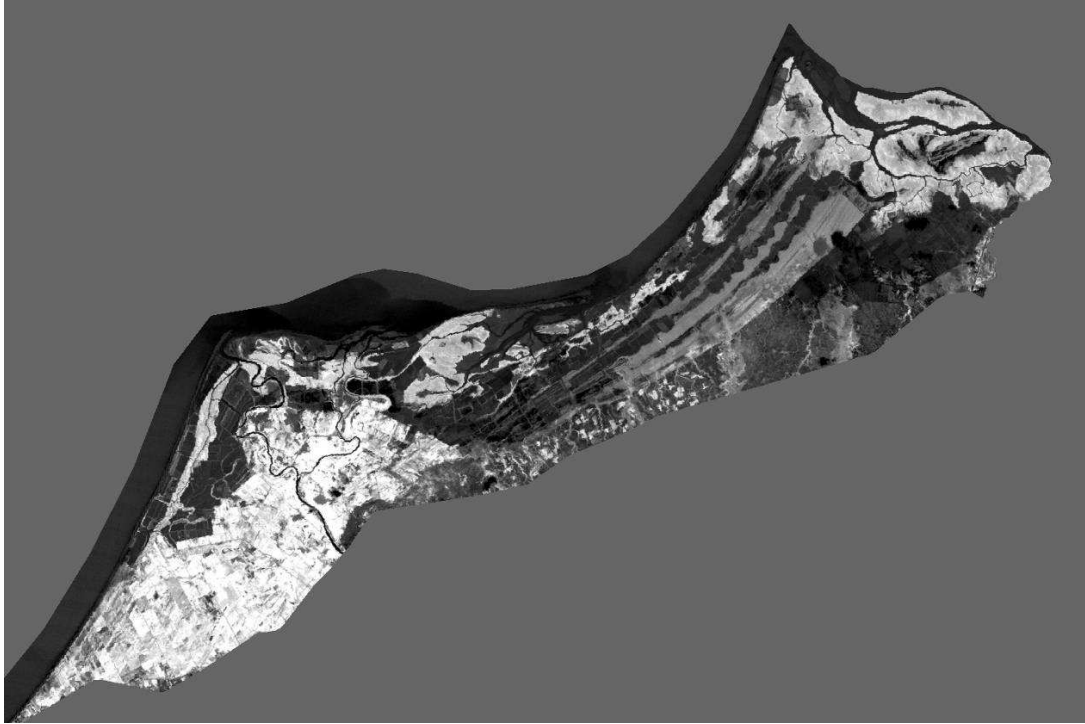


Figure 2-21 - Image en niveaux de gris de la seconde composante principale (ACP 2)

La seconde composante (Figure 2-21) montre un gradient lié à la présence de la végétation, entre des pixels à faible valeur correspondant à des zones non végétalisées (eau, sols nus) et des pixels à valeur élevés correspondant à des formations végétales (cultures, mangrove, forêt sèche).

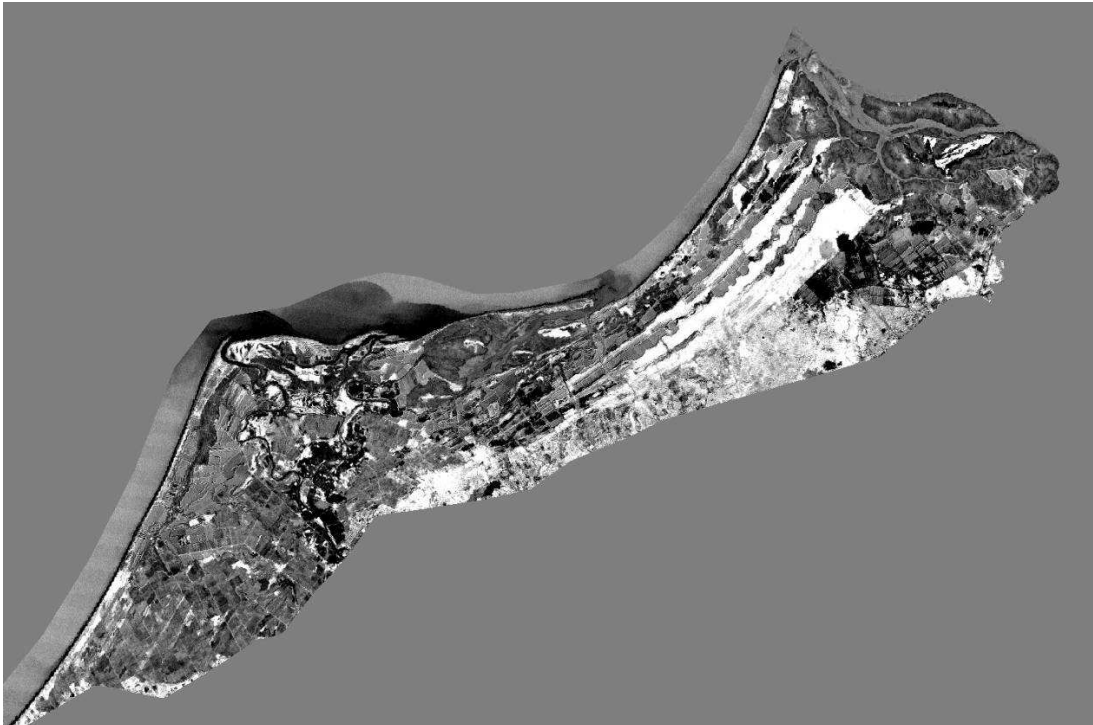


Figure 2-22 - Image en niveaux de gris de la troisième composante principale (ACP 3)

La troisième composante (Figure 2-22) est plus délicate à interpréter. Le gradient représenté ne montre pas des oppositions connues *a priori*. C'est la conséquence de la faible variance portée par cette composante.

2.3.3.2 La classification non-supervisée par Nuées Dynamiques

La classification non-supervisée par Nuées Dynamiques crée un nombre déterminé (préalablement fixé par l'utilisateur) de classes en s'appuyant sur un algorithme qui cherche à minimiser la variance intra-classe tout en maximisant la variance interclasses dans l'espace euclidien. La classification par centres mobiles nécessite de fixer au préalable le nombre de classes désiré. Celui-ci a fluctué selon les résolutions spatiales et spectrales des images, avec un nombre de classes moins important pour les images Landsat MSS par exemple. Pour l'image développée en exemple, ce nombre a été fixé à 25 classes (Figure 2-23).

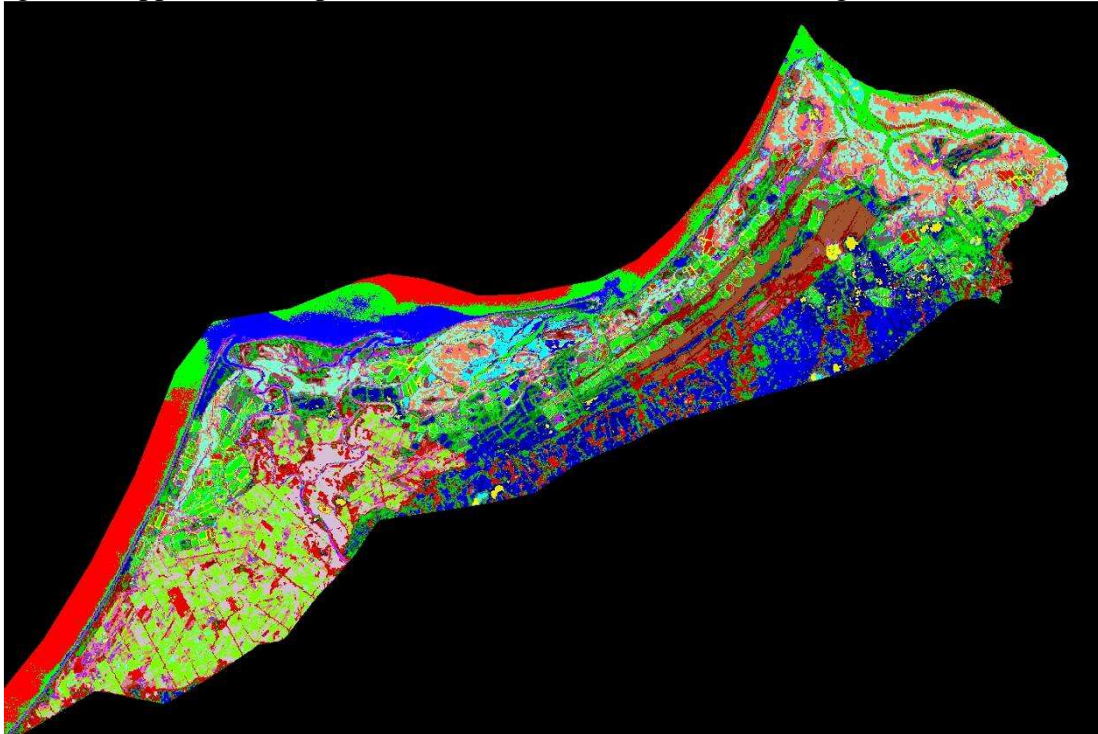


Figure 2-23 - Image classée issue de la première classification non-supervisée par Nuées Dynamiques

2.3.3.3 Interprétation des courbes radiométriques

Les réponses radiométriques moyennes de chacune des classes constituent une information supplémentaire à la répartition spatiale des classes (Figure 2-24). C'est par l'interprétation de ces courbes radiométriques qu'il a été possible d'effectuer des regroupements de classes en respectant la nomenclature élaborée.

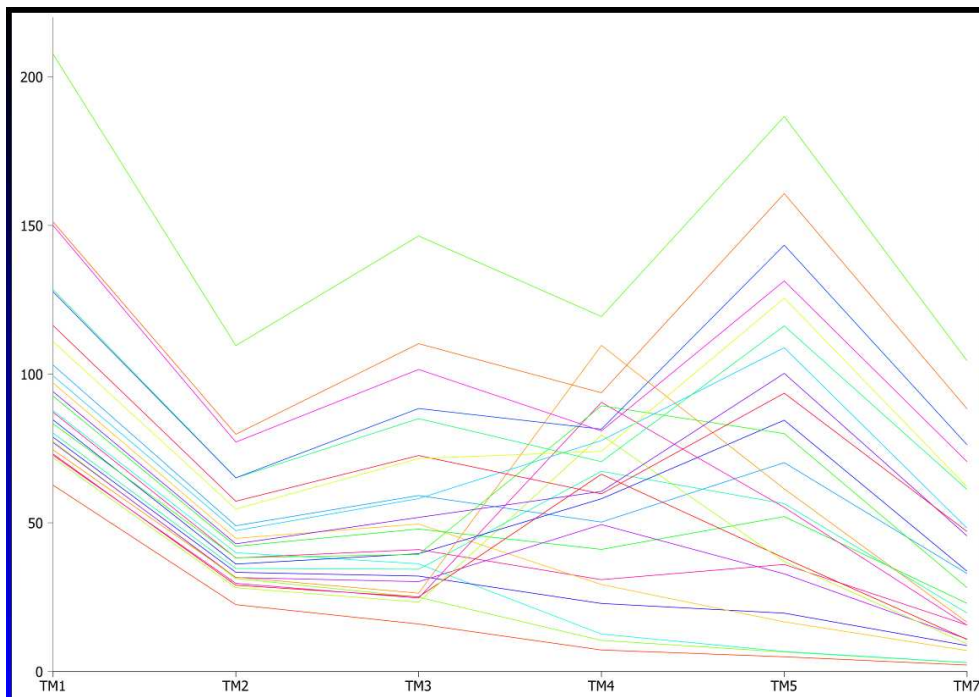


Figure 2-24 - Courbes radiométriques des classes issues de la classification non-supervisée

La première étape a consisté à un premier classement des courbes radiométriques dans les trois classes principales : eau, végétation, sol. Ainsi, les six premières classes montrent des courbes radiométriques moyennes qui peuvent être mises en rapport avec le comportement spectral de l'eau (Figure 2-25).

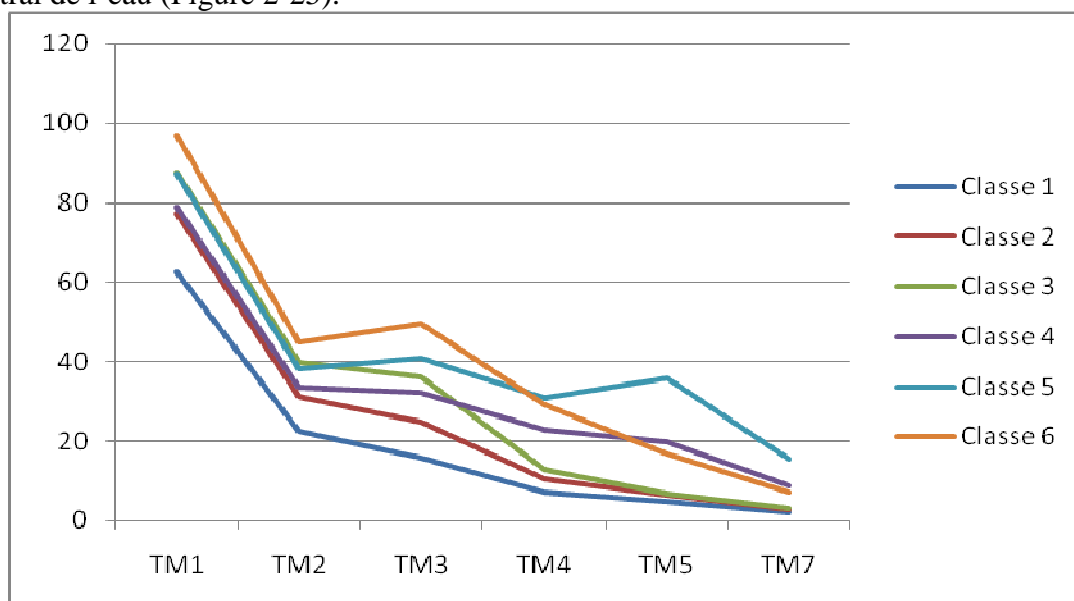


Figure 2-25 - Courbes radiométriques montrant une tendance similaire à la signature spectrale de l'eau

Les classes dont la signature spectrale se rapproche de celle des formations végétales ont ensuite été repérées, c'est-à-dire celles dont les courbes radiométriques présentent un pic dans le proche infrarouge (TM4) (Figure 2-26).

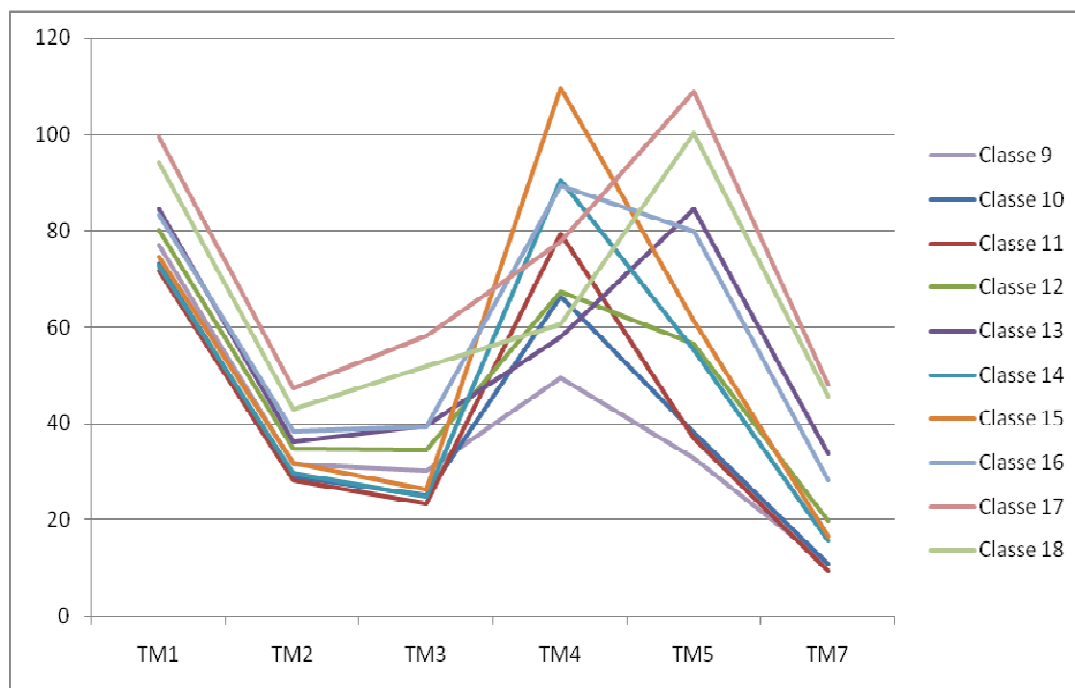


Figure 2-26 - Courbes radiométriques montrant une tendance similaire à la signature spectrale des formations végétales

Ce sont enfin les classes dont la signature spectrale se rapproche de celle des sols qui ont été identifiées, c'est-à-dire avec des réponses élevées dans la majorité des bandes et une tendance à l'augmentation entre le vert (TM2) et l'infrarouge moyen (TM5) (Figure 2-27).

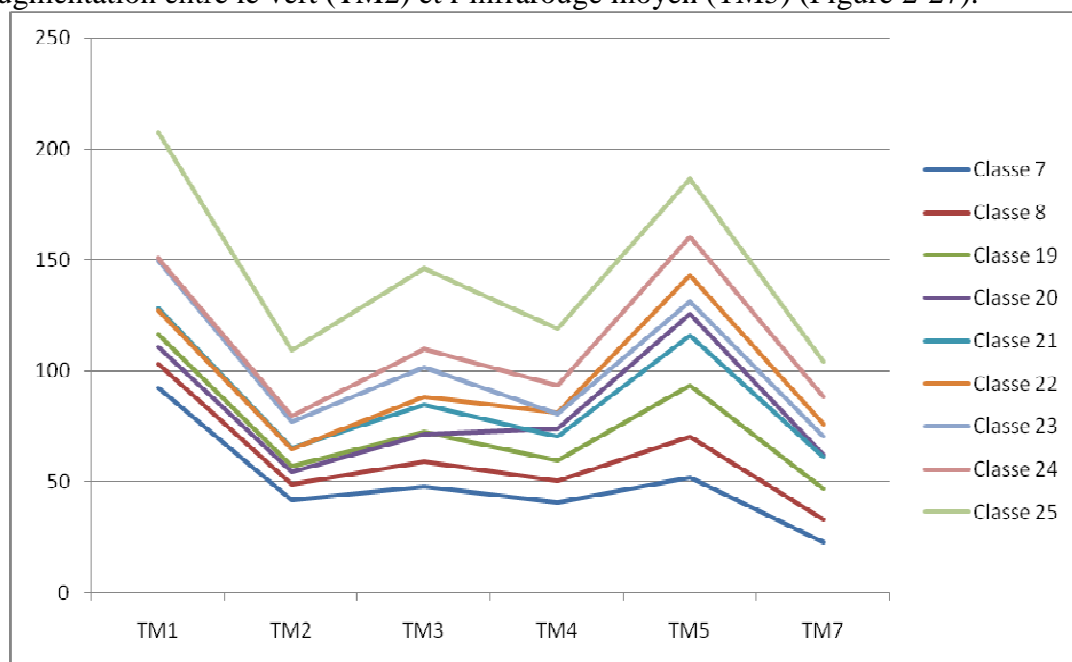


Figure 2-27 - Courbes radiométriques montrant une tendance similaire à la signature spectrale des sols

Sur la Figure 2-27, on constate que trois courbes présentent une courbe similaire à celle de l'eau. Les différences dans le visible sont généralement le résultat d'une interférence avec des éléments compris dans la colonne d'eau ou sur le fond, en particulier des éléments minéraux. Trois classes (classes 1, 2 et 3) ont donc été interprétées comme appartenant à la classe eau. Les différences dans le visible de ces trois classes ont été interprétées comme dépendantes de la turbidité. Ce facteur n'étant pas l'objet du présent travail, un premier regroupement a été

opéré entre ces trois classes sans les distinguer les unes par rapport aux autres. Les trois autres classes (4, 5 et 6), montrant des valeurs plus élevées dans l'ensemble des canaux, ont été interprétées comme correspondant à des plans d'eau de faible profondeur ou des sols nus à très forts taux d'humidité et ont ainsi été regroupées dans la classe zone humide.

Pour interpréter les classes de végétation, les classes de végétation présentant un fort pic dans l'infrarouge, soit cinq classes, ont d'abord été réunies sur un même graphique (Figure 2-28). Sachant que la mangrove possède un pic dans le proche infrarouge généralement plus faible que celui des cultures, cela a permis d'interpréter les classes 10 et 11 comme appartenant à la classe mangrove. Les trois autres classes, 14, 15 et 16, présentent un pic dans le proche infrarouge plus élevé, ce qui permet de les regrouper dans la classe des cultures. La classe 16, qui présente une réponse plus élevée dans TM5 correspond à des cultures dont la turgescence est moins forte, c'est-à-dire que le taux d'humidité à l'intérieur des plantes est moins fort qui peut aussi être la conséquence d'un taux d'humidité du substrat plus faible.

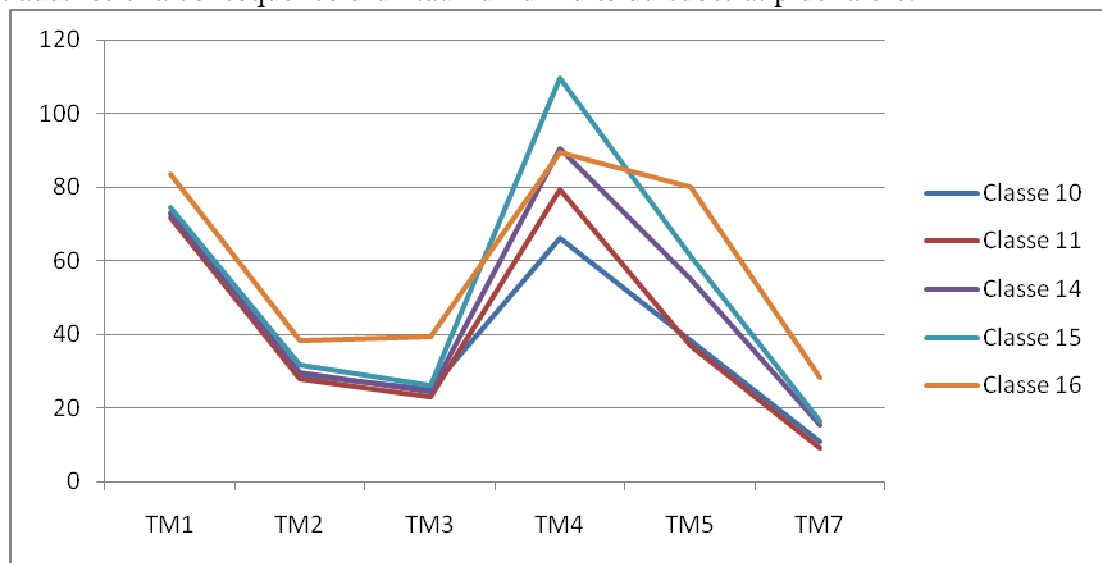


Figure 2-28 - Courbes radiométriques des classes de végétation présentant un fort pic dans le proche infrarouge

À partir des courbes représentées sur la Figure 2-29, des regroupements ont été effectués dans les classes de forêt sèche et de végétation mixte. La classe 13 présente à la fois une forme et des valeurs proches de celle de la forêt sèche, c'est-à-dire des valeurs relativement faibles dans le visible, une augmentation dans le proche infrarouge et des valeurs élevées dans TM 5 du fait que cette végétation soit soumise à un stress hydrique une majeure partie de l'année. Les autres courbes, aux valeurs et aux formes globales variées, ont été regroupées dans la classe dite de végétation mixte.

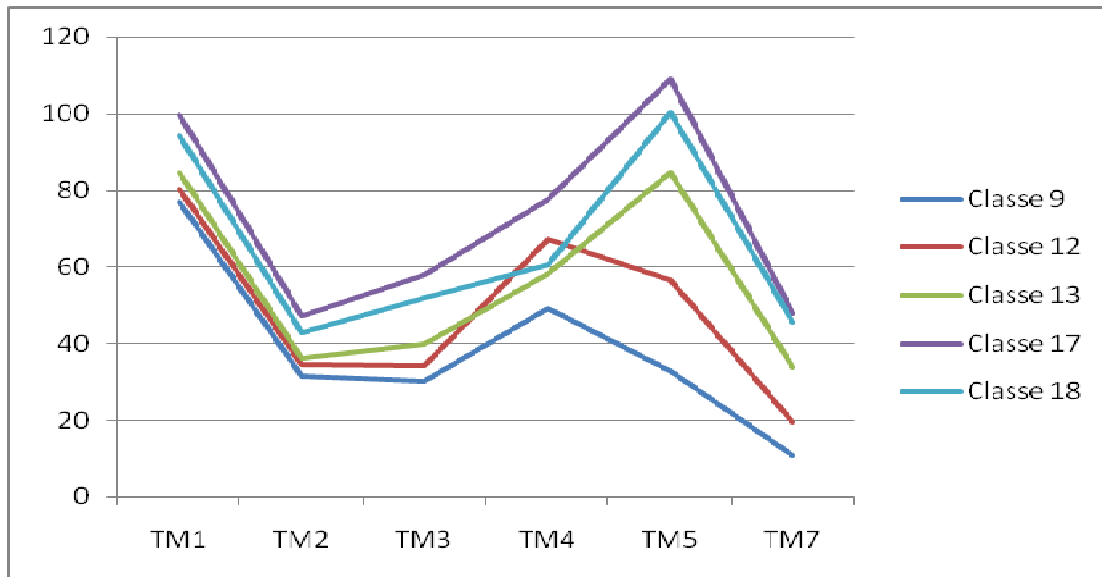


Figure 2-29 - Courbes radiométriques des classes de végétation présentant un pic dans le proche infrarouge peu marqué

Enfin, les courbes des sols nus (Figure 2-30) montrent des formes globalement très proches les unes des autres. Les différences de valeurs s'expliquent par la granulométrie, la texture et le taux d'humidité de surface. Ainsi, les classes 7 et 8, présentant des niveaux de réponse faibles, ont été regroupés dans la classe des sols nus humides. Toutes les autres classes ont été regroupées dans la classe des sols nus.

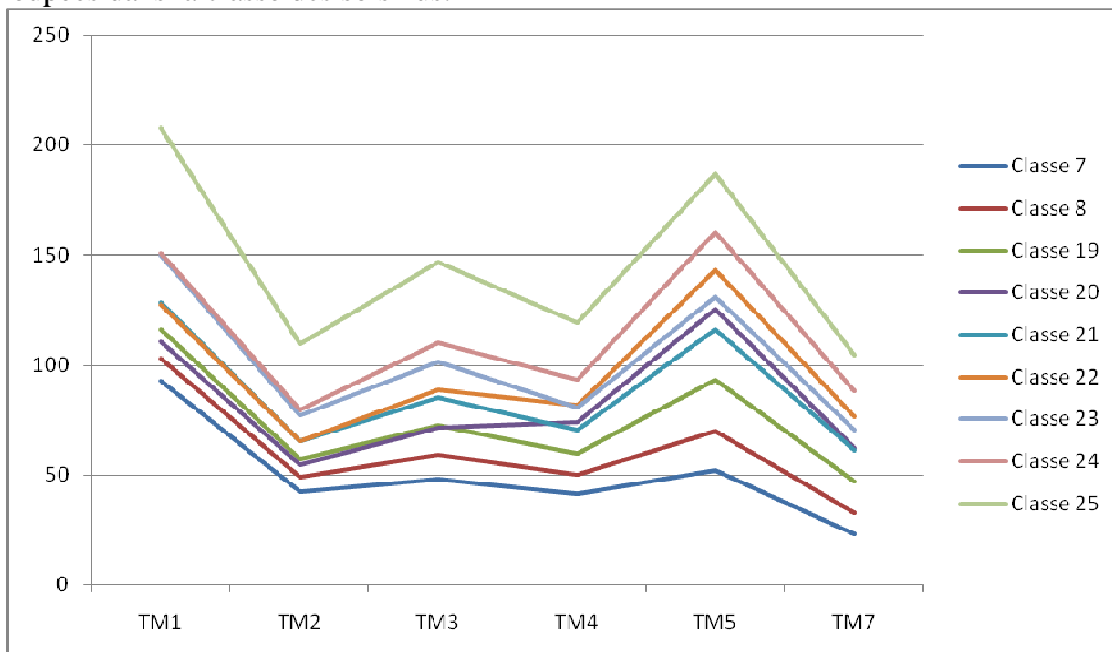


Figure 2-30 - Courbes radiométriques des classes de sols nus

2.3.3.4 Vérification des cartes d'occupation du sol

Afin de valider l'interprétation des classes, une méthode de vérification basée sur des données tests a été utilisée, appelées encore zones de réalité terrain. Cette étape a pour but de diagnostiquer les erreurs de classification lors (i) du prétraitement, (ii) de l'interprétation des classes (Story et Congalton 1986). L'estimation de la qualité de détection s'est faite grâce à une matrice de confusion. Une telle matrice comporte deux ensembles de données : celui contenant les classes produites par les traitements et ensuite interprétées (en ligne), et celui

comportant les données de référence, aussi appelées réalité terrain (en colonne). L'exactitude générale (*overall accuracy*) est calculée en divisant la somme des nombres en diagonale (correspondant au nombre d'éléments correctement classés) par le nombre total d'éléments. Deux indices supplémentaires permettent de mieux évaluer la qualité de la classification : l'exactitude dite du producteur (de la carte) et l'exactitude de l'utilisateur. La première consiste à calculer le nombre d'éléments de l'ensemble de référence correctement classés dans l'ensemble classifié ce qui revient alors à calculer le nombre d'omissions de la classification finale. Cet indice est dit du producteur car celui-ci « [...] est intéressé de savoir si un état de surface spécifique peut être cartographié » (Story et Congalton 1986). Le second indice revient à calculer le nombre d'éléments de chaque classe produite correctement classés au regard de l'ensemble de référence. Cela revient à calculer la probabilité que chaque classe produite a de représenter l'état de surface réel. Ici sont alors calculées les erreurs de commission, dites encore de fiabilité (Story et Congalton 1986). Enfin, l'indice de Kappa est un indice utilisé pour évaluer l'exactitude d'une classification en tenant compte des erreurs en ligne et en colonne à l'intérieur de la matrice de confusion (Foody 2002). Cet indice est surtout sensible aux erreurs de commission (Daloz et Collet 2001). Son calcul permet en outre de comparer la fidélité relative de plusieurs classifications. Une de ses faiblesses est qu'il ne tient pas compte des pixels non classés (Daloz et Collet 2001). Le calcul de ces indices requiert donc au préalable l'identification des données de référence. Au total 843 pixels ont été identifiés, compris dans 76 polygones. L'exactitude globale est de 93,7% (790/843 pixels correctement classés) et le coefficient de Kappa de 0,92 (Tableau 2-7) (voir Annexe 3 pour les statistiques des autres images).

| Classes | Vérité terrain (pixels) | | | | | | | | Total |
|--------------------|-------------------------|-------------|---------------|--------|----------|-------------|----------|------------|-------|
| | Eau | Zone humide | Sol nu humide | Sol nu | Mangrove | Forêt sèche | Cultures | Végétation | |
| Eau | 102 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 104 |
| Zone humide | 0 | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75 |
| Sol nu | 0 | 25 | 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 |
| Sol nu | 0 | 0 | 0 | 142 | 0 | 0 | 0 | 0 | 142 |
| Mangrove | 0 | 0 | 0 | 0 | 149 | 0 | 4 | 0 | 153 |
| Forêt sèche | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 106 | 0 | 15 | 122 |
| Cultures | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 137 | 1 | 138 |
| Végétation | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 32 | 37 |
| Total | 102 | 102 | 52 | 142 | 150 | 106 | 141 | 48 | 843 |

Tableau 2-7 - Matrice de confusion pour l'image Landsat TM de 1991

Le tableau des erreurs d'omission et de commission fournit des détails supplémentaires (Tableau 2-8). Si l'on considère par exemple les zones humides, on constate une différence entre l'exactitude du producteur et celle de l'utilisateur. La première valeur indique qu'un peu plus de 25% des pixels de zone humide n'ont pas correctement été classés. À l'inverse, tous les pixels classés comme zone humide appartiennent bien à cette classe. Cela revient à dire que la classe zone humide sera sous-estimée, mais que, dans le même temps, la classe de la zone humide ne comprend que des pixels de zones humides. Dans le cas de la forêt sèche une partie de la classe forêt sèche correspond dans la réalité à la classe végétation. Ainsi la superficie de la classe forêt sèche est surestimée.

Pour Foody (2002), les cartes d'occupation du sol produites à partir d'images satellites sont un modèle imparfait de l'environnement car elles s'accompagnent inévitablement d'erreurs. Les valeurs tirées de la matrice de confusion permettent d'estimer le degré d'exactitude de la classification. Cette étape permet ainsi la poursuite de l'analyse, et en particulier la diachronie qui doit s'appuyer sur des cartes thématiques les plus exactes possibles.

| Classes | Exactitude producteur (%) | Exactitude utilisateur (%) | Exactitude producteur (pixels) | Exactitude utilisateur (pixels) |
|---------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Eau | 100 | 98 | 102/102 | 102/104 |
| Zone humide | 74 | 100 | 75/102 | 75/75 |
| Sol nu humide | 90 | 65 | 47/52 | 47/72 |
| Sol nu | 100 | 100 | 142/142 | 142/142 |
| Mangrove | 99 | 97 | 179/150 | 149/153 |
| Forêt sèche | 100 | 87 | 106/106 | 106/122 |
| Cultures | 97 | 99 | 137/141 | 137/138 |
| Végétation | 67 | 86 | 32/48 | 32/37 |

Tableau 2-8 - Valeurs d'omissions et de commissions pour l'image Landsat TM de 1991

2.3.4 La diachronie

La diachronie est une technique consistant à identifier les changements d'occupation du sol entre deux dates. C'est un processus d'identification des variations de l'état d'un objet par comparaison de son état à différentes dates (Singh 1989). Il en existe globalement deux types : un premier qui détecte d'abord le changement et ensuite assigne des classes (par exemple comparaison directe pixel par pixel de la réflectance) et un second qui assigne d'abord des classes avant d'en détecter les changements (comparaison post-classification) (van Oort 2007). Cette seconde méthode dite de post-classification a été choisie car elle passe outre les difficultés liées à l'emploi des méthodes de détection de changement sur des images acquises à différents jours durant l'année ou enregistrées depuis différents capteurs (Singh 1989). Le principal désavantage de cette méthode est qu'elle est très dépendante de la qualité des classifications réalisées au préalable (Singh 1989).

En premier lieu, il faut que les paires d'images aient la même résolution spatiale. La technique du ré-échantillonnage consiste à modifier la taille des pixels d'une image. Plusieurs ré-échantillonnages ont alors été réalisés afin que les pixels des images de chaque paire aient la même taille. L'image ré-échantillonnée est celle dont la résolution spatiale est la plus faible afin de conserver tous les détails de l'image présentant la résolution spatiale la plus forte. Ainsi, pour réaliser la diachronie sur le couple d'images Landsat MSS acquise en 1977 (79 m) et Landsat TM (1991), c'est l'image MSS de 1977 qui a été ré-échantillonnée.

La méthode consiste simplement à attribuer un code numérique à chacune des classes pour qu'après addition des deux cartes, l'on obtienne une carte avec toutes les combinaisons possibles. Par exemple pour la diachronie effectuée sur les cartes de 1977 et de 1991, les classes de la première carte ont été codées selon des multiples de 10, de 10 à 70. Les classes de la seconde carte ont, quant à elles, été classées entre 1 et 7. On obtient ainsi, après addition, des classes de stabilité (11, 22, 33...) et des classes de changements (correspondant aux codes restants) (Figure 2-31).

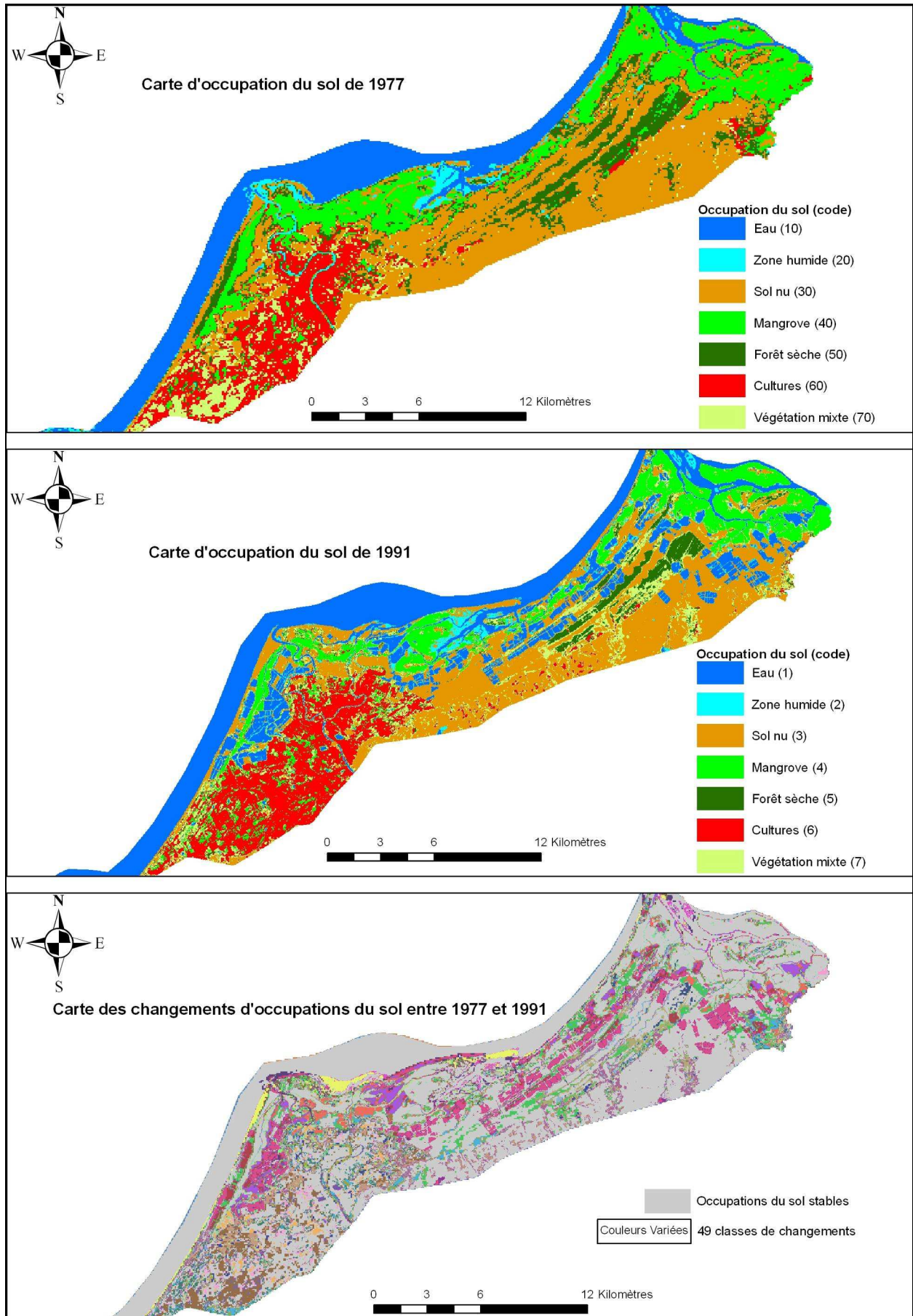


Figure 2-31 - Cartes d'occupations du sol et carte des changements entre 1977 et 1991

Malgré cela, le nombre de classes reste encore très grand (42 classes). Cette quantité d'information ne permet pas une identification visuelle claire des changements qui ont eu lieu entre les deux dates. Il faut donc opérer une réduction de l'information représentée grâce à une sélection qui peut se faire suivant plusieurs critères : la superficie, la nature du changement, le niveau de fragmentation, ou la localisation du changement. La nature du changement a ici été considérée, au même titre que la superficie car l'objectif premier est de repérer les changements ayant une dimension anthropique, c'est-à-dire contraint, totalement ou en partie et directement ou indirectement, par l'occupation humaine. Il a donc semblé intéressant de repérer, en priorité, les changements dont la nature n'apparaissait pas *a priori* naturelle ou uniquement naturelle. Ceci a conduit à élaborer des premières hypothèses sur les raisons des changements. Dans notre exemple, la sélection a permis de conserver les changements suivants :

| Changement | Hypothèse | Changement | Hypothèse |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Eau à sol nu | Progradation côtière | Mangrove en eau | Dynamique régressive |
| Zone humide à sol nu | <i>Idem</i> | Mangrove à sol nu | <i>idem</i> |
| Sol nu à eau | Changement d'usage | Mangrove à cultures | <i>idem</i> |
| Sol nu à zone humide | Changement d'usage ou érosion | Mangrove à végétation mixte | <i>idem</i> |
| Sol nu à mangrove | Dynamique progressive | Forêt sèche à eau | Changement d'usage |
| Sol nu à cultures | Extension de l'agriculture | Forêt sèche à sol nu | Dynamique régressive |
| Sol nu à végétation mixte | Augmentation de la biomasse | Cultures à sol nu | Changements cultureux |

Tableau 2-9 - Changements sélectionnés et hypothèse sur l'origine du changement

Les hypothèses qui accompagnent les changements sélectionnés permettent de saisir une ou plusieurs dimensions de leurs causes probables. Les dynamiques que ces changements supposent sont : (i) une dynamique de la couverture végétale, (ii) un changement d'utilisation du sol, et (iii) une dynamique du trait de côte. Le fait de porter un jugement *a priori* sur le changement peut prêter à confusion. Toutefois, lorsque ce jugement s'appuie sur la connaissance préalable du territoire, comme dans notre cas, la probabilité qu'il soit fallacieux diminue.

2.4 Résultats préliminaires : les méthodes de détection des étangs

Les résultats présentés ici ne concernent que la détection des étangs, et plus précisément la qualité de détection des différentes techniques.

2.4.1 Approche cartographique

Les résultats issus des différentes méthodes de détection des étangs sont représentés sur des planches qui portent à la fois des informations statistique et spatiale (Figure 2-33 à Figure 2-40). Chaque planche présente ainsi, pour une image, les étangs détectés et identifiés. Ainsi, pour évaluer les méthodes et sélectionner la plus performante, plusieurs informations peuvent être comparées. Seule la capacité des méthodes à détecter les étangs dans leurs limites spatiales a été évaluée, c'est-à-dire entourés de digues.

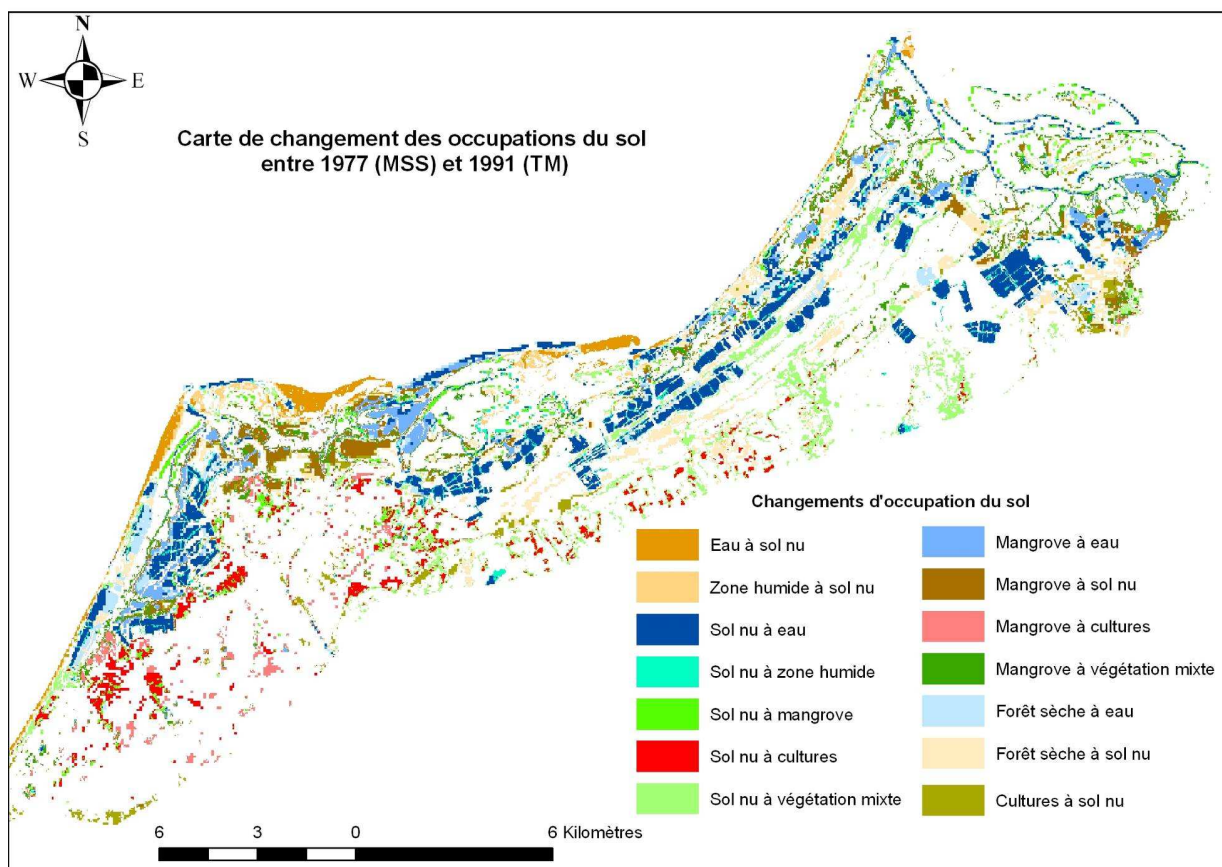
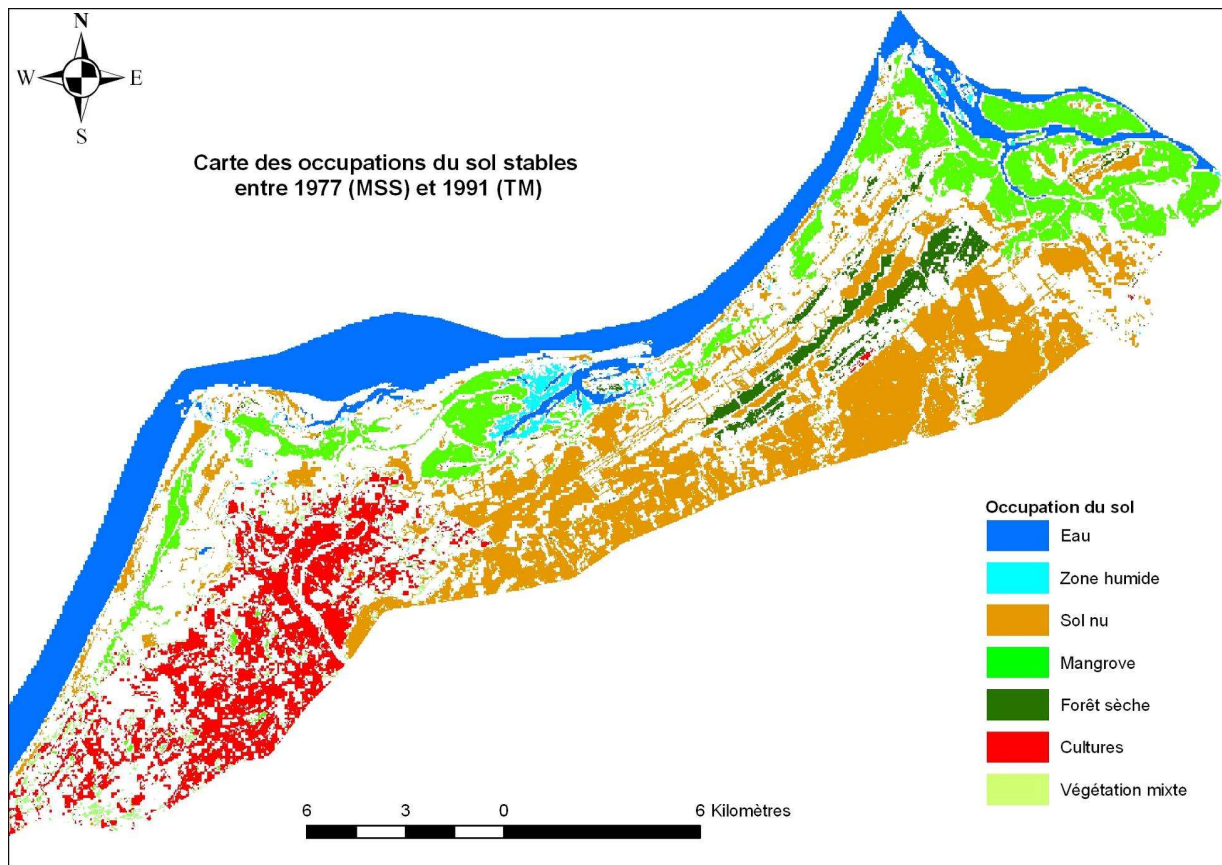


Figure 2-32 - Cartes des occupations du sol stables et carte des changements entre 1977 et 1991

Image TM de 1991

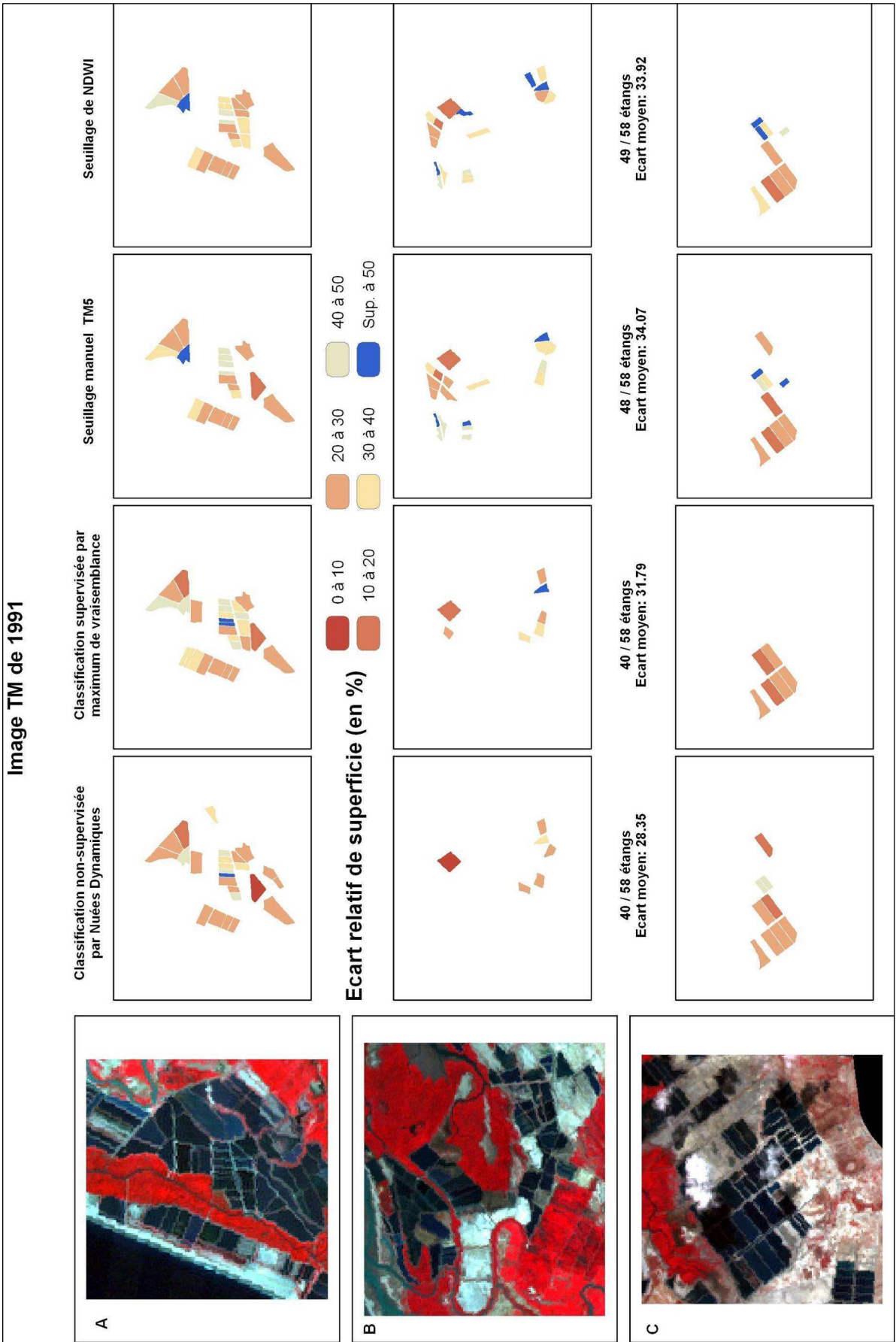


Figure 2-33 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (Landsat TM 1991)

Image ETM+ de 2000

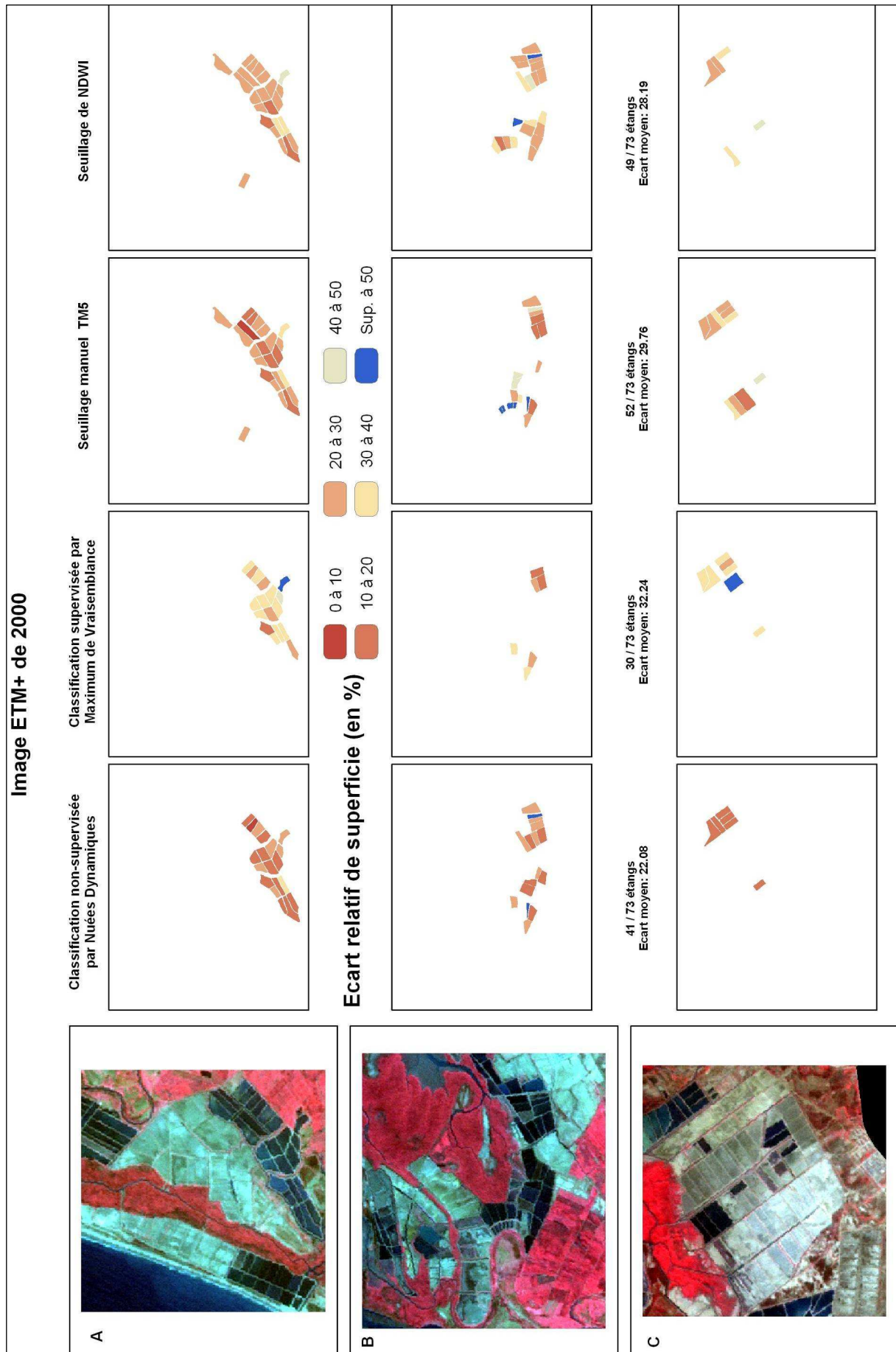


Figure 2-34 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (ETM de 2000)

Image SPOT 5 de 2003

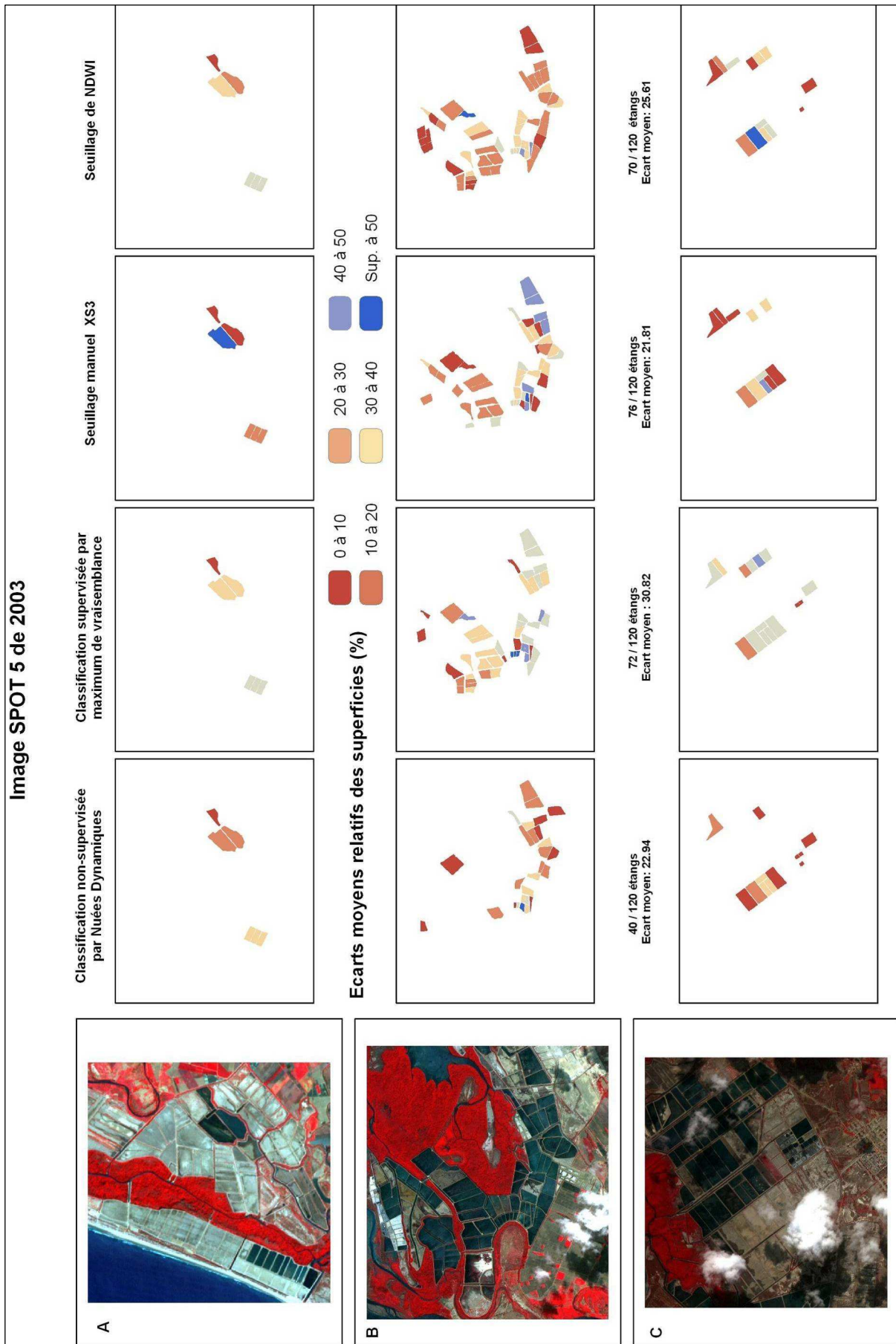


Figure 2-35 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (SPOT 5 2003)

Image SPOT 5 fusionnée de 2003

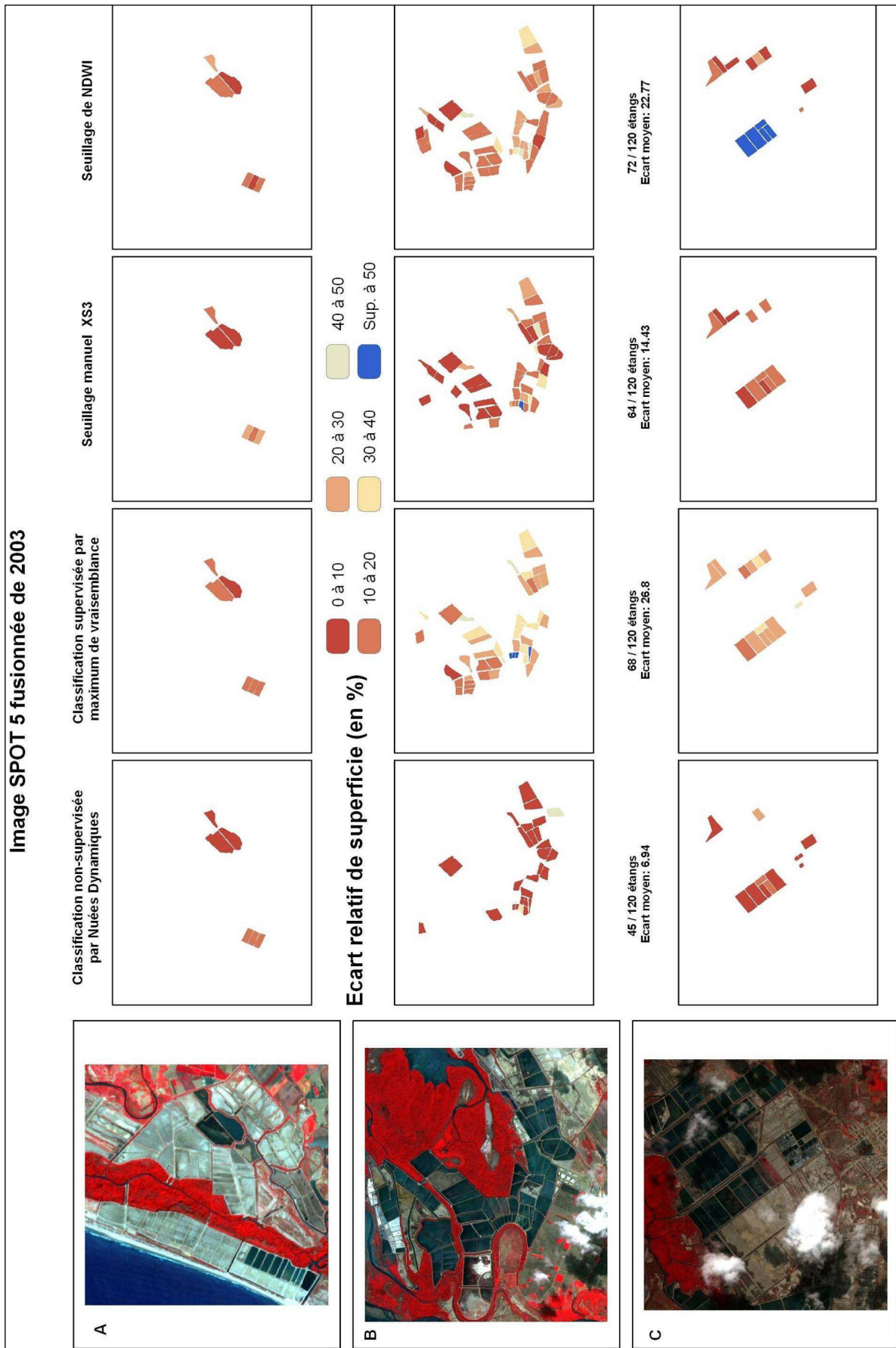


Figure 2-36 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (SPOT 5 fusionnée de 2003)

Image SPOT 5 2004

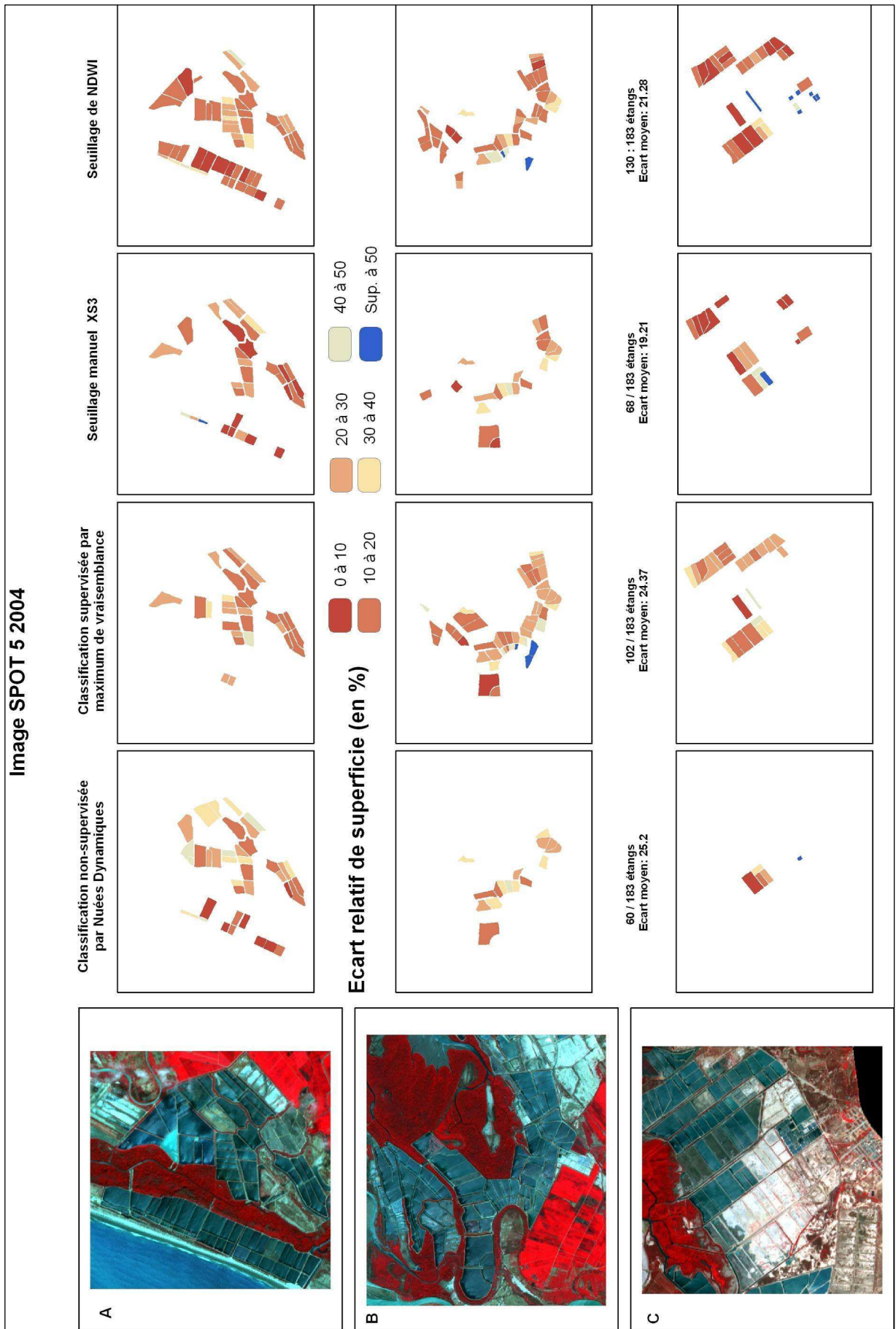


Figure 2-37 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (SPOT 5 de 2004)

Image SPOT 5 fusionnée 2004

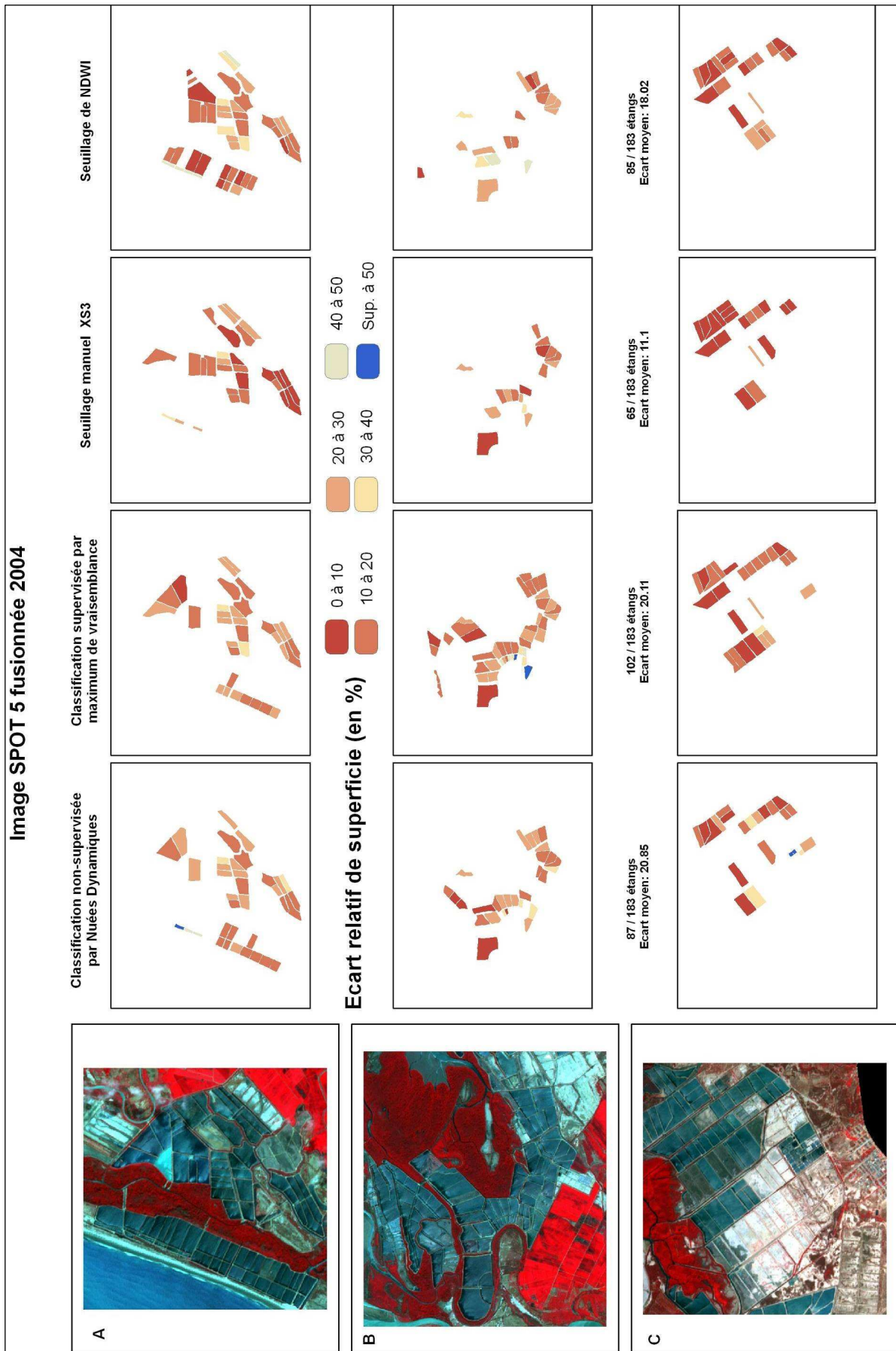


Figure 2-38 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (SPOT 5 fusionnée de 2004)

Image SPOT 5 de 2007

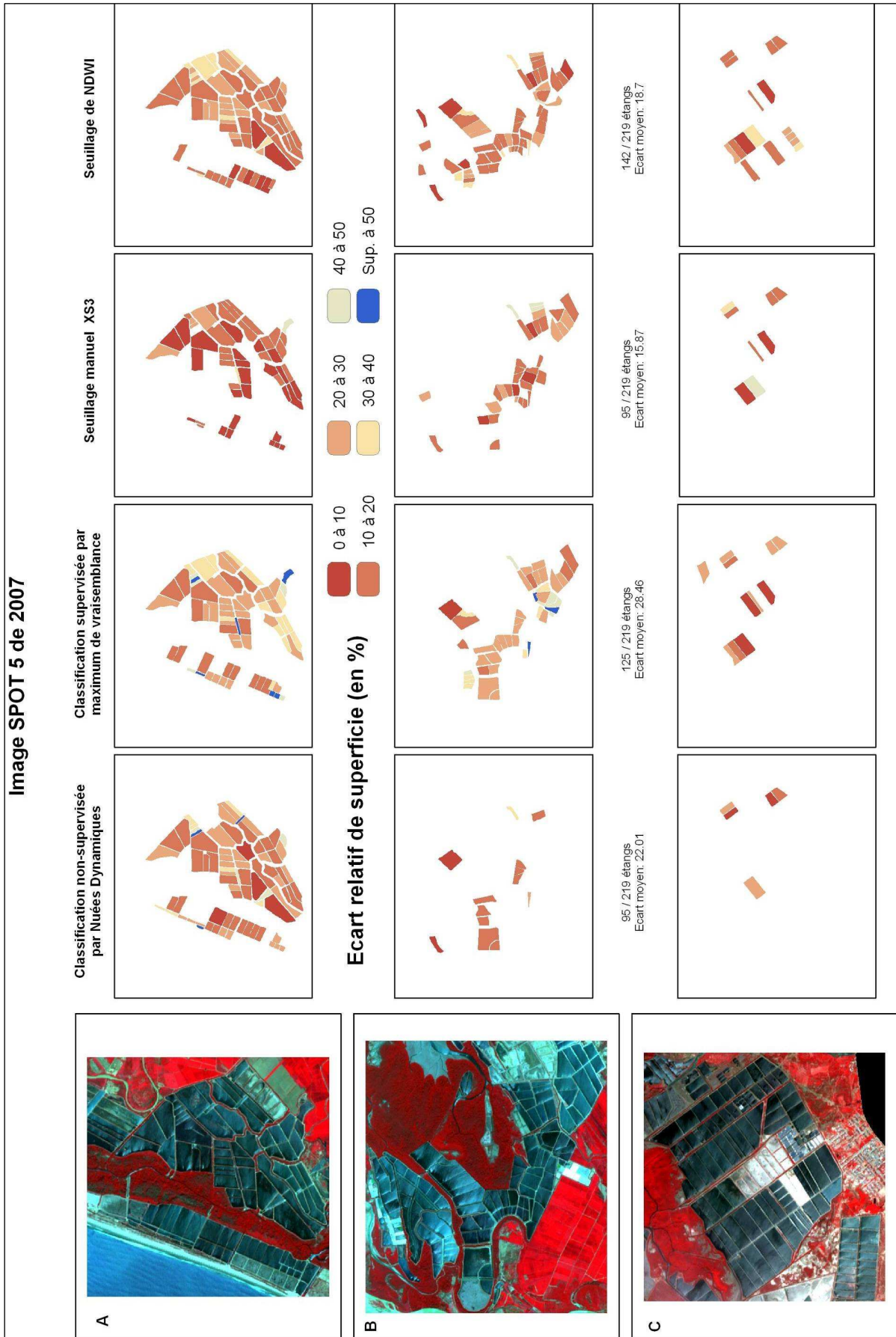


Figure 2-39 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (SPOT 5 de 2007)

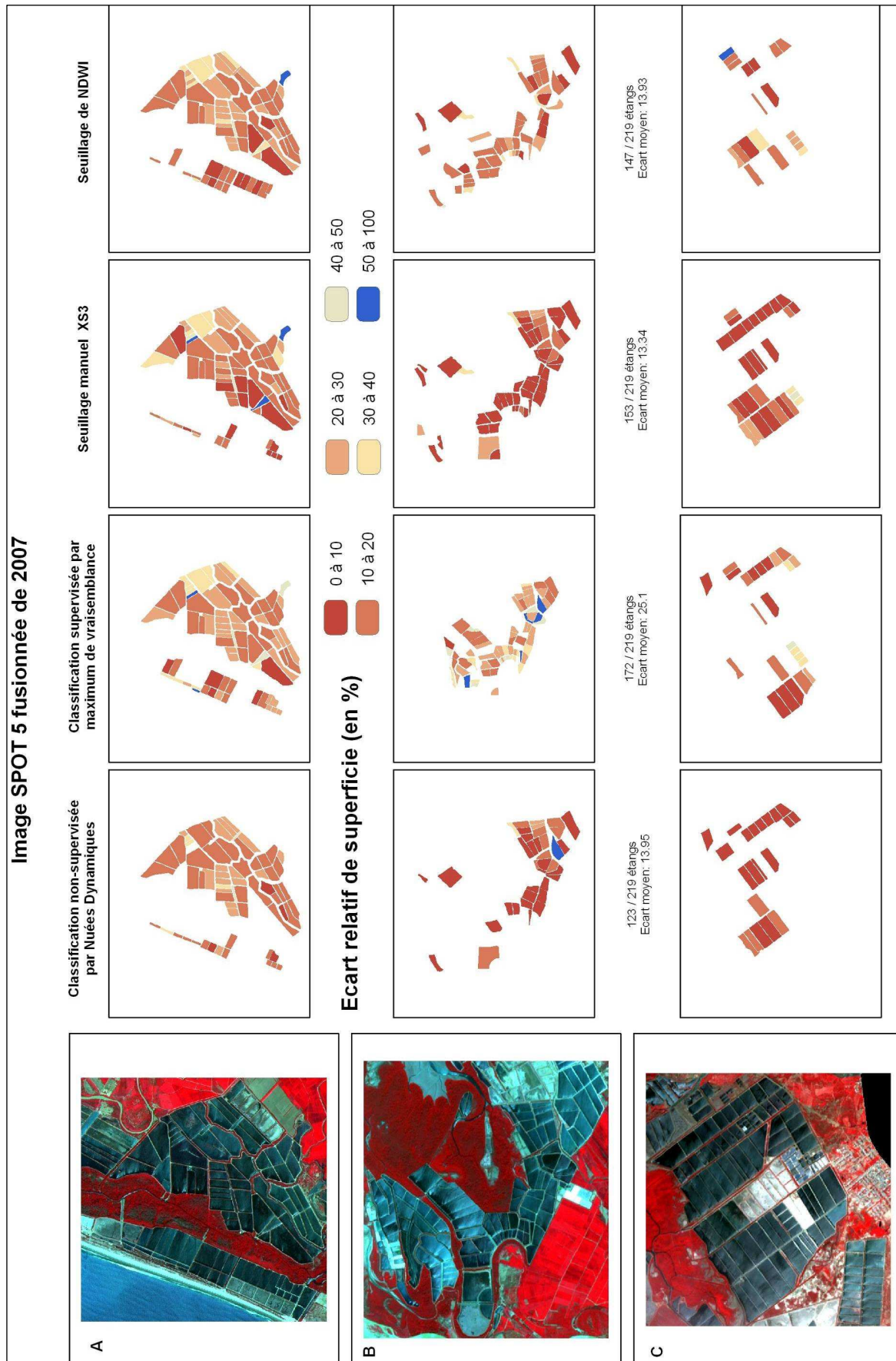


Figure 2-40 - Planche cartographique des étangs suivant les 4 méthodes de détection (SPOT 5 fusionnée 2007)

2.4.2 Le nombre d'étangs détectés

L'interprétation des figures précédentes peut se faire de multiples façons. Le premier choix a été de considérer le pourcentage du nombre d'étangs détectés par chacune des méthodes de détection (Figure 2-41). La méthode de détection par classification non supervisée montre des fluctuations importantes selon les images. Les valeurs les plus basses sont atteintes sur les images SPOT 5, qui ont pourtant une résolution spatiale plus forte que les images Landsat. Sur l'image SPOT 5 de 2003, la couverture nuageuse et les effets d'ombres restreignent les capacités de détection de cette méthode. Pour toutes les images fusionnées, comparativement aux résultats avec les images non fusionnées, cette méthode a montré un plus grand nombre d'étangs détectés. Sur l'ensemble de la série, la valeur la plus élevée concerne l'image TM de 1991, même si ce résultat doit être tempéré par l'écart important entre la superficie détectée et la superficie test. Cette méthode permet donc une relative bonne détection des étangs sur les images TM à haute résolution mais s'accompagne par des écarts de superficie importants. La seconde méthode, par classification dirigée, montre des capacités qui se réduisent entre les images TM et ETM+ suivie de valeurs stables pour les images SPOT 5. Cette relative stabilité s'explique par le fait que ce soit le même producteur qui choisisse, d'une image à l'autre, les données tests et que les choix se reproduisent d'une image à l'autre. Au contraire de la précédente, la méthode par seuillage d'un canal d'absorption de l'eau montre une forte variabilité d'une image à l'autre (de 80% à 35%). Cette méthode, de plus, ne montre par une efficacité accrue pour les images fusionnées de 2003 et 2004. La méthode par NDWI est globalement celle qui présente les taux les plus forts. Sur les images fusionnées, son efficacité semble toutefois inférieure, en particulier, à la méthode de classification dirigée.

L'amélioration de la détection du fait de l'emploi de méthodes de fusion n'apparaît ainsi pas évidente. On repère ici les limites des méthodes utilisées pour les images à très haute résolution. A partir d'une certaine résolution spatiale, l'augmentation de celle-ci doit s'accompagner d'un changement de méthodes. Sans considérer ces images fusionnées, la méthode par NDWI est celle qui présente les meilleures capacités de détection des étangs-objets.

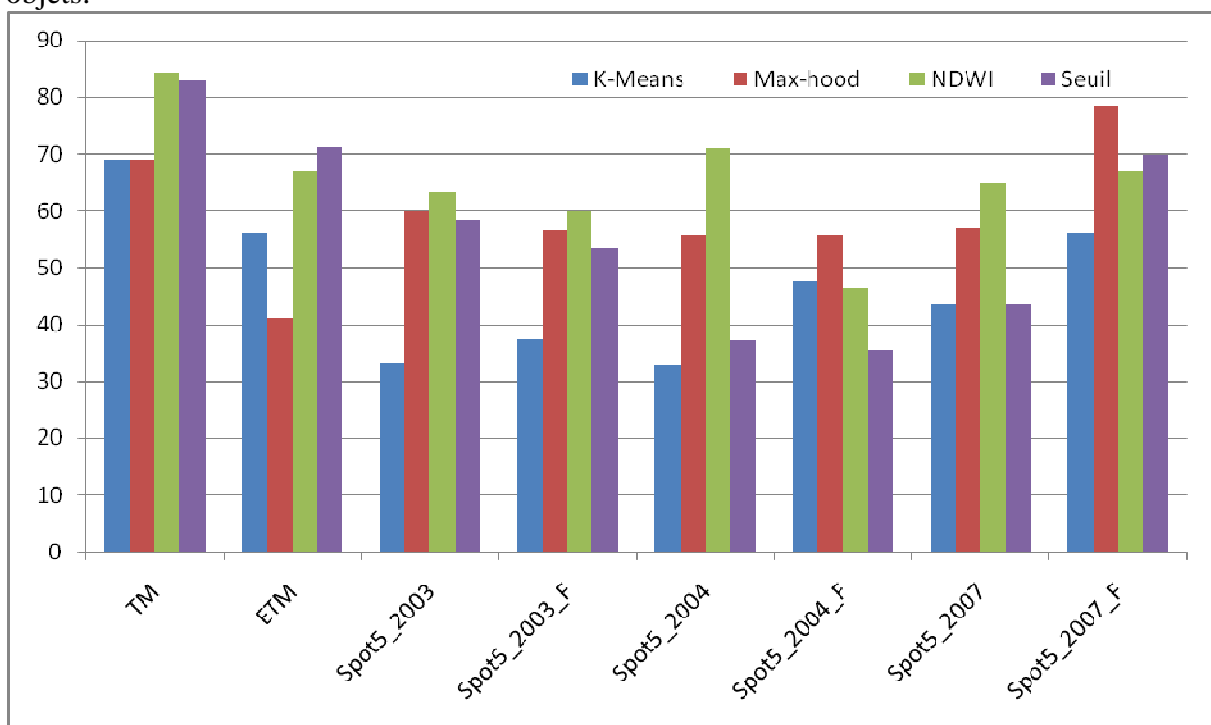


Figure 2-41 - Pourcentage du nombre d'étangs détectés par les quatre méthodes

2.4.3 Écart relatif entre superficie détectée et superficie test

La classification non supervisée connaît globalement des écarts relatifs qui régressent avec l'augmentation des résolutions spatiales (Figure 2-42). Sur l'image 2003 fusionnée, toutefois, l'écart relatif se réduit fortement. Une telle anomalie s'explique par le faible nombre d'étangs détectés. La méthode par classification supervisée montre une aptitude moins forte à détecter avec précision les bords des étangs, ce qui se caractérise par des écarts de superficies relativement élevés. En conséquence, pour améliorer ces résultats il faudrait modifier les zones tests afin d'y intégrer un plus grand nombre de pixels situés à proximité des bords des étangs. La méthode de seuillage simple montre une courbe qui décroît régulièrement parallèlement à l'augmentation de résolution. Ici, le rôle joué par la fusion est positif dans le sens où, pour toutes les images SPOT 5, les images fusionnées sont l'objet d'une détection plus fine des superficies. La méthode par l'indice NDWI montre des valeurs proches de celles de la méthode précédente, hormis pour les images fusionnées. En effet, l'amélioration des résultats avec l'emploi d'images fusionnées est léger. De manière globale, la tendance générale des courbes est à la baisse, ce qui exprime une certaine corrélation entre la résolution spatiale et la qualité de détection des bords des étangs, étant entendu que ce sont ces bords qui jouent un rôle majeur dans les différences de superficie (voir Annexe 4 pour une comparaison par images).

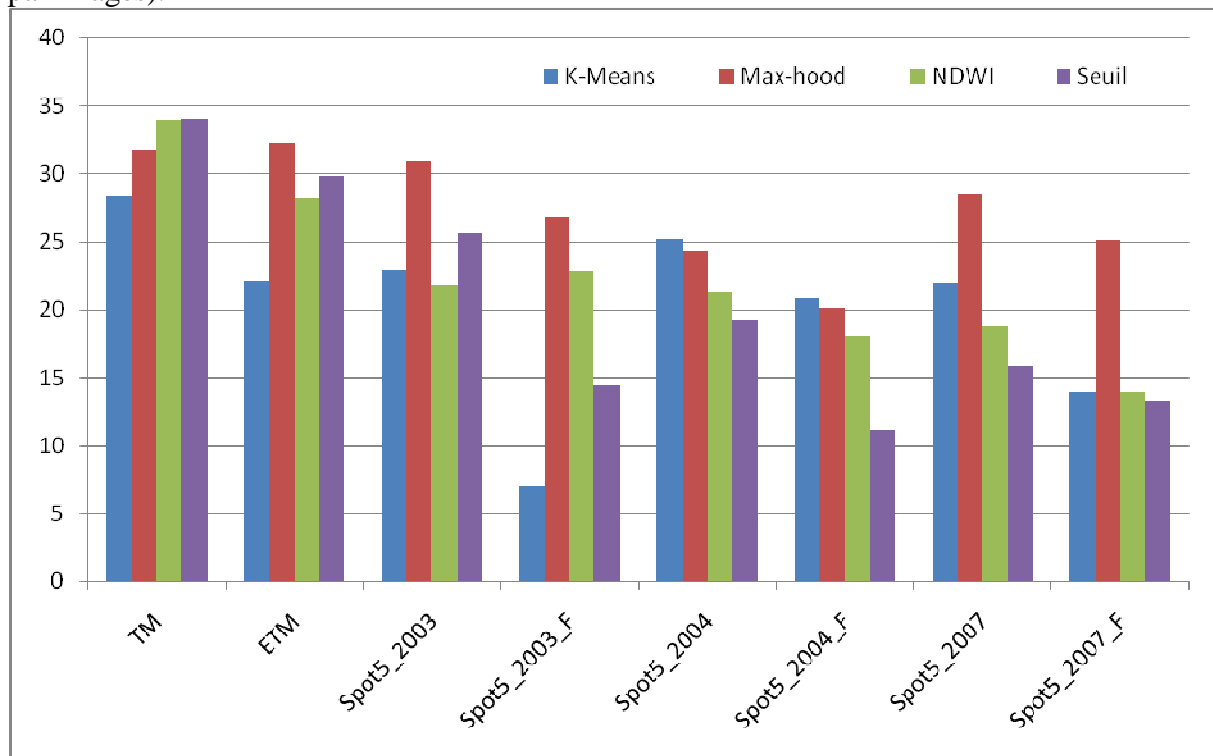


Figure 2-42- Écart relatif entre superficie détectée et superficie test

2.4.4 Impacts du filtrage sous Apheliontm et de la sélection des étangs

Afin de connaître précisément les effets de différentes opérations pratiquées sur les images, les superficies éliminées lors de deux étapes ont été calculées : le filtrage sous Apheliontm, et la sélection empirique des étangs complets, tout cela sur la zone test située à l'ouest (Tableau 2-10).

| | Méthodes * | A Image issue d'une des 4 méthodes | B Filtrage sous Aphelion tm | Pourcentage éliminé en B | C Superficie conservée après sélection des objets | Pourcentage éliminé en C |
|-------------|---------------|---|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
| TM | 1 | 36938 | 36360 | 2 | 12125 | 67 |
| | 2 | 51526 | 33454 | 35 | 12408 | 63 |
| | 3 | 37850 | 36891 | 3 | 10328 | 72 |
| | 4 | 37087 | 35958 | 3 | 9912 | 72 |
| ETM | 1 | 19810 | 18600 | 6 | 6383 | 66 |
| | 2 | 17548 | 16111 | 8 | 4791 | 70 |
| | 3 | 37249 | 16471 | 56 | 7821 | 53 |
| | 4 | 39034 | 18073 | 54 | 8214 | 55 |
| 2003 | 1 | 27029 | 4812 | 82 | 2930 | 39 |
| | 2 | 3384 | 2856 | 16 | 2711 | 5 |
| | 3 | 28206 | 6151 | 78 | 1947 | 68 |
| | 4 | 26676 | 5724 | 79 | 2558 | 55 |
| 2004 | 1 | 46415 | 28327 | 39 | 15043 | 47 |
| | 2 | 31071 | 29094 | 6 | 12200 | 58 |
| | 3 | 45334 | 25511 | 44 | 11845 | 54 |
| | 4 | 48887 | 30753 | 37 | 21785 | 29 |
| 2007 | 1 | 38725 | 37841 | 2 | 29854 | 21 |
| | 2 | 35996 | 35934 | 0 | 24929 | 31 |
| | 3 | 57724 | 39634 | 31 | 22389 | 44 |
| | 4 | 60617 | 43430 | 28 | 30237 | 30 |

Tableau 2-10 - Superficies éliminées lors du filtrage et de la sélection (*1 : non-supervisée, 2 : supervisée, 3 : NDWI, 4 : seuillage canal simple)

Quelques calculs de moyenne facilitent l'interprétation (Tableau 2-11). Les méthodes de classification sont les moins bruitées, si l'on considère tout artefact autre que des étangs aquacoles comme du bruit. Le seuillage de canal et d'indice, du fait qu'il soit empirique, est entaché de l'erreur qui consiste à prendre une fourchette assez large pour inclure tous les étangs et qui en conséquence inclus d'autres artefacts. La classification en revanche est capable de distinguer plus finement des groupes de pixels.

| Méthode | Surface éliminée lors du filtrage | Surface conservée lors de la sélection |
|-----------------------|-----------------------------------|--|
| Non-supervisée | 26,2 | 48 |
| Supervisée | 13 | 45,4 |
| NDWI | 42,4 | 58,2 |
| Canal Simple | 40,2 | 48,2 |

Tableau 2-11 – Données synthétiques sur le filtrage et la sélection

Les superficies relatives éliminées sont moins importantes pour les images SPOT que pour les images Landsat. Cela s'explique par le rôle de la résolution spatiale des images sur la capacité d'isoler les étangs les uns des autres. Toutefois, on relève aussi des différences notoires entre les images SPOT. Ainsi, notre explication est de relever l'importance des propriétés physiques des objets au moment de l'acquisition de l'image. Il existe donc des environnements idéals qui contrastent avec des environnements qui le sont moins, les différences étant dues à l'atmosphère, la présence de vent agitant la surface de l'eau et l'heure d'acquisition (ombres).

Au regard des données statistiques, l'indice NDWI constitue la méthode la plus efficace pour des images à haute résolution. C'est, en effet, la méthode qui apparaît la plus robuste car elle maintient des résultats de haute fidélité pour l'ensemble des images. L'avantage de cette méthode sur le simple seuillage est que ce dernier est plus sensible aux variations des niveaux de réflectance à travers l'image. L'utilisation d'un indice normalisé présente des avantages dans de telles circonstances. Les méthodes basées sur la classification non supervisée fournissent des résultats de bonne qualité à résolution spatiale moyenne (30 m). À plus haute résolution (10 m), les étangs sont correctement détectés, c'est-à-dire avec un écart de superficie relativement faible, mais un grand nombre d'étangs ne peuvent être analysés en termes d'objets, du fait d'une détection médiocre au niveau des digues. La classification supervisée produit de bons résultats sur les images SPOT 5 fusionnées. La principale contrainte vient du fait qu'il est essentiel de constituer un ensemble de données tests qui reflète la variabilité de la réponse spectrale des plans d'eau. À très haute résolution, si les résultats, de manière générale, s'améliorent, ceci ne se produit pas dans des proportions auxquelles on pouvait s'attendre. Ainsi, cela semble poser la limite d'adaptation de ces méthodes à la haute résolution, supposant alors que d'autres techniques sont plus adaptées à très haute résolution.

2.4.5 La détection sur les images GoogleEarth™

Les images obtenues offrent des superficies très proches de la réalité (Tableau 2-12). La méthode qui repose sur des opérateurs de la morphologie mathématique s'avère robuste mais suppose de connaître plusieurs caractéristiques des étangs aquacoles, telles que les tailles minimum et maximum et le spectre des formes des étangs, afin de procéder à une sélection attributaire efficace. À la suite du filtre alterné séquentiel, un filtre de gradient a été utilisé pour détecter les contours. Ce filtre soustrait l'image érodée à l'image originale. Une segmentation par LPE puis un calcul d'attributs permet d'obtenir une multitude d'objets caractérisés par des attributs morphologiques et surfaciques propres (Figure 2-43). Les attributs utilisés pour la sélection des étangs sont la circularité, l'aire, le rectangle englobant. La méthode présente l'avantage d'être automatique jusqu'à l'étape de sélection par attributs, de permettre la constitution de bases de données spatialisées même en l'absence d'images satellites multispectrales, d'une grande précision et d'un coût peu élevé.

| Superficies Image GoogleEarth (ha) | Superficies Image Spot 5 Pan (ha) | Superficies Réalité (ha) | Δ Superficie Images / Réalité (%) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 11,69 | | 11,65 | -0,3 |
| 6,59 | | 6,42 | -2,6 |
| 3,51 | | 3,375 | -4,0 |
| 8,59 | | 8,72 | 1,5 |
| 4,94 | | 5,044 | 2,1 |
| 12,84 | | 12,56 | -2,2 |
| | 19,25 | 17,35 | -11,0 |
| | 2,17 | 1,7 | -27,6 |
| | 7,19 | 6,34 | -13,4 |
| | 5,25 | 4,54 | -15,6 |
| | 3,89 | 3,45 | -12,8 |
| | 4,59 | 4,09 | -12,2 |
| | 5,9 | 5,37 | -9,9 |
| | 5,42 | 4,99 | -8,6 |
| | 5,93 | 5,3 | -11,9 |
| | 3,17 | 2,56 | -23,8 |
| | 5,85 | 5,19 | -12,7 |

Tableau 2-12- Ecarts de superficies enregistrés entre les images traitées par Aphelion et la réalité terrain

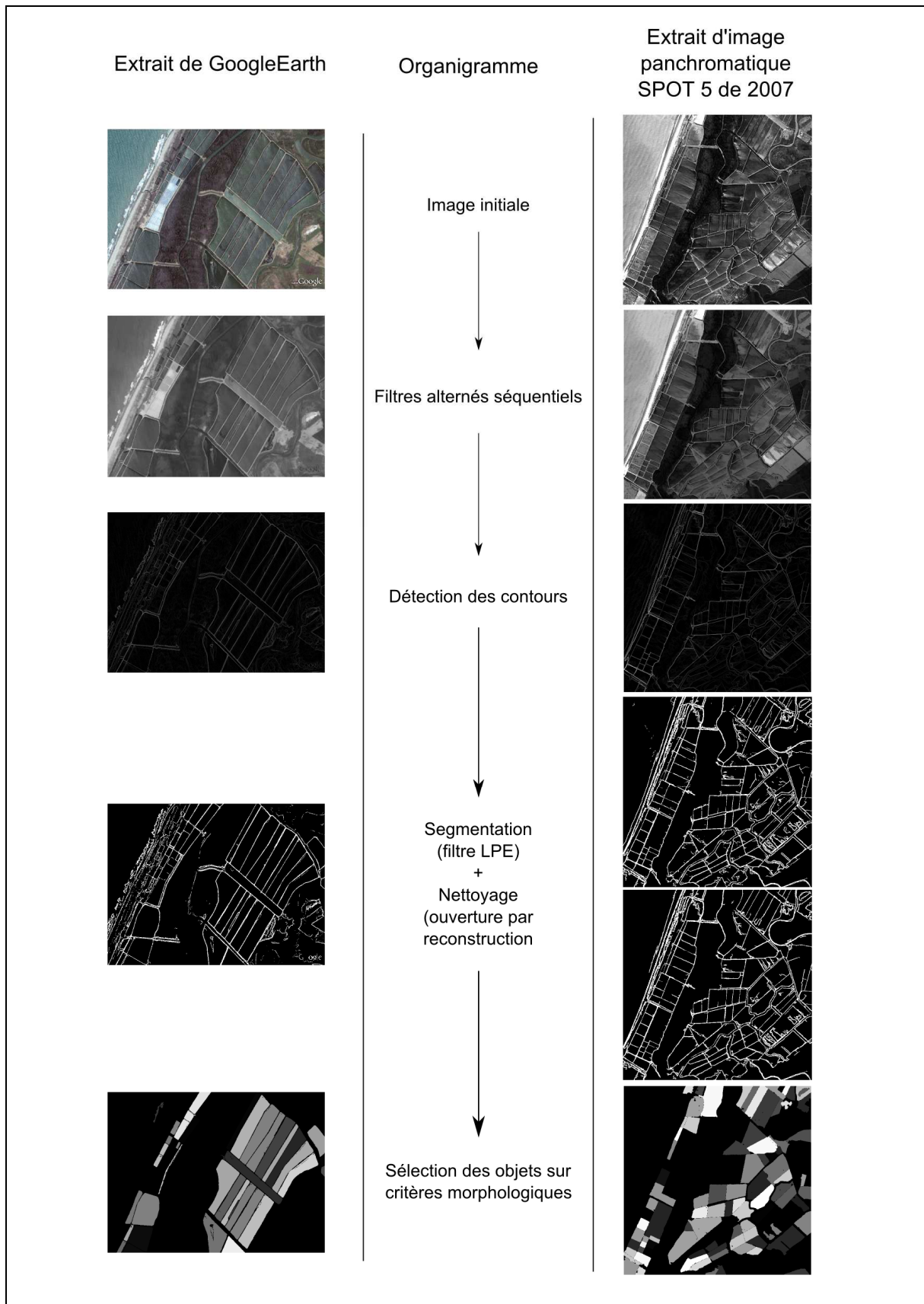


Figure 2-43 – Chaîne de traitement et images en sorties pour la détection des étangs sur les images GoogleEarthtm

2.4.6 Cartographie des étangs

L'objectif premier de la détection des étangs était de proposer une cartographie et une estimation des superficies (Figure 2-44 et Figure 2-45). La méthode par NDWi a été appliquée aux images entières, puis ces dernières ont été traitées sous Aphelion™ afin de supprimer certains plans d'eau selon des critères de taille et de forme : les chenaux de mangrove et les cours d'eau ont ainsi été éliminés grâce à leur forme sinueuse. Le Tableau 2-13 présente les superficies détectées et les superficies estimées en fonction de l'écart moyen calculé précédemment.

| Année | Aire détectée | Aire estimée | Nombre d'étangs |
|-------|---------------|--------------|-----------------|
| 1991 | 1891 | 2861 | 439 |
| 2000 | 1168 | 1428 | 240 |
| 2003 | 1634 | 2090 | 358 |
| 2004 | 2471 | 3139 | 553 |
| 2007 | 3010 | 3702 | 680 |

Tableau 2-13 - Différences entre superficies détectées et superficies estimées

Conclusion

Ce chapitre était avant tout méthodologique. La méthode que l'on a cherché à développer devait répondre à trois objectifs : la cartographie des étangs, la cartographie de l'occupation du sol et la diachronie. En ce qui concerne la détection des étangs, une comparaison de plusieurs méthodes a finalement permis de ne conserver que l'une d'entre elle, la méthode par NDWI, considérée comme la plus efficace. L'évaluation des méthodes s'est basée sur le nombre d'étangs détecté et l'écart de superficie entre le modèle et la réalité. Quelque soit la méthode utilisée, la qualité des résultats est améliorée par l'ajout de traitements en morphologie mathématique. Ces traitements ont ici permis d'éliminer des objets sur des critères morphologiques. L'utilisation de ces techniques sur des images panchromatiques de type GoogleEarth™ s'est aussi avéré concluante et présente un intérêt évident pour la constitution de bases de données. La cartographie de l'occupation du sol a utilisée une méthode plus conventionnelle, basée sur une analyse en composantes principales suivies d'une classification non supervisée. Les classes obtenues sur les images finales résultent de la nomenclature élaborée dont la qualité des éléments qui la composent est le reflet des objectifs de l'étude. Enfin, la diachronie s'est basée sur les cartes d'occupation du sol créées. Les post-traitements ont consisté à ne conserver que les classes qui ont un sens pour l'analyse du territoire, c'est-à-dire les classes qui représentent des changements quantitativement ou qualitativement importants.

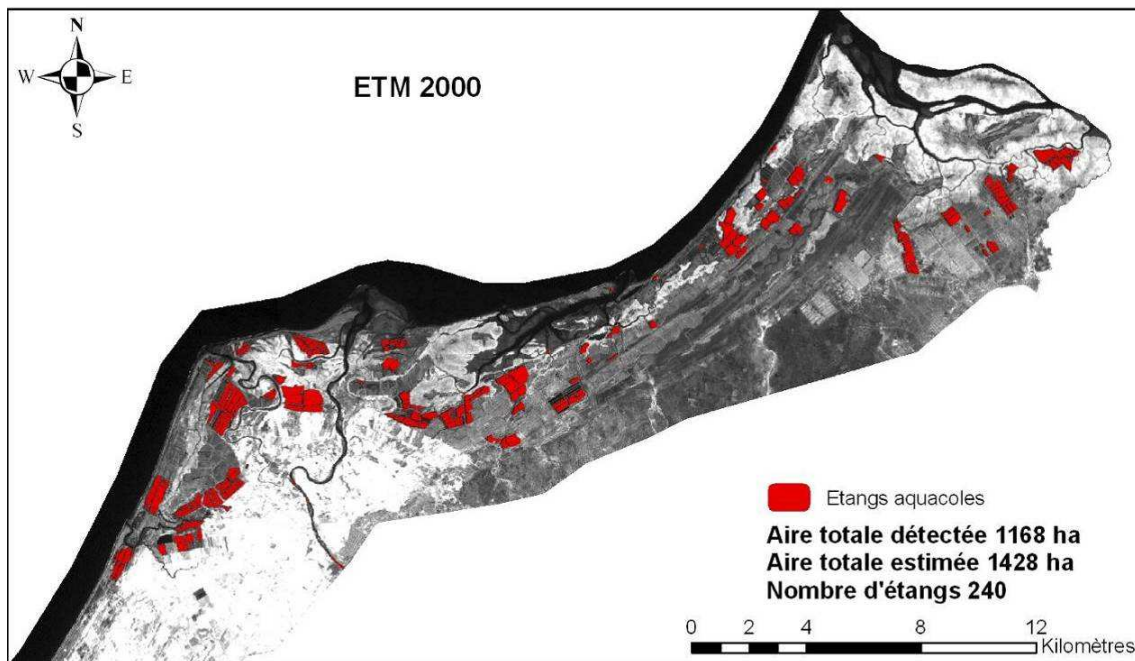
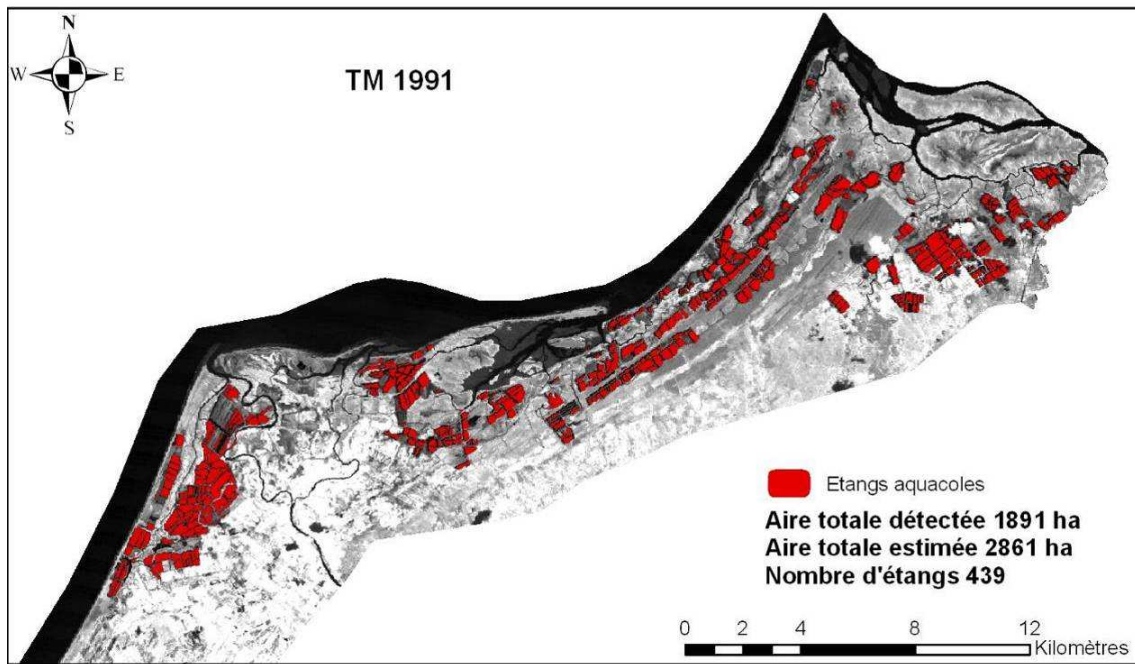


Figure 2-44 - Cartographie des étangs en 1991 et 2000

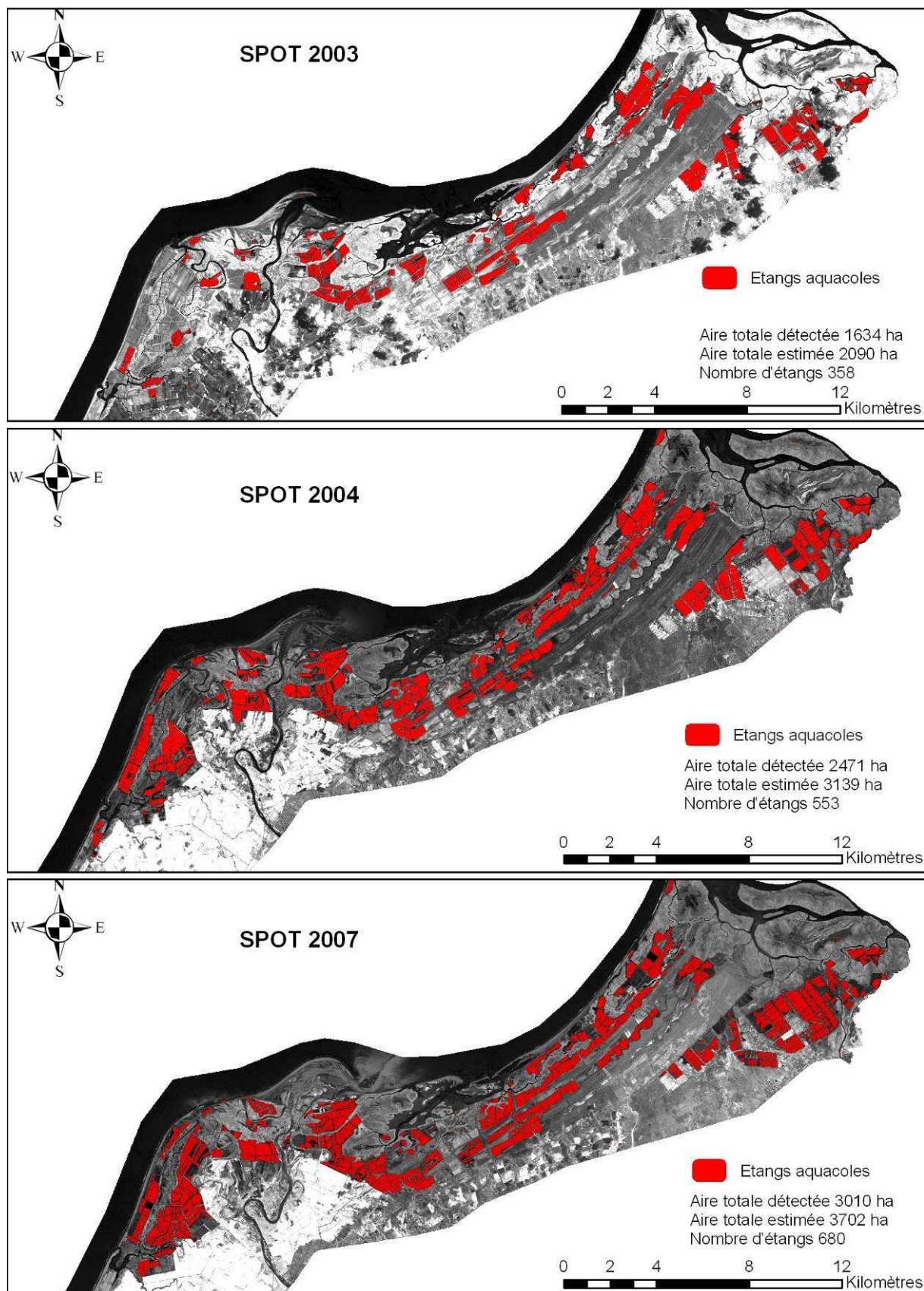


Figure 2-45 - Cartographie des étangs en 2003, 2004 et 2007