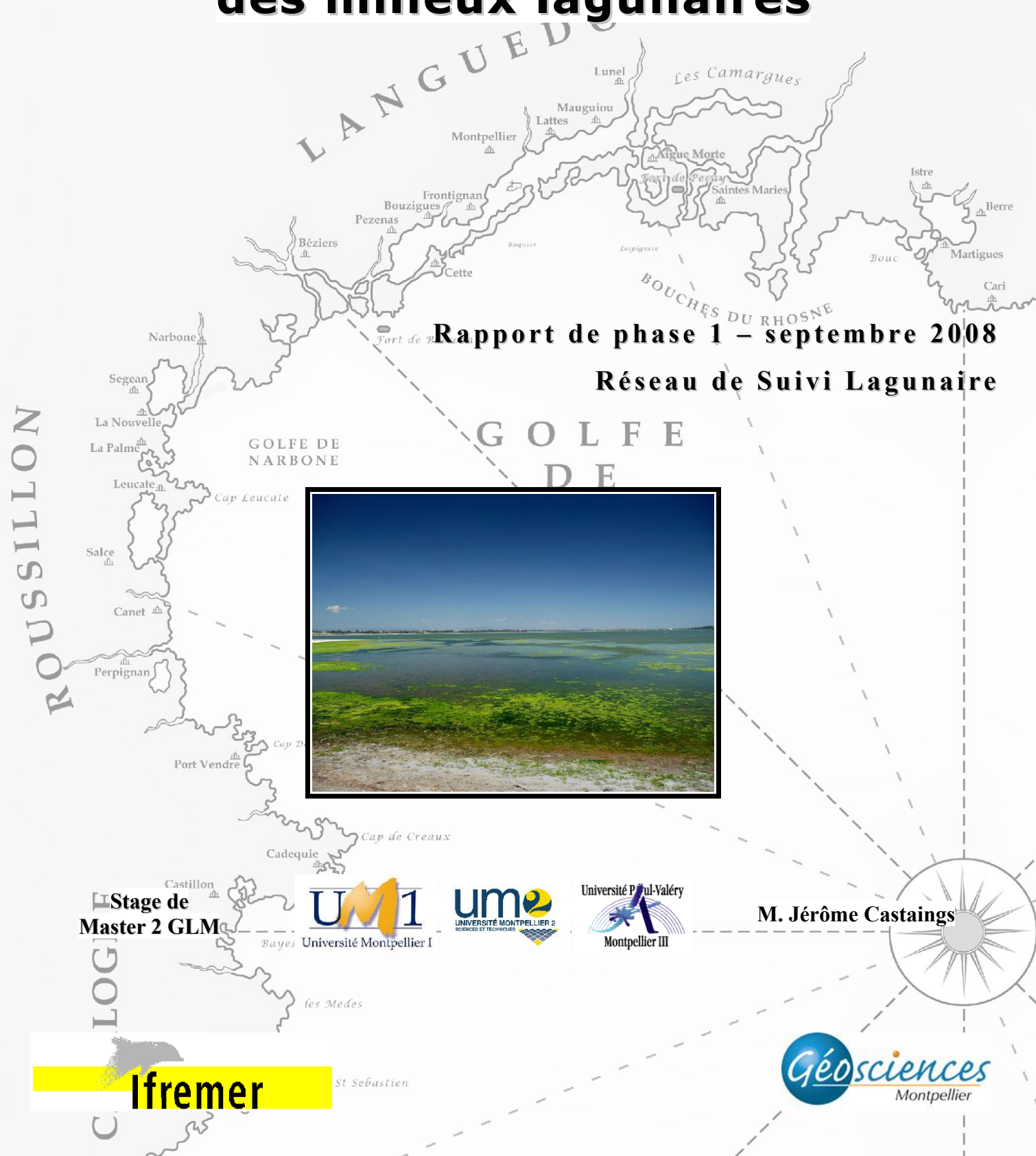


État de l'art des connaissances du phénomène de comblement des milieux lagunaires



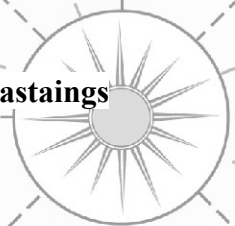
Rapport de phase 1 – septembre 2008

Réseau de Suivi Lagunaire

Stage de
Master 2 GLM



M. Jérôme Castaings



Liste des sigles employés

BP : <i>Before Present</i> (avant le présent), système de datation exprimé en nombre d'années avant 1950.	MNT : Modèle Numérique de Terrain
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières	MSNM : laboratoire de Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique (ex L3M-M2P2, Université d'Aix-Marseille)
CEH : Centre d'Etudes Hydrobiologiques de l'Université de Perpignan	NGF : Nivellement Général de la France
CETE : Centre d'Études Techniques du ministère de l'Équipement	PNR : Parc Naturel Régional
CG : Conseil Général	RMC : Rhône-Méditerranée et Corse (Agence de l'Eau)
CRELA : Centre de Recherche sur les Ecosystèmes Littoraux Anthropisés (Ifremer, La Rochelle)	RSL : Réseau de Suivi Lagunaire
DIREN : Direction Régionale de l'Environnement	SCP : Société Civile Professionnelle
DGPS : <u>GPS</u> différentiel	SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, créé en 1988 par l'Organisation des Nations Unies	SIEL : Syndicat mixte des Étangs Littoraux
GSA : Geological Society of America	SIG : <u>Système d'Information Géographique</u>
IFEN : Institut Français de l'Environnement	SMGEO : Syndicat Mixte de Gestion de l'Étang de l'Or
IGN : Institut Géographique National	SMNLR : Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon
MES : Matières En Suspension dans l'eau	USGS : United-States Geological Survey
	ZNIEFF : Zone Naturelle d'Importance Écologique Floristique et Faunistique

Note :

Les mots soulignés en bleu dans le texte renvoient au glossaire situé en fin de rapport (page 97).

Avant propos

Les zones humides littorales représentent une valeur patrimoniale et un intérêt majeur pour les activités humaines. Ces écosystèmes remarquables, support d'activités traditionnelles, économiques et récréatives, sont cependant menacées par deux principaux phénomènes : l'eutrophisation et le comblement.

Le SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse, ainsi que le plan de développement du littoral établi par la mission interministérielle d'aménagement du littoral du Languedoc-Roussillon préconisent la lutte contre l'eutrophisation et la mise en place de réseaux spécifiques. C'est dans ce cadre que la mise en œuvre du Réseau de Suivi Lagunaire (RSL) par la Région Languedoc-Roussillon, le Cépralmar, l'Agence de l'Eau et l'Ifremer s'est effectuée depuis 2000. L'objectif de ce réseau est double :

- effectuer un diagnostic annuel de l'eutrophisation des lagunes du Languedoc-Roussillon,
- fournir une grille d'évaluation permettant aux gestionnaires des milieux d'adapter leurs actions

Aujourd'hui, le phénomène d'eutrophisation est toujours d'actualité mais mieux appréhendé. Cela permet de se pencher sur de nouvelles problématiques mises en avant par les gestionnaires. C'est ainsi que les partenaires du RSL ont décidé, dans le cadre du programme d'action 2008, de lancer une démarche d'étude sur la problématique du comblement. Le projet prévoit trois phases :

- **Phase 1** : Synthèse bibliographique de l'état des connaissances, recensement des données disponibles et des méthodes d'estimation du phénomène de comblement.
- **Phase 2** : Élaboration d'une méthodologie permettant de définir la vulnérabilité d'une lagune au phénomène de comblement
- **Phase 3** : Inventaire des solutions techniques permettant de limiter le phénomène de comblement

Le présent rapport présente les résultats de la première phase d'étude. Il a été élaboré au Cépralmar dans le cadre d'un stage de Master 2 « Gestion des Littoraux et des Mers » cohabilité par les trois universités de Montpellier. L'étude a été menée en partenariat avec le Laboratoire Environnement-Ressources de l'Ifremer à Sète (LER/LR) ainsi que le laboratoire Géosciences de l'Université de Montpellier 2.

Je tiens à remercier sincèrement l'ensemble des personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail au sein du Cépralmar, de l'Ifremer et de l'Université, plus particulièrement :

- M. Alain PAUGAM, directeur du Cépralmar
- Mme. Annie FIANDRINO, modélisatrice à l'Ifremer Sète
- M. Jean-Louis GUILLOU, documentaliste à l'Ifremer Sète
- M. Thibault GEOFFROY et M. Gregory MESSIAEN, techniciens à l'Ifremer Sète
- M. Laurent DEZILEAU, chercheur au laboratoire Géosciences Montpellier
- M. Pierre SABATIER, thésard au laboratoire Géosciences Montpellier

Mes pensées vont également à l'ensemble des acteurs qui ont pu me fournir des informations indispensables à l'élaboration de ce travail :

- L'ensemble des gestionnaires des lagunes du Languedoc-Roussillon
- Le Pôle Relais Lagunes et le Conservatoire des Espaces Naturels du Languedoc-Roussillon
- La DIREN du Languedoc-Roussillon
- Le Conseil Général de l'Hérault

Sommaire

Introduction.....	5
I-Le comblement des milieux paraliques : problématique et enjeux.....	6
I.1)Les milieux paraliques : des écosystèmes entre terre et mer.....	6
I.2)L'écosystème lagunaire : un bassin paralique particulier.....	9
I.3)Que sait-on vraiment du processus de comblement ?.....	13
I.4)La perception du comblement et ses enjeux.....	16
II-Les mécanismes du comblement des lagunes.....	19
II.1)Les dynamiques terrestres.....	19
II.2)Les dynamiques marines.....	24
II.3)Les dynamiques biologiques internes.....	30
II.4)Les dynamiques éoliennes.....	34
II.5)Les remblaiements artificiels.....	36
Conclusion : l'importance relative des facteurs de comblement.....	39
III-Les méthodes d'estimation du comblement.....	40
III.1)Le bilan sédimentaire.....	40
III.2)L'étude sédimentologique par datation de carottages.....	41
III.3)L'évolution surfacique par vues aériennes.....	43
III.4)L'évolution tridimensionnelle par suivi bathymétrique.....	45
III.5)Le potentiel de la modélisation hydro-sédimentaire.....	47
Conclusion : avantages et inconvénients des méthodes d'estimation.....	50
IV-L'évolution des lagunes du Languedoc-Roussillon.....	51
IV.1)Les études et données disponibles au niveau local.....	51
IV.2)Repères chronologiques et évolution historique des lagunes.....	53
IV.3)État des lieux et situation de chacun des étangs.....	54
IV.4)Travaux d'estimation du comblement sur les étangs palavasiens.....	72
Conclusion : bilan de la situation des étangs face au comblement.....	78
Conclusion et perspectives.....	79
Bibliographie alphabétique.....	80
Bibliographie thématique.....	87
Webographie.....	90
Table des matières.....	91
Table des illustrations.....	94
Glossaire.....	96

Introduction

Débutée il y a 8 000 à 10 000 ans, la formation des lagunes méditerranéennes a lentement séparé des plans d'eau du domaine marin. Confinés et soumis à de nombreux apports, ces bassins littoraux se comblent progressivement. Craignant pour le devenir de leurs activités et pour la pérennité de ce patrimoine unique, de nombreux acteurs sonnent aujourd'hui l'alarme face à « l'envasement » et au « colmatage » des étangs.

La problématique ne se restreint pas aux étangs du Languedoc-Roussillon. Partout dans le monde, des plans d'eau littoraux - dits paraliques – sont soumis à des phénomènes de comblement sédimentaire. Les enjeux sont considérables pour les milieux touchés :

- intérêts économiques traditionnels (pêche, conchyliculture) et modernes (tourisme, loisirs de plein air, activités nautiques)
- protection du patrimoine écologique (faune, flore, zones humides) et parfois historique
- préservation du cadre de vie (paysage, coupures d'urbanisation)
- bénéfices environnementaux (effet tampon face aux inondations, épuration des eaux)

Pour les conserver, il est nécessaire de se poser aujourd'hui les questions essentielles qui guideront les choix de demain quand à la gestion de ces milieux et au développement des sociétés humaines qui y vivent. Quels sont les mécanismes du comblement lagunaire ? Est-ce un phénomène naturel ? Les activités humaines ont-elles un impact sur son déroulement ? Comment évaluer la rapidité du phénomène ? Quelle est la sensibilité des lagunes du Languedoc-Roussillon face au comblement ?

Autant de questions auxquelles le présent rapport tentera de répondre en fonction de l'état actuel des connaissances scientifiques. Dans cette optique, les caractéristiques générales des milieux paraliques ainsi que l'importance de la problématique du comblement au niveau mondial seront tout d'abord restituées. Dans un deuxième temps, les mécanismes qui concourent au comblement seront examinés en détail. Une troisième partie sera consacrée à la présentation des différentes techniques permettant d'évaluer l'ampleur du comblement. Enfin, un état des lieux des lagunes régionales sera dressé.

I- Le comblement des milieux paraliqes : problématique et enjeux

I.1) Les milieux paraliqes : des écosystèmes entre terre et mer

I.1.1. Le fonctionnement général du milieu paraliqe

Les lagunes sont scientifiquement définies comme appartenant au domaine paraliqe (du grec *para* « à côté de » et *halos* « le sel » et par extension la mer). Ce concept récent a été développé par deux chercheurs au début des années 1980 (Guelorget et Perthuisot, 1983). Le domaine paraliqe constitue un écotone, c'est-à-dire un espace de transition, entre les écosystèmes continentaux et marins.

La diversité des milieux paraliqes est considérable : estuaires, deltas, lagons, lagunes (ou étangs littoraux), sebkhas, mangroves, marais maritimes, salins, baies, abers ou rias, fjords... Tous ont pourtant des caractéristiques communes, dont six principales :

- Ce sont des milieux aquatiques, permanents ou temporaires
- Ils sont en communication directe ou épisodique avec la mer
- Ils constituent un réceptacle physiquement délimité (cordon littoral, thermocline, ...)
- Ce sont des milieux à forte productivité biologique (organismes autotrophes et décomposeurs)
- L'organisation de l'écosystème est structurée en fonction du confinement
- Ce sont des milieux en équilibre précaire continuellement soumis à des dynamiques variées

Ces deux dernières caractéristiques sont particulièrement intéressantes car elles permettent d'établir une classification entre les différents milieux paraliqes. L'influence relative des principaux facteurs morphodynamiques permet d'en classifier les grands types (Figure 1).

Le confinement est le paramètre fondamental régissant l'organisation de l'écosystème paraliqe, tout comme la profondeur organise la zonation biologique en milieu marin. Difficilement mesurable, le confinement est étroitement lié à l'hydrodynamisme. En effet, il correspond à l'épuisement progressif des oligoéléments d'origine marine (cuivre, cobalt, ...) et à la dilution des nutriments d'origine terrestre (nitrates, matière organique...) au sein du bassin paraliqe. Une échelle de confinement établie d'après la zonation biologique permet d'apprécier le degré de confinement du milieu (Figure 2).

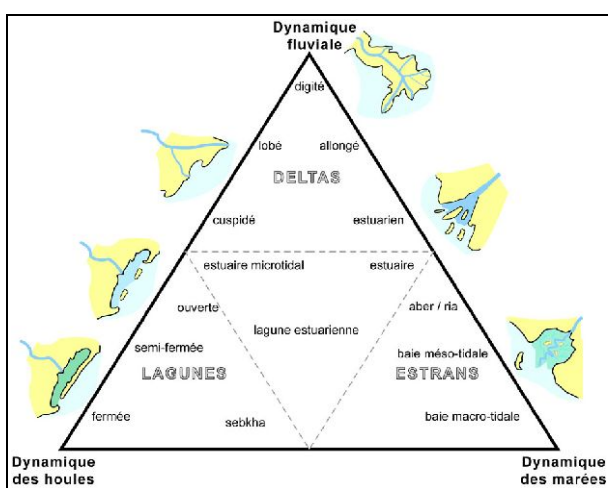


Figure 1: Classification géomorphologique des principaux types de milieux paraliqes

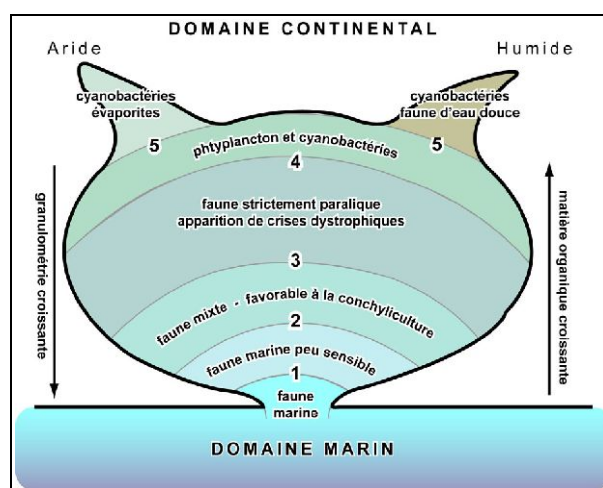


Figure 2: Échelle de confinement d'un écosystème paraliqe (d'après Guelorget, 1985 modifié)

I.1.2. La sédimentologie des milieux paraliques

La sédimentation dans les bassins paraliques dépend de divers mécanismes d'apports qui seront détaillés dans la deuxième partie du rapport (II, page 19). La répartition de ces apports est étroitement liée à l'hydrodynamisme du bassin, à son confinement ainsi qu'aux conditions physico-chimiques.

a- La nature des matériaux déposés

La nature des matériaux sédimentaires dominants dans une lagune est étroitement liée au confinement du milieu et à la quantité d'eau douce qu'il reçoit (Figure 3). Les sédiments lagunaires sont constitués de matériaux minéraux et organiques.

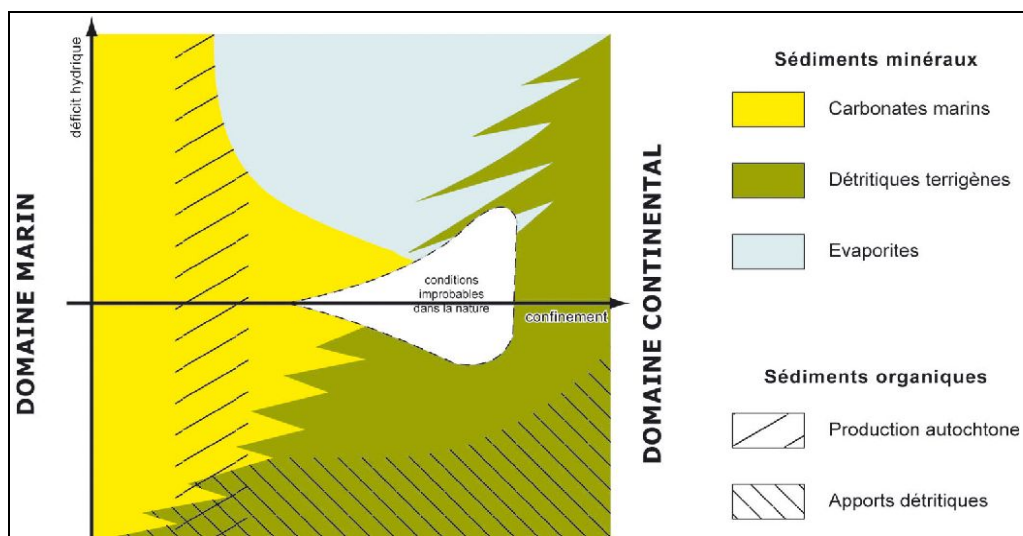


Figure 3: Dominantes sédimentologiques du domaine paralique

Les sédiments minéraux se répartissent en trois pôles. Près de la mer et dans les zones peu confinées, il s'agit de calcaires en cours de formation constitués de débris coquilliers et sables ainsi que de carbonates d'origine biochimique (bactéries et plancton). Lorsque les apports des cours d'eau sont importants (déficit hydrique faible) les matériaux terrigènes, issus de l'érosion du bassin versant, sont dominants. Lorsque le déficit hydrique est important, l'évaporation intense entraîne la précipitation des sels dissous dans l'eau qui forment alors un faciès évaporitique.

Les sédiments organiques sont issus de la production des organismes lagunaires et des apports des tributaires. La production des organismes lagunaires est maximale pour un degré de confinement moyen (entre 2 et 4). La matière organique d'origine extérieure provient du lessivage des sols et des rejets, elle est dominante dans les lagunes à faible déficit hydrique. A l'échelle des temps géologiques, ces matériaux organiques piégés dans le sédiment se transformeront en hydrocarbures (pétrole ou charbon).

b- L'organisation des faciès sédimentaires : un double gradient

L'organisation globale des faciès sédimentaires au sein d'un bassin paralique est une superposition de deux gradients. En fonction des conditions locales l'une ou l'autre des organisations sédimentologique peut dominer. L'ensemble des intermédiaires existe cependant (Guelorget et Perthuisot, 1983).

- le gradient longitudinal : (Figure 4a)

Il répartit les sédiments en fonction des influences marines et terrestres. Ainsi, côté mer la tendance est aux sédiments plutôt sableux et vers la terre plutôt argilo-vaseux. L'importance des flux à travers les graus et les cours d'eau affluents va influencer cette distribution. Ce type d'organisation se retrouve principalement dans les bassins paraliques largement ouverts sur la mer.

- le **gradient concentrique** : (Figure 4b)

Il reflète l'influence de la bathymétrie et de l'hydrodynamisme sur les déplacements sédimentaires. Sur les bordures s'accumulent les sédiments grossiers et au centre, dans les zones les plus profondes, des sédiments fins. Celle-ci peut être renforcée ou diminuée en fonction de l'orientation des embouchures. Ce type d'organisation se retrouve principalement dans les bassins paraliques fermés.

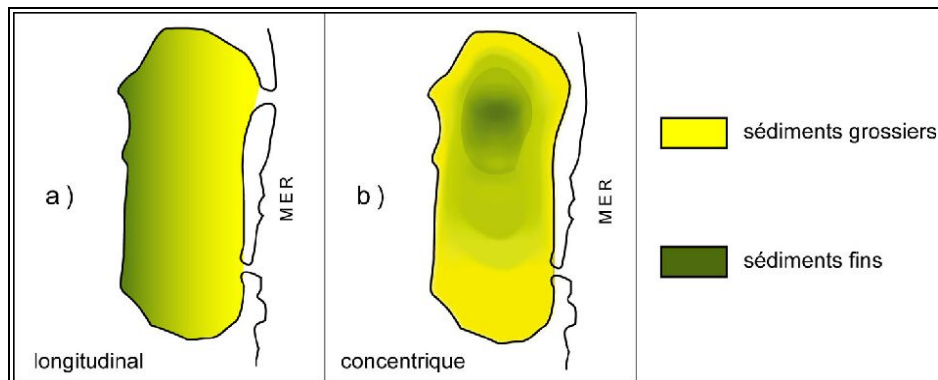


Figure 4: Organisation des faciès sédimentaires d'un bassin paralique

c- La sédimentation physico-chimique

En plus des gradients de répartition sédimentologique, différents processus physico-chimiques influencent la sédimentation en milieu lagunaire. Il s'agit principalement de la floculation et de la formation d'éaporites (Beauchamp, 2005).

- **La floculation :**

Elle concerne principalement les particules argileuses. Celles-ci sont chargées négativement et vont donc se repousser lorsqu'elles sont en suspension dans les eaux douces. Lors de leur arrivée en lagune, elles sont au contact d'eau salée ou saumâtre riche en cations, ceux-ci vont attirer les particules argileuses. Ces particules très fines en suspension colloïdale vont alors se rapprocher et s'agglomérer pour former des flocs (aussi appelés flocculats) plus denses capables de sédimenter. Ce phénomène est bien visible dans les estuaires où il se forme fréquemment un bouchon vaseux dû au maintien en suspension des flocculats sous l'effet des marées.

- **La formation d'éaporites :**

Elle est liée à la saturation des eaux lagunaires en minéraux dissous. Elle se déroule généralement sous un climat aride, ou dans des zones annexes de lagunes protégées des apports d'eau douce importants. Sous l'effet de l'évaporation, les minéraux se concentrent et finissent par précipiter et sédimenter. L'ordre de précipitation des différents minéraux dépend de leurs caractéristiques chimiques. Les carbonates sont les premiers à précipiter. Ensuite viennent les sulfates (gypse et anhydrite) puis les chlorures (dont le sel de cuisine). Ce phénomène bien connu est à la base de l'exploitation des marais salants.

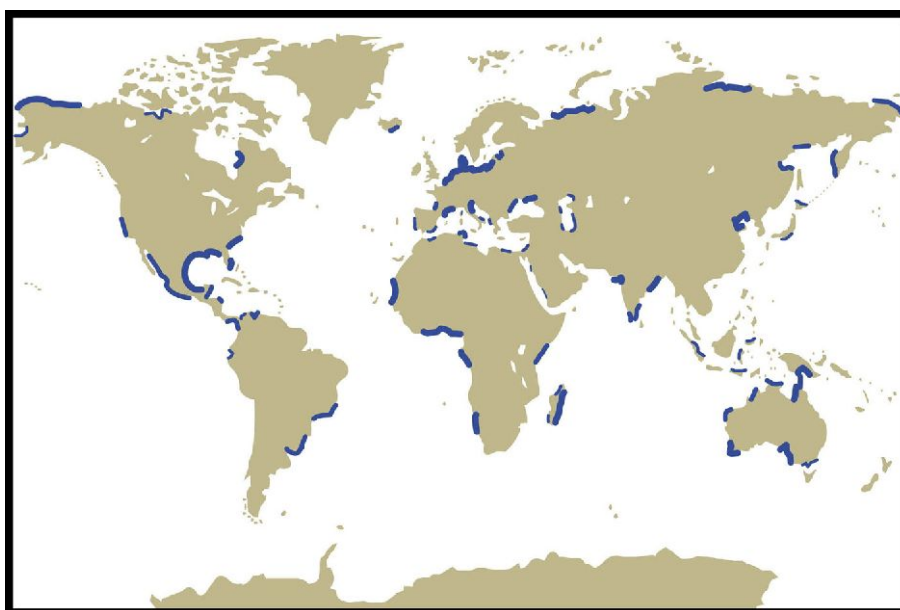
I.2) L'écosystème lagunaire : un bassin paralique particulier

I.2.1. Les lagunes : définition et répartition mondiale

Parmi l'ensemble des milieux paraliques, la lagune nous intéresse particulièrement dans cette étude. Lors du colloque international sur les lagunes côtières de Mexico (Novembre 1967) la définition suivante en est donnée (Phleger, 1969) :

« Un milieu lagunaire est un environnement dynamique particulier, où différentes énergies interfèrent pour apporter et répartir des sédiments terrigènes et marins. Le lieu d'interférence de ces énergies avec le sédiment intervient dans une tranche d'eau peu profonde qui se trouve partiellement fermée par un cordon littoral, et ayant une communication éphémère ou restreinte avec la mer à travers une passe. »

Les lagunes sont donc des milieux paraliques peu profonds séparés de la mer par un cordon littoral constitué de sédiments. Elles sont à différencier des lagons qui sont séparés de la mer par des formations biologiques (récifs coralliens). Le même terme est cependant employé pour ces deux milieux en langue anglaise. Les milieux lagunaires constituent environ 13 % des littoraux mondiaux (Larras, 1964). Celles-ci se retrouvent sous toutes les latitudes et dans tous les océans (Carte 1).



Carte 1: Distribution des milieux lagunaires sur les côtes mondiales (d'après des données de Larras, 1964 et de Nichols et Allen, 1981)

Du fait de leurs caractéristiques dynamiques, les lagunes sont plus nombreuses sur les côtes à marées moyennes ou faibles. En effet, devant la puissance de l'hydrodynamisme, sur les côtes macro-tidales des baies ouvertes et des estuaires sont plutôt observés. Ainsi c'est autour des mers (Méditerranée, Baltique, Golfe du Mexique...), où le marnage est généralement plus faible que sur les côtes océaniques, que se concentrent une grande part des milieux lagunaires. La formation des lagunes nécessitant d'importants apports sédimentaires, elles sont aussi très fréquentes à proximité des zones deltaïques (Gange, Mississipi, Niger, Rhône, Pô...).

I.2.2. La formation des lagunes

a- Les premières hypothèses sur l'apparition des lagunes

En 1845, un ouvrage ébauche la première théorie sur la formation des lagunes en les décrivant de la façon suivante (de Beaumont, 1845) :

« Là comme partout ailleurs la nature, qui quoique le mouvement soit son essence cherche néanmoins toujours l'équilibre et le repos, a fondé au milieu des eaux un barrage naturel qui établit une limite entre les atterrissements formés par les tempêtes de la mer et ceux qui résultent des dépôts fluviaux. »

Au cours du XIX^{ème} siècle, trois théories scientifiques se sont “affrontées” pour expliquer les mécanismes à l'origine de la formation des lagunes (Davis et Fitzgerald, 2003). Il s'agit du concept d'émergence des barres sédimentaires sous-marines, de l'hypothèse d'accroissement de flèches sableuses et de la submersion de cordon dunaire (Figure 5).

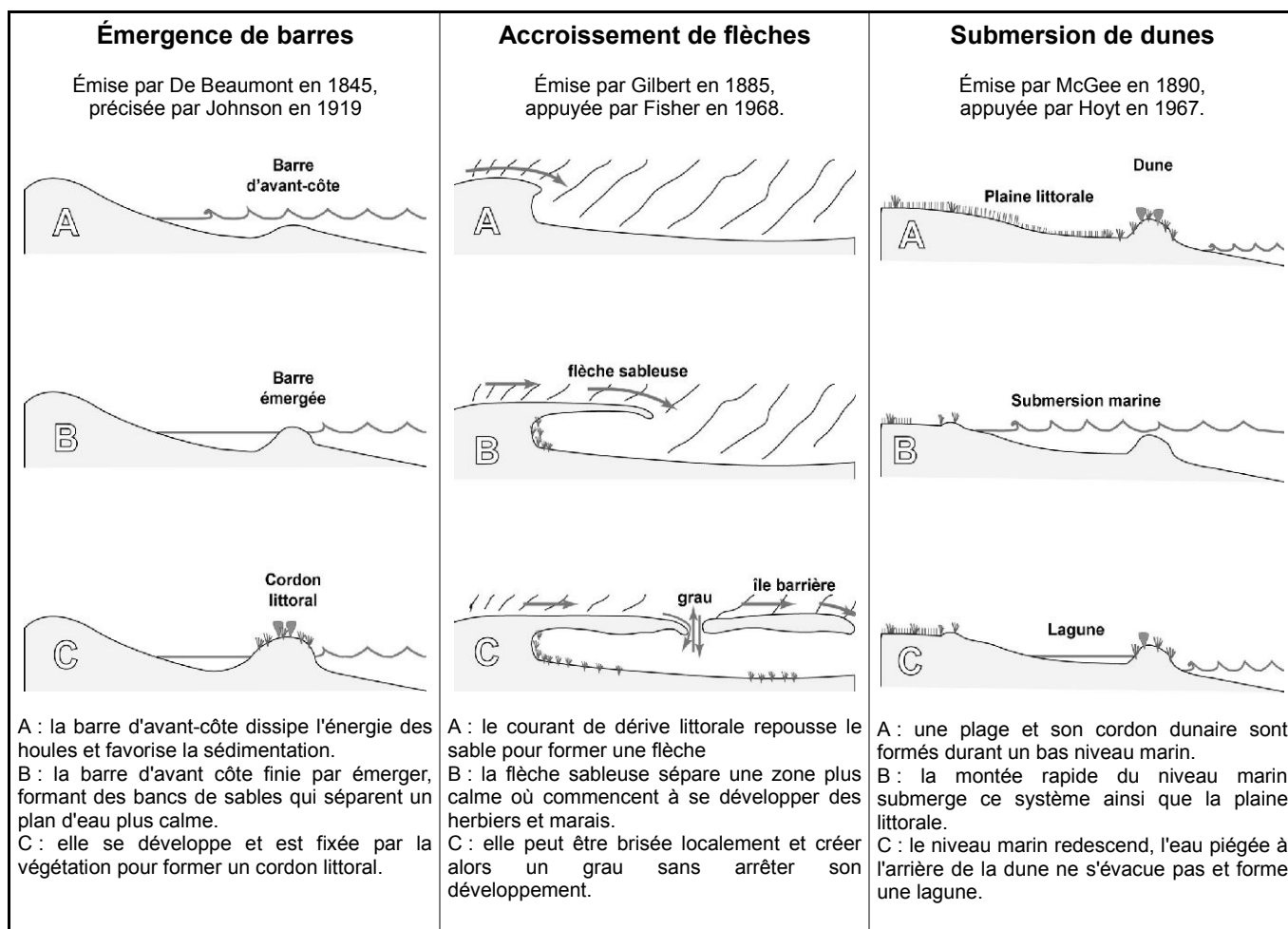


Figure 5: Les trois théories de base pour la formation des lagunes

b- La théorie actuelle

En 1971, Schwartz étudie différentes lagunes de part le monde pour tenter de vérifier ces théories. Il distingue alors trois types de lagunes, c'est cette approche qui sera finalement retenue :

- Des **lagunes de submersion** formées par inondation de l'arrière d'un cordon dunaire. Ce processus est lié à une remontée rapide du niveau marin suivie d'une légère régression.
- Des **lagunes d'origine sédimentaire** : cela combine les processus d'émergence de barres sous-marines et le développement latéral de flèches. Ce système se met en place sous des conditions de montée lente du milieu marin, et d'apports sédimentaires importants.
- Des **lagunes tectoniques** formées par l'effondrement d'une partie de la zone côtière alors envahie d'eau. Elles sont en général plus profondes que les autres types de lagunes.

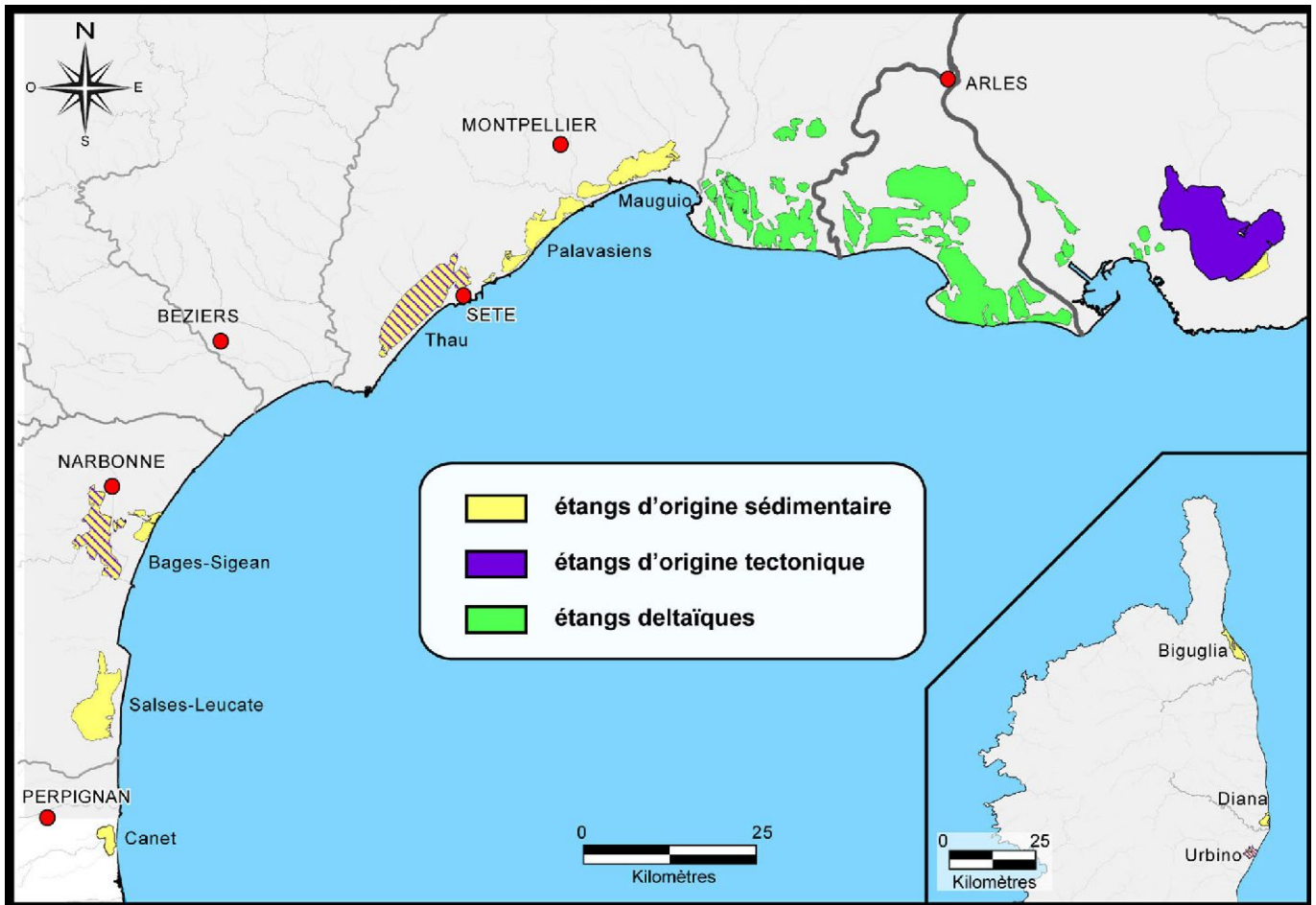
Les lagunes d'origine sédimentaire sont les plus fréquentes. Les lagunes de submersion sont rares car associées à des cordons littoraux très résistants (souvent rocheux) qui ne sont pas ou peu érodés lors de la transgression marine.

Les travaux les plus récents ont pu préciser les conditions de mise en place et d'évolution des différents systèmes lagunaires. L'importance des variations du niveau marin sur l'évolution géomorphologique des côtes est communément admise. Dans le golfe d'Aigues-Mortes, des traces de paléolagunes ont été découvertes au large, confirmant la théorie d'une origine sédimentaire avec migration progressive du cordon littoral. Les sédiments de ces anciennes lagunes sont plus riches en sables et en silts que les lagunes actuelles, ce qui semble également confirmer la fermeture progressive avec l'accroissement latéral des lidos. Une thèse est actuellement en cours sur le sujet, exploitant des données de sismique réflexion très haute résolution et de carottages sur les étangs palavasiens (Raynal O. sous la direction de Bouchette F., Géosciences - Université Montpellier 2).

c- L'origine des étangs côtiers méditerranéens

Au niveau des côtes méditerranéennes françaises (Carte 2), la plupart des lagunes ont une origine sédimentaire et se sont formées durant la transgression marine Holocène (voir détail au chapitre IV.2. page 53). Certains étangs (Thau et Bages-Sigean en Languedoc-Roussillon, Urbino en Corse) ont une origine tectonique préexistante sur laquelle s'est construit le lido. Les cordons littoraux ont évolué depuis l'état de bancs sableux en îles barrières puis en lidos fermés qui ont séparés progressivement les étangs du milieu marin.

En Camargue, il existe aussi des plans d'eau qui ne sont pas des lagunes. Ces étangs deltaïques remplissent des dépressions de la plaine formées par les divagations du Rhône. Il s'agit parfois d'anciens bras abandonnés du fleuve (par exemple le Rhône de St-Romans).



Carte 2: Les diverses origines des étangs sur les côtes Méditerranéennes françaises

I.2.3. L'évolution envisageable des lagunes

A partir de la situation actuelle, deux modes d'évolution antagonistes sont envisageables. La limite entre les deux types d'évolution est étroite, elle dépend d'une part de la vitesse de remontée du niveau marin, et d'autre part de la vitesse de sédimentation dans le milieu. Si la montée du niveau marin est inférieure au taux de sédimentation, alors la lagune tendra vers un comblement qui la transformera en plaine littorale. Dans le cas contraire, il y aura une submersion du milieu qui fera reculer la surface des terres émergées et transformera la lagune en milieu marin.

a- L'ouverture et la submersion du lido

Pour un niveau marin en élévation rapide, l'évolution de l'écosystème va au contraire tendre vers une ouverture du milieu. La progression des dynamiques marines va accentuer l'érosion du lido, favoriser la submersion du cordon dunaire lors des tempêtes et élargir les graus (Paskoff, 2001). Les caractères paraliques du bassin vont alors progressivement disparaître au profit des espèces strictement marines. La lagune deviendra alors une baie ouverte avec éventuellement la permanence de quelques îles pour les points les plus résistants du cordon littoral.

Cette hypothèse récente d'évolution des lagunes est liée aux perspectives envisagées par rapport aux conséquences du changement climatique dont les impacts locaux demeurent encore incertains. Des indices tendent à montrer que cette érosion serait en train de se mettre en place sur certaines lagunes comme à Venise (Brambati *et al.*, 2003) et la laguna Madre (Morton *et al.*, 2000). Cependant, si certaines zones d'érosion sont identifiées, le recul n'est pas encore suffisant pour affirmer avec certitude que la tendance se poursuivra à terme.

b- La fermeture et le comblement du milieu

Pour un niveau marin stable, ou avec une vitesse de transgression inférieure à la vitesse de sédimentation, l'évolution naturelle d'un écosystème lagunaire est une augmentation progressive de son degré de confinement. Dans la continuité de son processus de formation, la lagune va voir le cordon littoral se refermer jusqu'à couper totalement la communication avec la mer. Dans le même temps, la circulation interne va progressivement fragmenter la lagune en plusieurs bassins (Zenkovitch, 1959). Sous l'effet des vents, les houles internes vont conduire à la formation de flèches sableuses perpendiculaires au lido. Celles-ci vont progressivement compartimenter la circulation en plusieurs bassins et faire croître les flèches jusqu'à la fermeture totale (Figure 6). Ce confinement accru va entraîner une diminution de l'hydrodynamisme et un piégeage accru des apports externes particulaires et dissous. Ainsi le milieu lagunaire va progressivement devenir plus eutrophe et se combler.

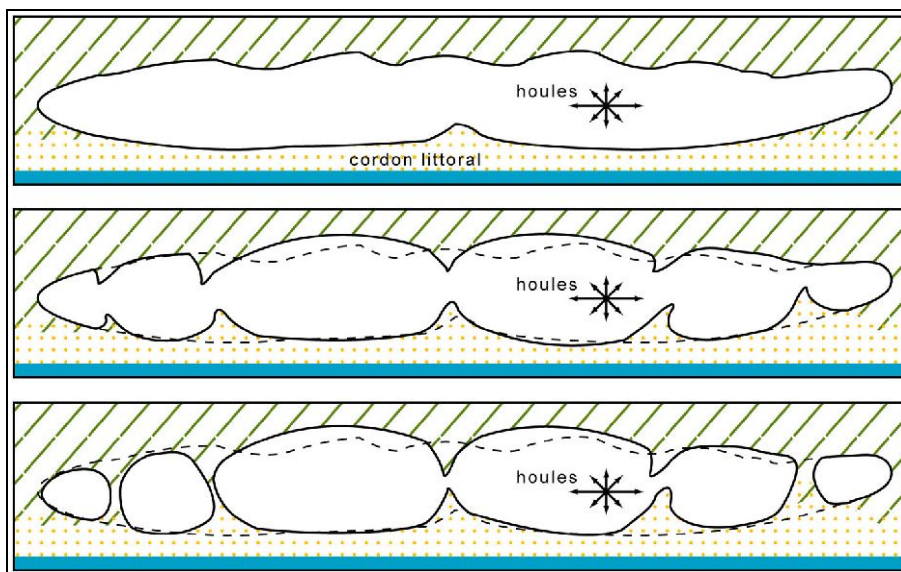


Figure 6: Segmentation d'une lagune en plusieurs bassins (d'après Zenkovitch, 1959)

I.3) Que sait-on vraiment du processus de comblement ?

L'ensemble des publications consultées nous rappelle que le **comblement** fait partie de **l'évolution naturelle de tout plan d'eau plus ou moins fermé**. Que ce soit en milieu continental avec les étangs piscicoles et les lacs de montagnes (Touchard, 2007) ou bien en milieu littoral pour les étangs côtiers (Girard, 1992), aucun ne semble échapper à cette dynamique de sédimentation. Progressivement, l'étang est transformé en marais puis en plaine. Selon les caractéristiques propres de chaque plan d'eau, son remplissage sédimentaire naturel sera plus ou moins rapide. En règle générale, l'évolution se déroule sur une durée relativement longue par rapport à l'échelle humaine, toutefois cela reste un processus rapide au regard des temps géologiques (quelques siècles ou millénaires à peine).

I.3.1. Une problématique d'ampleur mondiale

Au niveau international la problématique de l'érosion des côtes est largement étudiée, elle fait d'ailleurs l'objet d'actions et de programmes de recherche conséquents (EUROSION, 2001 ; BEACHMED-e, 2005 ...). La problématique du comblement sédimentaire des bassins paraliques par contre reste encore peu connue. Pourtant, ce phénomène revêt une ampleur mondiale : ensablement de la baie du Mont-Saint-Michel (France), envasement de la Grande Barrière de Corail (Australie), colmatage de la lagune de Venise (Italie), disparition de la Mer d'Aral (Kazakhstan et Ouzbékistan)...

Que le phénomène soit lié à une évolution naturelle ou aux activités humaines, les conséquences écologiques et économiques de ces modifications sont souvent considérables (Tableau 1). Les processus entrant en jeu dans le comblement sédimentaire sont complexes et variés. Leur prise en compte à travers une vision pluridisciplinaire s'avère nécessaire afin de mieux cerner le phénomène et mettre en place des mesures durables pour en limiter les impacts sur les sociétés.

Tableau 1: Quelques exemples de sites littoraux soumis au comblement sédimentaire

	Causes principales	Conséquences	Référence
Baie du Mont Saint-Michel (France)	Apports marins. Extension des prés salés. Création d'une digue d'accès. Aménagement des fleuves.	Disparition d'un site patrimonial. Modifications de l'écosystème.	Ehrhold, 1999
Lagune de Venise (Italie)	Apports fluviaux lors des crues. Fermeture du lido et des passes. Anthropisation du système.	Disparition d'un site patrimonial. Inondations. Modifications de l'écosystème. Tendance récente à l'érosion ?	Brambati <i>et al.</i> , 2003
Laguna Madre (États-Unis)	Transport éolien et marin. Fort impact des cyclones.	La réouverture du milieu par submersion semble plus probable que le comblement.	Morton <i>et al.</i> , 2000
Lagune La Mancha (Mexique)	Apports marins. Fixation artificielle des passes. Érosion côtière.	Modifications de l'écosystème. Perturbation du régime hydrique des mangroves.	Psutty <i>et al.</i> , 2008
Grande barrière de corail (Australie)	Apports fluviaux. Ruissellement direct.	Mort des récifs coralliens.	Fabricius, 2005
Lacs de Shinji et Nakaumi (Japon)	Remblaiements artificiels. Eutrophisation. Aquaculture.	Dégradation de l'écosystème, impact économique sur la pêche	Mc Cormack, 1998
Lagune de Xiaohai (Chine)	Aménagement des fleuves. Remblaiements artificiels.	Concentration des polluants. Impacts économiques (pêche et l'aquaculture).	Gong <i>et al.</i> , 2008
Lagune Sidi Moussa (Maroc)	Ruissellement direct en hiver. Transport éolien local en été.	Évolution lente, le bassin est peu anthropisé. Pas d'impact notable.	Maanan, 2003
Mer de Boughrara (Tunisie)	Apports marins, tempêtes. Création d'une digue d'accès.	Évolution très rapide du système. Impact sur la navigation.	Masmoudi <i>et al.</i> , 2005
Mer d'Aral (Kazakhstan, Ouzbékistan)	Sédimentation évaporitique. Déficit en eau dû à l'aménagement des fleuves.	Assèchement et disparition de l'écosystème. Impacts socio-économiques.	Le Callonnec <i>et al.</i> , 2005

I.3.2. L'état actuel des connaissances

Les publications traitant du comblement des lagunes sont rares et il s'agit généralement d'études locales menées pour le compte d'autorités publiques face à une problématique précise. Les articles scientifiques eux sont peu abondants, cependant de nombreuses thématiques annexes traitées par diverses disciplines ont pu nous apporter de précieux renseignements. Chaque discipline possède sa propre vision du phénomène de comblement en fonction de l'approche utilisée et de l'échelle d'étude. Le manque d'études scientifiques globales sur cette problématique restreint la possibilité d'une comparaison de l'importance relative des divers phénomènes entrant en jeu.

Les biologistes et les géologues nous rappellent l'importance du confinement. Plus le milieu est fermé, plus il est calme et facilite la sédimentation. Dans le même temps, il retient de nombreux nutriments qui permettent une forte productivité biologique dont la biomasse est croissante depuis la mer jusqu'à un confinement de degré 5 (Guelorget et Perthuisot, 1983). Cette masse d'organismes induit une forte production de sédiments biogènes.

Les hydrologues et les climatologues mettent eux en lumière l'importance des événements extrêmes sur les apports et la dynamique sédimentaire : crues (Gouze, 2008) et tempêtes (Liu et Fearn, 1993) constituent une part importante du phénomène de comblement. Le climat local a également une influence sur la vitesse d'évolution et la part de chacun des mécanismes sédimentaires (Nichols et Allen, 1981) :

- **lagunes des hautes latitudes** : le comblement est ralenti, la couverture de glace hivernale arrête la production biologique et limite l'érosion des sols. Les apports se font surtout au printemps avec la fonte des glaces.
- **lagunes des moyennes latitudes tempérées** : le comblement provient de différences sources, principalement les cours d'eau et la mer. Leur importance varie en fonction des caractéristiques locales.
- **lagunes des moyennes et basses latitudes arides** : le comblement provient essentiellement des apports marins et éoliens, ainsi que de la formation d'évaporites. Sa vitesse varie en fonction des conditions locales.
- **lagunes des basses latitudes tropicales** : le comblement est souvent rapide, la production biologique est importante toute l'année, et les événements météorologiques puissants (orages, cyclones). Pour les lagunes à mangroves, la dynamique végétale peut être un facteur important.

a- Mécanismes du comblement

En 1992, le SMNLR faisait état de quatre modes de comblement sur les étangs languedociens (Girard, 1992) : (i) le comblement biologique, (ii) les apports terrigènes, (iii) les effets de la mer et (iv) les remblaiements. Les recherches bibliographiques ont permis de compléter et préciser ces processus de comblement des milieux lagunaires. Un nouveau facteur de comblement, les apports dus aux vents, a pu être identifié. Ainsi, les connaissances actuelles permettent de définir cinq dynamiques de comblement :

- les dynamiques terrestres
- les dynamiques marines
- les dynamiques biologiques
- les dynamiques éoliennes
- les remblaiements artificiels

Ces dynamiques ont été étudiées au regard de plusieurs publications scientifiques pour en détailler les différents processus qui entrent en jeu. La deuxième partie de ce rapport (voir II-, page 19) les décrira en détail. Les références bibliographiques sont également classées en fonction des ces cinq processus (voir page 87).

La plupart des publications étudiées font état de l'existence d'un impact des activités humaines sur l'ensemble des processus de comblement. Les perturbations anthropiques s'opèrent à tous les niveaux (morphologie, vitesse d'évolution, composition et importance des apports...). Cela renforce l'idée récemment émise par plusieurs scientifiques d'une nouvelle période géologique baptisée Anthropocène (Zalasiewicz *et al.*, 2008). Cette ère succédant à l'Holocène aurait démarré au cours du XVIII^{ème} siècle avec la révolution industrielle et la généralisation des grands aménagements. Cette nouvelle époque est caractérisée par l'influence prépondérante d'une seule espèce vivante (l'être humain) sur les mécanismes climatiques et biogéochimiques de la planète ; cette tendance progresse de façon exponentielle depuis le XX^{ème} siècle. Le rapport du SMNLR sur le comblement des étangs languedocien constate en effet une perte accrue de surface depuis les années 1940 directement liée aux actions humaines (endiguements, terrassements mécaniques et eutrophisation).

b- Les méthodes d'estimation

Les investigations bibliographiques ont permis de relever plusieurs méthodes permettant d'estimer l'importance du comblement des lagunes. Globalement trois types de méthodes peuvent être utilisées pour rendre compte du comblement des milieux lagunaires : (i) les méthodes directes qui mesurent les processus sédimentaires, (ii) les méthodes indirectes qui comparent la situation à deux dates distinctes et (iii) les méthodes de modélisation qui permettent de reproduire mathématiquement les processus.

Les quatre techniques les plus couramment employées ont été identifiées et étudiées à travers diverses publications scientifiques locales et internationales. Il s'agit des méthodes suivantes :

- le bilan sédimentaire
 - l'analyse sédimentologique par carottages
 - l'évolution de la surface en eau par vues aériennes
 - l'évolution tridimensionnelle par suivi bathymétrique
- } méthodes directes
} méthodes indirectes

Ces techniques d'analyse seront présentées dans la troisième partie de ce rapport (voir III-, page40) il y sera abordé également les potentialités offertes par les méthodes de modélisation. Les références bibliographiques sont classées en fonction de ces différentes techniques (voir page 87).

I.4) La perception du comblement et ses enjeux

I.4.1. Une vision du milieu qui varie selon les époques

Le comblement des lagunes est un phénomène lent qui se déroule sur le long terme. L'évolution de la pensée collective est elle bien plus rapide. En fonction des lieux et des époques, la vision des milieux lagunaires par les populations varie énormément.

A l'époque romaine, les lagunes sont plus profondes et plus ouvertes vers la mer. Elles constituent alors des abris pour les navires de commerces et sont le lieu de pêches abondantes ce qui permet l'installation de nombreuses villes. Le comblement des lagunes est alors limité, la principale crainte des habitants des rives des lagunes est le risque d'inondation venant des fleuves affluents (Ambert et Chabal, 1992).

A Venise, le comblement de la lagune est une problématique majeure aux XV^{ème} et XVI^{ème} siècles. De nombreux travaux hydrauliques sont entrepris dont la déviation des fleuves, la création de canaux et la régulation des passes pour tenter de maîtriser cette évolution. Cette volonté était motivée principalement par la nécessité de maintenir un niveau d'eau suffisant permettant la navigation de commerce qui a fait la richesse de la cité vénitienne. Cependant, des conflits d'intérêts apparaissent avec les habitants de l'arrière pays qui désirent se protéger des inondations et gagner de nouvelles terres fertiles sur la lagune.

A la fin du XVII^{ème} siècle en France, des problèmes de navigation se posent également sur les étangs languedociens. La construction du canal du Rhône à Sète est alors entamée afin de faciliter la navigation à travers les étangs entre le canal du Midi et le Rhône. Des dragages réguliers sont également entrepris comme en témoigne un édit royal de 1724 :

« Vu au Conseil d'Etat du Roy, sa Majesté y étant, l'arrêt rendu en iceluy le vingt cinq avril mil sept cent vingt quatre, par lequel sa Majesté a approuvé et confirmé l'adjudication faite le vingt trois février précédent par le Sr du Bernage Conseiller d'Etat pour lors intendant en la province de Languedoc, au nommé Jean Roussel, pour rendre et entretenir navigable l'Etang de Latte dans la distance d'environ trois cent toises qui avoit été ensablé à l'embouchure du Canal de la rivière du Lez, et à cet effet construire au travers de l'ensablement [...] un canal de trois cent toises et demie de largeur, et deux pieds de demy de profondeur sous les basses eaux, [...] et de l'entretenir à mesure qu'il se seroit des ensablemens au bout du Canal pendant six années à commencer du premier octobre lors prochain, au prix, clause et conditions portées par la dite adjudication; par lequel arrêt il estoit aussi ordonné que le dit Roussel seroit payé... »

Au XIX^{ème} siècle, une toute autre vision des étangs côtiers s'installe en Europe. Maintes fois, le comblement artificiel des lagunes et l'assèchement des marais sont même préconisés. Les lagunes sont considérées comme des milieux insalubres, nauséabonds et vecteurs de maladies parasitaires. Le récit d'un voyageur du littoral espagnol en témoigne (Boucher de La Richarderie, 1808) :

« La beauté du climat, la fertilité du sol, la bonne constitution physique des habitants de Valence, prolongent leurs jours au-delà du terme ordinaire. [...] Il n'y a d'exception à cet égard, que dans la Huerta d'Alicante, la contrée d'Arppasa, la banlieue de Museros, où il existe plusieurs lagunes et marais, et en général dans tous les lieux où l'on cultive le riz. L'abandon absolu de cette culture, le comblement des lagunes, le dessèchement des marais, feroient cesser l'épidémie, qui, dans la Huerta d'Alicante, emporte quelquefois en un seul jour, vingt à vingt-cinq personnes. »

De même, un rapport officiel de 1868 proposait de combler les étangs et assainir les marais de l'Hérault afin de réduire l'insalubrité du littoral et de gagner de nouvelles terres fertiles (Régy, 1868). Quelques années plus tard, Lenthéric se résigne avec nostalgie face à l'évolution naturelle des lagunes du Golfe du Lion, tout en imaginant la future disponibilité de nouvelles terres cultivables (Lenthéric, 1876) :

« Faisons donc un aveu sincère : notre littoral est, depuis deux mille ans, en décadence. Sous la domination romaine, et même longtemps avant cette domination, un nombre considérable de colonies florissantes étaient échelonnées sur le pourtour du Golfe du Lion et aux embouchures de toutes les rivières. La plupart de ces villes prospères ont disparu. [...] La nature a contribué d'ailleurs elle-même, et dans une très forte proportion, à cette décadence. [...] A une époque relativement peu éloignée de nous, les étangs étaient plus profonds, les baies plus ouvertes, les estuaires des cours d'eau plus larges et presque toujours navigables. La limite du continent était réellement formée d'un double rivage, l'un baigné par la mer, l'autre par les lagunes intérieures. [...] et le fleuve, en suivant un autre cours, les a condamnées presque toutes à un irrémédiable amoindrissement. Aujourd'hui les étangs sont transformés sur bien des points [...] dans quelques siècles seulement, le colmatage de toutes ces cuvettes, qui ont jadis été de petites mers, sera terminé; la culture pourra alors prendre possession de cette zone littorale [...] Nous sommes en plein travail d'atterrissement et dans une véritable période de transition. Nous avons perdu un domaine maritime, et n'avons pas encore reçu en échange un domaine agricole. »

Au cours du XX^{ème} siècle, les rapides avancées technologiques conduisent à l'idée d'une domination possible de la nature. A partir des années 1950, le comblement s'accélère avec les remblaiements artificiels, les terrassements et les divers aménagements des lagunes et des bassins versants. L'extension de l'urbanisation, les aménagements touristiques et les infrastructures de transports ont largement été développées au dépend des lagunes afin d'assurer l'essor économique. Les lagunes et les marais sont alors des milieux à coloniser et assainir pour assurer la croissance des activités humaines. A la fin du XX^{ème} siècle, les préoccupations environnementales font cependant prendre conscience des conséquences néfastes que peuvent avoir ces actions. Le patrimoine naturel exceptionnel que constituent les zones humides est redécouvert. Des actions de préservation et de restauration de ces écosystèmes sont alors mises en place.

I.4.2. Les enjeux actuels des milieux lagunaires

Aujourd'hui, les lagunes constituent un atout exceptionnel pour les activités économiques traditionnelles, pour les nouvelles formes de tourisme et pour la perpétuation d'un milieu riche et vivant. La lutte contre l'eutrophisation et le comblement de ces milieux est donc devenu un enjeu essentiel.

Pour les activités traditionnelles des bassins lagunaires (pêche, conchyliculture) ainsi que pour les nouvelles activités nautiques de loisir, le comblement représente une perte de plan d'eau et donc d'espace indispensable à l'accomplissement des activités. L'envasement des chenaux et la prolifération de récifs de casails (*Ficopomatus enigmaticus*) constituent des gênes importantes pour la navigation.

Au niveau du cadre de vie la disparition des lagunes représenterait également une perte considérable. Que ce soit pour les résidents ou pour le tourisme (qui représente une part importante de l'économie régionale) le paysage offert par les lagunes est en effet un atout unique. De plus, elles constituent des coupures d'urbanisation et un espace de nature propice aux activités de détente et de loisir.

Les lagunes et les zones humides attenantes représentent de plus un patrimoine écologique exceptionnel. La richesse de leur biodiversité est reconnue internationalement par la convention de Ramsar (1971). La disparition de milieux lagunaires par comblement pourrait affecter cette biodiversité. Par ailleurs rappelons que les bénéfices écologiques rendus par ces milieux (effet tampon face aux inondations, auto-épuration des eaux) ne sont pas négligeables.

II- Les mécanismes du comblement des lagunes

II.1) Les dynamiques terrestres

Les dynamiques terrestres ont pour origine les apports sédimentaires liés aux bassins versants, notamment par les fleuves. Lors de leur entrée dans la lagune ils peuvent se disperser dans la masse d'eau ou bien sédimenter immédiatement près de l'embouchure et des berges. Dans ce second cas, ils participent alors au mécanisme d'avancée terrestre qui constitue une progression de l'écosystème continental au dépend de la lagune.

II.1.1. Les apports sédimentaires du bassin versant

a- Mécanismes en jeu

L'apport sédimentaire via les cours d'eau est une des causes les plus évidentes du comblement des étangs. Connue depuis le Moyen-âge (Grillo, 2004), elle est étroitement liée à l'érosion des bassins versants et donc à l'utilisation des sols et à l'aménagement des cours d'eau comme le précisait déjà les frères Paulini pour la lagune de Venise (Paulini, 1601).

Lors des précipitations, les matériaux sont érodés des roches et des sols du bassin versant puis transportés vers la lagune. Le transport s'effectue principalement par les cours d'eau. Cependant, les matériaux peuvent aussi être entraînés directement par le ruissellement aux abords de l'étang. Le transport de matériaux par les cours d'eau peut s'effectuer sous deux formes :

- **le transport d'éléments en solution :**

Il s'agit des éléments dissous dans l'eau sous forme d'ions (carbonates, sulfates, nitrates...). Ils représentent en climat tempéré la majorité des éléments transportés (Beauchamp, 2005). Ils ne peuvent pas sédimenter sous cette forme, mais en entrant au contact de l'eau salée certains éléments précipitent et constituent des floculats qui vont sédimenter (pour la floculation, voir c, page 8).

- **le transport de matériaux solides :**

Ils sont transportés par les courants de la rivière soit en suspension dans la masse d'eau, soit par charriage sur le fond du cours d'eau pour les plus gros éléments. Les lois régissant ce transit sédimentaire sont relativement bien connues, elles dépendent de la vitesse des courants ainsi que de la taille des particules comme le montre le diagramme de Hjulström (Figure 7). Une particule fine est donc transportée plus facilement et parcourt une plus longue distance. Par ailleurs, l'érosion des particules argileuses nécessite une énergie plus grande pour être arraché car il existe une forte cohésion entre elles.

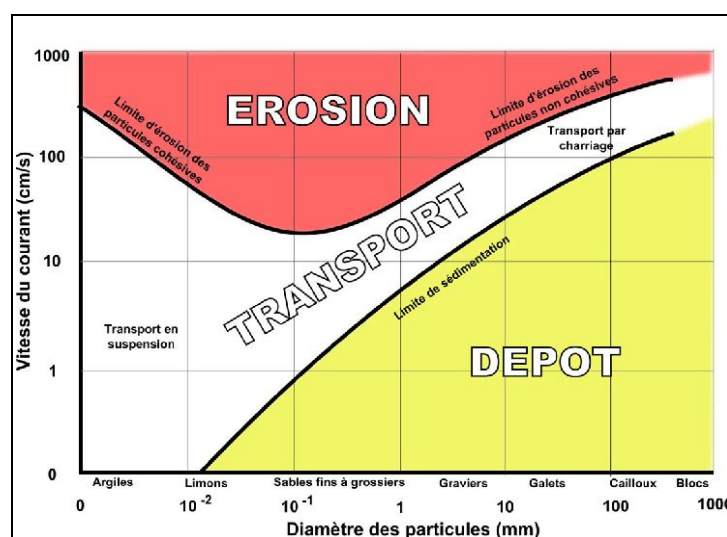


Figure 7: Érosion, dépôt et capacité de transport des particules dans un cours d'eau

b- Typologie des matériaux transportés

Les lagunes, situées à l'embouchure des cours d'eau, reçoivent les particules les plus fines qui ont parcouru la plus longue distance dans le bassin versant. De plus, la vitesse des courants lagunaires étant généralement plus faible que dans les fleuves, une partie des particules se dépose immédiatement.

La quantité de matériaux qui peut être apportée par les cours d'eau est étroitement liée à la climatologie. Pour la laguna Madre, située en milieu semi-aride, la contribution des fleuves représente à peine 5 % des apports sédimentaires (Morton, 2000). Pour la lagune de Bolinas, située au Nord de San Francisco, sous un climat de type méditerranéen, elle est la source principale d'apports sédimentaires (Tetra Tech Inc., 2001).

Les modes d'occupation et d'utilisation des sols jouent quand à eux sur la granulométrie des matériaux transportés. En période de crue apparaît souvent un paradoxe : alors que le courant est plus fort, ce sont des particules fines qui sont transportées en majorité. En effet, l'inondation des terres et le ruissellement abondant chargent massivement le cours d'eau en particules terrigènes argileuses. L'effet des crues sur le transport de particules fines a été observé dans le Dese, un affluent de la lagune de Venise (Zonta, 2005). L'analyse granulométrique des prélèvements à différents niveaux de la section d'écoulement a ainsi montré que 80 % des particules transportées durant les crues ont un diamètre inférieur à 20 μm (Figure 8). Cette même étude a permis de mettre en évidence la variation du transport sédimentaire au cours de l'évènement de crue. Le flux de particules en suspension subit un retard par rapport au débit de pointe de l'évènement. Cela s'exprime par une relation de type hystérésis (Figure 9). Contrairement au transport d'éléments dissous, il n'existe donc pas de relation directe entre la quantité de matériaux transportés et le débit. Cela confirme l'origine terrigène des sédiments transportés qui ruissellent sur le bassin versant avant d'arriver au cours d'eau.

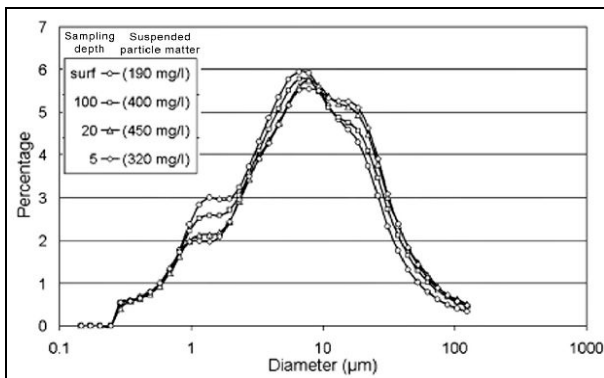


Figure 8: Taille des particules transportées durant une crue du Dese (Zonta, 2005)

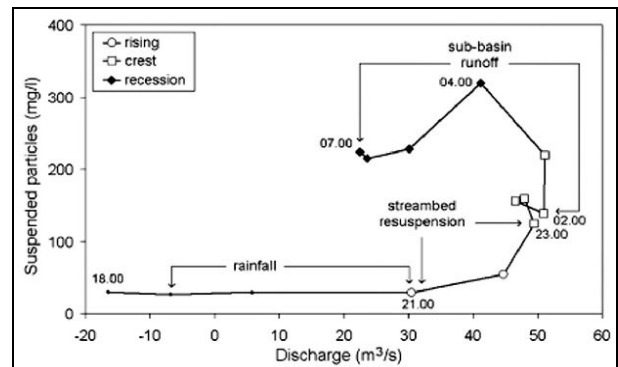


Figure 9: Relation entre le débit et les matières en suspension au cours du temps lors d'une crue du Dese (Zonta, 2005)

Par ailleurs, une crue représente une part importante des apports sédimentaires annuels des fleuves. Sur l'étang de Berre, une seule crue peut représenter de 31 % (crue de la Touloubre en 2006) à 99 % (crue de l'Arc en 2006) des apports annuels de matières en suspension du cours d'eau (Gouze *et al.*, 2008). Cette même étude estime le flux annuel de matière en suspension pour chaque bassin versant entre 14 et 42 t/km²/an. Ces valeurs sont conformes aux travaux précédemment menés sur la zone estimant les flux sédimentaires entre 17,4 et 47,7 t/km²/an (Fiandino, 2004). Les auteurs précisent cependant que les résultats sont largement inférieurs à la moyenne observée sur les cours d'eau côtiers en Europe de 30 à 88 t/km²/an et aux flux estimés pour la zone méditerranéenne de 100 à 200 t/km²/an (Walling et Webb, 1996). Les différences pourraient être dues à l'artificialisation des cours d'eau et des berges. En ce qui concerne le Languedoc-Roussillon, les apports moyens des bassins versants sont estimés à 175 t/km²/an (Girard, 1992), d'après une estimation effectuée sur l'étang de Bages-Sigean.

c- Influence anthropique

Si les apports sédimentaires des cours d'eau constituent la cause de comblement la plus connue, c'est aussi celle qui a fait l'objet des plus importantes modifications au cours des derniers siècles. C'est dans la lagune de Venise que les premiers travaux importants ont été réalisés. Au cours du XVI^{ème} siècle, le cours des fleuves qui s'y jettent est dévié à plusieurs reprises afin de tenter de préserver à la fois la lagune de l'envasement et les terres agricoles de l'inondation (Grillo, 1992). Malgré ces efforts le comblement de la lagune ne s'est pas arrêté pour autant, les cours d'eau reprenant leur ancien lit lors des crues importantes et y déversant de grandes quantités de matériaux.

Au cours du XX^{ème} siècle, la maîtrise des cours d'eau pour les besoins humains s'est largement développée, facilitée par l'apparition des engins de terrassement. Celle-ci a amplement modifié les dynamiques hydrologiques et sédimentaires, avec des conséquences parfois opposées. En fonction des actions menées, deux cas peuvent se présenter :

- **le déficit sédimentaire :**

Il est causé par l'aménagement de barrages sur les cours d'eau. Le transport par charriage sur le fond des éléments les plus grossiers est entièrement bloqué. Les matériaux en suspension se déposent également du fait du ralentissement de la vitesse des courants dans la retenue. Il en résulte en aval une érosion accrue du fleuve, ainsi qu'une érosion des côtes entraînée par la réduction des apports sédimentaires au littoral.

- **le surplus sédimentaire :**

Il est causé par l'endiguement et la canalisation des cours d'eau, ainsi que par l'utilisation des sols du bassin versant (déforestation, pratiques agricoles...) et les rejets d'eaux usées (matières en suspension). Il s'agit surtout de particules fines. Il en résulte un taux de sédimentation plus important et un envasement des zones calmes du cours d'eau et des milieux récepteurs (marais, lagune...).

Ce dernier point nous intéresse plus particulièrement pour la problématique du comblement. Que ce soit en milieu urbain pour la protection contre les crues ou en milieu rural pour la maîtrise de l'irrigation et du drainage des terres, les fleuves côtiers se jetant dans les lagunes ont subi de nombreuses modifications. Dragages, rectifications et recalibrages ont permis de développer de nombreuses activités, mais ont aussi des conséquences sur les milieux naturels. Cette canalisation a réduit l'espace de liberté des cours d'eau, ceux-ci devant alors dissiper l'énergie sur une section d'écoulement plus faible. Il en résulte des vitesses de courant plus importantes et donc une érosion accrue des berges et du lit. Les matériaux ainsi érodés constituent un apport sédimentaire supplémentaire vers les étangs. A Kushiro Mire, zone humide pré-littorale du Japon, entre 1960 et 2000 le taux de sédimentation est passé de 0,13 cm/an à des valeurs allant de 1,3 à 8,9 cm/an. Les principales causes avancées sont la canalisation des cours d'eau et les modifications de l'utilisation des sols dans le bassin versant (Mizugaki *et al.*, 2006).

L'impact de l'utilisation des sols sur le comblement lagunaire est connu depuis des siècles. A Venise, la déforestation et l'extension des terres cultivées dans l'arrière pays à partir du XV^{ème} siècle ont accéléré l'envasement de la lagune (Paulini, 1601 ; Grillo, 2004). D'après l'IFEN, plus d'un tiers des sols du bassin méditerranéen sont soumis à une érosion forte. Les principaux apports sédimentaires liés à l'érosion proviennent des sols agricoles qui sont les plus soumis à l'érosion pour de nombreuses raisons :

- la couverture végétale est souvent limitée à une partie de l'année
- les systèmes racinaires peu profonds (contrairement aux forêts) n'assurent pas un bon maintien
- le travail des engins de labour modifie la cohésion des particules argileuses
- l'arrachage des haies et l'agrandissement des parcelles favorisent le ruissellement

Les zones urbaines quant à elles apportent peu de sédiments par le ruissellement direct du fait de l'imperméabilisation des sols qui les rend peu érodables. Cela conduit cependant à une forte augmentation du débit des cours d'eau, entraînant des risques accrus d'érosion et d'incision du lit. Les infrastructures routières bien entretenues contribuent pour une faible part à l'enrichissement sédimentaire par les poussières qui s'y déposent et apportent des polluants divers (Carter *et al.*, 2003). Lorsqu'elles sont à l'abandon leur érosion peut être une source non négligeable d'apports, pour la lagune de Bolinas c'est la deuxième source d'apports terrestres (Tetra Tech. Inc., 2001). Par ailleurs, les stations d'épuration, surtout lorsqu'elles sont sous-dimensionnées, relâchent des matières en suspension dans le milieu qui contribuent aux apports sédimentaires (Carter *et al.*, 2003).

II.1.2. Le processus d'avancée terrestre

Le phénomène qualifié d'avancée terrestre est une progression de l'écosystème continental sur le milieu lagunaire. Il ne constitue pas en lui-même une source de sédiments, mais est un mécanisme favorisant le dépôt des sédiments en suspension dans la lagune sur ses bordures. Il peut être directement lié à un apport très important de sédiments par un fleuve formant un delta. Il peut aussi être causé par un taux de sédimentation accru localement par la végétation.

a- Mécanisme de progradation deltaïque

Les processus de formation et de progradation des deltas sont bien connus sur les grands fleuves. Tout d'abord, les sédiments les plus grossiers se déposent en masse à l'embouchure. Le débit du fleuve diminue progressivement avec l'accumulation des sédiments dans le bras, puis fini par emprunter un chenal différent. Ces dépôts se stabilisent ensuite par l'apparition de végétation.

Les petits fleuves côtiers forment parfois des deltas lorsqu'ils transportent une grande quantité de sédiments et débouchent dans un milieu relativement calme comme les lagunes. Leur progression s'effectue alors au dépend des milieux lagunaires. Dans les milieux confinés, du fait du manque d'espace de liberté pour la divagation des chenaux, la progradation du delta peut être très rapide. Par exemple, la baie de Cispata (Colombie) a été largement comblée en seulement deux siècles par le delta du Sinu (Serano-Suarez, 2004). Localement, plusieurs deltas peuvent être observés dans les lagunes comme par exemple le Réart (étang de Canet), la Berre (étang de Bages-Sigean) et le Salaison (étang de l'Or). La vitesse de progradation de ces deltas n'a semble-t-il pas été étudiée.

b- Mécanisme de conquête végétale

La progression des écosystèmes terrestres sur le milieu lagunaire est un facteur supplémentaire de comblement directement lié à la colonisation par la végétation des zones humides (mangroves, roselières, sansouires,...). Les études sur le sujet portent principalement sur les mangroves, laissant peu de données accessibles sur les milieux méditerranéens.

Pour les lagunes tropicales, la mangrove avance par l'implantation en milieu immergé (ou semi immergé) de nouveaux palétuviers, ceux-ci en se développant vont créer une zone plus calme où la sédimentation va s'accélérer soustrayant peu à peu cet espace au domaine aquatique. L'impact global de la mangrove sur le comblement d'un bassin paralique est cependant difficile à évaluer. En effet, en retenant les sédiments sur les rives elle accentue certes la réduction de la surface du plan d'eau, mais limite également le transport des sédiments d'origine terrestre. Ainsi, la réduction de profondeur au centre de la lagune s'en voit diminué d'autant. De plus, dans le cas des lagons, l'envasement des récifs coralliens s'en trouve limité. Une étude menée sur la mangrove du Golfe de Papua (Nouvelle-Guinée) montre la coexistence de zones d'accrétion et d'érosion. Globalement, la capacité de séquestration de la mangrove est estimée entre 2 et 14 % des entrées sédimentaires (Walsh et Nitrouer, 2004). A terme, si les apports sédimentaires sont suffisants, la mangrove finira cependant par combler le bassin paralique comme cela s'est produit par le passé sur d'anciens estuaires comme celui de l'Itanhaém au Brésil (Figure 10) étudié par Do Amaral en 2006.

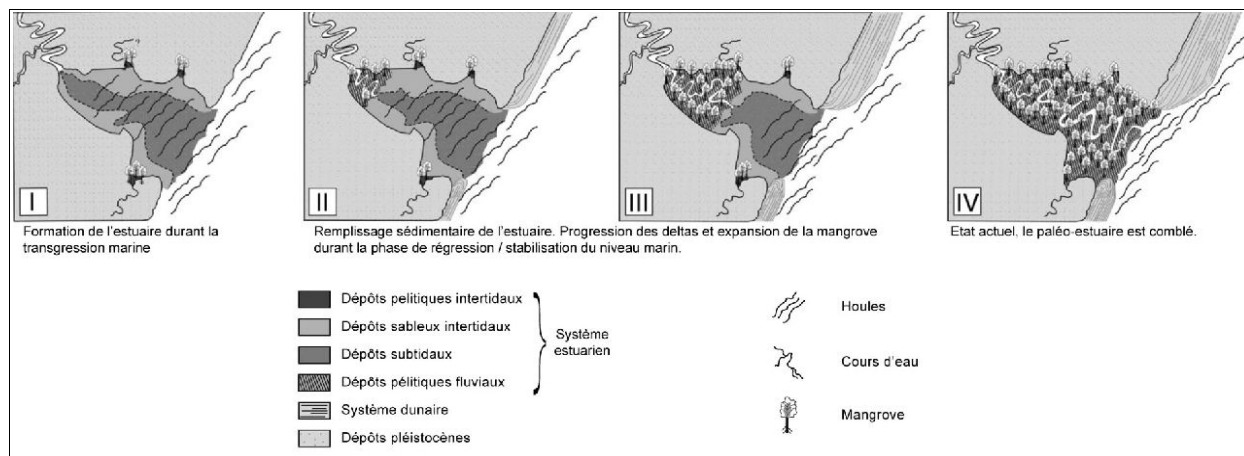


Figure 10: Schéma d'évolution de la mangrove d'Itanhaém (Do Amaral, 2006, modifié)

Le processus de conquête terrestre n'est cependant pas limité aux écosystèmes tropicaux. Sous les latitudes tempérées, schorres, herbus, sansouires, et roselières jouent un rôle similaire à celui des mangroves bien que leur dynamique soit moins rapide. Le processus a été étudié sur l'étang de Bages-Sigean (Boutière, 1974) ainsi que sur l'étang de La Palme (Wilke *et al.*, 2001).

Les rives de la lagune sont de deux types, soit soumise à l'influence directe des houles et des courants, soit plus abritées. Le processus de conquête terrestre touche principalement ces secondes où l'hydrodynamisme plus calme favorise la sédimentation. Sur ces berges il se forme des dépôts de particules ainsi que de débris végétaux constituant des laisses d'étang. Les graines des plantes pionnières peuvent alors se développer dans cette zone abritée et enrichie en limons. Progressivement, une formation végétale avancée par rapport au rivage va s'étendre. Cette végétation stabilise les sédiments en place. De plus, elle isole une zone plus calme où le comblement s'accélère : la micro-lagune (Figure 11). Le phénomène de conquête terrestre peut parfois être observé dans les zones éloignées des rives de la lagune au niveau d'îlots ou de bancs sableux.

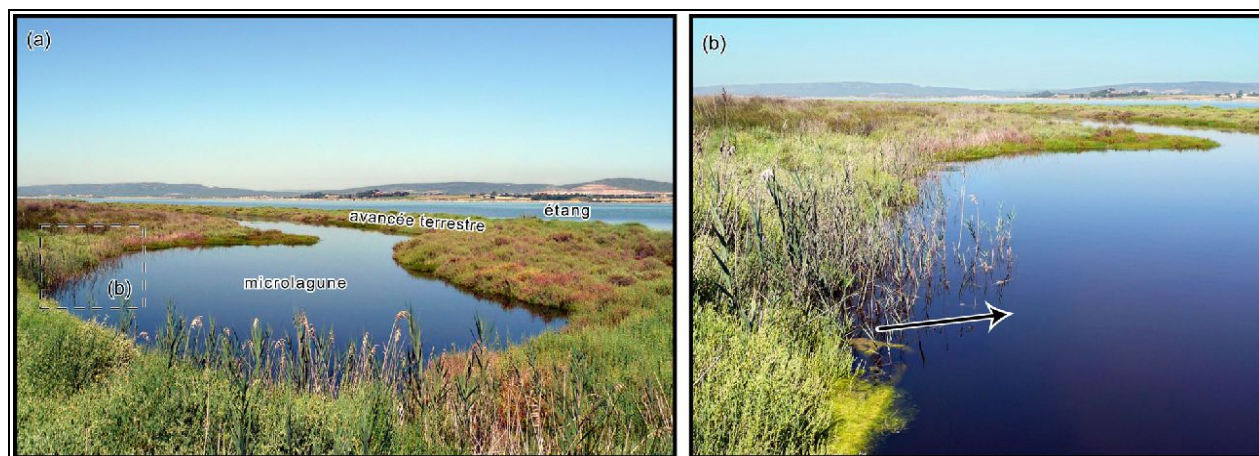


Figure 11: Avancée de la végétation sur le milieu lagunaire (étang de Pierre-Blanche)

La vitesse de conquête terrestre va dépendre du type de végétation qui est lié à la salinité du milieu. Dans les zones à salinité marquée, la sansouire (salicornes, soudes, obiones, saladelles) va progresser lentement en surface mais accumuler des hauteurs importantes. Au contraire dans les zones dessalées, la végétation dulçaquicole (roseaux, scirpes, jones et phragmites) va s'étendre rapidement en surface mais peu en hauteur ce qui conserve une lame d'eau.

Il semble par ailleurs que les processus de conquête terrestre soient étroitement liés à l'hydrodynamisme et au niveau d'eau dans la lagune. A Venise, le taux d'accrétion sédimentaire dans les prés-salés est corrélé à la fréquence de submersion de ceux-ci par les eaux lagunaires. Sur le long terme, l'accrétion sédimentaire pourrait ainsi permettre le maintien de la zone humide face à la montée du niveau marin (Bellucci, 2007).

II.2) Les dynamiques marines

Le comblement lagunaire d'origine marine est induit par les processus hydrodynamiques du littoral (houles, courants et marées) dont l'impact dépend de l'importance de l'ouverture et des échanges entre le bassin et la mer. Les événements extrêmes tels que les tempêtes, ou plus rarement les tsunamis, peuvent avoir une contribution importante en projetant du sable dans la lagune. L'évolution climatique à long terme qui entraîne la variation du niveau marin est un facteur susceptible de modifier ces mécanismes.

Les apports de matériaux d'origine marine sont constitués de sédiments côtiers. Les lagunes reçoivent des particules sableuses ainsi qu'une grande part de débris coquilliers. Les espèces *Rissoa sp.* et *Bittium reticulatum* sont particulièrement abondantes dans les lagunes Méditerranéennes. Ces gastéropodes marins vivent sur les herbiers et les fonds sableux. Une fois morts, leurs coquilles sont transportées par les houles vers le rivage où elles s'accumulent avant d'être projetées dans la lagune lors des tempêtes (Dezileau, communication personnelle). Les sédiments constituant la plage et le cordon dunaire sont également érodés puis déposés dans la lagune.

II.2.1. Les échanges sédimentaires à travers les passes

a- Mécanismes généraux

Passes, graus ou chenaux, les noms sont variés mais désignent tous les ouvertures des milieux paraliques sur la mer. De l'importance de ces ouvertures dépend la configuration du milieu et les caractéristiques de l'écosystème.

L'ouverture sur la mer permet des échanges d'eau, de nutriments et de sédiments entre le plan d'eau et la mer. Ces échanges ne vont pas se faire de la même façon selon l'importance des marées dans la zone. La complexité des phénomènes qui peuvent survenir au sein d'une passe rend difficile la quantification des flux sédimentaires. Les échanges sédimentaires dépendent de la morpho-bathymétrie, de la puissance des marées et des houles et de la différence de niveau d'eau entre l'étang et la mer. Globalement, deux types de graus peuvent être différenciés : (i) les passes dominées par la marée où les sédiments entrent et sortent par le milieu du chenal, (ii) les passes dominées par les houles où les sédiments se déplacent le long de l'entrée du chenal avec les courants de dérive (Seabergh et Kraus, 2003). Il est possible d'identifier le processus dominant des transits sédimentaires ainsi que les zones de dépôts immédiats en arrière du grau grâce à une approche qualitative à partir de photographies aériennes (Fitzgerlad *et al.*, 2000).

b- Sédimentation dans un bassin macro-tidal

Dans les zones où la marée est marquée, elle génère des échanges réguliers dans les deux sens. Ceux-ci ont largement été étudiés dans une grande variété de milieux (baies, estuaires, marais maritimes, ...). La majorité des auteurs s'accordent à définir les courants de marée comme facteur principal des échanges sédimentaires entre la mer et le bassin paralique. Ceci est dû principalement à la dissymétrie de l'onde de marée. Le courant de flot (marée montante) submerge en général rapidement l'estran, alors que le courant de jusant (marée descendante) est plus lent. Ce dernier a un débit moins puissant, et l'eau doit se frayer un chemin entre les bancs sableux. Ainsi confinée dans des chenaux restreints, la perte d'énergie par frottement augmente et la vitesse du courant diminue. La puissance du transport sédimentaire est alors réduite, induisant des dépôts et une incapacité à reprendre l'ensemble du sédiment apporté à marée haute. Le cas est particulièrement flagrant dans la baie du Mont Saint-Michel (Ehrold, 1999 ; Drévès et Chaussepied, 2001 - p.348). Le phénomène peut de plus induire une boucle rétroactive, augmentant progressivement l'ampleur de la problématique. En effet, la sédimentation dans la baie entraîne une diminution des courants de jusant qui entraînent à leur tour une augmentation de la sédimentation (Bertin *et al.*, 2004).

c- Sédimentation dans un bassin micro-tidal

Dans les zones de très faible marée, comme en Méditerranée où le marnage n'excède pas 40 cm, les courants résultants ne peuvent déplacer que de faibles volumes sédimentaires. D'autres phénomènes interviennent alors dans les échanges entre le milieu marin et les lagunes. La dynamique des houles et le courant de dérive littorale induit transportent les sédiments le long des lidos. Au niveau du grau, une partie du sédiment va s'engouffrer dans la lagune en suivant le pourtour du grau (Seabergh et Kraus, 2003).

Le courant de dérive littorale transporte généralement les sédiments selon un sens dominant le long du cordon littoral. Cela va donc avoir tendance à engraisser un côté du grau et éroder l'autre. Sur le long terme, cette dynamique va entraîner la migration du grau qui va se déplacer dans le sens de la dérive littorale (Johnson, 1919). La vitesse de migration dépend des apports, de l'énergie des houles, des courants de marée et de la stabilité des berges de la passe. Si le grau s'appuie sur un substrat rocheux ou est consolidé artificiellement, sa migration sera stoppée. Par ailleurs, les graus profonds ont tendance à être plus stables que les graus peu profonds (Fitzgerlad *et al.*, 2000).

En conditions météorologiques normales, la plupart des graus expulsent largement plus de sédiment de la lagune vers la mer qu'ils n'en font rentrer. Par exemple sur la lagune de la Palme (Wilke *et al.*, 2001), près de 50 % du temps il n'y a aucun apport sédimentaire vers la lagune (débit inférieur à 2 m³/s) et les entrées importantes (débit supérieur à 5 m³/s) représentent seulement 17 % du temps annuel (Figure 12). Les entrées sédimentaires s'effectuent ainsi surtout en période de tempête. Dans ces conditions d'entrées marines, l'énergie des vagues et la différence de niveau d'eau deviennent en effet suffisantes pour créer un fort transport (Fitzgerlad *et al.*, 2000). Lors de ces événements, des graus temporaires sont également susceptibles de se former, augmentant d'autant la capacité de transport sédimentaire (voir II.2.2, page 26).

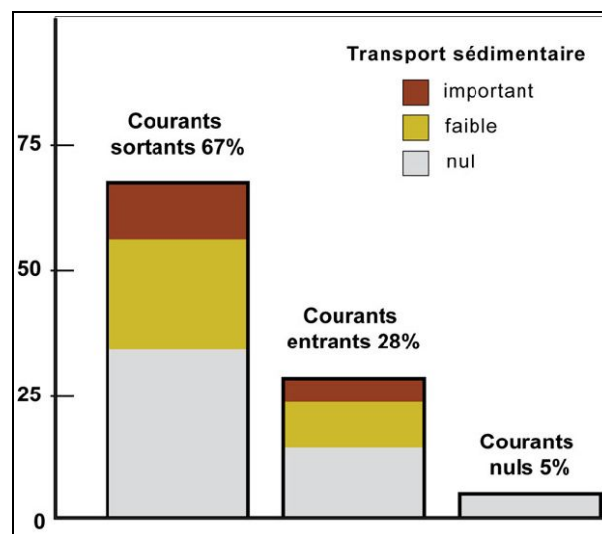


Figure 12: Transports sédimentaires dans le grau de l'étang de La Palme entre 1998 et 2001 (d'après des données de Wilke *et al.*, 2001)

II.2.2. Le phénomène de migration du lido et l'effet des tempêtes

a- Mécanismes en jeu

Le phénomène de migration vers la terre du cordon littoral est un processus lié à l'élévation du niveau marin et aux événements climatiques. Le processus n'est pas continu, il s'effectue principalement à l'occasion des tempêtes. Les vagues de débordement prélèvent du sable du côté externe des cordons pour le projeter du côté interne (Figure 13) permettant ainsi au cordon de rouler sur lui-même en progressant sur la lagune (Paskoff, 2001 ; Davis et Fitzgerald, 2003). Le sable projeté dans la lagune et l'avancée du cordon littoral réduisent la surface de la lagune en contribuant à son comblement.

Une preuve matérielle de cette translation est donnée par des dépôts de tourbe qui affleurent près des plages côté mer alors qu'ils se sont formés dans les lagunes, en arrière du lido (Figure 14).

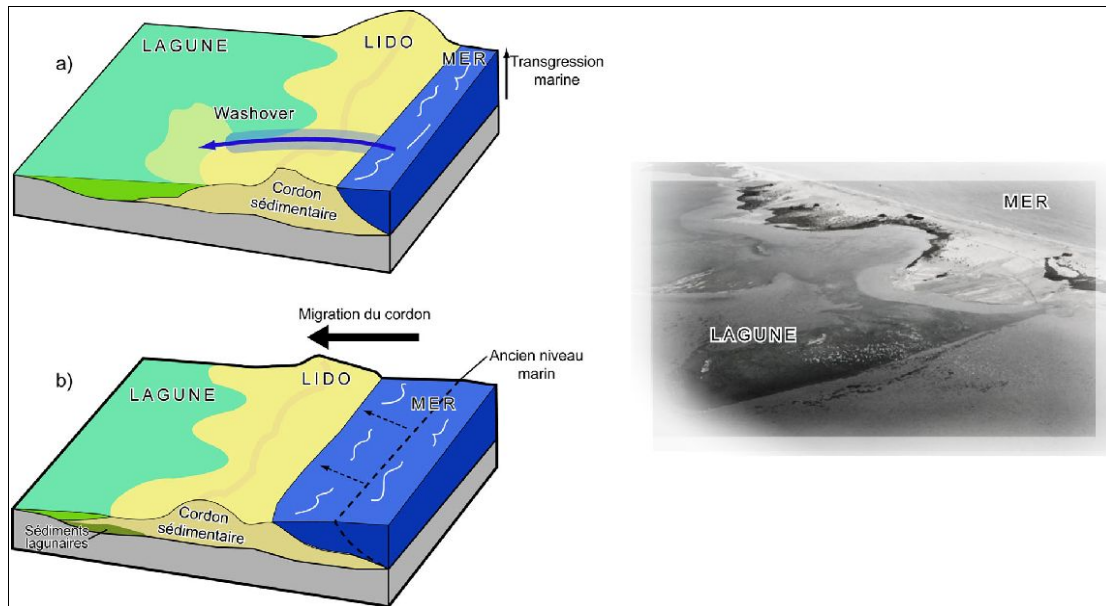


Figure 13: La migration du cordon littoral sous l'effet des tempêtes

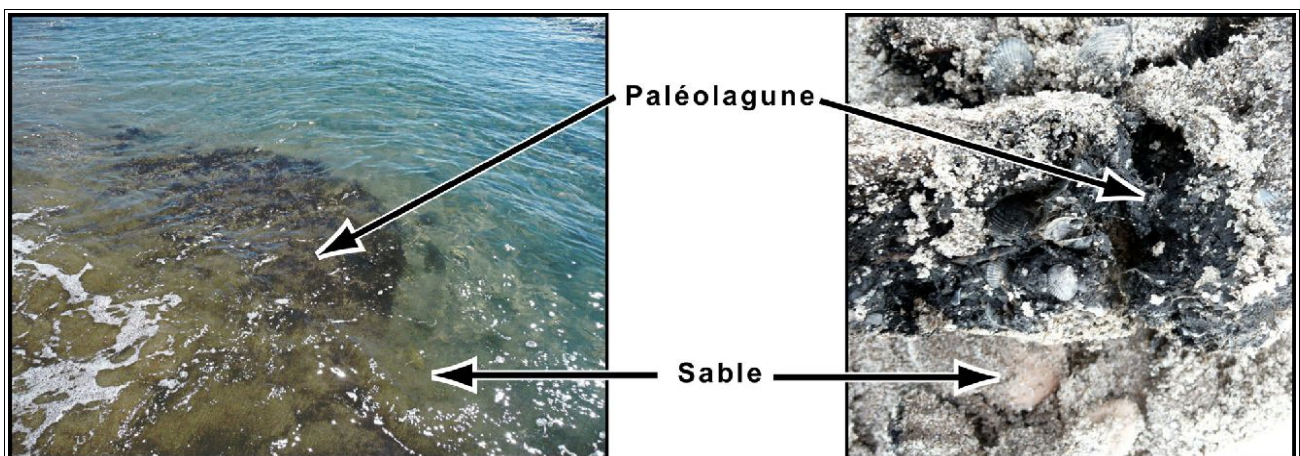


Figure 14: Trace de dépôts lagunaires anciens en milieu marin (plage de Maguelone)

L'évolution du lido de Sète a été étudiée à partir de données de sismique-réflexion, et d'observations sédimentologiques et archéologiques (Tessier *et al.*, 2000). Il en ressort que depuis la période antique (-2000 ans) le cordon littoral s'est déplacé d'environ deux cents mètres vers le continent et a perdu en volume sédimentaire (Figure 15). Ce déplacement d'environ 10 cm/an est particulièrement impressionnant, d'autant plus que l'élévation du niveau marin a été très modérée durant cette période (environ 0,18 cm/an).

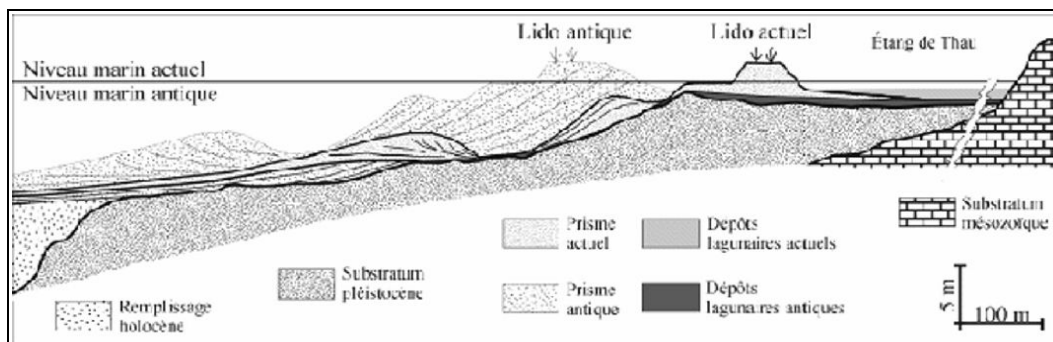


Figure 15: Évolution du lido de Sète depuis l'Antiquité (Tessier *et al.*, 2000)

Au niveau des étangs Palavasiens, l'effet de la seule tempête de novembre 1982 a entraîné un recul du cordon littoral de plus de vingt mètres sur certains secteurs de l'étang de Pierre-Blanche (Figure 16). Le cordon dunaire a également été rompu localement, entraînant un aplatissement du profil et une plus grande vulnérabilité de la lagune aux futures entrées marines.

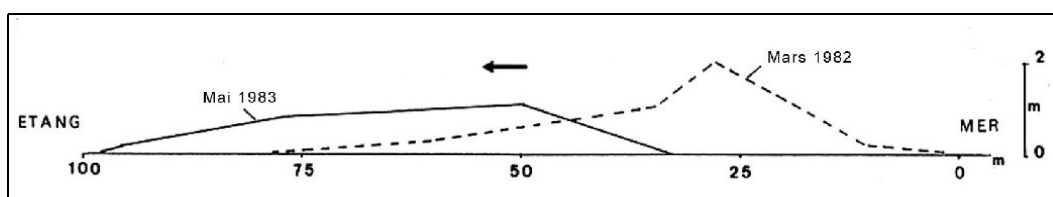


Figure 16: Évolution du lido de l'étang de Pierre-Blanche entre mars 1982 et mai 1983 (Paskoff, 2001 - d'après SOGREAH)

II.2.3. Influence anthropique

a- Les modifications du cordon littoral

La fragilisation du cordon littoral va faciliter la pénétration des sédiments marins dans les lagunes. Au Moyen-Âge, il semble qu'une formation forestière recouvrait le cordon littoral dans le secteur de Lattes. Celui-ci a progressivement été déboisé au XIV^{ème} siècle (Ambert et Chabal, 1992). La végétation herbacée qui maintient les dunes depuis lors est de plus en plus mise à mal par le piétinement qu'entraîne la surfréquentation. Seuls demeurent de petits monticules sableux qui sont rapidement érodés par les vents et les tempêtes, et facilitent ainsi les apports sédimentaires de la mer vers la lagune. Le nivellement des plages et des dunes, le développement d'infrastructures de transport et d'aménagements touristiques sont également des facteurs qui peuvent fragiliser le lido. Par ailleurs, dans le contexte actuel d'érosion accrue des plages, il est probable qu'il y ait une augmentation des apports sédimentaires marins (issus de cette érosion) vers la lagune à travers les passes permanentes. Ces apports vont se déposer dans les secteurs proches du grau (Psutty *et al.*, 2008).

b- La construction de digues bloquant le transport sédimentaire

La mise en place de digues et ponts en travers d'un bassin paralique est un élément qui va bloquer le transport sédimentaire. En conséquence, la sédimentation va être accrue localement, entraînant un comblement rapide. Le phénomène a été observé dans la baie du Mont-Saint-Michel avec la digue-route qui le relie au continent. Ce comblement était d'ailleurs prévu dès sa construction en 1878 car l'objectif poursuivi à l'époque était la poldérisation de la baie (Verger, 2001). En Tunisie, le comblement accéléré de la Mer de Boughrara est également associé à la construction d'une digue reliant l'île de Djerba au continent (Masmoudi *et al.*, 2005). Sur l'étang de la Palme, un phénomène similaire est observé avec le pont ferroviaire. Construite au XIX^{ème} siècle, la voie ferrée a bouché trois des quatre graus originels, entraînant une sérieuse modification de l'hydrodynamisme et des dynamiques sédimentaires (Wilke *et al.*, 2000).

c- Les impacts du changement climatique

Largement influencée par les activités humaines (émission des gaz à effet de serre), l'évolution climatique actuelle favorise l'élévation du niveau marin. D'après le GIEC, le niveau marin moyen aura probablement augmenté d'environ 42 cm à la fin du siècle* (soit +4,2 mm/an). En méditerranée, l'évolution au cours du XX^{ème} siècle a été de +2,2 mm/an en Camargue et +1,1 mm/an à Marseille. Elle pourrait donc être près de deux fois plus importante pour les années à venir. Cette élévation risque d'entraîner une érosion accrue du littoral, ainsi que des effets néfastes sur les zones humides côtières. Le risque d'inondation sur les côtes basses va probablement augmenter, avec des conséquences sur les populations proches du littoral (GIEC, 2007).

Les lagunes sont particulièrement concernées puisque un réchauffement global de 2 à 3°C pourrait entraîner par submersion la disparition de la moitié des zones humides méditerranéennes (Romani *et al.*, 2008). Cependant, l'évolution des lagunes face aux modifications du climat reste difficile à prévoir. Il diminuera très probablement la durée de vie des étangs, mais la limite entre le scénario de comblement et celui de submersion (voir I.2.3, page 12) est très étroite et demeure entachée d'incertitudes. D'une part l'érosion accrue favorisera la submersion du lido. D'autre part, le climat plus sec favorisera des apports terrestres plus importants (dégradation des sols et incendies de forêt) et une éventuelle augmentation des tempêtes pourrait favoriser les apports marins et la migration du lido vers la terre.

II.2.4. Le risque potentiel de tsunami

Le tsunami, fait souvent référence à l'Océan Pacifique et à l'Asie du Sud-Est. C'est dans cette zone en effet que sont recensés les raz-de-marée les plus dévastateurs comme le dramatique événement du 26 décembre 2004. Pourtant, ce risque n'est pas absent des côtes européennes, 25 % des tsunamis recensés dans les données historiques ont eu lieu en Méditerranée (Courteau, 2007). En observant les effets provoqués par une tempête sur les cordons littoraux, il est possible d'imaginer les dégâts considérables que pourrait entraîner une telle vague sur les côtes du Golfe du Lion. Le rapport parlementaire du sénateur Courteau met en exergue les lacunes en matière de prise en compte des risques liés aux séismes et tsunamis sur les côtes françaises (Courteau, 2007).

Un tsunami est une vague générée par un important mouvement d'eau sous-marin. La cause la plus courante est le séisme, il peut également être dû à une éruption volcanique, un glissement de terrain ou une chute de météorite. Ces vagues peuvent donc être générées dans n'importe quelle mer du globe, cependant leur puissance ne sera pas la même en fonction de la configuration locale. En Méditerranée, la fréquence des tsunamis à potentiel dévastateur est estimée à environ un par siècle (Courteau, 2007). Par le passé plusieurs événements dévastateurs ont été recensés (Tableau 2).

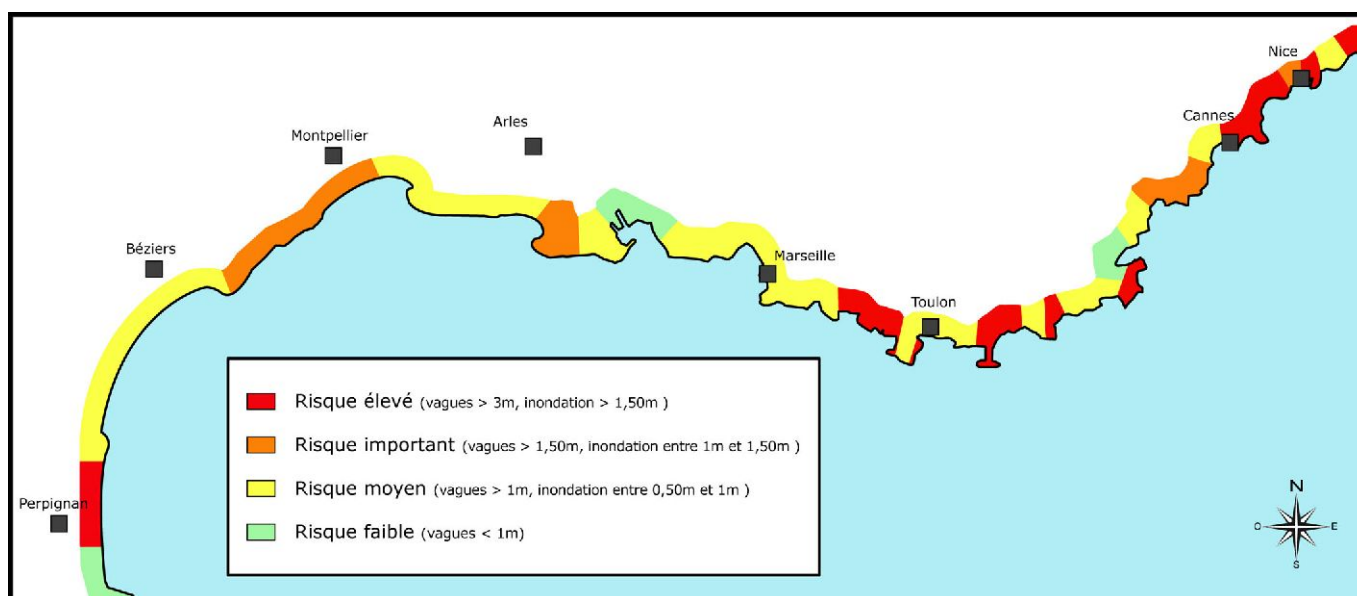
La puissance des tsunamis est capable de déplacer de nombreux matériaux. Ainsi, outre l'apport de sédiments sableux, sa contribution en terme de comblement peut également se faire sous forme de débris divers. Par exemple les organismes arrachés aux fonds marins, les débris de la végétation côtière ainsi que ceux des habitations et embarcations humaines peuvent être projetés dans les lagunes. Un tel événement pourrait donc contribuer en un bref instant à un comblement important des lagunes.

* Rythme de transgression évalué entre +18 cm/siècle et + 59 cm/siècle selon les scénarios.

Tableau 2: Historique des principaux tsunamis en Méditerranée

Date	Événement	Conséquences
environ 1500 av J.C.	Explosion de l'île volcanique de Santorin en Grèce. Vague estimée à plusieurs dizaines de mètres.	Contribue à la disparition de la civilisation Minoenne. Cela aurait donné naissance au mythe de l'Atlantide.
373 av. J.C.	Tremblement de terre et ouverture d'une faille près du golfe de Corinthe. La vague est estimée à 10 m environ.	Les villes d'Héliké et de Boura sont englouties.
365 ap. J.C.	Séisme en Crête. Une vague d'environ 10 m se propage en Méditerranée.	La ville d'Alexandrie est détruite.
1303	Tsunami à Rhodes suite à un séisme d'une magnitude évaluée à 8 sur l'échelle de Richter.	Bilan inconnu.
1365	Un petit tsunami frappe Alger suite à un tremblement de terre.	Les parties basses de la ville sont inondées.
1887	Important séisme sous-marin en Mer de Ligure. Une soudaine vague de 2 m frappe 250 km de côtes.	Les secousses et le tsunami font 600 victimes en Italie et une dizaine sur le littoral français.
1908	Le plus fort tremblement de terre jamais enregistré en Europe frappe la ville de Messine. Il se forme une vague de 8 m.	La Calabre et la Sicile sont touchées. Plus de 100 000 victimes dénombrées.
1979	Tsunami de faible ampleur à Antibes et Nice.	Une digue du chantier de l'aéroport est emportée faisant 11 victimes.

En Région Languedoc-Roussillon, le risque de tsunami est considéré comme moyen à élevé (Carte 3). Les vagues pouvant toucher la côte sont estimées à moins de 1,5 m de hauteur. Cependant, la morphologie plate des côtes et leur puissance permettrait à l'eau de pénétrer sur plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres.



Carte 3: Le risque de tsunami sur les côtes méditerranéennes françaises (données BRGM)

II.3) Les dynamiques biologiques internes

Les écosystèmes lagunaires sont dotés naturellement d'une forte productivité biologique. Les végétaux, les macroalgues, le plancton et les bivalves sont les organismes dominants. Ils participent activement à l'envasement de l'étang par la production de matériaux biodétritiques : organismes morts, débris végétaux, coquilles de bivalves, fèces... En outre, certaines espèces ont un impact sur la dynamique sédimentaire du bassin. Il s'agit des organismes enfouis dans le sédiment qui prennent part au processus de bioturbation et des organismes capables de freiner les masses d'eau. Parmi ces dernières, il existe des espèces proliférantes telles que les cascaills (*Ficopomatus enigmaticus*) qui peuvent avoir un impact.

II.3.1. La sédimentation biogène

a- Mécanismes en jeu

La productivité naturelle des lagunes est un facteur d'enrichissement sédimentaire. Ils concentrent les apports de nutriments extérieurs dans un environnement à l'hydrodynamisme relativement calme et avec une grande variabilité des paramètres physico-chimiques comme la salinité. Ces caractéristiques favorisent le développement d'une biomasse très importante pour un nombre réduit d'espèces capables de résister aux fluctuations du milieu. Il s'agit essentiellement d'organismes invertébrés, d'algues, de phytoplancton et de bactéries. Cependant, les feuilles mortes provenant des herbiers de phanérogames aquatiques contribuent également aux apports. Transportés vers les rives par les courants, ils y constituent des laisses d'étang (Figure 17).



Figure 17: Contribution des débris végétaux au comblement
(photo Wilke M. - CEH)

Une fois morts, ces organismes contribuent aux dépôts sédimentaires essentiellement en matière organique (jusqu'à 60 %) et en matière minérale (coquilles, tests ou thèques). L'apport total de la biodéposition en milieu non perturbé et faiblement confiné (degré de confinement inférieur à 4 d'après l'échelle de Guelorget et Perthuisot*) est la source principale d'apports en matière organique et en carbonates (Perthuisot et Guelorget, 1992). La productivité biologique maximale du plancton correspond aux degrés de confinement compris entre 4 et 5. Dans les zones plus confinées, la biomasse lagunaire chute soit en raison des conditions extrêmes de salinité (marais salants) soit pour laisser place à une faune dulçaquicole (embouchures de cours d'eaux).

* Voir la figure 2, page 6

b- Influence anthropique : eutrophisation et aquaculture

Dans les milieux perturbés par l'influence anthropique, les processus de sédimentation biogène subissent des modifications importantes. Ces perturbations sont étroitement liées aux apports en nutriments et en polluants qui arrivent par les cours d'eau et les rejets directs. Les nutriments enrichissent le milieu qui devient hyper-eutrophe, ce qui induit un fort développement du phytoplancton et de cascaills (voir page 33). La masse de matière organique qui sédimente augmente alors. Lorsque ce développement devient trop important, des crises dystrophiques ou malaïgues se déclenchent ; les organismes benthiques et ceux de la colonne d'eau meurent en masse, créant un apport sédimentaire biogène important et une couche de sédiment anoxique. Après cette crise, la sédimentation biogène est alors peu importante, laissant agir les processus externes jusqu'à la reconstitution de l'écosystème.

La production conchylicole est largement installée dans les bassins côtiers plus ou moins fermés (Marennes, Arcachon, Thau...). Les caractéristiques naturelles de ces milieux paraliques permettent en effet comme nous l'avons vu précédemment une forte production de biomasse et sont de plus facile d'accès depuis la côte avec des embarcations légères. Les bivalves, organismes filtreurs, absorbent le plancton et autres matières en suspension dans l'eau et relâchent des pseudo-fèces (particules rejetées par la filtration) et des fèces (produits de la digestion). L'impact global des installations conchylicoles sur la sédimentation doit ainsi prendre en compte à la fois l'absorption et les rejets de matière par les coquillages ; mais aussi l'impact des structures porteuses (tables, filières, bouchots...) sur l'hydrodynamisme. L'opinion générale blâme souvent les ostréiculteurs et mytiliculteurs pour leur contribution considérable à l'envasement.

Cependant, faire la part des choses entre les différents phénomènes n'est pas aisée, et les avis des scientifiques sont partagés en ce qui concerne l'impact réel de la conchyliculture sur les processus sédimentaires.

Une étude comparative menée sur l'étang de Thau montre ainsi des taux de sédimentation 2 à 4 fois supérieurs sous les tables ostréicoles exploitées par rapport au reste de l'étang (Grenz *et al.*, 1992). Ces travaux ont été confirmés récemment (Mesnage *et al.*, 2007) avec l'observation de flux sédimentaires de matière organique plus importants dans la zone conchylicole de l'étang de Thau. Les mêmes corrélations ont été mises en évidence pour la baie de Marennes-Oléron (Bertin et Chaumillon, 2006) et pour les parcs ostréicoles de la baie du Mont Saint-Michel (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2004).

Au contraire, d'autres spécialistes mettent en avant un impact très modéré de la conchyliculture sur la sédimentation (Crawford *et al.*, 2003 ; Mallet *et al.*, 2006). D'après A. Bodoy (CRELA), l'impact de la conchyliculture est le plus souvent si faible qu'il ne peut être mis en évidence (Le Roux, 2008). L'impact sur la quantité de sédiment serait quasiment nul, et au niveau qualitatif une augmentation de la teneur en matière organique (au dépend de la fraction minérale) sans impact sur la faune benthique serait observée. Cependant, il précise qu'un certain envasement peut exister sur les sites à faible hydrodynamisme comme l'étang de Thau. Celui-ci serait imputable au freinage de la masse d'eau par les installations plus qu'à la production biologique des bivalves. En milieu ouvert l'impact des bivalves serait même bénéfique. Ainsi en Norvège et en Écosse, certaines piscicultures installent des filières de moules autour des cages à poissons dans le but d'en filtrer les rejets et réduire ainsi l'impact sur les fonds.

Certains auteurs adoptent une position intermédiaire. Ainsi une étude menée dans la lagune de Pipe Clay en Tasmanie (Mitchell *et al.*, 2006) conclue à un apport significatif de sédiments par les huîtres, mais précise que son impact sur le comblement est limité car les particules, très fines, sont largement dispersées par les courants. Ces travaux mettent également l'accent sur la grande variation saisonnière des taux de biodéposition (quatre fois plus élevés en été), ainsi que sur l'influence des méthodes de cultures employées (types de structures, densité d'individus).

II.3.2. Les effets des organismes sur la répartition des sédiments

a- Mécanismes de bioturbation

La bioturbation est un phénomène biologique qui n'apporte pas de sédiment, elle agit cependant de manière forte sur sa texture et sa structure. Il s'agit d'un mélange et d'une altération des couches superficielles de sédiments par les organismes benthiques. C'est un phénomène complexe qui en modifiant les propriétés physicochimiques du sédiment entraîne différentes conséquences. Il existe différents modes de bioturbation qui permet de répartir les organismes en plusieurs groupes en fonction de leur effet sur le sédiment : (i) les biodiffuseurs, (ii) les convoyeurs vers le haut, (iii) les convoyeurs vers le bas, (iv) les diffuseurs à galerie et (v) les régénérateurs (Figure 18). L'impact global de l'ensemble des organismes benthiques est différent de la somme des impacts individuels de chaque espèce et reste difficile à prévoir dans l'état actuel des connaissances. Dans un milieu donné, une espèce peut être plus efficace que les autres au niveau de la bioturbation, le mode d'action de cette espèce serait donc plus important que la richesse spécifique en organismes bioturbateurs (Mermillod-Blondin *et al.*, 2005).

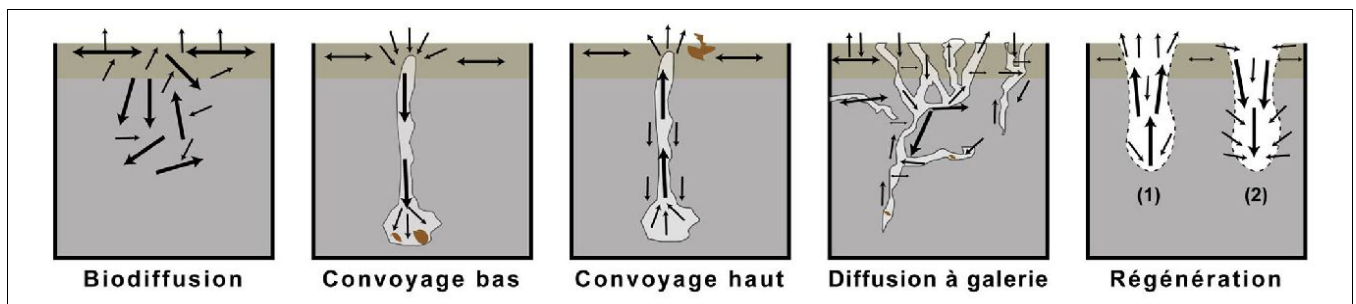


Figure 18: Les cinq modes de bioturbation des sédiments

En ce qui concerne le comblement des lagunes, la bioturbation accroît le potentiel de remise en suspension. Ainsi, c'est un facteur favorisant le relargage de nutriments qui va donc entraîner potentiellement une production biologique accrue. En Languedoc-Roussillon, la bioturbation s'effectue au maximum sur les quinze premiers centimètres de sédiments (François-Carcaillet F., communication personnelle). L'organisme dominant en terme de bioturbation dans les lagunes est le polychète *Nereis diversicolor*. D'autres espèces y participent également comme par exemple des bivalves (*Cerastoderma sp.*, *Abra sp.*) et des crustacés (*Corophium sp.*, *Carcinus sp.*).

b- Effet des organismes fixés

Les organismes fixés comme les végétaux et les organismes constructeurs de récifs ont un impact local sur les dynamiques sédimentaires. En ralentissant localement l'hydrodynamisme, ils vont favoriser le dépôt de sédiments. De plus, les racines des plantes aquatiques vont stabiliser ces dépôts et ainsi limiter leur remise en suspension tout comme le font les végétaux terrestres sur les berges de l'étang (voir II.1.2 page 22). Ce processus n'a que peu d'influence sur la vitesse de comblement globale de l'étang, par contre il va favoriser la sédimentation dans certaines zones par rapport à d'autres. Dans les étangs du Languedoc-Roussillon, ce sont les herbiers à zostère (*Zostera marina*) qui jouent ce rôle.

Le vers tubicole *Ficopomatus enigmaticus* qui construit les récifs de cascails a également une action semblable sur l'hydrodynamisme et la sédimentation. Il s'agit d'une espèce qui peut rapidement proliférer (voir paragraphe suivant).

c- Influence anthropique : organismes proliférants

Lorsqu'une espèce animale ou végétale prolifère, elle va indubitablement générer une plus grande quantité de déchets donc de sédiments biogènes. Mais ses effets ne s'arrêtent pas là et peuvent influencer plus dramatiquement la dynamique sédimentaire. Les espèces invasives sont nombreuses de part le monde, leurs effets variés dépendent de leurs caractéristiques propres. Nous nous intéresserons donc ici uniquement aux espèces invasives les plus communes sur les étangs du Languedoc-Roussillon.

Le cascaïl (*Ficopomatus enigmaticus*) a été observé pour la première fois en France dans des canaux reliés à la Manche en 1921. Il s'agit vraisemblablement d'une espèce importée, mais son origine exacte et le mode de contamination demeure inconnu (une espèce proche est cependant observée en Australie ce qui pourrait constituer une source possible). Il atteint de nombreux sites littoraux confinés notamment des ports et des lagunes en Atlantique et Méditerranée. Il a sur la sédimentation lagunaire des effets négatifs en modifiant l'hydrodynamisme (voir paragraphe précédent) mais aussi des effets positifs car il consomme la matière organique en suspension. Il constitue cependant une gêne importante pour la navigation dans les étangs touchés à cause des récifs qu'il construit (Figure 19). Sa prolifération est notamment due aux apports de nutriments venant des cours d'eau, ainsi c'est dans les lagunes les plus sensibles vis à vis de l'eutrophisation que son expansion est la plus problématique. La seule méthode de lutte contre le cascaïl qui n'ait pas d'impact sur les autres espèces est une amélioration de la qualité des eaux (CEH, 2003 ; Aqua Expert et CEH, 2004).

Le Ragondin (*Myocastor coypus*) quand à lui favorise l'érosion des berges de l'étang et des cours d'eau qui l'alimentent (Figure 20). Cela a pour conséquence directe d'augmenter les apports de matériaux terrigènes participants au comblement. Le contrôle des populations de ragondins s'avère néanmoins efficace pour limiter ces impacts (Gindre, 2005).



Figure 19: Récifs de cascaïls (*Ficopomatu enigmaticus*)



Figure 20: Terrier de ragondin (*Myocastor coypus*) dans la berge d'un cours d'eau

II.4) Les dynamiques éoliennes

Les dynamiques éoliennes se répartissent en deux phénomènes : d'une part les apports sédimentaires éoliens qui vont participer directement au comblement de l'étang, d'autre part la redistribution des sédiments dans la lagune sous l'effet des courants et houles induites par le vent.

II.4.1. Les apports sédimentaires éoliens

L'étude du transport sédimentaire éolien inclue une large gamme d'échelles. Il peut s'effectuer sur de longues distances de manière diffuse dans la haute atmosphère avec le transport de poussières désertiques sur des milliers de kilomètres (par exemple le transport des poussières sahariennes qui provoquent des pluies rouges en France) mais est également actif à des échelles locales (mobilité des dunes littorales). Au niveau global, les phénomènes sont bien connus. En Méditerranée les apports éoliens constituent entre 10 et 50 % des sédiments (Bout-Roumazielles *et al.*, 2007), c'est la deuxième source après les apports fluviaux. Ils apportent également des nutriments rares et essentiels, et pourraient par là être un facteur déterminant pour le déclenchement de blooms planctoniques au large (Mc Tainsh and Strong, 2007). A l'échelle locale des milieux littoraux, l'importance de la sédimentation éolienne reste cependant peu connue.

Les matériaux transportés par le vent sont relativement fins car sa compétence est limitée (hormis lors des phénomènes exceptionnels tels que les tornades et les tempêtes), il s'agit de poussières et de limons dont la granulométrie est bien triée. Au niveau local il peut s'agir de matériaux terrigènes, de poussières ainsi que de sables transportés depuis le cordon littoral.

a- Sédiments éoliens d'origine lointaine

Les apports de sédiments d'origine lointaine sont des poussières d'origine désertique transportées par les vents d'altitude. Ils sont fortement irréguliers car issus des tempêtes de sables désertiques. A titre d'exemple, un seul événement important dans le Sahara peut fournir 40 à 80 % des apports annuels de sédiments éoliens de Méditerranée occidentale (Guerzoni, 1997). Les sédiments éoliens d'origine lointaine peuvent aussi être déposés indirectement via une retombée des poussières lors des événements pluvieux. Malgré l'absence d'étude spécifique sur le sujet, au niveau des lagunes la part de ces apports est très certainement négligeable étant donné la faible surface et l'importance des apports terrestres. De plus une grande part des apports éoliens potentiels se trouvent disséminés sur les sols du bassin versant, et donc sont par la suite confondus avec les apports liés au ruissellement et aux cours d'eau.

b- Sédiments éoliens d'origine locale

Les apports sédimentaires locaux sont le fait de l'érosion éolienne du lido et des sols aux abords de la lagune. Les sables, matériaux terrigènes et poussières sont projetés directement dans la lagune lors des forts coups de vent. Peu étudiés, ces dynamiques sédimentaires sont pourtant un facteur essentiel dans les lagunes situées en milieu aride. En effet, la sécheresse fragilise les sols et limite le développement de la végétation, ayant pour effet de faciliter l'érosion éolienne. Ainsi, pour la *Laguna Madre*, les apports estimés à 429 200 m³/an constituent la principale source de sédiments (43 %) entrants dans la lagune (Morton *et al.*, 2000). Les mêmes tendances semblent exister dans les lagunes du sud de la Méditerranée bien qu'aucune étude quantitative ne soit disponible. En ce qui concerne les lagunes des climats plus humides, les études concernant les sédiments éoliens sont peu nombreuses. Étant donné l'importance des dynamiques fluviales et marines, ils semblent cependant constituer des apports minoritaires.

c- Influence anthropique

L'impact des activités humaines au niveau des apports éoliens de la modification des apports éoliens vers les lagunes ne semble pas avoir été étudié spécifiquement. Au niveau des transports locaux, la détérioration des dunes par le piétinement et la surfréquentation est un phénomène connu. Il induit un transport éolien accru depuis le cordon dunaire vers la lagune, accélérant ainsi son comblement. Néanmoins, sur les secteurs où le lido est urbanisé, il est également probable que la barrière formée par les bâtiments freine les vents et empêche le transport sédimentaire jusqu'à la lagune.

II.4.2. Le vent : un moteur pour la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune

Plus que par ses apports propres, l'influence des vents sur les sédiments lagunaires se fait sans doute sentir par ses effets sur l'hydrodynamisme du plan d'eau. En effet, le vent est, avec la différence de niveau d'eau entre mer et étang, le principal moteur de la circulation d'eau intralagunaire (Figure 21). Il génère directement des houles à la surface de l'étang dont l'amplitude dépend de la superficie du plan d'eau soumise aux vents. Ces vagues induisent elles-mêmes des courants. Ceux-ci, limités par la morphologie de la lagune, adoptent une configuration circulaire.

En fonction de la direction du vent et de la morphologie de la lagune, des zones plus ou moins agitées vont apparaître. Ainsi il y aura un fort transport sédimentaire dans les zones soumises à des courants importants et un dépôt sédimentaire dans les zones à faible hydrodynamisme. La circulation interne va également influencer la dispersion des entrées de sédiments extérieurs (fleuves et graus). De plus en fonction du système de circulation interne, il est possible de voir se former un ombilic hydraulique qui va accumuler les particules fines et freiner leur évacuation vers la mer (Figure 22).

Les houles et les courants vont également être à l'origine d'un arrachage des sédiments de surface et de leur remise en suspension. Pour l'étang de Bages-Sigean, il a été mis en évidence une remise en suspension des sédiments fins dans la masse d'eau pour des vents de vitesse supérieure à 10 m/s. Pour les particules plus grosses, il y a un charriage sur le fond à partir de 15 m/s (Cataliotti-Valdina, 1978). Ces valeurs peuvent être différentes en fonction des conditions locales (profondeur, orientation) pour les autres lagunes. Ceci va avoir pour conséquence une diffusion des sédiments dans la lagune et donc une certaine homogénéisation. Cela va également entraîner un relargage des nutriments présents dans les sédiments et donc potentiellement un accroissement de la production biologique.

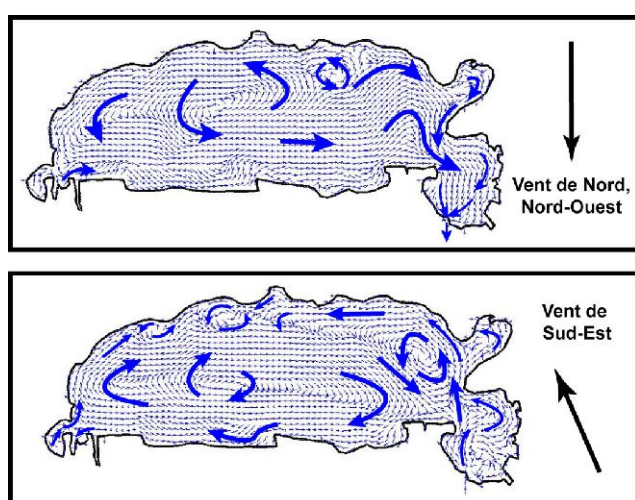


Figure 21: Influence du vent sur la circulation interne de la lagune de Thau (courants intégrés sur la verticale) (d'après Fiandrino et Laugier, 2007)

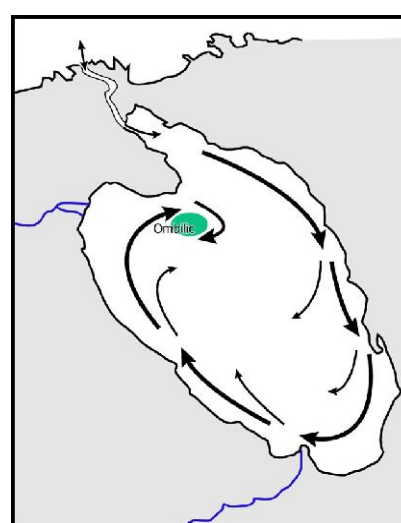


Figure 22: Circulation des eaux de surface et formation d'un ombilic hydraulique dans le lac Mèlah (Algérie) (Guelorget et Perthuisot, 1992)

II.5) Les remblaiements artificiels

Le remblaiement des zones humides est réalisé par l'action directe de l'homme. Il touche ponctuellement un point donné de la lagune. L'ampleur des réclamations sur les milieux lagunaires a considérablement augmenté à partir des années 1940 avec le développement des engins de terrassement (bulldozer, pelles mécaniques, dragues...). L'importance du remblaiement est étroitement liée aux caractéristiques locales ainsi qu'aux conditions politiques et socio-économiques pesant sur le milieu.

II.5.1. Un état des lieux du phénomène

a- Disparités temporelles et géographiques

Les zones humides ont souvent été considérées comme des milieux malsains (et le sont encore dans certains pays) qu'il fallait à tout prix « assainir ». Ainsi les zones humides ont fait l'objet de nombreux remblaiements artificiels (Boucher de La Richarderie, 1808 ; Régy, 1868). Ce phénomène doit impérativement être examiné au niveau local car les disparités sont grandes quand à sa contribution au comblement global. Par exemple, pour des lagunes de taille comparable (3000 ha), la perte de surface au cours du dernier demi-siècle peut varier de 0,8 % pour l'étang de l'Or (Girard, 1992) à 26 % pour la lagune de Xiaohai en Chine (Gong *et al.*, 2008). Il est donc relativement difficile de prévoir à long terme l'impact des remblaiements sur les lagunes.

Les réclamations sur les lagunes sont parfois le fait des autorités publiques qui réalisent sur les terrains gagnés des aménagements divers (infrastructures de transport, complexes touristiques, zones industrielles...). Elles peuvent également être provoquées par des individus désirant étendre leur habitat (cabanisation, bidonvilles, ...). Le phénomène est particulièrement inquiétant dans les pays en développement avec la croissance anarchique de l'urbanisation des grandes villes littorales.

b- Réclamations sur les lagunes du Languedoc-Roussillon

D'après l'étude menée sur le comblement des étangs en Languedoc-Roussillon (Girard, 1992), la surface soustraite officiellement aux étangs s'élève à 308 ha entre 1960 et 1990 (Tableau 3). Cela représente approximativement la perte de 1,5 % de la surface totale des étangs concernés. Cette valeur semble peu au regard des 20 % perdus depuis le XVIII^{ème} siècle (Girard, 1992) cependant il s'agit d'évolutions ponctuelles extrêmement rapides. Les remblaiements non officiels sont eux estimés à plusieurs dizaines voire quelques centaines d'hectares par la même étude. Par ailleurs, le phénomène inverse, à savoir le creusement de nouveaux plans d'eau littoraux existe aussi. En effet, l'étang du Ponant a été créé artificiellement en creusant 240 ha de terrain.

Tableau 3: Remblaiements officiels dans les étangs du Languedoc-Roussillon (d'après Girard, 1992)

Étang	Surface soustraite entre 1960 et 1990
Repausset Couchant	8 ha
Mauguio / Or	23 ha
Grec	80 ha
Ingril Sud	109 ha
La Peyrade	21 ha
Thau les eaux blanches	10 ha
Le Grazel	7 ha
Leucate-Barcarès	50 ha

II.5.2. La législation en vigueur

En France, les remblaiements autrefois importants sont aujourd'hui limités par la législation. La loi sur la protection du littoral du 3 janvier 1986 a permis de limiter les aménagements nouveaux. Les lois sur l'eau du 3 janvier 1992 puis celle du 30 décembre 2006, ont quant à elles réglementé le remblaiement des étangs. Cependant, il existe encore parfois des remblaiements ponctuels effectués soit de manière illégale, soit étant d'un volume inférieur aux seuils réglementaires.

a- Loi littorale

Les travaux d'urbanisation dans les communes riveraines de la mer et des lacs de plus de 1000 ha sont soumis aux préconisations des articles L146-1 et suivants du Code de l'urbanisme issus de la loi relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral du 3 janvier 1986 (loi n°1986-2, JO du 04/01/1986). A ce titre, les documents d'urbanisme doivent tenir compte de la préservation des espaces terrestres et marins remarquables ou caractéristiques du patrimoine naturel et culturel, ainsi que des milieux nécessaires au maintien des équilibres biologiques. Les lagunes et les zones humides associées doivent donc faire l'objet d'une attention particulière. De plus, l'urbanisation du littoral est d'une part limitée à la continuité de l'existant ou en hameaux nouveaux intégrés à l'environnement, d'autre part interdite dans une zone située dans les 100 mètres du rivage.

Article L146-4 du Code de l'urbanisme (extraits) :

II - L'extension limitée de l'urbanisation des espaces proches du rivage ou des rives des plans d'eau intérieurs désignés à l'article 2 de la loi n° 86-2 du 3 janvier 1986 précitée doit être justifiée et motivée, dans le plan local d'urbanisme, selon des critères liés à la configuration des lieux ou à l'accueil d'activités économiques exigeant la proximité immédiate de l'eau.

III - En dehors des espaces urbanisés, les constructions ou installations sont interdites sur une bande littorale de cent mètres à compter de la limite haute du rivage ou des plus hautes eaux pour les plans d'eau intérieurs désignés à l'article 2 de la loi n° 86-2 du 3 janvier 1986 précitée.

Cette interdiction ne s'applique pas aux constructions ou installations nécessaires à des services publics ou à des activités économiques exigeant la proximité immédiate de l'eau. Leur réalisation est toutefois soumise à enquête publique suivant les modalités de la loi n° 83-630 du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement.

Pour les eaux intérieures cela ne concerne que les plans d'eau de superficie supérieur à 1000 ha tels que définis dans l'article L321-2 du Code de l'environnement. Seules les lagunes de Salses-Leucate, Bages-Sigean, Ayrolle, Thau, Vic et de l'Or sont donc concernées.

b- Loi sur l'eau et les milieux aquatiques

Les travaux pouvant affecter les milieux aquatiques et zones humides sont soumis aux préconisations des articles L214-1 et suivants du Code de l'environnement issus de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 (loi n°2006-1772, JO du 31/12/2006). A ce titre, les remblaiements et dragages des étangs peuvent nécessiter la réalisation préalable d'un dossier d'autorisation ou de déclaration en fonction de leur ampleur. Les seuils réglementaires sont précisés dans l'article R214-1 du Code de l'environnement issu du décret du 14 décembre 2007 portant dispositions relatives aux régimes d'autorisation et de déclaration au titre de la gestion et de la protection de l'eau et des milieux aquatiques, aux obligations imposées à certains ouvrages situés sur les cours d'eau, à l'entretien et la restauration des milieux aquatiques (décret n° 2007-1760, JO du 16/12/2007). Les rubriques concernées dans le cadre du comblement délibéré des étangs côtiers sont les suivantes :

Article R214-1 du Code de l'environnement (extraits) :

3.3.1.0. Assèchement, mise en eau, imperméabilisation, remblais de zones humides ou de marais, la zone asséchée ou mise en eau étant :

- 1° Supérieure ou égale à 1 ha (Autorisation) ;
- 2° Supérieure à 0,1 ha, mais inférieure à 1 ha (Déclaration).

4. 1. 3. 0. Dragage et / ou rejet y afférent en milieu marin* :

1° Dont la teneur des sédiments extraits est supérieure ou égale au niveau de référence N2 pour l'un au moins des éléments qui y figurent (Autorisation) ;

2° Dont la teneur des sédiments extraits est comprise entre les niveaux de référence N1 et N2 pour l'un des éléments qui y figurent :

a) Et, sur la façade métropolitaine Atlantique-Manche-mer du Nord [...]

b) Et, sur les autres façades ou lorsque le rejet est situé à moins de 1 km d'une zone conchylicole ou de cultures marines :

I.-Dont le volume maximal in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 5 000 m³ (Autorisation) ;

II.-Dont le volume maximal in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est inférieur à 5 000 m³ (Déclaration) ;

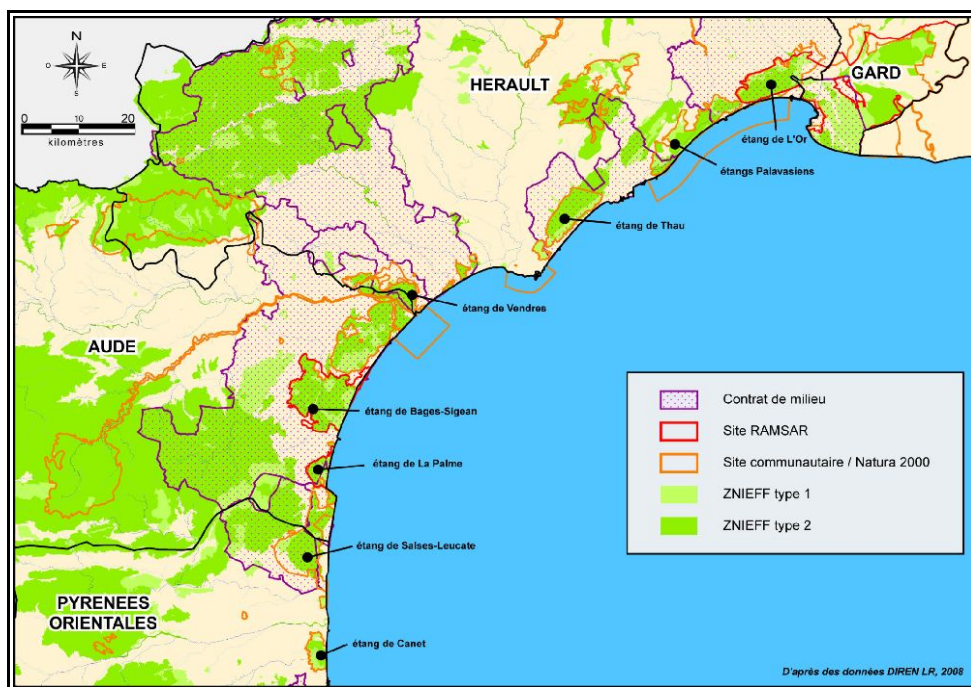
3° Dont la teneur des sédiments extraits est inférieure ou égale au niveau de référence N1 pour l'ensemble des éléments qui y figurent :

a) Et dont le volume in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 500 000 m³ (Autorisation) ;

b) Et dont le volume in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 5 000 m³ sur la façade Atlantique-Manche-mer du Nord et à 500 m³ ailleurs ou lorsque le rejet est situé à moins de 1 km d'une zone conchylicole ou de cultures marines, mais inférieure à 500 000 m³ (Déclaration).

c- Autres protections

En plus des éléments législatifs présentés précédemment, les lagunes bénéficient aujourd'hui d'une reconnaissance nationale et internationale pour leur valeur patrimoniale. Les nombreux zonages tels que les sites classés, ZNIEFF, Natura 2000, Ramsar ... (Carte 4) même s'ils n'ont pas de valeur réglementaire permettent d'appuyer les recours contre d'éventuels aménagements empiétant sur le domaine lagunaire. A ceux-ci se rajoutent également les règlements spécifiques aux constructions en zones inondables. Ce risque est en effet très présent autour des étangs et des cours d'eaux tributaires.



Carte 4: Protections des lagunes du Languedoc-Roussillon (données DIREN)

* Au sens du présent article, le « milieu marin » inclus entre autres les étangs littoraux salés ou saumâtres.

Conclusion : l'importance relative des facteurs de comblement

Les apports sédimentaires globaux sont bien connus au niveau des mers, par exemple en Méditerranée, les sources principales de sédiments sont les fleuves (50 %), les organismes (30 %) et les poussières éoliennes (20 %). Au niveau des bassins, les cinq dynamiques étudiées précédemment entrent en jeu (Figure 23). La part de chacun des phénomènes dépend étroitement des conditions locales. La superficie drainée par le bassin versant, le climat qui y règne, la dynamique de la communication avec la mer et la productivité biologique sont des paramètres importants pour caractériser le fonctionnement sédimentaire d'une lagune.

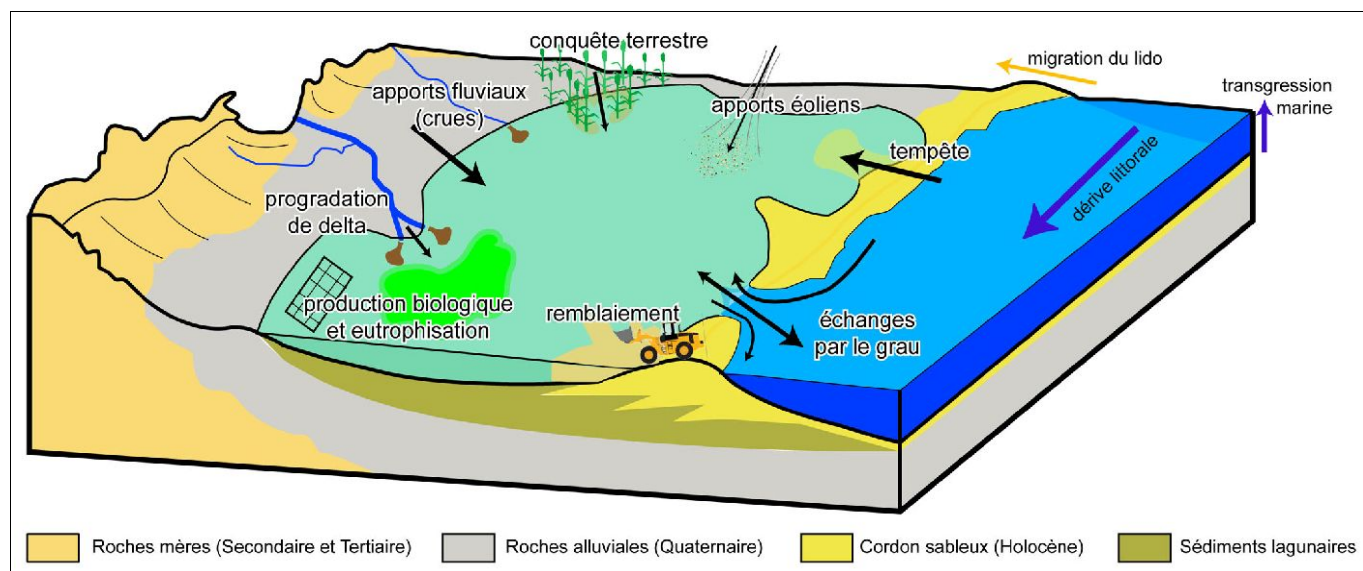


Figure 23: Schéma récapitulatif des processus de comblement des lagunes

Les références bibliographiques étudiées permettent de dresser un premier état sur l'importance des différentes dynamiques de comblement lagunaire (Tableau 4). Ceci n'est qu'une première approche qualitative qui devra être précisée en fonction des caractéristiques propres de chaque lagune. Cette précision sera l'objet de l'étude de deuxième phase qui devra établir une méthodologie destinée à définir la vulnérabilité d'une lagune.

Tableau 4: Importance relative des facteurs de comblement des bassins

		terrestres	marins	éoliens	biologiques
Climat aride	marée significative	faibles	importants	importants	variables
	marée réduite	faibles	variables	importants	variables
Climat humide ou méditerranéen	marée significative	importants	importants	faibles	variables
	marée réduite	importants	variables	faibles	importants

Les facteurs les plus importants en Languedoc-Roussillon semblent donc être les dynamiques terrestres et les dynamiques biologiques. Celles-ci sont étroitement liées aux activités humaines qui ont tendance à amplifier les dynamiques naturelles. En effet, l'aménagement des cours d'eau et l'utilisation des sols augmentent le transport sédimentaire des fleuves et les rejets de nutriments (nitrates, phosphates) favorisent la production biologique. En ce qui concerne les remblaiements, ils ont pour beaucoup contribué au comblement des lagunes dans le passé mais semblent aujourd'hui plus réduits grâce à la mise en œuvre des nouvelles législations.

III- Les méthodes d'estimation du comblement

III.1) Le bilan sédimentaire

Le bilan de matière consiste à mesurer l'ensemble des flux de matériaux sédimentaires entrants et sortants de la lagune. Fréquemment employée sur les étangs et lacs continentaux (Touchart, 2007 ; Campy et Meybeck, 1995) cette méthode l'est beaucoup moins sur les lagunes où seuls quelques sites ont été étudiés comme par exemple la Laguna Madre aux États-Unis (Morton *et al.*, 2000) et localement l'étang de La Palme (Wilke *et al.*, 2001).

III.1.1. La méthodologie mise en œuvre

a- Échantillonnage

Une première idée des flux peut être établie simplement par la connaissance de l'hydrodynamisme (débit des cours d'eau, courants internes...) mais pour être réellement quantifiés ils doivent faire l'objet d'un échantillonnage sédimentaire et de mesures spécifiques. Les données nécessaires et le mode d'échantillonnage varie en fonction de l'interface considérée (bassin versant / lagune, mer/lagune...). Le tableau suivant récapitule les principales méthodes utilisées pour chacun des transferts entre la lagune et le milieu extérieur (Tableau 5).

Tableau 5: Principales méthodes d'estimation pour la réalisation d'un bilan de matière

		Méthode d'estimation
Entrées	Bassin versant	Flux de particules : - mesure directe par prélèvement puis analyse (centrifugation, filtration, sédimentation) de façon ponctuelle - mesure indirecte par <u>proxys</u> optique (turbidité) ou acoustique (<u>ADCP</u>) de façon ponctuelle ou en continu - calcul à partir de l'érodabilité des sols et des données climatiques (orages et autres précipitations)
	Mer : projections de tempêtes	Flux de particules lors des événements : - mesure directe ou indirecte lors des événements - évaluation à partir des volumes des cônes de tempête passés
	Mer : entrée par les graus	Flux de particules : - mesure directe par prélèvement puis analyse - mesure indirecte par <u>proxys</u> optique (turbidité) ou acoustique (<u>ADCP</u>)
	Apports éoliens	- évaluation par piégeage aux abords du plan d'eau - calcul à partir des statistiques météorologiques (force et direction des vents) et de la connaissance du terrain (faciès sédimentaires, granulométrie, couverture végétale, obstacles...)
	Remblaiements	Évaluation à partir des archives et déclarations de travaux passés.
Sorties	Sortie par les graus	Flux de particules : - mesure directe par prélèvement puis analyse - mesure indirecte par <u>proxys</u> optique (turbidité) ou acoustique (<u>ADCP</u>)
	Dragages	Évaluation à partir des archives et déclarations de travaux passés.

Il a été constaté que les événements extrêmes (crues et tempêtes) constituent une part importante des apports (voir II-) ce qui complexifie la mise en œuvre des mesures. Des problèmes d'accessibilité du site, de résistance du matériel et de sécurité peuvent survenir. En ce qui concerne les échanges sédimentaires dans les graus, il convient de réaliser plusieurs échantillonnages (ou dans l'idéal un suivi en continu) afin de déterminer la part relative des flux entrants et sortants.

Il est également possible d'évaluer les flux sédimentaires totaux par l'utilisation de pièges à sédiments placés dans le plan d'eau. Ces récipients (souvent cylindriques ou coniques) intègrent sur une période de temps donnée les dépôts sédimentaires totaux. Cependant, ces systèmes sont peu fiables pour les plans d'eau de faible profondeur puisqu'ils conduisent à sous-estimer largement les flux avec 35 à 79 % de pertes (Wilke *et al.*, 2001 ; Banas *et al.*, 2002). De plus, ils prennent en compte la sédimentation secondaire (après remise en suspension) dont le flux ne contribue pas effectivement au comblement global de la lagune.

b- Calcul du comblement

Une fois l'ensemble des données recueillies, le calcul du bilan sédimentaire de la lagune est relativement simple. Il se base sur le principe de la "baignoire", c'est-à-dire le calcul de la différence de volume entre l'ensemble des apports et l'ensemble des sorties pour un temps donné (en général sur une année). Ceci permet de connaître le volume annuel de sédiments remplissant effectivement la lagune [1]. Ce volume peut ensuite être divisé par la superficie du plan d'eau afin d'obtenir un taux de sédimentation moyen annuel.

$$[1] \quad V_{\text{Comblé}} = V_{\text{Entrées}} - V_{\text{Sorties}}$$

$$[2] \quad \tau = \frac{V_{\text{Comblé}}}{S_{\text{lag}}}$$

V_i : volume sédimentaire
 S_{lag} : surface lagunaire
 τ : taux de sédimentation

III.1.2. Interprétation et bilan de la méthode

La méthode du bilan sédimentaire permet d'estimer le comblement moyen d'un étang et surtout la part relative de chacun des processus d'apports. Cela permet d'identifier les principaux vecteurs de sédiments et donc de cibler les interventions de gestion sur ces sources principales. Néanmoins, cette méthode ne rend pas compte des processus de transformation et de production internes à la lagune (Campy et Meybeck, 1995). Les effets des organismes vivants et de la physico-chimie sont souvent négligés. Ils ont été estimés à 4 % du flux entrant total pour la Laguna Madre à partir de l'analyse de composition des sédiments lagunaires (Morton *et al.*, 2000).

III.2) L'étude sédimentologique par datation de carottages

L'analyse sédimentologique se base sur l'étude d'échantillons des successions de sédiments prélevés par carottage. Diverses analyses physico-chimiques (granulométrie, radio-éléments, ...) et biologiques (faune, pollen...) permettent de caractériser et dater les différentes couches sédimentaires. A partir de ces éléments, il est possible de calculer un taux d'accumulation sédimentaire. Les études de ce type sont nombreuses car elles permettent d'approcher des thématiques variées et pas seulement le comblement. Pour ce qui est de l'étude spécifique sur les phénomènes de comblement, la méthode a entre autres été appliquée à la lagune de Venise (Serandrei-Barbero *et al.*, 2006) et à plusieurs étangs du Languedoc-Roussillon (Barrusseau *et al.*, 1992).

III.2.1. La méthodologie mise en œuvre

a- Échantillonnage

Les méthodes de carottages des sédiments sont nombreuses, elles reposent toutes sur un principe de base qui est de prélever une colonne verticale de sédiment à l'aide d'un tube creux. La mise en œuvre de ce principe varie selon le type de sédiment et sa consistance (rocheux, sableux, vaseux...), de l'accessibilité du milieu (terrestre, lagunaire, haute mer...) et de l'étendue des données désirées (histoire récente ou ancienne). Cela va ainsi des techniques manuelles, aux forages et vibrocarottiers.

Une technique manuelle simple à l'aide d'un tube en plastique est suffisante pour étudier le comblement des lagunes dont le sédiment est facile à pénétrer (vases et argiles). Il suffit d'enfoncer un tube de PVC au niveau du point de carottage. Celui-ci est alors bouché à son extrémité supérieure (effet ventouse) puis la carotte est relevée. Cette méthode permet d'obtenir des carottes d'une longueur d'environ 1 m ce qui correspond aux trois derniers siècles pour le Languedoc-Roussillon. Une carotte permet d'obtenir le taux de sédimentation de la lagune en un point, en effectuant plusieurs carottages cela permet d'évaluer la tendance dans différentes zones de l'étang.

b- Techniques de datation

Pour pouvoir déduire un taux de sédimentation, la carotte doit être datée à différents niveaux. Elle est découpée selon un pas de longueur prédéfini et chaque portion est analysée séparément. Il existe une multitude de méthodes permettant de dater les sédiments, elles peuvent être absolues (datation précise de l'échantillon) ou relatives (datation par comparaison avec une séquence de référence).

La datation absolue est réalisée à partir des radioéléments. Un élément radioactif émet un rayonnement en se désintégrant au cours du temps. L'évolution de la quantité d'un radioélément suit une décroissance exponentielle [3] liée à la période de demi-vie [4] qui est caractéristique de cet élément. Cela permet de calculer l'âge de l'échantillon [5]. Différents isotopes radioactifs sont utilisés en fonction de la période temporelle étudiée (Tableau 6).

$$[3] \quad N(t) = N_0 * e^{-\lambda t} \qquad [4] \quad \lambda = \frac{\ln(2)}{T} \qquad [5] \quad t = \frac{1}{\lambda} * \ln \frac{N_0}{N(t)}$$

N(t) : nombre de noyaux radioactifs dans l'échantillon

λ : constante de désintégration de l'élément

N₀ : quantité initiale de noyaux radioactifs (dépend de l'élément)

T : période de demi-vie

Tableau 6: Caractéristiques des éléments utilisés en datation radiométrique

élément	demi-vie	Période d'étude
¹³⁷ Cs*	30 ans	Depuis 1945.
²¹⁰ Pb	22 ans	Période récente.
¹⁴ C	5734 ans	30 000ans jusqu'à 50 000 ans avec une plus faible précision
²³⁴ U / ²³⁰ Th	245 500 ans	10 000 ans plusieurs centaines de milliers d'années avec une plus faible précision

* Élément artificiel disséminé par les activités humaines

La datation relative est basée sur une comparaison de l'échantillon sédimentaire avec des séries chronologiques ou stratigraphiques connues. Les méthodes qui peuvent être mises en œuvres sont variées, elles se basent sur le principe de continuité (une même couche a le même âge sur toute son étendue) et le principe de superposition (une couche est plus récente que celle qu'elle recouvre). Les restes d'organismes (fossiles, coquilles, pollens) sont souvent utilisés pour effectuer cette datation. Dans un contexte local, les caractéristiques sédimentaires (minéralogie, granulométrie...) peuvent également fournir des repères de datation par rapport à des événements connus (géologiques ou climatiques).

c- Calcul du comblement

L'estimation du comblement est relativement aisée une fois que la datation de la carotte est effectuée. Il s'agit de relier la date à la quantité de sédiments accumulés pour calculer le taux de sédimentation à partir d'un niveau donné. Pour cela, il suffit de faire le rapport entre la hauteur de sédiments accumulée et le temps écoulé durant cette accumulation [6]. Le taux de sédimentation peut être estimé à différentes échelles en prenant en compte différents niveaux ce qui permet d'en apprécier l'évolution au cours du temps.

$$[6] \quad \tau = \frac{H_{\text{accumulée}}}{(t - t_0)}$$

$H_{\text{accumulée}}$: hauteur de sédiments depuis le niveau considéré
 t : date du sédiment de surface t_0 : date du niveau sédimentaire considéré
 τ : taux de sédimentation

III.2.2. Interprétation et bilan de la méthode

La méthode de datation par carottage est une analyse des sédiments déposés au cours du temps, elle intègre donc l'ensemble des paramètres dynamiques liés au comblement des lagunes. Elle permet de reconstituer l'histoire du comblement passé des lagunes. Pour être fiable, l'estimation du taux de sédimentation à une échelle fine doit se baser sur une datation précise et prendre en compte la compression éventuelle des sédiments. Lorsque ces deux conditions sont réalisées, il permettent d'apprécier l'évolution du taux de sédimentation au cours de différentes périodes (accélération ou diminution du comblement ?). Cela permet alors, à partir du taux de sédimentation le plus récent, de faire des hypothèses de projection et d'estimer les tendances de comblement à venir.

La méthodologie n'est cependant pas applicable partout. En effet dans les lieux où l'activité de bioturbation et la remise en suspension sont importantes, la datation précise est alors rendue difficile par le mélange des couches sédimentaires. De plus, elle pourrait sous-estimer les taux de sédimentation dans certains milieux très eutrophes ou dilués par des apports fluviaux importants (Touchart, 2007).

III.3) L'évolution surfacique par vues aériennes

L'évolution de la surface en eau consiste à estimer la réduction de la superficie occupée par le plan d'eau à partir de vues aériennes (photographie, carte, image satellite) prises à des dates distinctes. Cette méthode est couramment utilisée pour estimer le comblement des retenues d'eau artificielles comme par exemple le barrage de Bargi en Inde (Goel *et al.*, 2002). Elle a également été employée par le SMNLR pour observer l'évolution des étangs languedociens depuis le XVIII^{ème} siècle (Girard, 1992).

III.3.1. La méthodologie mise en œuvre

a- Données nécessaires

Différents types de données permettent d'observer l'évolution de la surface d'un plan d'eau. Il s'agit de représentations aériennes à l'échelle de la zone étudiée (cartes, photographies, imagerie satellitaires).

Les cartographies sont celles qui permettent de couvrir la plus grande amplitude temporelle. Pour que la mesure des distances soit fiable, il est nécessaire que la carte soit réalisée dans un système géodésique. La première carte de France ayant la précision nécessaire est celle réalisée par la famille Cassini au XVIII^{ème} siècle par triangulation. Les cartes antérieures permettent uniquement une approche qualitative et non quantitative.

La photographie aérienne permet de visualiser des zones plus précises car elle couvre une échelle plus locale que les cartes*. Elle permet de visualiser la limite entre la zone en eau et le milieu terrestre. Il faut cependant garder à l'esprit que le niveau d'eau peut varier, il est donc préférable de comparer des photographies réalisées dans des conditions météorologiques similaires pour estimer l'évolution d'un plan d'eau. Les premières photographies aériennes exploitables datent de la seconde guerre mondiale ; en France, la première campagne photographique complète a été menée par l'IGN en 1946.

L'imagerie satellitaire est une technique récente développée dans les années 70 pour des applications militaires puis météorologiques. Depuis les années 90, les applications se diversifient largement grâce à l'utilisation de capteurs en longueurs d'onde variées (infrarouge, radars, laser...). Très utilisées en haute mer et en zone côtière (suivi du trait de côte, pollutions, blooms de phytoplancton...) les techniques d'imagerie satellite sont encore peu développées pour les bassins paraliques. En effet, elles rencontrent des difficultés liées à la faible profondeur et à la turbidité de l'eau. Ainsi elles ne sont pas plus efficaces que les images aériennes tout en étant plus coûteuses.

b- Calcul du comblement

Les vues aériennes permettent de calculer la superficie du plan d'eau à deux dates distinctes via un logiciel de SIG. La différence des deux surfaces permet de calculer la perte de superficie du plan d'eau entre les deux dates [7]. Cette valeur donne une idée précise de la perte de milieu entraînée par le comblement (Figure 24). Il est possible d'en déduire une estimation générale des volumes comblés en connaissant la profondeur moyenne du plan d'eau [8]. Il faut toutefois prendre garde à avoir deux images prises dans des conditions de niveau d'eau similaires.

$$[7] \quad S_{Comblée} = S_1 - S_2$$

S_1 et S_2 : superficies anciennes et actuelles

$$[8] \quad V_{Comblé} \approx S_{Comblée} * P_{moyenne}$$

$P_{moyenne}$: profondeur moyenne du plan d'eau

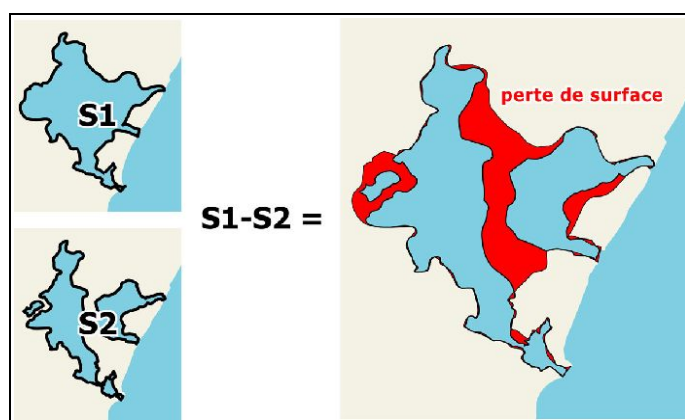


Figure 24: Principe de l'analyse d'évolution surfacique

III.3.2. Interprétation et bilan de la méthode

L'étude de l'évolution surfacique des lagunes est une méthode simple à mettre en œuvre qui peut se baser sur des données déjà existantes et relativement abondantes permettant de couvrir les deux derniers siècles. Elle ne donne pas une idée précise du phénomène de comblement mais permet d'en apprécier les impacts en terme de pertes de milieux. Si cette méthode ne donne pas d'indications sur les processus d'apports sédimentaires eux-mêmes, elle permet cependant de relever les aménagements humains qui ont pu y contribuer. Il est par exemple possible à partir de différentes cartes de voir les pertes de surface de la lagune dues à la création de salins, à des remblaiements ou la mise en place d'infrastructures. Cette méthode ne permet cependant pas d'effectuer des projections fiables quant au comblement futur des lagunes, elle ne peut que faire l'état des lieux des évolutions passées.

* Les cartes modernes, notamment celles de l'IGN sont basées sur des photographies aériennes.

III.4) L'évolution tridimensionnelle par suivi bathymétrique

Le suivi bathymétrique consiste dans un premier temps à relever la profondeur de l'étang en de nombreux points localisés précisément afin d'établir une carte bathymétrique et un modèle numérique de terrain. Un second relevé réalisé à une date ultérieure permettra de calculer l'évolution de la profondeur de l'étang, et donc les zones de comblement et d'érosion. Des études de ce type ont été menées sur la lagune de Venise (Magistrato alle Acque, 1993) et sur l'étang de Bages-Sigean (SCP Ferrier-Leduc-Boyer, 2001).

III.4.1. La méthodologie mise en œuvre

a- Acquisition des données

Le lever bathymétrique consiste à établir une cartographie en trois dimensions du fond de l'étang. Pour cela, trois mesures simultanées doivent être effectuées : la position, la profondeur et le niveau d'eau.

La mesure de la position repose sur l'utilisation d'un système de positionnement permettant de relever les coordonnées XY du système de mesure de la profondeur. De nos jours, elle est effectuée généralement par GPS avec une précision d'ordre métrique. L'utilisation de la technique du DGPS (GPS Différentiel) permet d'accroître la précision. Il s'agit de disposer localement d'une station GPS fixe reliée au GPS mobile par ondes radios. Le différentiel entre les deux stations permet de corriger les erreurs dues aux perturbations atmosphériques et au décalage de phase des satellites pour atteindre une précision centimétrique.

La mesure de la profondeur s'effectue par sondage du fond. Lorsque la profondeur est suffisante pour l'utilisation d'une embarcation, elle est mesurée par un échosondeur (sonar) dont la précision dépend du modèle (elle est généralement aux alentours de 3 %). Lorsque le fond est insuffisant, la profondeur est relevée à pied avec une perche. Celle-ci peut être équipée d'un GPS en mode topo-bathymétrique pour l'acquisition de données numériques.

La mesure du niveau d'eau permet de corriger la profondeur mesurée afin d'obtenir la topographie réelle du fond par rapport à un niveau de base. En France, ce niveau de référence correspond le plus souvent au zéro NGF (Nivellement Général de la France). Il est généralement mesuré en même temps que les coordonnées lors des mesures embarquées car le GPS fournit également l'altitude, qui correspond au niveau d'eau lorsqu'elle est mesurée à la base de l'embarcation. Lors des mesures manuelles, elle peut être obtenue par la lecture d'échelles locales.

Ces trois paramètres sont mesurés en parcourant des transects prédéfinis. L'espacement entre les transects et entre les points de mesures dépend de la précision désirée et des moyens disponibles. Les mesures doivent permettre de couvrir l'ensemble de l'étang.

La technique récente du LiDAR, laser altimétrique aéroporté, permet d'effectuer des relevés topo-bathymétriques extrêmement denses avec une précision décimétrique. Déjà appliqué à la mesure de la bathymétrie pré-littorale (programme *Beachmed-e* en Languedoc-Roussillon), elle est cependant limitée par la pénétration du faisceau laser dans les eaux turbides (2,5 fois la visibilité au maximum). De futures améliorations technologiques pourraient cependant permettre son utilisation pour les milieux lagunaires.

b- Traitement des données

Les données acquises doivent subir un prétraitement informatique avant leur exploitation. Les objectifs du prétraitement sont multiples :

- éliminer les fausses sondes dues à des échos parasites
- rectifier localement la position en cas de décrochage du GPS
- calculer l'élévation réelle en corrigeant la profondeur par rapport au niveau d'eau
- sélection spatiale et nettoyage des points dans le cas d'une acquisition en continu

Les données peuvent ensuite être traitées par un logiciel de SIG. Deux opérations sont possibles. Premièrement la réalisation de la carte bathymétrique, pour cela, les lignes isobathes sont tracées à partir des points de mesure. Deuxièmement la mise au point d'un modèle numérique de terrain (MNT). L'opération consiste à extrapoler les points de mesure afin d'obtenir des valeurs sur un maillage régulier (rectangulaire ou triangulaire). Le résultat est une couche de données pouvant être manipulée mathématiquement par le logiciel. Ce MNT servira de base pour calculer l'évolution bathymétrique.

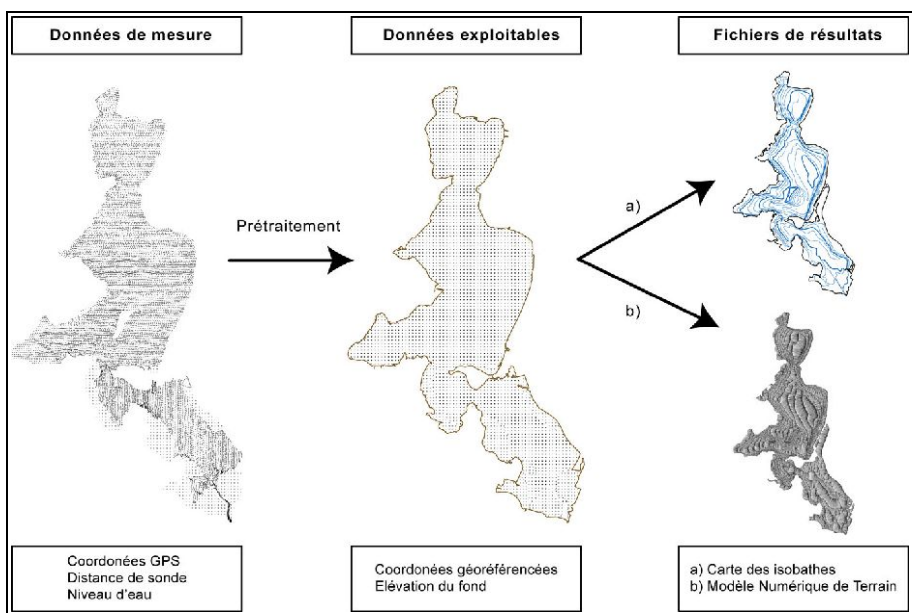


Figure 25: Principe de traitement des données bathymétriques

c- Calcul du comblement

Le calcul du comblement nécessite deux relevés bathymétriques effectués à des dates distinctes, si possible avec les mêmes conditions d'acquisition (méthodologie, précision du matériel...). Les deux séries de données sont transformées en MNT puis exploitées à l'aide d'un logiciel de SIG. L'estimation du comblement passe par le calcul de la différence de profondeur pour chaque point du MNT. Cette différence peut ensuite être intégrée sur la surface pour obtenir l'évolution globale du volume de la lagune. Elle peut aussi être représentée de façon cartographique afin de visualiser l'intensité du comblement (ou de l'érosion) pour chaque zone du bassin lagunaire (Figure 26).

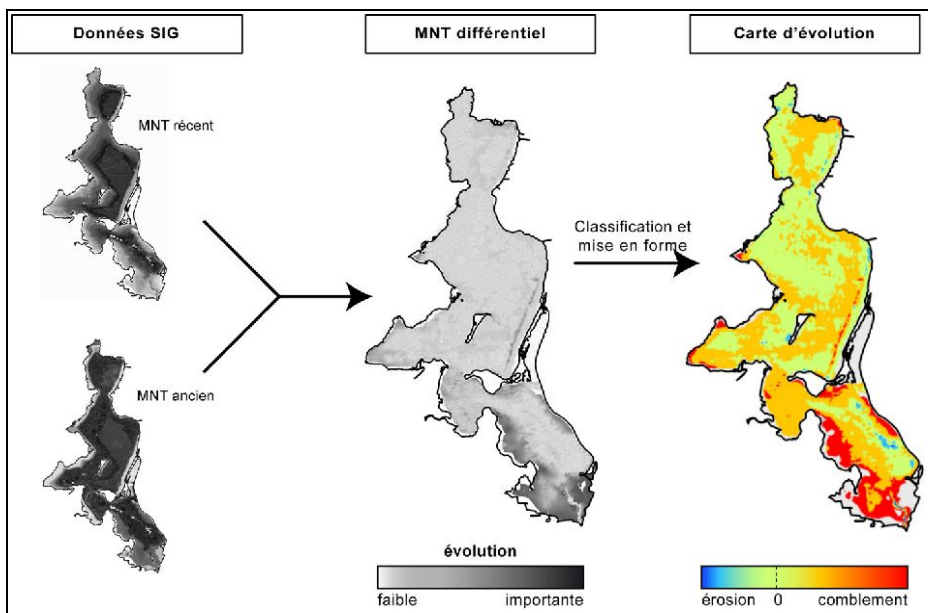


Figure 26: Principe de l'analyse d'évolution bathymétrique

III.4.2. Interprétation et bilan de la méthode

L'évolution bathymétrique d'un étang intègre l'ensemble des processus d'apports, pertes, transports, sédimentation, tassement et modifications des sédiments. Ainsi, elle permet d'effectuer le bilan du comblement d'un étang et de visualiser les modifications topographiques qui en sont la conséquence. Cependant, elle n'apporte aucune information en ce qui concerne la nature et l'origine des matériaux déposés. De plus, les données actuellement disponibles sont souvent insuffisantes, fragmentaires et imprécises car elles ont été acquises avec des techniques anciennes. Les nouvelles technologies d'acquisition et de traitement (GPS, Lidar, SIG,...) permettent aujourd'hui d'avoir une précision élevée sur l'ensemble du plan d'eau. Les études bathymétriques à venir apporteront donc des éclaircissements supplémentaires sur l'importance du phénomène de comblement. Par ailleurs, la réalisation préalable d'une étude bathymétrique pourrait contribuer à l'élaboration de meilleurs plans d'échantillonnages pour des analyses sédimentologiques.

III.5) Le potentiel de la modélisation hydro-sédimentaire

Un modèle est une traduction mathématique construite de la réalité. Il tente de reproduire et simuler des processus naturels. Le modèle peut être soit physique (réalisation d'une maquette à l'échelle) soit numérique (avec un logiciel informatique). Pour sa mise au point, un modèle s'appuie sur la connaissance scientifique des phénomènes entrant en jeu et sur des données réelles. Celles-ci servent d'une part à alimenter les valeurs de base du modèle et d'autre part à vérifier ses performances.

III.5.1. La mise au point d'un modèle

a- Données et connaissances préalables

La modélisation d'un phénomène commence tout d'abord par une compréhension des phénomènes entrant en jeu. Les phénomènes naturels sont d'une complexité infinie, il s'agit donc dans un premier temps de dégager les processus dominants. Ces processus sont formulés mathématiquement sous formes d'équations à partir d'une bonne connaissance du milieu naturel. Des simplifications de la réalité sont souvent nécessaires compte tenu des possibilités informatiques limitées. Ces approximations doivent cependant être négligeables au regard de la précision de résultats attendus.

Il est nécessaire également de disposer de données de base permettant d'alimenter le modèle. Dans le cas de l'élaboration d'un modèle sédimentaire en lagune, la connaissance de la bathymétrie est un point essentiel. Des mesures concernant les conditions climatiques (vents, précipitations, pressions) ainsi que les apports sédimentaires externes sont également nécessaires.

b- Développement et test

La mise en place du modèle peut s'effectuer soit de façon numérique soit de façon physique. Les modèles physiques sont coûteux et longs à mettre en place. Reproduisant l'ensemble du site à l'échelle, ils permettent parfois de visualiser des phénomènes particuliers. Les modèles numériques consistent à programmer un logiciel afin de calculer les équations relatives au phénomène.

L'échelle du modèle est un paramètre important à prendre en compte. Le calcul ne pouvant être effectué sur une infinité de points, il est nécessaire d'adapter le maillage en fonction du temps de calcul et de la problématique posée. La précision des équations sera également à prendre en compte selon que l'on désire reproduire la globalité d'un phénomène ou une situation locale spécifique.

Une fois l'élaboration du modèle achevée, il s'agit de vérifier s'il reproduit correctement la réalité. Dans ce but, il est mis en fonction avec des séries de données connues dont les résultats attendus sont également connus. Il s'agit alors d'ajuster les différents paramètres du modèle pour obtenir la réponse la

plus juste possible (Figure 27). Cette étape de calage est parfois difficile à mettre en œuvre. En effet, les lacunes existantes dans les jeux de données passées et le caractère empirique de certains paramètres ne facilitent pas la tâche.

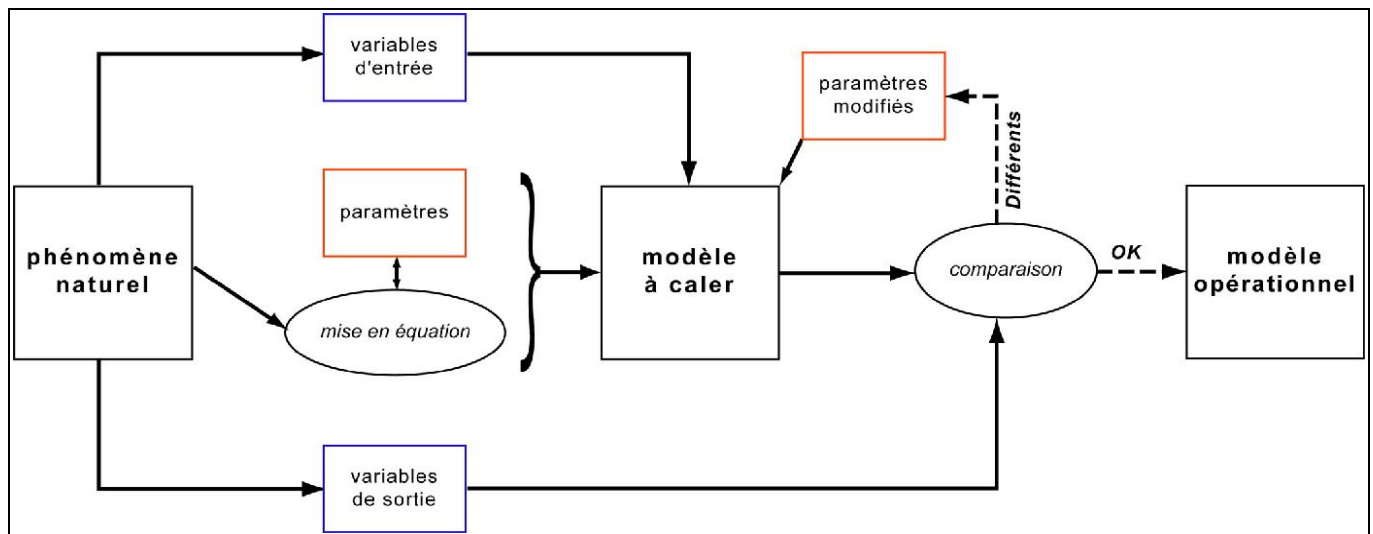


Figure 27: Principe d'élaboration d'un modèle

c- Calculs et interprétations

Lorsque le modèle est fonctionnel et reproduit au plus près la réalité du terrain, il est alors possible d'effectuer des calculs prospectifs. En fonction de la problématique posée, il est possible de simuler l'évolution future du système, l'impact d'un événement particulier ou de la réalisation d'un aménagement. L'interprétation des résultats donnés par le modèle nécessite de garder à l'esprit les incertitudes liées d'une part aux simplifications du modèle par rapport au milieu réel et d'autre part à la précision des données fournies comme variables d'entrées.

III.5.2. La modélisation sédimentaire et le comblement

Le comblement des bassins paraliques est un phénomène complexe faisant intervenir de nombreux processus. Si plusieurs modèles permettent d'appréhender la problématique dans le cas des bassins macrotidaux, aucun ne permet à l'heure actuelle de simuler les lagunes méditerranéennes.

Pour les bassins à forte marée, les processus sédimentaires sont majoritairement liés aux courants entrants et sortants. Phénomène régulier et bien connu, sa modélisation ne pose pas de difficulté majeure. Des modèles physiques et numériques ont ainsi été réalisés dans le cadre du programme de sauvegarde du caractère maritime du Mont Saint-Michel (Ehrhold A., 1999 ; SOGREA, 1999) ainsi que sur l'estuaire de la Gironde (Mallet *et al.*, 2000).

Pour les lagunes, la complexité et la variabilité des phénomènes entrant en jeu pose par contre de nombreux problèmes. Leur comblement n'est pas dû à des courants réguliers mais à des événements climatiques aléatoires (crues et tempêtes) et à une activité biologique difficile à prévoir. La granulométrie assez hétérogène (sablo-vaseux) pose également problème pour la modélisation du transport sédimentaire, alors que sur les milieux estuariens une nette dominance des vases fines. De plus, la faible profondeur des étangs entraîne de nombreuses interactions entre les sédiments et la colonne d'eau (Hearn *et al.*, 1994) :

- La remise en suspension de particules déjà déposées sous l'effet du vent et/ou de la bioturbation. Celle-ci peut de plus relâcher des nutriments influençant la production biologique.
- La modification des vitesses de courants par frottement sur le fond et par les frictions dans la masse d'eau en raison de la forte teneur en particules en suspension.

Actuellement, l'Ifremer en partenariat avec l'Agence de l'Eau RMC travaille sur la mise au point d'un modèle hydrosédimentaire au niveau de l'étang de Thau. Cependant la mise au point d'un modèle pour le comblement est encore loin d'être atteinte. En plus des transports sédimentaires, celui-ci doit intégrer de nombreuses autres processus (Figure 28). Il doit notamment être capable de gérer les rétroactions entre dynamique sédimentaire et modification de la bathymétrie.

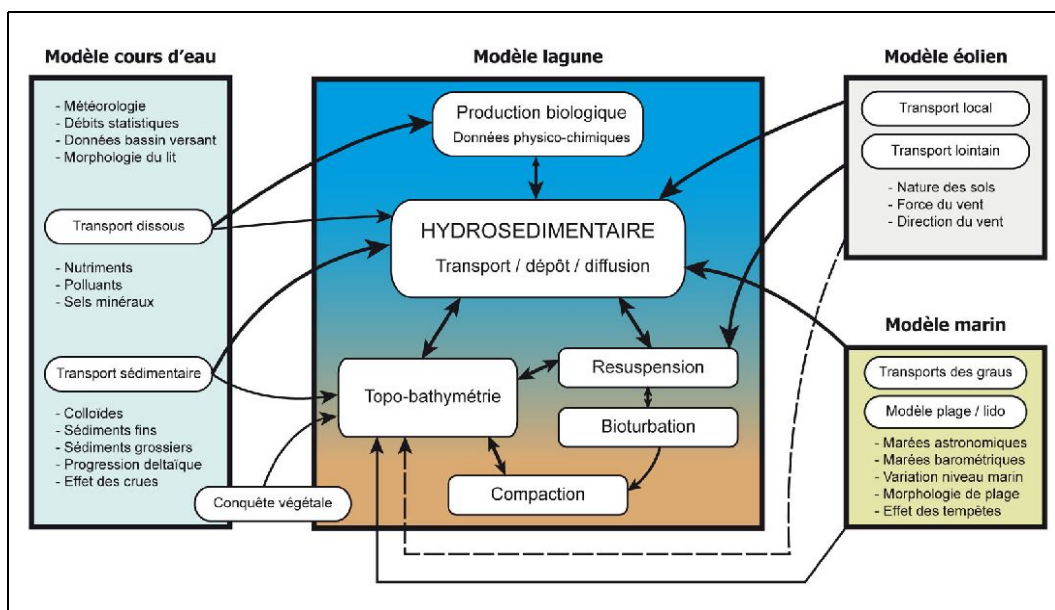


Figure 28: Schéma théorique d'un modèle de comblement en lagune méditerranéenne

Conclusion : avantages et inconvénients des méthodes d'estimation

Les apports des différentes méthodes d'estimation du comblement d'un plan d'eau sont variés. Chacune d'elle possède des avantages et des inconvénients pour l'étude des lagunes méditerranéennes (Tableau 7) mais aucune n'est totalement satisfaisante pour répondre à l'ensemble de la problématique. Les méthodes directes permettent de connaître les principaux facteurs d'apports pour une lagune donnée, mais elles ne renseignent pas vraiment sur l'évolution globale de la morphologie lagunaire. Les méthodes indirectes permettent elles d'apprécier cette évolution au cours du temps mais n'apportent pas d'information sur les causes. Ces deux types d'approche sont donc complémentaires pour pouvoir saisir l'ensemble de la problématique sur une lagune donnée.

Les méthodes de modélisation quant à elles ne sont pas encore au point pour simuler avec fiabilité les processus de comblement des milieux lagunaires. Elles peuvent représenter des perspectives prometteuses mais demeurent pour l'instant du domaine de la recherche et ne sont pas encore exploitables pour optimiser la gestion des milieux.

Tableau 7: Avantages et inconvénients des techniques d'estimation du comblement des étangs

		Avantages	Inconvénients
Méthodes directes	Bilan matière	Vision précise des flux entrants et sortants de la lagune. Calculs simples pour estimer et prévoir le comblement.	Ne prend pas en compte les phénomènes internes à la lagune. Méthode coûteuse si le nombre de tributaires arrivant à la lagune est important.
	Carottages	Permet de dater les épisodes de comblement passés et de calculer l'évolution de la vitesse de sédimentation. Permet d'estimer la part des différents apports (organiques / minéraux).	Nécessité de reproduire la manipulation en plusieurs points pour étudier l'ensemble de la lagune. Le temps d'analyse et les coûts afférents peuvent donc être importants.
Méthodes comparatives	Surfacique	Méthode simple à mettre en œuvre. Permet de disposer de nombreux points de comparaison dans le passé (cartes anciennes, données IGN...)	N'estime pas le comblement en profondeur. Peut être biaisée si les niveaux d'eau ne sont pas comparables.
	Bathymétrique	Permet d'observer l'évolution de la profondeur en tout point de la lagune et donc de repérer les zones les plus sensibles au comblement.	Les données de référence ne sont pas toujours disponibles et peuvent être imprécises par rapport aux méthodes récentes.
Modélisation	Physique	Permet de visualiser et simuler au plus proche les phénomènes naturels.	Les coûts et le temps de développement sont importants.
	Numérique	Permet de simuler à moindre coût les phénomènes de comblement.	Outils complexe à développer, aucun modèle n'existe actuellement pour les lagunes méditerranéennes.

IV- L'évolution des lagunes du Languedoc-Roussillon

IV.1) Les études et données disponibles au niveau local

Des recherches bibliographiques plus précises sur les lagunes du Languedoc-Roussillon ont été entreprises. Ces recherches ont exploité notamment les bases documentaires du Cépralmar, de l'Ifremer, de la DIREN, du Pôle relais lagunes méditerranéennes, du CG 34 et des gestionnaires de milieux. Elles ont permis de faire le point sur les connaissances et les données disponibles spécifiquement sur la région.

Une étude globale, déjà citée précédemment, a été menée en 1992 par le SMNLR sur le comblement des étangs (Girard, 1992). Elle a mis l'accent sur les principaux phénomènes entrant en jeu, et établi un diagnostic de tendance concernant l'échéance de comblement de chacun des étangs (Tableau 8). Au cours des années 2001 et 2002, le SMNLR a également conduit une étude réalisée par le CETE* Méditerranée à propos de l'évolution du littoral sableux du Golfe du Lion. Cette étude contient des informations concernant l'évolution du lido et les communications entre mer et étang. Malheureusement, le rapport de phase 2 de cette étude demeure introuvable à ce jour.

Tableau 8: Calcul approché des durées de comblement des étangs par le SMNLR (Girard, 1992)

Étang	Canet	Salses-Leucate	La Palme	Bages-Sigean	Vendres	Thau	Vic	Arnel	Méjean	Or
Comblement (années)	20	30000	200	700	imminent	3000	600	10	80	600

Entre 2000 et 2005, le SMNLR a également mené des campagnes de mesures bathymétriques sur les étangs. Celles-ci ont pu être récupérées au format informatique, pour certains étangs les fichiers SIG étaient défectueux (les profondeurs étaient mal rattachées aux couches géographiques) ce qui a nécessité de les corriger. D'autres données bathymétriques ont également été recensées (Tableau 9).

Tableau 9: Les données bathymétriques disponibles sur les étangs du Languedoc-Roussillon

	Bathymétrie récente	Bathymétrie ancienne
Étang de l'Or	2005, format numérique (données CG 34)	Existence connue de deux bathymétries anciennes non retrouvées
Étangs palavasiens	2006 étang de la Peyrade 2005 étangs du Méjean, Grec, Arnel, Vic 2004 pour les autres étangs tous au format numérique (données SMNLR / SIEL)	1964-1965, bathymétrie complète au format papier (données Mission Racine)
Étang de Thau	Assemblage de données de 1984 à 1987 au format numérique (données Ifremer)	
Étang de Bages-Sigean	2001, format numérique (données SCP Ferrier-Leduc-Boyer / PNR de la Narbonnaise)	Assemblage de données de 1961 et 1978 au format numérique (données SCP Ferrier-Leduc-Boyer / PNR de la Narbonnaise)
Étang de la Palme	2001, format papier (données CEH Perpignan)	
Étang de Salses-Leucate	2001, format numérique (données SMNLR)	
Étang de Canet	2002, format numérique (données SCP Ferrier-Leduc-Boyer / Ifremer)	1996, format papier (données Université de Perpignan) 1973, <u>krigeage</u> numérique (données Ifremer)

De plus, des études spécifiques ont été conduites sur le comblement de certains étangs. Il s'agit soit d'études menées à la demande de gestionnaires, soit d'études à but scientifique (Tableau 10).

Tableau 10: Études spécifiques menées sur le comblement des étangs du Languedoc-Roussillon

Étangs concernés	Référence	Description
Salses-Leucate	Martin-Buscail, 1978	Étude sédimentologique sur l'évolution des conditions de sédimentation du début de l'Holocène (-10 000ans) à la période actuelle. Le taux de sédimentation a été estimé de 0,3 mm/an au centre des bassins, jusqu'à 1 mm/an sur les bordures de l'étang.
Canet-Saint-Nazaire	Martin <i>et al.</i> , 1981	Étude sédimentologique du centre de recherche en sédimentologie marine (Université de Perpignan) sur l'évolution de la sédimentation de l'étang au cours de l'Holocène. Trois périodes sont distinguées, la plus récente présente un taux de sédimentation d'environ 1 mm/an.
Canet, Salses-Leucate, Bages-Sigean (et partiellement Thau)	Duboul-Ravazet et Martin R., 1981	Étude sédimentologique du centre de recherche en sédimentologie marine (Université de Perpignan). Elle compare l'évolution du remplissage sédimentaire pour plusieurs étangs durant l'Holocène. Les caractères communs les influences mixtes marines et terrestres, et l'importance des facteurs météorologiques.
Étang de Canet	Planchais, 1985	Étude sédimentologique basée sur les pollens (laboratoire de palynologie de Montpellier) sur le comblement de l'étang durant la période Holocène.
Étangs palavasiens	Planchais, 1987	Étude sédimentologique basée sur les pollens (laboratoire de palynologie de Montpellier) mettant en évidence l'impact de l'Homme sur les conditions de sédimentation de l'estuaire du Lez au cours de l'Holocène.
Tous	Girard, 1992	Étude cartographique, historique et bibliographique sur le phénomène de comblement des étangs.
Doul (Bages-Sigean), Canet	Barrusseau <i>et al.</i> , 1992	Étude sédimentologique des radio-éléments (Université de Perpignan) et des pollens (Université de Montpellier) sur les trois derniers siècles. Elle établit les taux de sédimentation de quelques millimètres par an sur la période considérée. L'impact des activités humaines et celui des événements naturels sont mis en évidence.
Vendres	Aloisi et Gadel, 1992	Étude sédimentologique et géomorphologique du centre de recherche en sédimentologie marine (Université de Perpignan). Elle met en avant les mécanismes spécifiques de comblement de l'étang, l'influence des conditions naturelles et des aménagements humains.
Canet-Saint-Nazaire	Schmittner, 1996	Modélisation prospective à partir de données bathymétriques de trois scénarios de comblement. Elle met l'accent sur l'importance des aménagements et de l'occupation des sols dans le phénomène de comblement.
Bages-Sigean	SCP Ferrier-Leduc-Boyer, 2001	Étude de l'évolution bathymétrique menée pour le PNR de la Narbonnaise. Elle se base sur une campagne de mesures réalisée en 2000 ainsi que sur des données bathymétriques anciennes datant de 1961 et 1978.
La Palme	Wilke <i>et al.</i> , 2002	Étude en trois parties menée par le CEH de l'Université de Perpignan. La première partie effectue un bilan hydrologique , la deuxième un bilan des apports sédimentaire et des mécanismes de comblement, et la troisième propose des modes d'intervention.
Or, Méjean, Campagnol	Aqua Expert et CEH, 2004	Étude précisant le rôle du cascaïl (<i>Ficopomatus enigmaticus</i>) dans le fonctionnement hydrologique et sédimentologique des étangs.
Thau	Schmidt <i>et al.</i> , 2007(b)	Étude sédimentologique de l'étang de Thau dans le cadre du programme de recherche MICROBENT.

IV.2) Repères chronologiques et évolution historique des lagunes

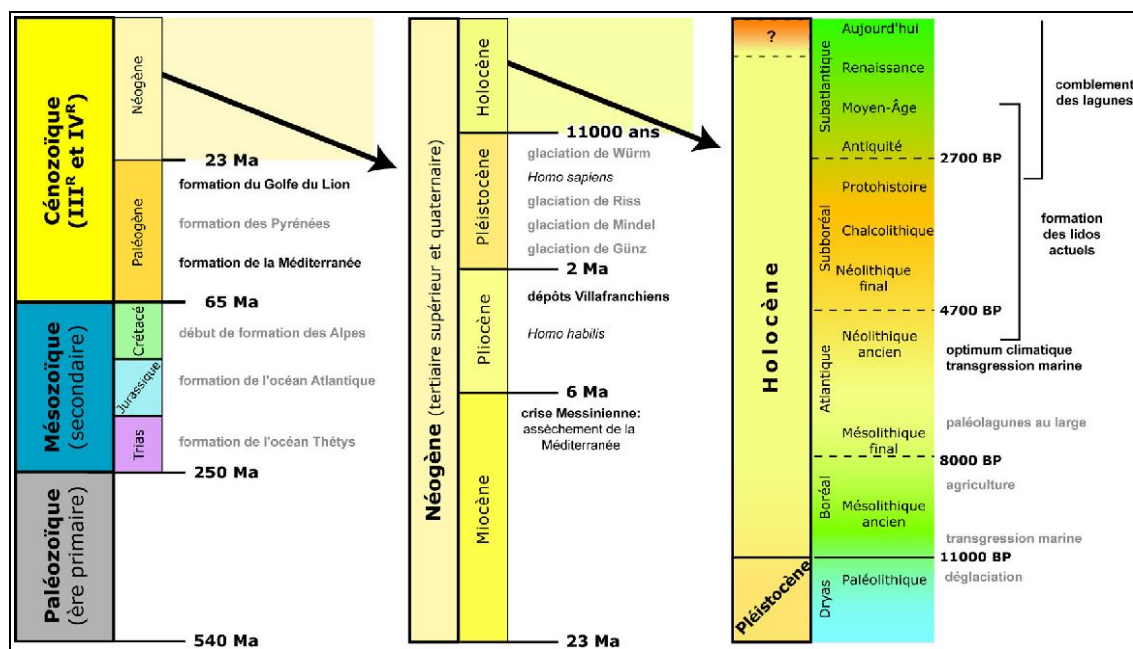


Figure 29: Contexte géochronologique de la formation des lagunes

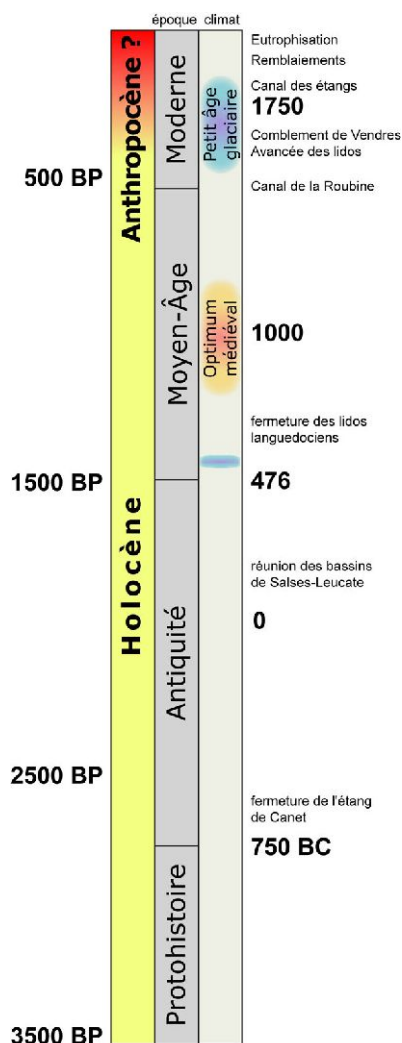


Figure 30: Évolution des lagunes Méditerranéennes

Les lagunes du littoral méditerranéen sont de formation récente au regard des temps géologiques (Figure 29). Elles prennent place dans un contexte plus vaste qui a vu la formation de la Méditerranée par fermeture de l'océan Thétys au début de l'ère tertiaire. L'effondrement d'une large part de la chaîne Pyrénéenne a permis la création du Golfe du Lion il y a 28 millions d'années. Cet événement a créé de nombreuses failles et des zones d'effondrements plus marquées qui sous-tendent aujourd'hui la morphologie des bassins de Thau et de Bages-Sigean.

Des dépôts marins Miocènes (calcaires) puis Pliocènes (marnosableux, cailloutis Villafranchiens) vont ensuite s'établir à l'emplacement des lagunes actuelles. Au cours du Pléistocène, plusieurs glaciations abaissent la mer parfois jusqu'à -100 m. Les fleuves entaillent alors de profondes vallées dont certaines sont observables sous les lagunes actuelles.

C'est sur cette paléomorphologie qu'avec le réchauffement du climat à l'Holocène les lagunes vont se former. Plusieurs systèmes lagunaires vont apparaître et être submergés au fur et à mesure de la transgression marine. La formation des lagunes actuelles débute il y a environ 5000 ans.

Au début de l'Antiquité, l'étang de Canet est déjà refermé. Ceux des littoraux narbonnais et héraultais sont encore ouverts, ils permettent l'installation d'importants ports romains. Au cours du Moyen-âge, tous vont se fermer. Ne pouvant plus être évacués vers la mer, les sédiments s'accumulent et vont entraîner le comblement des lagunes.

A partir du XVIII^{ème} siècle, les aménagements et les modifications du milieu vont se succéder, accélérant souvent la vitesse de comblement.

IV.3) État des lieux et situation de chacun des étangs

Le présent chapitre réalise un état de lieux en fonction de la bibliographie spécifique disponible sur les étangs du Languedoc-Roussillon. Elle permet de dresser un état des lieux ainsi que de mettre en avant les lacunes et poser les bases qui seront utiles à l'élaboration d'une méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité des étangs.

IV.3.1. Étang de Canet-Saint-Nazaire

a- Évolution historique

L'évolution de l'étang de Canet est bien connue depuis sa formation au début de l'Holocène, notamment via les travaux du Laboratoire de Sédimentologie Marine de l'Université de Perpignan (Duboul-Ravazet et Martin, 1981 ; Martin *et al.*, 1981). L'étang repose sur un socle marno-sableux d'époque Pliocène entaillé par une paléomorphologie mise en place lors de bas niveaux marins. Sur ce socle reposent des sédiments sableux moyens et grossiers formant un ancien prisme littoral. Celui-ci a été édifié il y a environ 6000 à 5000 ans lors d'un niveau marin stable proche de l'actuel et constituait alors un golfe ouvert. À partir de 5000 BP, une remontée du niveau marin entame alors l'édification du lido et la séparation progressive de la lagune par progression de flèches sableuses. Trois périodes de comblement sont alors différenciables (Figure 31) :

- de 5000 à 4200 BP : Atlantique récent

Sédimentation vaseuse relativement lente (3 mm/an) avec apports continentaux dominants. Les sédiments sont pauvres en matière organique (0,60 à 0,70 %). Ceci témoigne d'un système encore très ouvert sur la mer avec un rapide renouvellement des eaux permettant la mise en place de conditions oxydantes.

- de 4000 à 2500 BP : Subboréal

La vitesse de sédimentation est élevée (environ 5 mm/an) avec une teneur en matière organique plus importante (0,90 à 1,30 % de carbone organique). Elle semble résulter d'une forte production végétale avec une dominance des algues.

- depuis 2500 ans : Subatlantique

Le taux de sédimentation ralenti (entre 0,5 et 1 mm/an) mais peut être localement plus important notamment au débouché du Réart. La teneur en matière organique redevient plus faible (0,70 % de carbone organique). Le fort brassage du milieu dû à la faible profondeur pourrait expliquer en partie la réduction de la production végétale (turbidité plus élevée). A cette époque la fermeture du lido est achevée et la lagune complètement isolée de la mer.

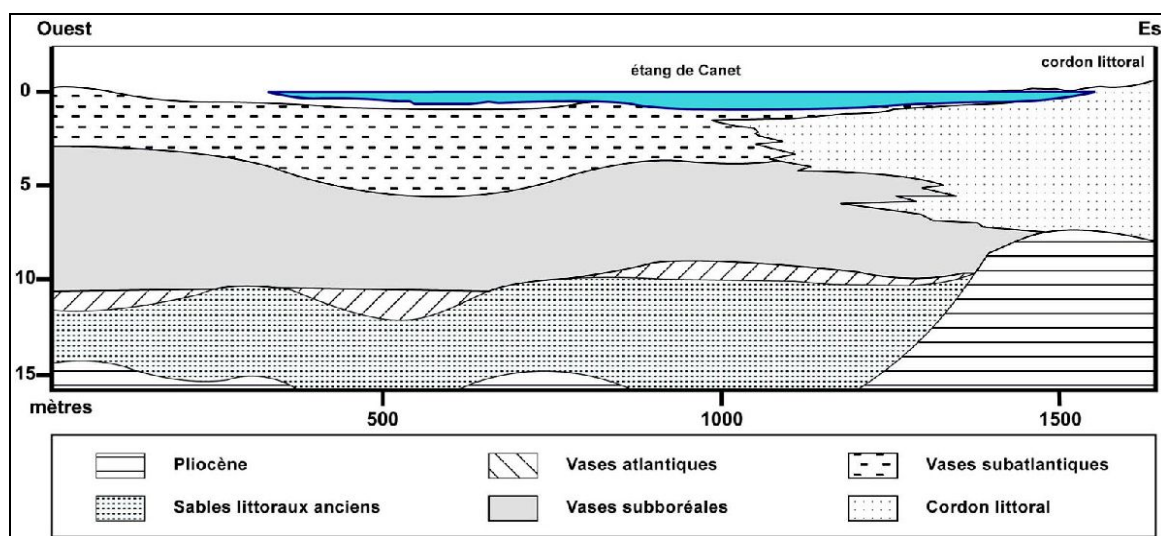
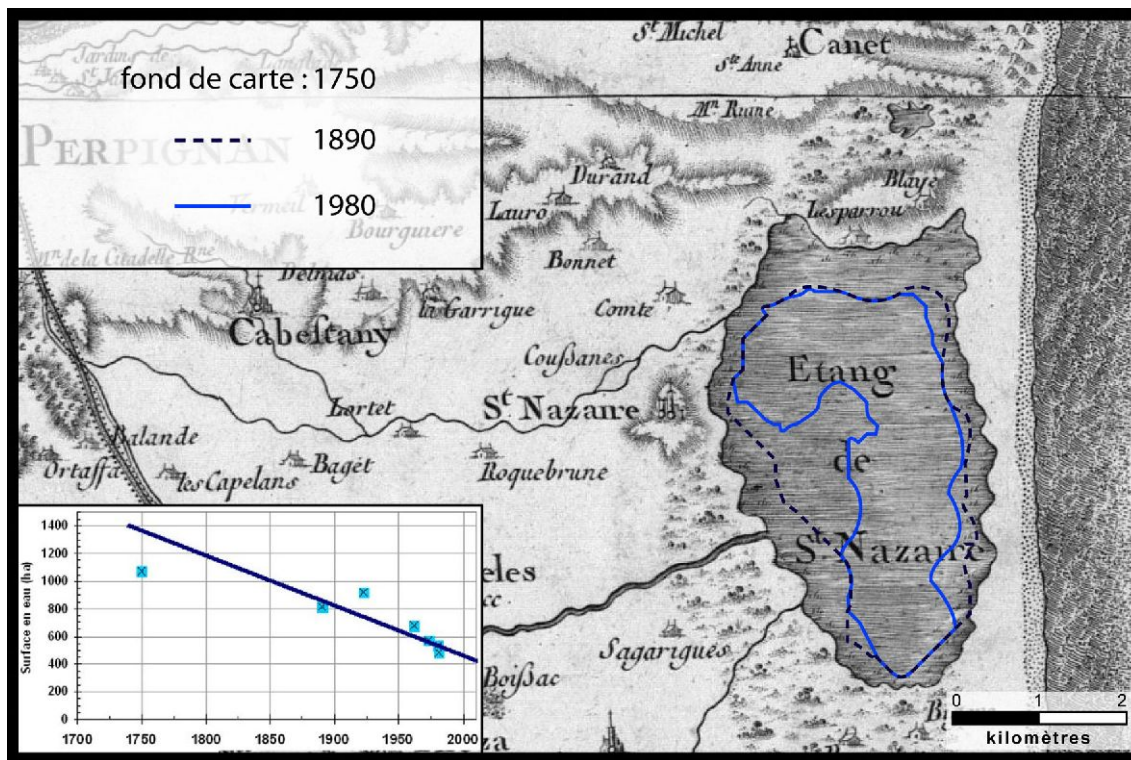


Figure 31: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Canet (Duboul-Ravazet et Martin, 1981, modifié)

A l'époque romaine, la lagune est bien plus vaste et regroupe en un même plan d'eau l'étang de Canet et l'ancien étang de l'Aygal dont le comblement s'est achevé à la fin du XIX^{ème} siècle (Schmittner, 1996). Au cours des derniers siècles, l'évolution de l'étang est précisée par les données historiques et cartographiques (Girard, 1992). La progression spectaculaire du delta du Réart indique une nette dominance des apports terrestres. L'évolution apparaît comme extrêmement rapide, l'étang de Canet ayant perdu plus de 50 % de sa superficie au cours des deux derniers siècles (Carte 5).



Carte 5: Évolution de la surface de l'étang de Canet depuis le XVIII^{ème} siècle (Duboul-Ravazet et Martin, 1981, modifié)

b- Modes de comblement

L'étang de Canet-Saint-Nazaire est aujourd'hui en fin de comblement. Avec une profondeur maximale inférieure à 1 m, et ne dépassant pas 40 cm sur près de la moitié de l'étang son colmatage est actuellement très avancé. Les apports de matériaux terrigènes dominent largement les autres modes de comblement (Duboul-Ravazet et Martin, 1981 ; Girard, 1992 ; Schmittner, 1996). La Réart en est le principal vecteur, la Fosseille et l'Agouille de la mer y contribuent également de façon plus modérée. La zone septentrionale est largement comblée par la progression du delta du Réart. Le bassin sud, plus profond résiste mieux mais se comble également (Girard, 1992).

Une production végétale importante d'herbiers (*Zostera sp.*, *Ruppia sp.*) et de macroalgues a contribué au comblement de ce bassin (Duboul-Ravazet et Martin, 1981). Cependant, les macrovégétaux ont disparu depuis 2005 en raison du mauvais état vis à vis de l'eutrophisation. Le phytoplancton et le cascaïl (*Ficopomatus enigmaticus*) ont pris le relais en matière de comblement biogène (IFREMER, 2006).

Au niveau des dynamiques marines, les échanges par le Grau des Basses sont très limités et ne permettent pas une évacuation efficace des sédiments comme en témoigne l'envasement de la passe (Schmittner, 1996).

Le taux de sédimentation moyen actuel est compris entre 8 mm/an (Planchais, 1985) et 13 mm/an ce qui suppose une forte augmentation de l'érosion du bassin versant par rapport aux périodes antérieures (Barousseau *et al.*, 1992) celle-ci est probablement liée aux changements dans l'occupation des sols. Une étude bathymétrique réalisée par le BCEOM entre 1969 et 1973 met également en avant des zones en légère érosion (Girard, 1992). Ce creusement a lieu principalement le long du lido.

c- Évolution future

En 1992, le SMNLR (Girard, 1992) estimait la durée de vie de l'étang de Canet à une soixantaine d'années au maximum. Il serait cependant déjà réduit à une simple mare de profondeur inférieure à 20 cm sous 24 ans. Cependant, l'accent était mis sur la possibilité d'un comblement rapide par une ou plusieurs crues importantes à l'échéance de la vingtaine d'années. Des résultats similaires ressortent des calculs effectués par Schmittner en 1996 (Tableau 11). Ces volumes comblés se basent sur trois scénarios de comblement probables en fonction des événements météorologiques et du niveau d'eau dans la lagune. Le scénario de comblement instantané se base sur un seul événement pluvieux de forte intensité pendant quatre heures entraînant une forte érosion et une crue majeure (1150 m³/s, basé sur l'événement de septembre 1992). Le scénario intermédiaire se base sur trois crues importantes (450 à 650 m³/s) et trente crues faibles (45 à 360 m³/s) dans les trente prochaines années. Le scénario de comblement lent se base sur une seule crue importante et 60 crues faibles durant le prochain siècle.

Tableau 11: Scénarios de comblement de l'étang de Canet-Saint-Nazaire (d'après Schmittner, 1996)

	Comblement instantané	Comblement moyen (20 à 30 ans)	Comblement lent (100 ans)
Niveau d'eau de base	Perte de volume : 95 à 99 % Perte de surface : 76 à 83 %	Perte de volume : 88 % Perte de surface : 63 %	Perte de volume : 92 % Perte de surface : 87 %
Surcôte à +0,5m NGF	Perte de volume : 88 à 96 % Perte de surface : 43 à 74 %	Perte de volume : 74 % Perte de surface : 35 %	Perte de volume : 78 % Perte de surface : 49 %
Surcôte à +1m NGF	Perte de volume : 62 à 82 % Perte de surface : 30 à 52 %	Perte de volume : 51 % Perte de surface : 25 %	Perte de volume : 72 % Perte de surface : 35 %
Surcôte à +1,5m NGF	Perte de volume : 48 à 75 % Perte de surface : 21 à 40 %	Perte de volume : 36 % Perte de surface : 19 %	Perte de volume : 56 % Perte de surface : 27 %

Ces résultats permettent d'observer que plus le niveau d'eau dans l'étang est bas lors d'une crue, plus les sédiments seront déposés facilement. Effectués selon différentes conditions d'érodabilité des sols pour le scénario de comblement instantané, ces calculs permettent de plus de rendre compte de l'importance que peut avoir l'utilisation et le mode d'exploitation des sols sur la variabilité des apports terrigènes (Schmittner, 1996). Cela pourrait représenter une des voies possibles pour la gestion de la problématique du comblement.

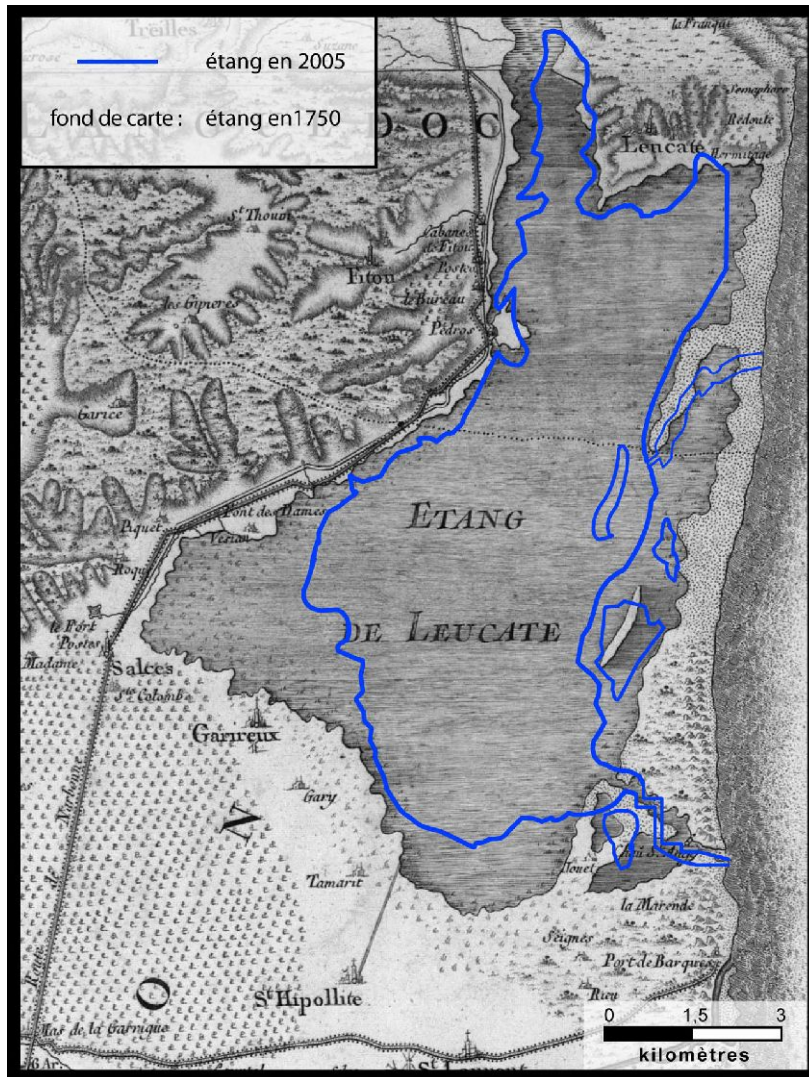
IV.3.2. Étang de Salses-Leucate

a- Évolution historique

L'évolution de l'étang de Salses-Leucate a été étudiée également par l'équipe du Laboratoire de Sédimentologie Marine de l'Université de Perpignan (Martin-Buscaïl, 1978 ; Duboul-Ravazet et Martin, 1981). Tout comme l'étang de Canet voisin, l'étang de Leucate s'est formé sur un substrat Pliocène marno-sableux. L'évolution Holocène du site est néanmoins différente. Dès le début du remplissage une distinction nette apparaît entre le bassin Sud et le bassin Nord de l'étang. Quatre phases distinctes peuvent être mises en évidence dans le comblement du site (Figure 32) :

- **de 10 000 à 7000 BP** : Atlantique ancien

La zone sud est occupée par un ancien delta de l'Agly qui débouchait probablement dans l'actuelle anse de la Roquette. Des dépôts fluviaux et des dépôts de milieux saumâtres s'y accumulent. La zone nord, séparée par un relief non identifié, constitue un bassin marin ouvert. Des matériaux sableux y sédimentent.



Carte 6: Évolution de la surface de l'étang de Leucate depuis le XVIII^{ème} siècle

b- Modes de comblement

L'étang de Salses-Leucate est dans un état de comblement peu avancé. Le maintien permanent de plusieurs communications avec la mer ont limité le confinement du bassin et favorisé une sédimentation faible. Les principaux apports sédimentaires actuels proviennent du bassin versant, notamment de l'érosion des limons de la plaine de la Salanque et des argiles de décalcification du massif des Corbières. Les cours d'eau et les résurgences fortement chargées en calcium et magnésium entraînent également une sédimentation par précipitation de carbonates.

Les trois graus actifs, régulièrement dragués et stabilisés permettent une entrée de sables. Ceux-ci entrent dans la lagune sous l'effet des vents de sud-est. Ils se déposent ensuite en partie le long du lido, le reste est incorporé à la sédimentation pélagique de l'étang.

Un dernier processus entre en jeu, il s'agit de la conquête terrestre. Celle-ci est active sur la rive nord-occidentale où l'accumulation de débris végétaux lors des épisodes de forte Tramontane permet un exhaussement du fond favorable à l'installation de végétation pionnière.

c- Évolution future

Le rapport du SMNLR calculait une durée de comblement d'environ 30 siècles (Girard, 1992). Aucune autre étude prévisionnelle n'a pu être recensée sur cette lagune. Cependant la situation de l'étang de Salses-Leucate face au comblement ne semble pas préoccupante. La bathymétrie établie en 2001 par le SMNLR pourra servir de référence pour une éventuelle évaluation future de l'état de la lagune.

b- Modes de comblement

Le mécanisme de comblement et l'hydrodynamisme de l'étang de La Palme ont fait l'objet d'une étude précise par le CEH (Wilke *et al.*, 2000-2002). La cause la plus importante de comblement a été le remblaiement qui a provoqué la perte d'environ 40 % de la superficie entre le XIX^{ème} siècle et le milieu du XX^{ème}. Ce processus étant aujourd'hui régulé par la législation, la situation de l'étang au niveau du comblement ne semble pas préoccupante.

Les apports terrestres sont limités du fait de la faible superficie du bassin versant, de la faible teneur en particules argileuses des sols et de l'importance des sources karstiques (71 % des apports) peu chargées en matières solides. Une augmentation sensible des apports a néanmoins été constatée au cours des dernières décennies. Elle est vraisemblablement liée à l'endiguement des rivières, ainsi qu'à la station d'épuration de La Palme. Les apports sédimentaires de cette station sont cependant limités, ils ne constitueraient qu'une couche annuelle de vase de 0,00064 mm.

Le processus de conquête continentale est à l'œuvre sur certaines rives, notamment celles situées au Nord-Ouest, et sur certains îlots. C'est un processus lent mais qui peut accélérer le comblement et la perte de surface de l'étang.

La production biologique de l'étang est relativement faible comparée à d'autres systèmes lagunaires. Cette situation est à mettre en rapport avec le bon état de l'étang vis-à-vis de l'eutrophisation (IFREMER, 2008).

Les apports sédimentaires marins ne semblent pas contribuer au comblement de l'étang. En effet, les mesures effectuées au grau de la Franqui entre 1998 et 2001 par le CEH montrent une large dominante des courants de sortie avec une part limitée des courants avec une vitesse suffisante pour transporter des sédiments (voir figure 12 page 25).

c- Évolution future

Le comblement général de la lagune semble peut inquiétant, le SMNLR estimait l'échéance de remplissage sédimentaire de la lagune à environ 200 ans (Girard, 1992). Deux points sont cependant à surveiller étroitement dans la lagune. Il s'agit d'une part des hauts fonds séparant le bassin Nord et le bassin Sud, et d'autre part de l'extrémité Sud entre la voie ferrée et le grau. En effet, la sédimentation sur ces deux points pourrait à terme augmenter sensiblement le confinement de la lagune et perturber son fonctionnement hydrodynamique.

IV.3.4. Étangs du Narbonnais

a- Évolution historique

L'évolution du complexe lagunaire de Bages-Sigean est connue par les travaux du Laboratoire de Sédimentologie Marine de l'Université de Perpignan (Duboul-Ravazet et Martin, 1981). Le site s'est construit dans un bassin d'effondrement dominé par trois massifs anciens d'époque Jurassique et Crétacé (Montagne de la Clape, Fontfroide, Corbières). Des dépôts de calcaires lacustres d'époque Oligocène constituent les bordures du complexe et le soubassement des îles. Au Pléistocène, le niveau marin est plus bas et le site est ouvert avec un caractère marin marqué. La Berre élabore un système complexe de terrasses fluviales avec de nombreux cours et entaille de profondes vallées durant la glaciation würmienne. Au cours de l'Holocène, la construction du lido va débiter sous l'effet de la transgression flandrienne (4500 BP). La sédimentation dans la baie (qui regroupe tous les étangs en un seul plan d'eau allant jusqu'à l'emplacement actuel de Narbonne) va alors être dominée par des apports terrestres, issus du lessivage des reliefs calcaires et argilo-marneux. La séquence de comblement est alors constituée essentiellement de vases et vases sableuses (Figure 33). Deux phases de comblement peuvent être différenciées au cours de ce remplissage :

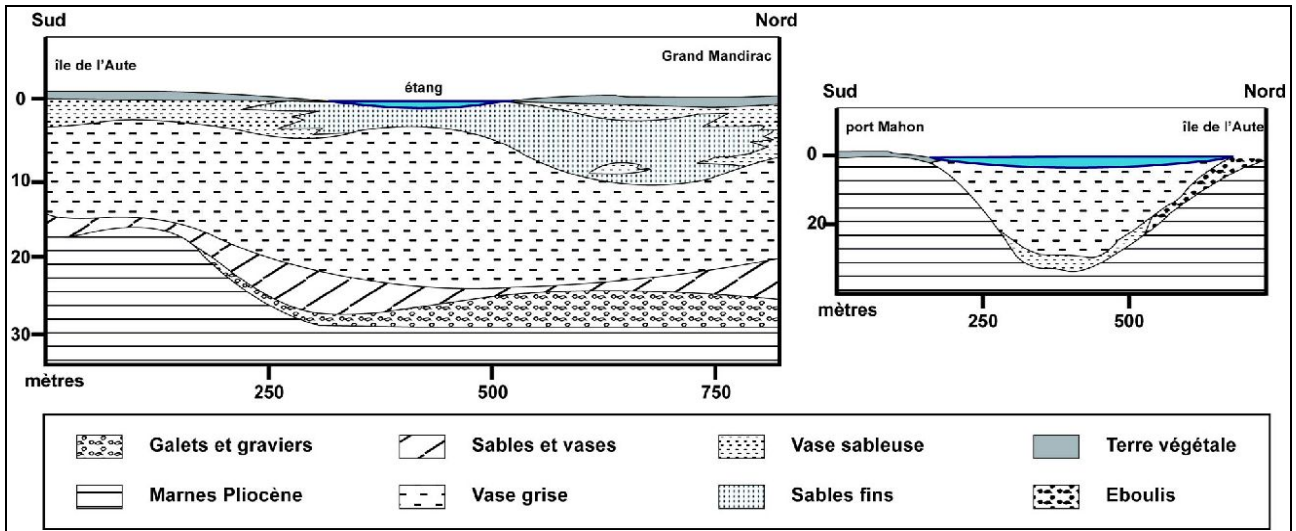
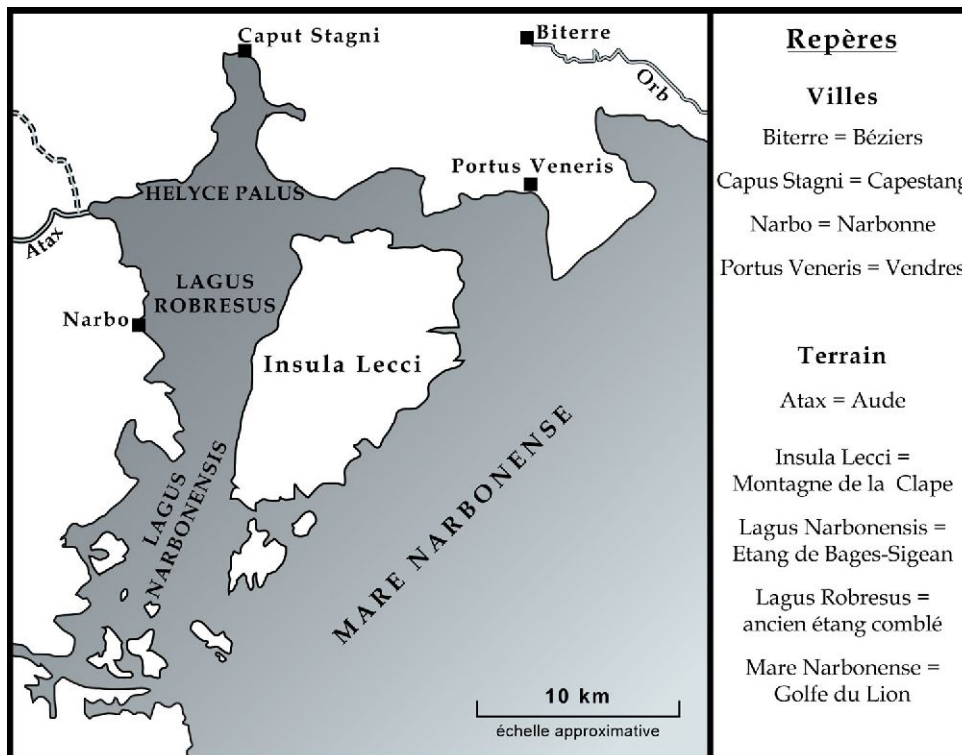


Figure 33: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Bages-Sigean (Duboul-Ravazet et Martin, 1981)

- **de 4500 à 500 BP environ** : période du delta de l'Aude

La vaste lagune se ferme progressivement et se comble avec les apports de l'Aude et de la Berre. Au début de la période antique, la baie est largement ouverte et protégée par des îles (Carte 8). Cela permet l'installation d'un important port Romain à Narbonne. Le lido va ensuite se former et s'accrocher sur les îles puis l'étang se comble progressivement. Au cours du Moyen-âge l'accès à Narbonne ne devient alors possible qu'en empruntant le cours de l'Aude. La progression du delta de l'Aude isole les étangs de l'Ayrolle et de Campagnol. Ce bras est progressivement abandonné par le fleuve, au XIV^{ème} siècle son maintien n'est possible que par l'endiguement, qui sera finalement abandonné aussi après plusieurs destructions par des crues.



Carte 8: Configuration de la baie de Narbonne avant l'ère Chrétienne (d'après Bouffet, 1894)

- Du XIV^{ème} siècle à nos jours : période récente

Avec l'arrêt des apports de l'Aude, le comblement de la lagune ralenti. La construction du canal de la Robine entre le XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle restaure une communication au niveau de l'ancien lit de l'Aude. Les transits sédimentaires au sein du canal sont minimes par rapport à l'Aude. Cependant, son creusement achève la séparation entre l'étang de Bages-Sigean et l'Est du complexe, accentuant le confinement et la sensibilité au comblement des étangs de l'Ayrolle et de Gruissan. La situation de l'étang de Bages-Sigean a peu évoluée depuis, mis à part la progression du delta de la Berre (Carte 9). Le comblement a été plus important sur les étangs de l'Ayrolle et de Campagnol.



Carte 9: Évolution de la surface des étangs Narbonnais depuis le XVIII^{ème} siècle (d'après Girard, 1992 - modifié)

b- Modes de comblement

Depuis l'arrêt des apports de l'Aude, le rythme de comblement de l'étang de Bages-Sigean est considérablement ralenti. Les apports terrestres demeurent toutefois la principale cause de comblement, essentiellement au niveau de la Berre (Duboul-Ravazet et Martin, 1981 ; Girard, 1992). Les apports des canaux y contribuent également dans une moindre mesure. Dans les étangs de l'est du complexe, la dynamique terrestre est également le mécanisme dominant. La rétention et la sédimentation des particules sont accentuées du fait du confinement important.

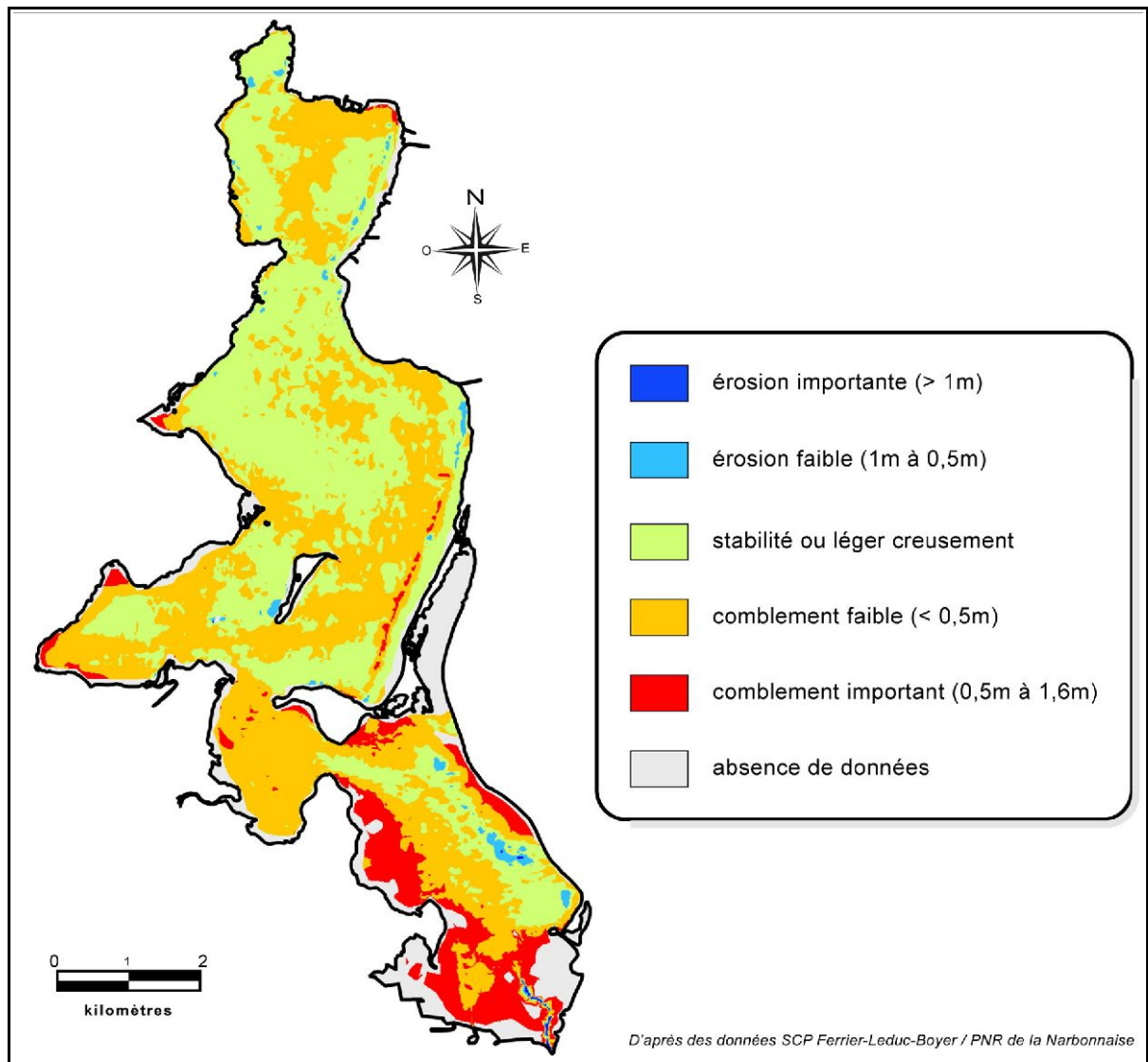
Le complexe étant relativement fermé, les apports marins semblent négligeables. L'orientation favorable de l'étang de Bages-Sigean pourrait même favoriser une forte évacuation de sédiments par le

grau lors des épisodes de Tramontane.

Au niveau des apports biologiques, ils sont probablement modérés. La production doit tout de même être significative pour le bassin Nord de l'étang de Bages-Sigean et pour l'étang de Campagnol. La qualité du milieu face à l'eutrophisation est en voie d'amélioration (IFREMER, 2006), la part de la production biologique dans le comblement devrait donc diminuer à terme.

c- Évolution future

L'évolution de l'étang de Bages-Sigean face au phénomène de comblement est assez lente. Sa durée de colmatage a été estimée à environ 700 ans par le SMNLR. L'étude bathymétrique réalisée pour le PNR de la Narbonnaise (SCP Ferrier-Leduc-Boyer, 2001) confirme une tendance au comblement avec une vitesse moyenne d'environ 1,5 mm/an* au cours des dernières décennies. L'évolution semble néanmoins positive pour le bassin Nord avec un léger surcreusement (-9,8 cm* entre 1961 et 2001). Dans le bassin Sud, le comblement est net (+34 cm* entre 1978 et 2001), il est important à proximité du débouché du chenal de Port-La-Nouvelle (Carte 10). Le chenal en lui-même par contre montre un creusement, effet des dragages qui ont pu être effectués. Les travaux menés sur le grau en 2004 (enlèvement du barrage à vannes) semblent favoriser l'évacuation des sédiments vers la mer (IFREMER, 2006).



**Carte 10: Évolution bathymétrique de l'étang de Bages-Sigean entre 1961-78 et 2001
(d'après SCP Ferrier-Leduc-Boyer, 2001)**

* Valeurs données à titre purement indicatif compte tenu des incertitudes de mesures pesant sur la bathymétrie ancienne.

L'étang de Campagnol est lui par contre à un stade final de comblement. Il a perdu près des trois quarts de sa surface au cours du dernier siècle avec les apports du canal de la Réunion. Cela à toutefois un effet bénéfique sur l'étang de l'Ayrolle qui est assez préservé grâce à l'effet décanteur de l'étang de Campagnol sur les apports. Son comblement sera néanmoins rapide une fois que le colmatage de l'étang de Campagnol sera achevé. Aucune étude n'a pu être relevée en ce qui concerne l'étang de Gruissan.

Dans l'étang de Douil, la sédimentation récente est faible, elle est évaluée entre 0,2 et 0,6 mm/an (Barusseau *et al.*, 1992). Elle a été bien plus importante dans les siècles passés alors que le bassin était utilisé pour la préconcentration des salins de Peyriac. Depuis la fin de l'exploitation, les ouvertures restent souvent fermées ce qui le préserve des apports de matières en suspension.

IV.3.5. Étang de Vendres

a- Évolution historique

L'évolution de l'étang de Vendres a été étudiée par le Laboratoire de Sédimentologie Marine de l'Université de Perpignan (Aloisi et Gadel, 1992). Le site semble appartenir à un ancien complexe qui réunissait à l'origine les étangs de Capestang, Pissevaches, de La Matte et de Fleury en un vaste golfe marin. Celui-ci s'est établi lors de la transgression marine Holocène par submersion des anciennes vallées creusés par l'Aude durant la glaciation de Würm (18 000 BP). Au maximum de cette transgression (5000 BP) des dépôts de type marins sont observables. Le golfe va alors progressivement se fermer par la mise en place du lido et par la progression du delta de l'Aude. Les sédiments vont alors devenir laguno-marins, puis limoneux (Figure 34). Avec l'abandon du bras occidental de l'Aude au XIV^{ème} siècle (voir IV.3.4.a, page 60) les apports vers l'étang de Vendres vont s'accélérer. L'évolution récente est spectaculaire comme le montre l'étude des archives cartographiques (Carte 11). L'augmentation des phénomènes de crues durant le petit âge glaciaire explique certainement la forte progradation du delta au XVIII^{ème} siècle. Le taux de sédimentation dans l'étang se situait alors en moyenne à 25 mm/an.

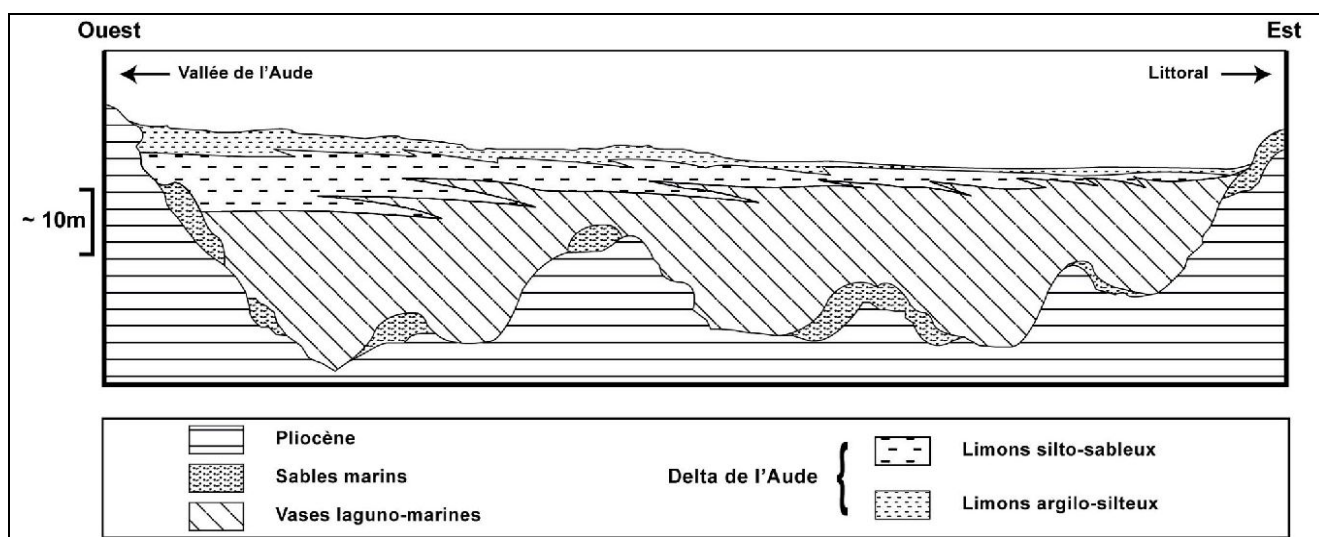
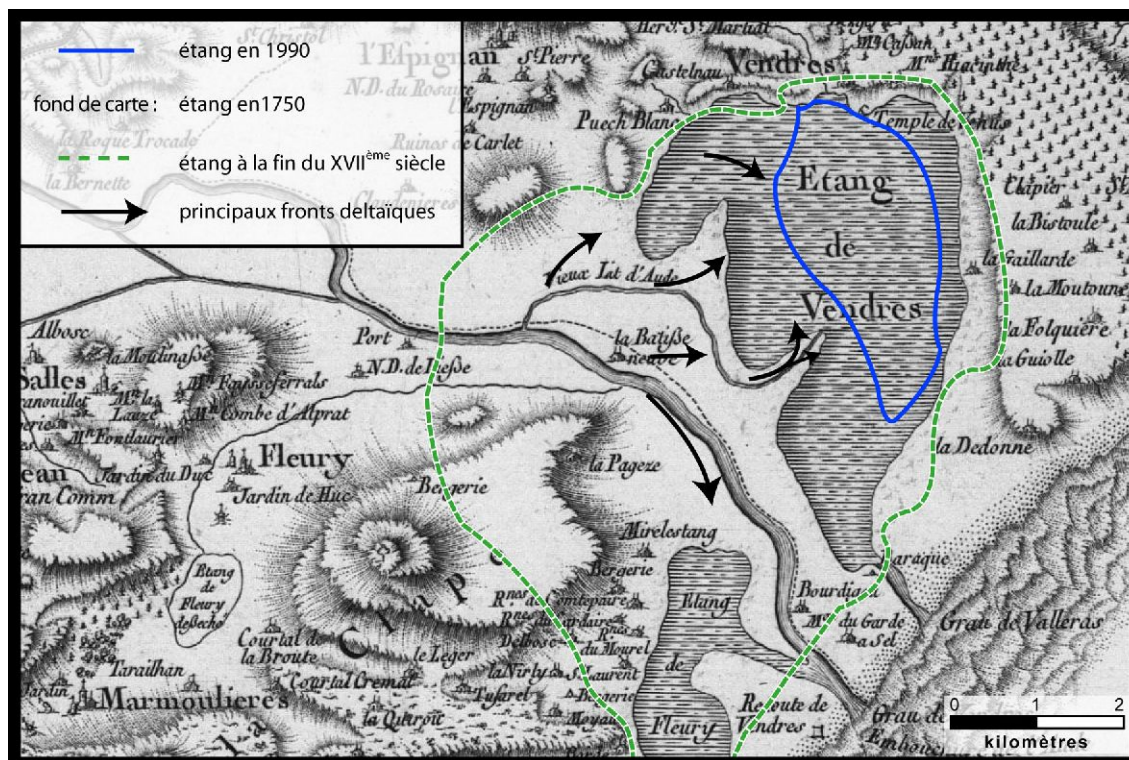


Figure 34: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Vendres (Aloisi et Gadel, 1992)



Carte 11: Évolution de la surface de l'étang de Vendres depuis le XVII^{ème} siècle (d'après Aloisi et Gadel, 1992)

b- Modes de comblement

Le comblement de l'étang de Vendres est aujourd'hui quasiment achevé. Son évolution a été directement liée à une forte dynamique des apports terrestres. Aujourd'hui, la situation est stabilisée grâce à la canalisation de l'embouchure de l'Aude vers la mer. Cependant l'avenir de l'étang reste compromis. Déjà plus marais que lagune, sa faible profondeur favorise une forte dynamique de conquête terrestre (notamment par les roselières) et une production biologique intense liée à l'eutrophisation.

c- Évolution future

L'équilibre relatif établi depuis l'aménagement du cours de l'Aude a permis d'éviter le comblement total de l'étang. Cependant son évolution laisse peu de doute quand à sa transformation prochaine en un marécage qui progressivement évoluera vers une plaine littorale. Le SMNLR classait d'ailleurs l'étang de Vendres dans la catégorie des étangs déjà comblés (Girard, 1992).

IV.3.6. Étang de Thau

a- Évolution historique

L'évolution de l'étang de Thau a été synthétisée par les écologistes de l'Euzière (1986). Le bassin prend place dans un vaste fossé d'effondrement, le graben de Gigean-Montbazin formé à l'Oligocène (-30 Ma). Des marnes et calcaires vont s'y former au cours du Miocène et du Pliocène. Ces formations vont subir une érosion et des affaissements locaux lors des glaciations du Pléistocène. Au début de l'Holocène, une vaste baie accumule des sédiments marins ; au centre de celle-ci le Mont Saint-Clair est une île. Une sédimentation lente va alors progressivement construire le lido. Au début de l'époque Romaine, la baie est encore largement ouverte, seuls quelques îlots sableux marquent une limite entre la mer et la future lagune. C'est au cours des siècles suivants que la fermeture du lido va s'achever tout en progressant vers la terre. L'étang de Thau va alors être isolé de la mer, mis à part quelques graus permanents et temporaires.

Au XVII^{ème} siècle, le lido est en place, mais il est situé plus en avant vers la mer, le plan d'eau englobe l'ensemble des lagunes de Thau jusqu'à l'étang de l'Or. La sédimentation devient alors plus active mais reste limitée, elle est évaluée en moyenne à 0,8 mm/an au cours des trois derniers siècles.

b- Modes de comblement

La sédimentation dans l'étang de Thau est actuellement relativement faible, mais semble plus active qu'au cours des siècles passés. Les taux de sédimentation récents ont été évalués à 1,5 mm/an sous les tables ostréicoles et 2,5 mm/an au centre de l'étang (Schmidt *et al.*, 2007).

Les apports terrestres représentent des quantités limitées en matière de sédiments. Le bassin versant est en effet peu important par rapport à l'étendue de l'étang. Dans la crique de l'Angle, ils sont susceptibles de représenter tout de même un apport conséquent compte tenu du confinement du bassin qui limite la dispersion des particules.

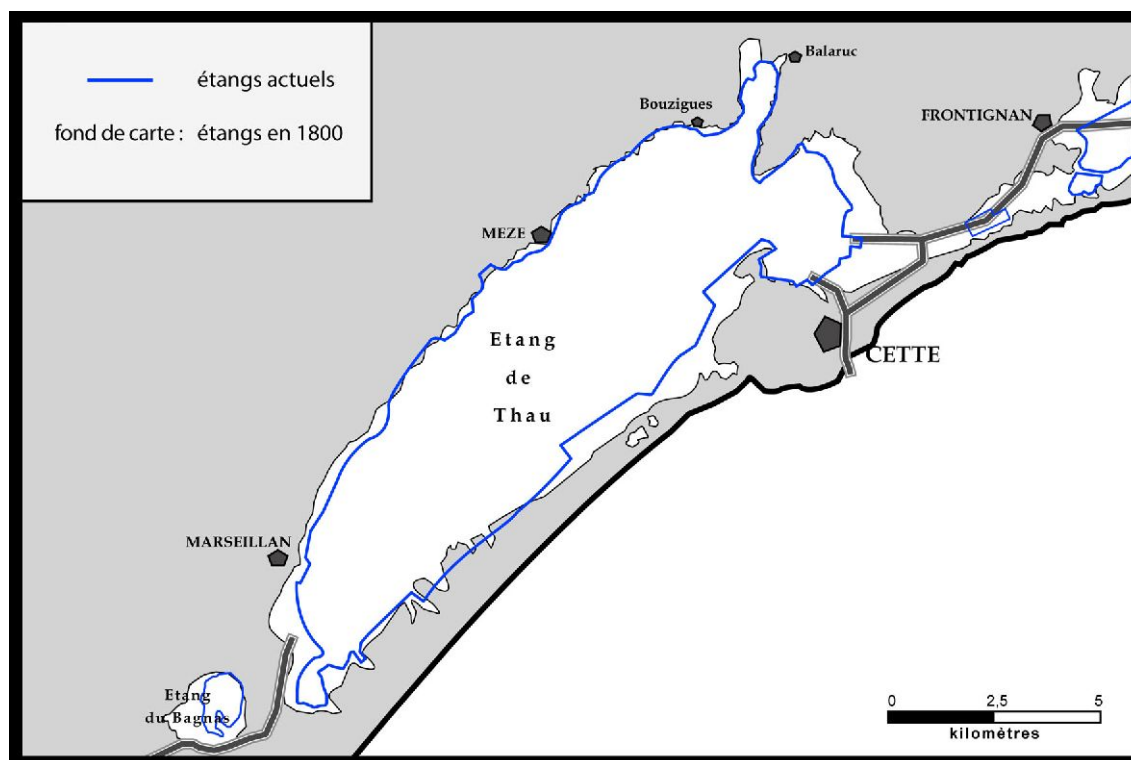
L'action de la mer par l'avancée du lido est aujourd'hui stoppée par les aménagements, notamment la route, qui constituent des points durs. Cependant cela a entraîné une érosion accrue des plages car les sédiments arrachés lors des tempêtes sont renvoyés au large au lieu d'être projetés vers la lagune.

Les aménagements et remblaiements ont constitué dans le passé une cause importante de comblement (construction des ports, gain de terrains urbanisables...) tout en restant limités par rapport à la taille de l'étang. Ces actions sont aujourd'hui limitées par la législation en vigueur.

Compte tenu de la faible importance des autres sources d'apports, la production biologique est donc la principale cause de comblement sur l'étang de Thau. Elle reste tout de même limitée par rapport aux autres lagunes et ne menace pas la pérennité de l'étang d'après le SMNLR (Girard, 1992). Mais l'accumulation de matière organique et de macroalgues mortes constitue un problème pour la qualité des eaux et peut favoriser le départ de malâigues.

c- Évolution future

La problématique du comblement n'est pas préoccupante sur l'étang de Thau et ne le menace pas. La superficie et la profondeur importantes suffisent à assurer sa pérennité durant encore près de 30 siècles (Girard, 1992).



Carte 12: Évolution de la surface de l'étang de Thau au cours des deux derniers siècles

IV.3.7. Étangs Palavasiens

a- Évolution historique

L'évolution des étangs Palavasiens prend place dans une série de lagunes anciennes. Au début de l'Holocène, un cordon littoral est en effet attesté au niveau d'un paléolittoral situé à -30 m par rapport au niveau actuel (Aloisi *et al.*, 1975). Celui-ci est remanié et submergé au début de la transgression flandrienne. Un équilibre s'établit vers 8000 BP entre les apports fluviaux et la remontée marine. Les travaux archéologiques et palynologiques (Planchais, 1987 ; Ambert, 1986 ; Ambert et Chabal, 1992) nous renseignent à partir de là sur le devenir du site :

- **De 8000 à 5000 BP** : transgression marine

Le milieu est marin avec d'importants apports terrestres. Au niveau de l'estuaire du lez la sédimentation est de l'ordre de 6,6 mm/an. Le cordon littoral se construit lentement, aux alentours de 6000 BP certains îlots développent déjà une végétation dunaire et la dynamique marine se fait plus faible (l'eau douce domine l'estuaire du Lez).

- **De 5000 à environ 4000 BP** : stabilisation du niveau marin

Le niveau marin se stabilise à un niveau sensiblement égal au niveau actuel. La sédimentation est très faible (0,37 mm/an). La dérive littorale poursuit l'édification du lido qui est encore largement ouvert. En fin de période, les premiers impacts humains se font sentir. Les déboisements par le feu entraînent une érosion accrue des versants visible dans les sédiments de l'estuaire du Lez.

- **De 4000 BP jusqu'au XVII^{ème} siècle** : comblement et fermeture progressive

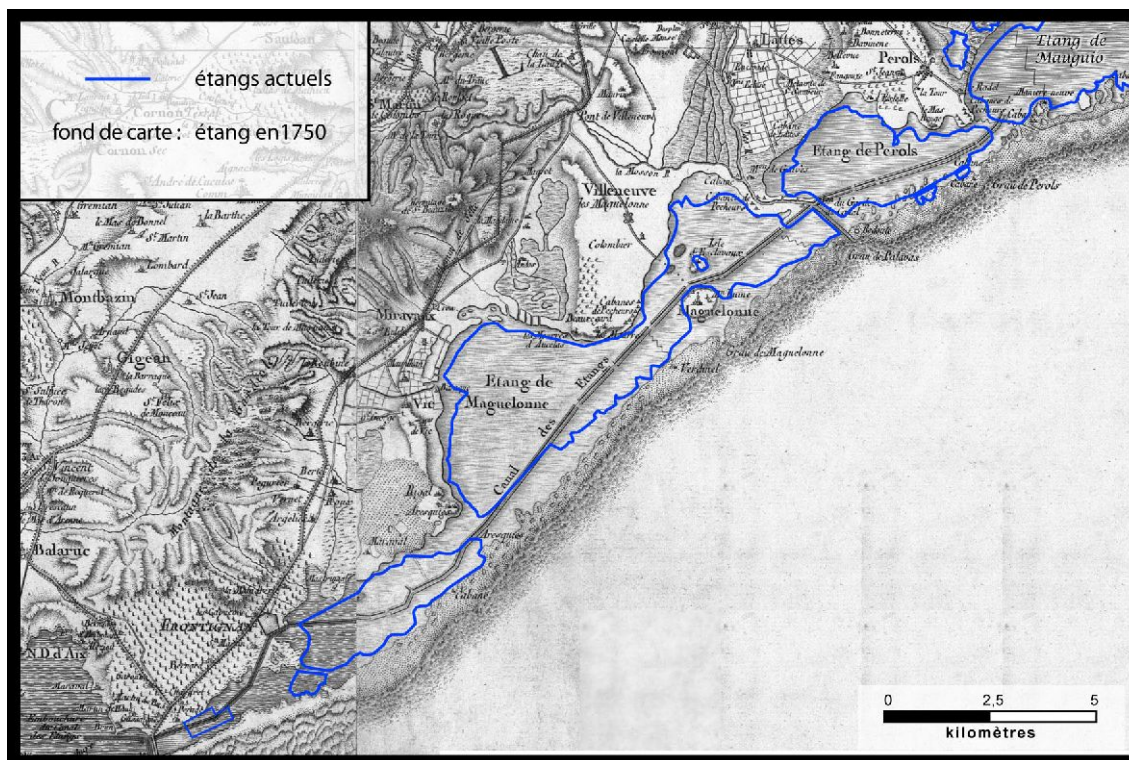
La sédimentation depuis cette période est d'environ 1 mm/an. A l'époque Romaine, le lido est situé plus au large et ouvert par de nombreux graus. La lagune est plus profonde et plus large que l'actuelle, elle se prolonge jusqu'à la cité de *Lattara* qui héberge un important port. La cité est entourée par les deux bras du delta du Lez. Un seul plan d'eau réunit alors l'ensemble des étangs Palavasiens et l'étang de l'Or. À l'ouest un large bras permet la communication avec l'étang de Thau. La faune marine est très présente dans l'étang comme en témoigne la sédimentation essentiellement sableuse et les récits de l'époque :

« Il y a dans la province de Narbonnaise, sur le territoire de Nîmes, un étang appelé Latera où les dauphins pêchent de société avec l'homme. » - Pline l'ancien, Histoire naturelle livre IX, 77 après J.C.

A partir de l'an 150 après J.-C. le niveau marin qui était alors légèrement plus élevé redescend au niveau actuel. Le lido se consolide et se recouvre d'une forêt qui sera défrichée au cours du XIV^{ème} siècle. Par ailleurs le comblement se poursuit avec la progression du lido vers la terre et les apports du delta du Lez. Son débit alors plus important permet d'entretenir un grau ouvert en face de l'embouchure. Le comblement se poursuit avec pour principales causes les apports terrestres et l'avancée du lido.

- **Depuis le XVII^{ème} siècle** :

A la fin du XVII^{ème} siècle, l'envasement des étangs devient problématique pour la navigation (voir ordonnance de dragage page 16). Afin de relier le Canal du Midi au Rhône la construction d'un « canal des étangs » (l'actuel canal du Rhône à Sète) est alors entreprise. C'est le début d'une série de travaux (canaux, déviation et endiguement de cours d'eau...) qui vont accélérer la fragmentation de la lagune en plusieurs étangs (Carte 13).

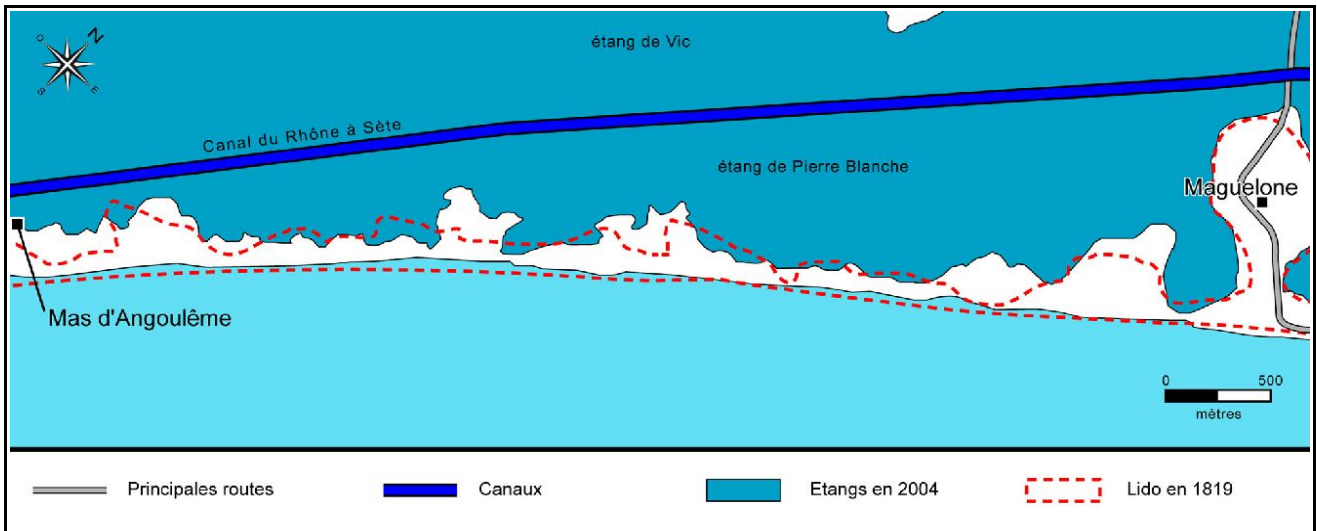


Carte 13: Évolution des étangs Palavasiens depuis le XVIII^{ème} siècle

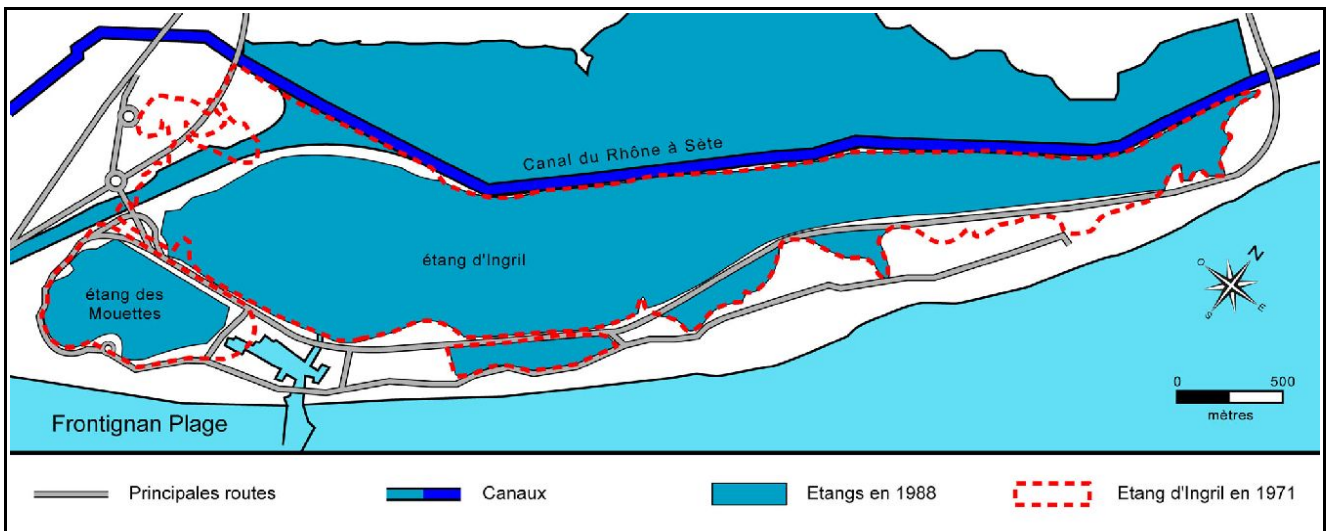
b- Modes de comblement

La fragmentation des étangs Palavasiens par le canal du Rhône à Sète permet de différencier deux groupes. Les étangs situés au nord du canal se comblent par les apports terrestres, les étangs situés au sud sont soumis aux dynamiques marines (Carte 14). La production biologique est également importante, elle est directement liée à l'état vis à vis de l'eutrophisation des étangs, enrichis par les rejets directs et les apports du canal du Rhône à Sète. Cette mauvaise qualité des eaux favorise également la prolifération du cascaïl (*Ficopomatus enigmaticus*).

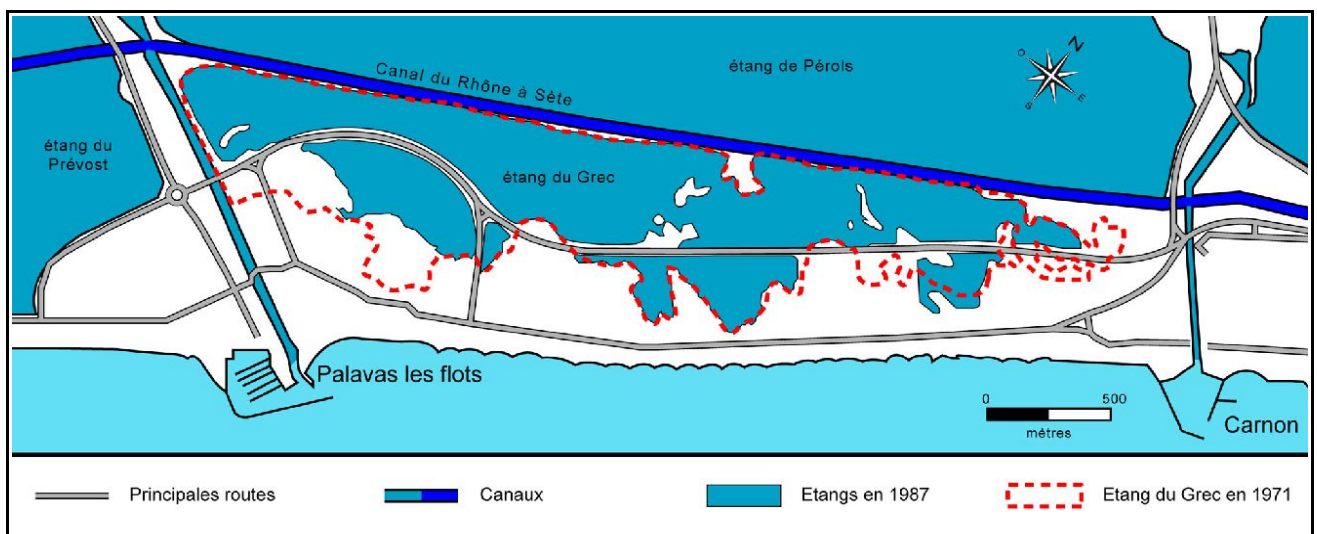
Les étangs les plus proches des villes ont également subi des remblaiements suite à l'expansion urbaine et aux aménagements touristiques (cartes 15 et 16). Les infrastructures de transport notamment segmentent les étangs en les traversant.



Carte 14: Comblement de l'étang de Pierre Blanche par l'action de la mer au cours des derniers siècles



Carte 15: Évolution de l'étang d'Ingril entre 1971 et 1988 (d'après des données Girard, 1992)



Carte 16: Évolution de l'étang du Grec entre 1971 et 1987 (d'après des données Girard, 1992)

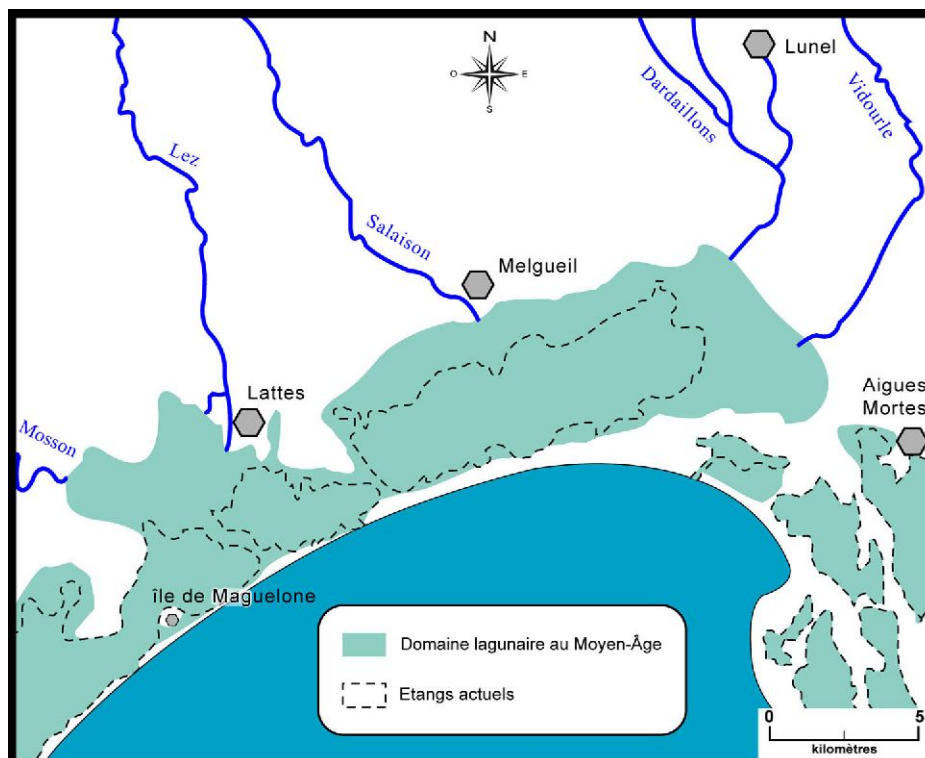
c- Évolution future

L'évolution du complexe Palavasiens est extrêmement variable d'un étang à l'autre. Les estimations faites par le SMNLR (Girard, 1992) donnaient une espérance de vie de quelques décennies pour l'étang de l'Arnel (soumis aux apports directs de la Mosson), d'environ 80 ans pour l'étang du Méjean et de près de 600 ans pour l'étang de Vic. Les travaux menés au cours de cette étude en partenariat avec le laboratoire Géosciences (Université de Montpellier II) ont permis de préciser les taux de sédimentation récents sur les étangs Palavasiens, ils seront précisés dans le chapitre suivant (IV.4. page 72).

IV.3.8. Étang de Mauguio ou de l'Or

a- Évolution historique

La formation et l'évolution de l'étang de l'Or est similaire à celle des étangs Palavasiens avec lesquels il était largement relié dans le passé (voir IV.3.7.a- page 67). Il était certainement plus étendu vers l'Est et a été comblé par d'anciens bras du Rhône qui débouchaient encore dans le secteur au Moyen-Âge (Carte 17). Moins fragmenté par les aménagements que le secteur palavasien (le canal passe ici sur le lido et non au milieu de l'étang) l'étang a mieux résisté au comblement. Il conserve aujourd'hui une profondeur moyenne supérieure à 1 m et près de 3000 ha de plan d'eau.



Carte 17: Évolution de l'étang de l'Or depuis le Moyen-Âge (d'après Ambert, 1992 modifié)

b- Modes de comblement

Tous les modes de comblement évoqués semblent être présents sur l'étang de l'Or. D'après le SMNLR (Girard, 1992) les facteurs dominants sont les dynamiques terrestres (environ 2/3) et biologiques (1/3).

Les apports proviennent des principaux cours d'eaux du bassin versant et du canal de Lunel. Le ruisseau du Salaisien a par le passé progressé en édifiant un delta sur la lagune. Les aménagements réalisés au cours du XX^{ème} siècle, notamment l'endiguement et le creusement du bras de décharge sont cependant susceptibles d'avoir modifié cette dynamique. Il est d'ailleurs possible de constater une érosion au niveau de la pointe du Salaisien (Figure 35).

Par ailleurs, les bordures de l'étang de l'Or présentent de nombreux secteurs en conquête terrestre (Figure 36).



Figure 35: Érosion du delta du Salaision (étang de l'Or)



Figure 36: Zone de conquête terrestre (étang de l'Or)

La production biologique forte est dominée par le plancton. C'est le résultat d'un important confinement du plan d'eau ainsi que du sérieux problème d'eutrophisation. Ce dernier est lié à des apports domestiques et agricoles importants, de nombreux efforts sont entrepris pour tenter de les limiter. L'édification de massifs de cascaïls (*Ficopomatus enigmaticus*) participe également à ce comblement.

Les dynamiques marines semblent avoir été importantes dans le passé comme en témoigne les vastes cônes de débordement de tempête. Les plus importants, aujourd'hui stabilisés par la végétation, datent certainement du petit âge glaciaire (Dezileau, communication personnelle). Avec les aménagements touristiques du lido (routes, stations balnéaires) et la mise en œuvre de protections des plages, cette dynamique de comblement semble aujourd'hui figée. Les échanges par le grau de Carnon sont quant à eux réduits, son fonctionnement global permet d'évacuer une faible quantité de sédiments (Girard, 1992).

Des remblaiements volontaires de l'étang ont été effectués dans le passé (aéroport, routes, cabanisation...) ils ont représenté une surface atteinte limitée par rapport à d'autres étangs et sont aujourd'hui encadrés par la loi.

c- Évolution future

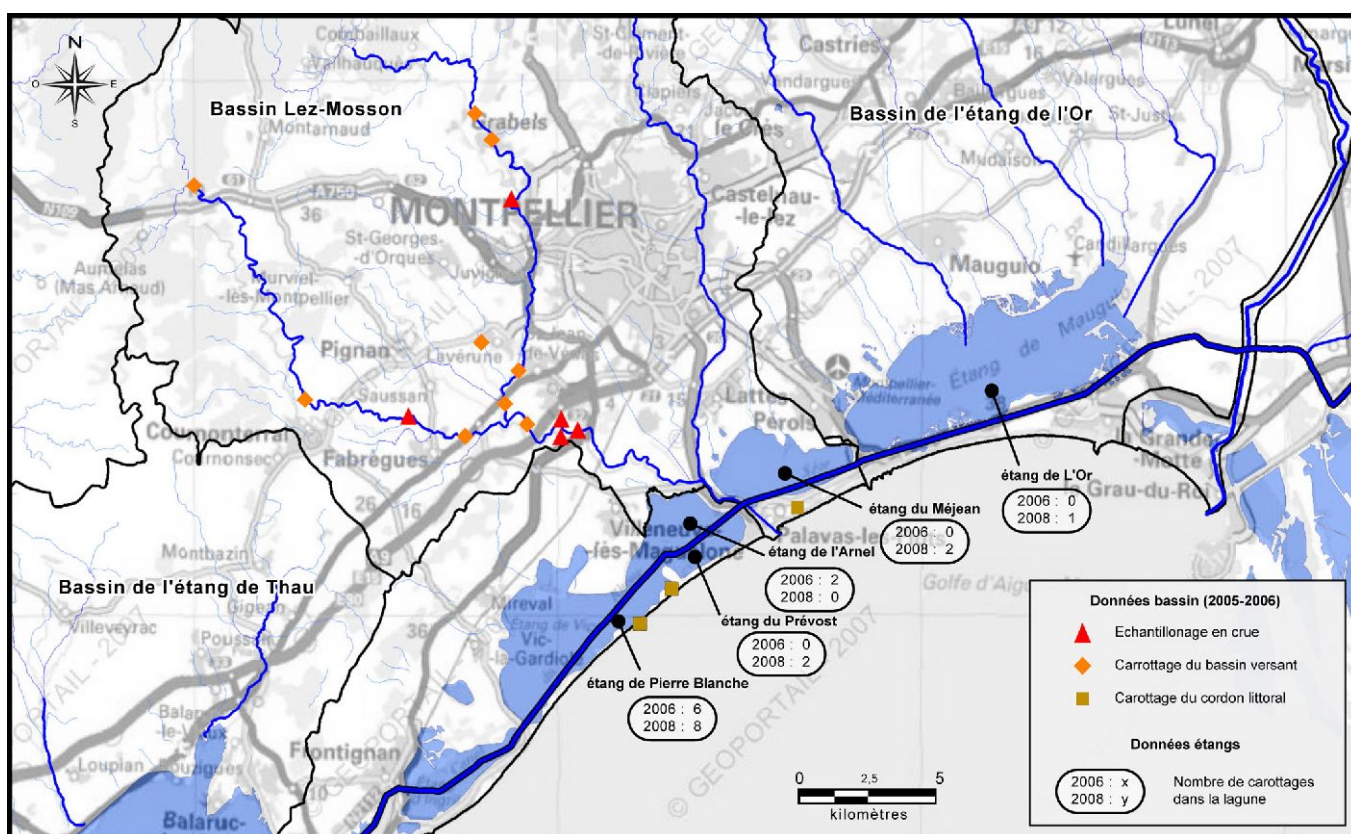
L'évolution de l'étang de l'Or est soumise à des dynamiques importantes, cependant au vu de la vaste étendue qu'il occupe la problématique du comblement reste peu urgente, sa durée de vie est estimée à 600 ans par le SMNLR (Girard, 1992). La prolifération rapide du cascaïl est cependant susceptible de causer une élévation rapide du fond dans certains secteurs ce qui peut causer une gêne pour la navigation et la circulation des eaux.

IV.4) Travaux d'estimation du comblement sur les étangs palavasiens

Dans le cadre de cette étude, un partenariat avec le laboratoire Géosciences de l'Université de Montpellier II a été mis en place. Laurent Dezileau, géochimiste et paléoclimatologue, mène actuellement des travaux sur la reconstitution des événements climatiques extrêmes du passé (tempêtes et crues) à partir des sédiments des étangs palavasiens. Le rapprochement des deux thématiques est apparu intéressant. Dans ce cadre, nous avons réalisé des carottages et des analyses sédimentologiques afin d'estimer la vitesse de comblement des étangs.

IV.4.1. Le site étudié : le complexe lagunaire du golfe d'Aigues-Mortes

Le complexe lagunaire du golfe d'Aigues-Mortes formait autrefois une lagune continue qui s'est progressivement segmentée. L'existence sur le secteur de deux relevés bathymétriques pour les étangs palavasiens (1965 et 2005) ainsi que de données de carottages réalisés depuis 2005 (Carte 18) par le laboratoire Géosciences (Sabatier, 2006 ; Sabatier *et al.*, 2008) constitue un important point de départ pour la comparaison des méthodes d'estimation.



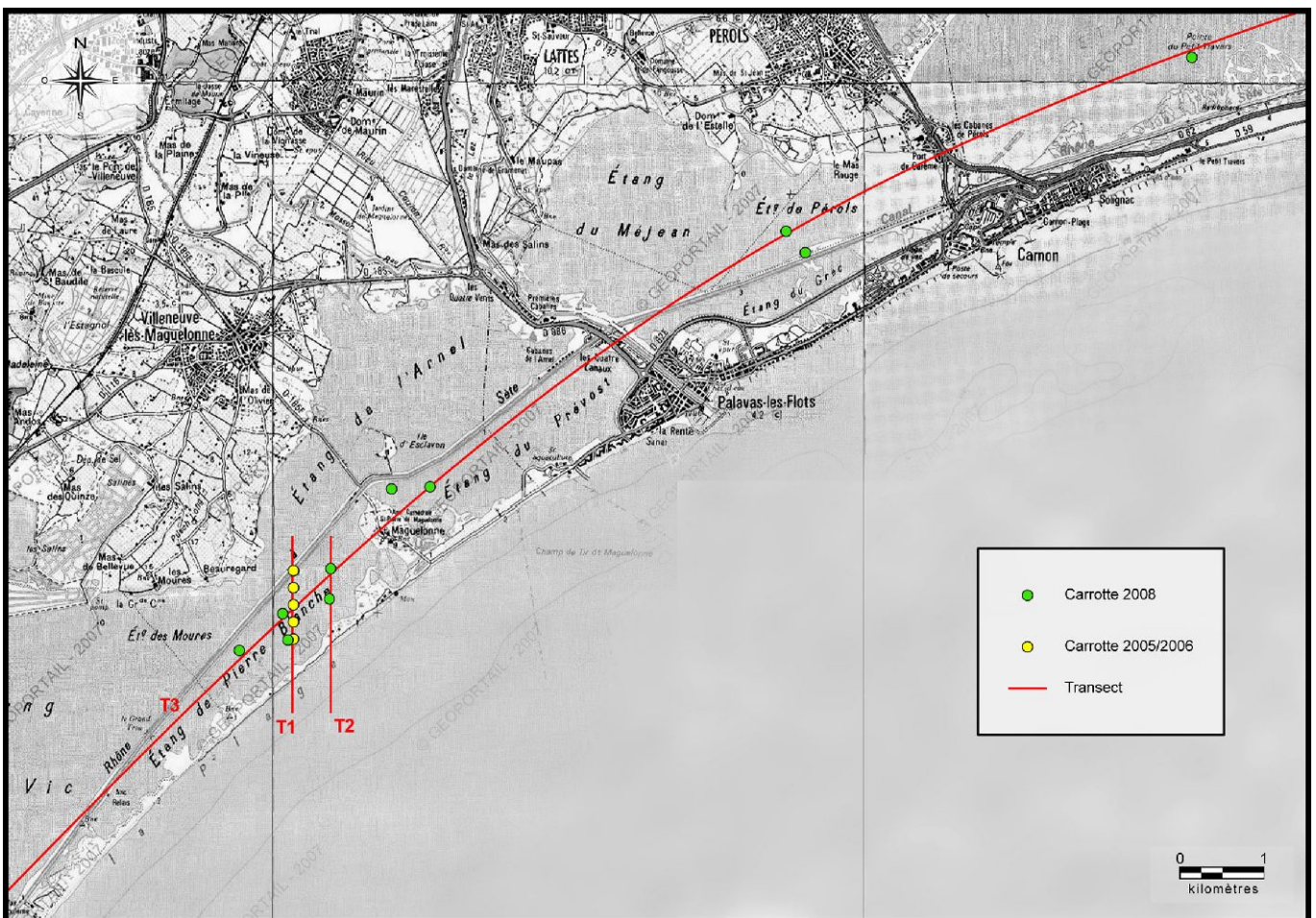
Carte 18: Localisation du site d'étude et données sédimentologiques disponibles

a- Nouveaux points de carottages

Deux campagnes de carottages ont été réalisées. La première effectuée le 16 mai 2008 a mobilisé une barge de l'IFREMER (Figure 37) pour échantillonner un transect dans l'étang de Pierre-Blanche ainsi qu'un point d'étude dans l'étang du Prévost. La seconde mission conduite le 4 juillet 2008 a permis d'effectuer des prélèvements dans les étangs de l'Or et du Méjean. L'ensemble des carottages ont été réparti de façon à constituer des transects (Carte 19).



Figure 37: Campagne de carottage dans l'étang de Pierre Blanche



Carte 19: Localisation des carottages dans les étangs palavasiens

b- Mise en place d'une station de mesure

Parallèlement à cette étude, un partenariat plus large est également en cours d'élaboration afin de constituer une équipe de recherche internationale sur les problématiques des milieux lagunaires et littoraux. Des partenaires de l'IFREMER (stations de Sète et Brest), du laboratoire Géosciences (Université de Montpellier 2), du laboratoire MSNM (Université d'Aix-Marseille) et du Taganrog Institute of Technology (Russie) sont actuellement mobilisées sur ce projet.

Durant l'été, la station de mesure « LAGUNA » a été mise en place dans l'étang de Pierre Blanche (Figure 38). Elle est destinée à enregistrer des données concernant la courantologie et le transport sédimentaire dans la lagune. Postée à proximité du lido elle devrait permettre de suivre des événements de tempête et leur impact sur le comblement.

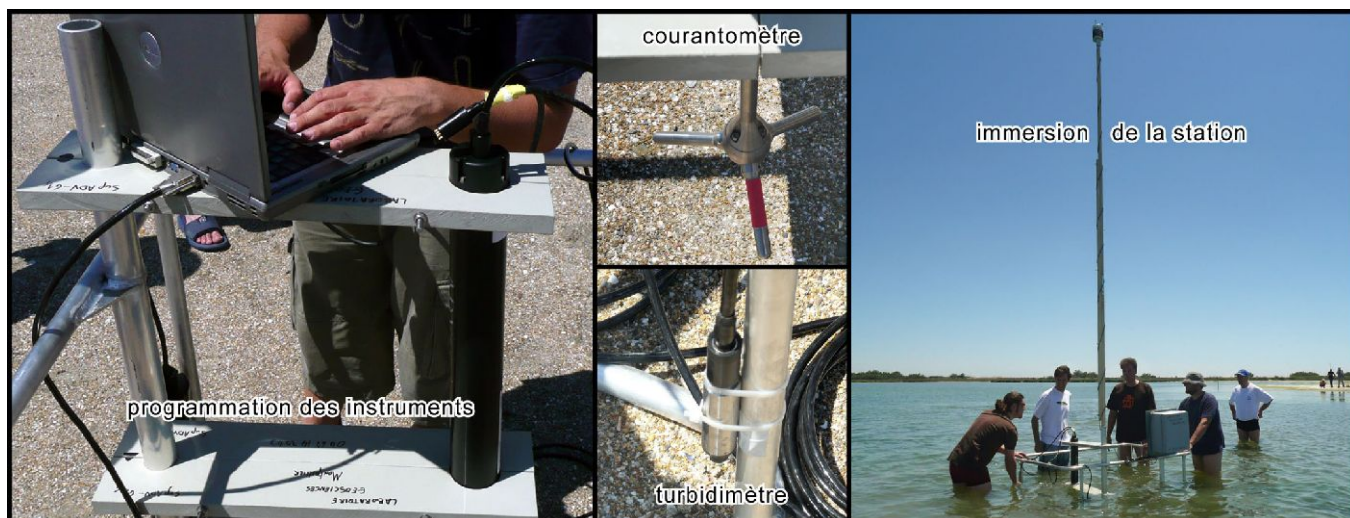


Figure 38: Mise en place de la station de mesures LAGUNA

IV.4.2. Étude du comblement par carottages

a- Analyse des sédiments

Les sédiments prélevés par carottages ont subi diverses analyses. La granulométrie des échantillons a été mesurée pour tous les centimètres avec un granulomètre laser (voir protocole en annexe). Des photographies par rayon-X (radiographies) et des analyses géochimiques par spectrométrie-XRF ont également été réalisées avec la participation d'un laboratoire de l'Université de Bordeaux. A l'heure actuelle, l'ensemble des analyses ne sont pas terminées, le tableau suivant fait l'état de l'avancement actuel des analyses.

Tableau 12: Avancement des analyses des carottes sédimentaires

étang	carotte	Longueur (cm)	Rayons X	XRF	granulométrie
Pierre Blanche	PB08-1	63	-	-	-
	PB08-2	73	-	-	-
	PB08-3 PB08-3 bis (longue)	70 130	OK	OK	OK
	PB08-4	75	OK	OK	-
	PB08-5 PB08-5 bis (longue)	84 104	OK	OK	OK
	Prévost	PB08-6	65	OK	OK
EG08		144	OK	OK	OK
Méjean Perols	MEJ08-1	90	OK	-	-
	MEJ08-C	50	OK	-	-
Or	OR08-1	149	OK	-	-

b- Estimation de la vitesse de comblement

L'estimation de la vitesse de comblement suppose de connaître à la fois les caractéristiques sédimentaires de la carotte (granulométrie) et l'époque de chaque niveau d'accumulation. Les analyses radiochronologiques étant particulièrement longues (une semaine d'analyse par centimètre de carotte), elles n'ont pas pu être réalisées au cours de ce stage. Cependant, grâce aux travaux préexistants sur le secteur il a été possible d'effectuer une datation relative des événements dans les nouvelles carottes prélevées. La datation utilisée se base sur des carottes du laboratoire Géosciences prélevées en 2005/2006. Celles-ci sont parfaitement datées par des analyses au plomb 210 (^{210}Pb) et au carbone 14 (^{14}C). De plus, les principaux événements de tempêtes ont pu être datés avec précision grâce à une corrélation de l'ensemble des analyses (géochimiques, granulométriques, faunistiques) avec les archives textuelles régionales étudiées par le laboratoire archéologique de Lattes (Figure 39).

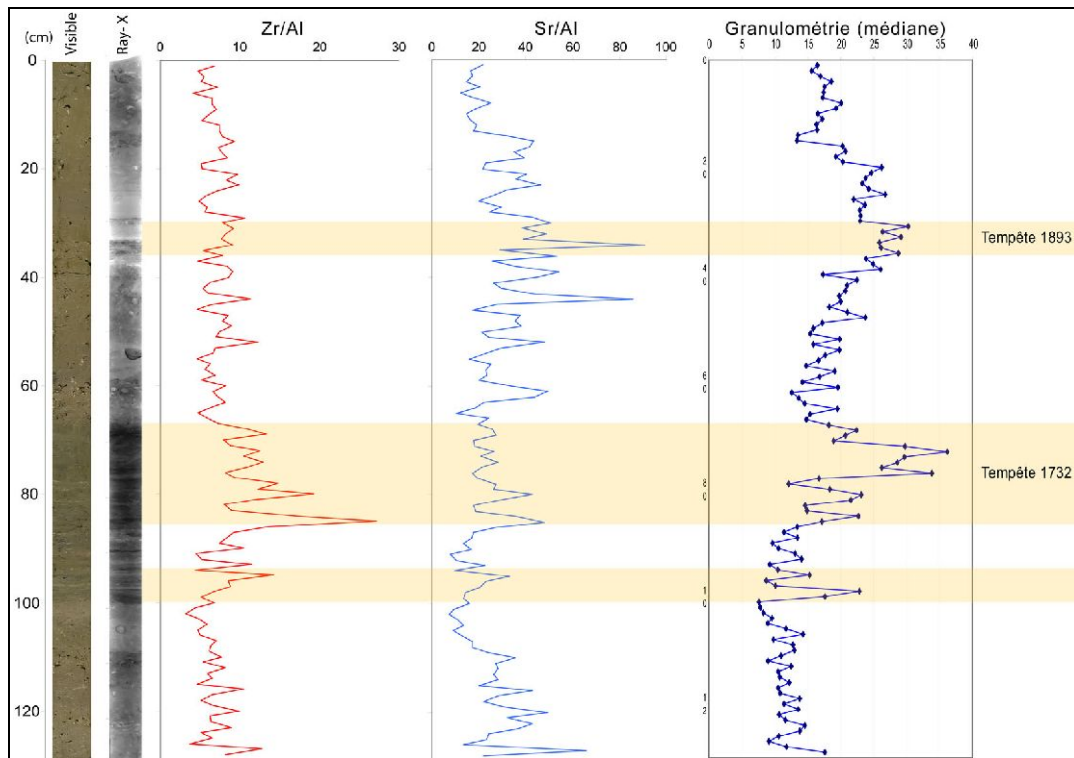


Figure 39: Corrélation des résultats sur une carotte de l'étang de Pierre Blanche

La figure 40 présente les résultats obtenus pour le transect parallèle au littoral sur les étangs de Pierre Blanche et du Prévost. Pour la carotte échantillonnée dans l'étang de l'Or, l'aspect visuel et la photographie aux rayons-X montrent une part importante de sable sur l'ensemble de la colonne sédimentaire. Il est donc fortement probable que l'analyse granulométrique ne permette pas de différencier avec précision les événements de tempête pour permettre une datation. Des analyses radiochronologiques pourraient par contre apporter un éclairage. L'échantillonnage a vraisemblablement été effectué sur un site trop proche d'un cône de tempête existant. Il conviendra de s'éloigner plus du cordon littoral lors de futures campagnes de carottages.

La vitesse de comblement est calculée en divisant la profondeur de l'évènement de tempête daté par le temps écoulé depuis cet évènement. Les premiers calculs effectués permettent d'estimer la vitesse de sédimentation récente qui est en moyenne de 3,1 mm/an (Figure 40). Ces résultats sont du même ordre de grandeur que l'estimation réalisée par le SMNLR en 1992 qui était d'environ 4 mm/an. De plus, les analyses radio chronologiques effectuées sur les carottes de 2006 dans le cadre de la thèse de Pierre Sabatier semblent démontrer une accélération de la sédimentation au cours du dernier siècle. Il s'agit probablement là de l'impact des activités humaines sur le comblement des étangs.

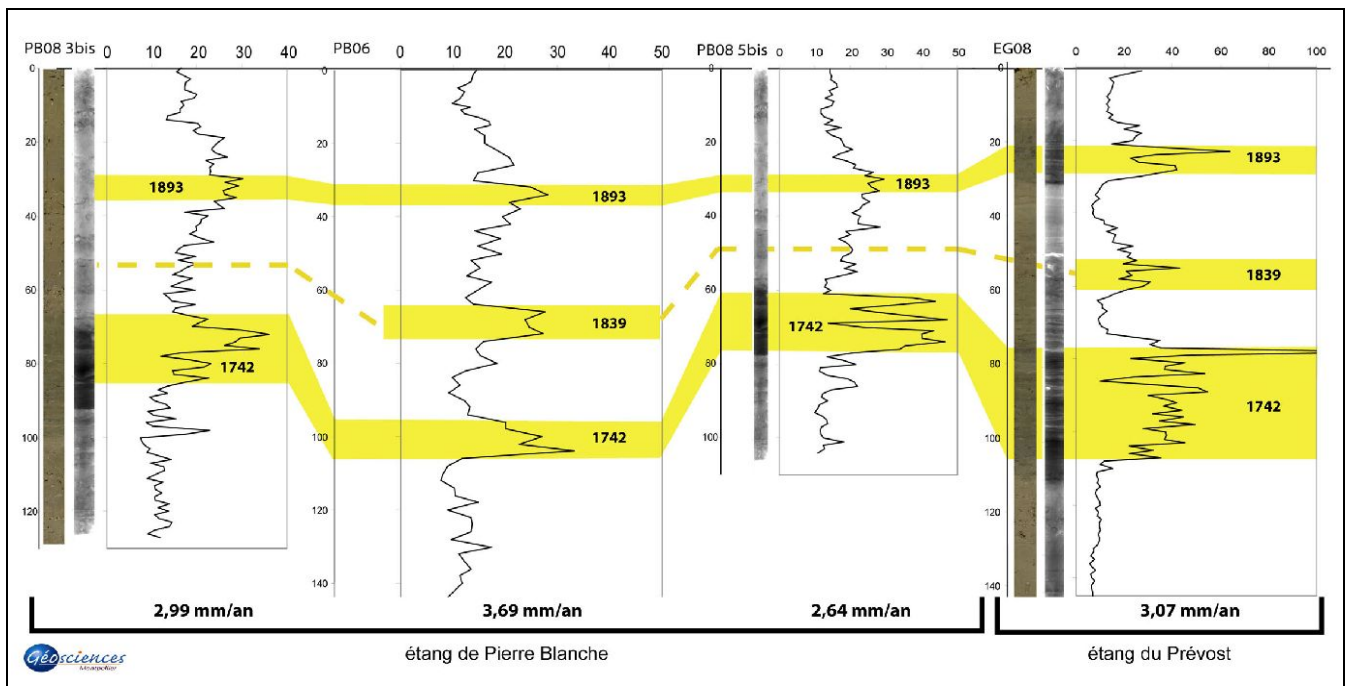


Figure 40: Le comblement des étangs de Pierre Blanche et du Prévost d'après la granulométrie

Note : Les carottes présentées représentent un transect s'étalant sur plusieurs kilomètres, le décalage qui peut paraître important ici entre les évènements sur les différentes carottes est en réalité relativement faible si l'on tient compte de cette distance.

IV.4.3. Étude de l'évolution bathymétrique

Un des objectifs poursuivi par ces travaux était de comparer deux méthodes d'estimation du comblement : l'analyse sédimentologique et l'évolution bathymétrique. L'étude de l'évolution bathymétrique des étangs palavasiens a cependant présenté plusieurs difficultés et n'a donc pu être réalisée dans le temps disponible.

La constitution d'un fichier exploitable à partir de la carte papier de 1965 s'est en effet avérée plus laborieuse que prévu. Outre le temps nécessaire à la numérisation des courbes de niveaux, l'absence de données quand au niveau de base utilisé pour le calcul des profondeurs indiquées (dépendantes du niveau d'eau ou rapportées au NGF ?) induit une incertitude sur le MNT qui peut en être déduit.

Par ailleurs, les fichiers bathymétriques récents (données SMNLR acquises auprès du SIEL) présentaient des lacunes au niveau des données de profondeur pour plusieurs étangs. Le même problème a été relevé avec d'autres données bathymétriques provenant du SMNLR (étang de Leucate et de Canet). Il a finalement pu être résolu avec l'aide du technicien SIG de l'IFREMER.

IV.4.4. Perspectives : la mise au point d'un outil d'estimation du comblement

Les analyses mises en œuvre au cours de cette étude présentent des résultats intéressants qui pourraient servir de base à l'élaboration d'une méthodologie d'estimation du comblement. Outre une méthode d'estimation simple de la vitesse de sédimentation, le futur outil de diagnostic devra permettre d'identifier les principales causes du comblement. Plusieurs indicateurs seront donc à sélectionner pour élaborer cette méthodologie applicable dans le cadre d'un suivi du comblement des étangs du Languedoc-Roussillon.

Voici une liste non exhaustive des indicateurs qui pourront être pris en compte :

- état actuel de l'étang (profondeur et superficie)
- existence de zones ou bassins plus confinés au sein de l'étang
- caractéristiques sédimentologiques de l'étang (origine des apports) et taux de sédimentation
- sensibilité de l'étang vis-à-vis de l'eutrophisation
- caractéristiques des cours d'eau tributaires (débits, transport solide, MES)
- identification des zones de progression de deltas
- caractéristiques des sols du bassin versant et sensibilité à l'érosion
- état du lido et risque de submersion en cas de tempête
- état de la végétation riveraine (zones de conquête ?)

La poursuite du partenariat avec le laboratoire Géosciences Montpellier dans le cadre d'une étude de deuxième phase destinée à élaborer cet outil est une voie à privilégier étant donné son expérience dans le domaine.

Conclusion : bilan de la situation des étangs face au comblement

Les différents éléments étudiés nous permettent de dresser un premier état des lieux concernant la problématique de comblement (Tableau 13). La situation des étangs face à la problématique de comblement est très diverse. Certains étangs se sont d'ores et déjà comblés dans le passé tels que les étangs de l'Aygal (Roussillon) et de Pissevaches. D'autres le seront très prochainement comme les étangs de Vendres ou de Canet. Plusieurs étangs sont en situation moins préoccupante, ils ont quelques siècles encore devant eux. Cet état des lieux demeure incomplet, l'étang de Gruissan et certains étangs du complexe Palavasien ne semblent pas avoir été étudiés. Par ailleurs, ce diagnostic repose sur des estimations issues de méthodes variées, parfois imprécises. Il devra être précisé par l'élaboration d'une méthodologie destinée à évaluer la vulnérabilité de chaque étang face à la problématique du comblement.

Tableau 13: Synthèse de la problématique comblement sur les étangs du Languedoc-Roussillon

	Comblement passé	Facteurs principaux	Sédimentation	Durée de comblement	
	Canet Saint-Nazaire	très avancé	apports terrestres (delta du Réart)	8 à 13 mm/an	20 à 30 ans
	Salses-Leucate	peu avancé	dynamiques terrestres entrées par les graus	non évaluée < 1 mm/an ?	3 000 ans
	La Palme	très avancé (aménagement)	conquête végétale	non évaluée < 1 mm/an ?	200 ans
Narbonnais	Gruissan	moyennement avancé	?	?	?
	Ayrolle	moyennement avancé	apports terrestres via Campagnol	non évaluée	< 100 ans
	Campagnol	très avancé	apports terrestres eutrophisation	non évaluée	< 50 ans
	Bages-Sigean	moyennement avancé	apports terrestres	1,5 mm/an	700 ans
	Vendres	très avancé (delta de l'Aude)	conquête végétale eutrophisation	non évaluée	en cours d'achèvement
	Grand Bagnas	très avancé	?	non évaluée	en cours d'achèvement
	Thau	peu avancé	production biologique	0,8 à 2,5 mm/an	3 000 ans
Palavasiens	Peyrade	très avancé (remblaiements)	?	non évaluée	100 ans ?
	Ingril Nord	très avancé (aménagement)	dynamiques terrestres	non évaluée	200 ans ?
	Ingril Sud		dynamiques marines	non évaluée	
	Pierre-Blanche	très avancé	dynamiques marines eutrophisation ?	3,11 mm/an	120 ans
	Vic	moyennement avancé	dynamiques terrestres eutrophisation	non évaluée	500 ans
	Arnel	très avancé	dynamiques terrestres eutrophisation	1 à 5 mm/an ?	50 ans
	Prévoist	très avancé	dynamiques marines	3,07 mm/an	230 ans
	Grec	très avancé (remblaiements)	dynamiques marines eutrophisation	non évaluée	150 ans ?
	Méjean / Pérol	très avancé	dynamiques terrestres eutrophisation	2 à 6 mm/an ?	130 ans
Or	moyennement avancé	dynamiques terrestres et biologiques	2 à 4 mm/an	600 ans	

Importance de la problématique de comblement : **urgente** ; **importante** ; **peu préoccupante** ; non évaluée

Conclusion et perspectives

La présente étude a fait le point sur l'état des connaissances en matière de comblement des lagunes méditerranéennes. A l'heure actuelle, les principales causes de comblement pour les lagunes à faible déficit hydrique (Nord de la Méditerranée) sont les apports terrestres et la production biologique et pour les lagunes à fort déficit hydrique (Sud de la Méditerranée) les dynamiques marines et les apports éoliens. Le comblement est un phénomène naturel de l'évolution des milieux lagunaires, cependant il est amplifié par les activités humaines. Aménagements du bassin versant, des lagunes et des lidos, rejets de particules en suspension et de nutriments aggravent dramatiquement ce phénomène de comblement.

Les méthodes permettant d'étudier le phénomène de comblement sont diverses, deux grands types de techniques se dégagent : les techniques directes et les techniques indirectes. Elles donnent accès à une vision différente du comblement en terme de précision et d'identification des causes. Ces deux techniques sont donc complémentaires pour l'étude du colmatage sédimentaire des lagunes.

La situation des lagunes du Languedoc-Roussillon face à cette problématique est hétérogène. Certaines sont en risque de comblement rapide (Canet, Vendres, Bagnas, Arnel) d'autres sont encore loin d'une situation préoccupante (Salses-Leucate, Thau). La sensibilité de chaque lagune devra cependant être précisée par une deuxième phase d'étude qui mettra au point une méthodologie d'évaluation applicable à l'ensemble des étangs littoraux.

Une troisième phase d'étude évaluera par la suite les possibilités d'actions pour gérer le comblement des lagunes. Il est d'ores et déjà possible de préconiser la poursuite des efforts entrepris pour la gestion de l'eutrophisation, notamment dans le cadre du RSL, puisque la production biologique est l'une des principales causes du comblement actuel des lagunes.

Bibliographie alphabétique

- Aagaard T., Davidson-Arnott R., Greenwood B., Nielsen J. (2004)** *Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution* - *Geomorphology* n°60-1/2, (p.205-224)
- Agence de l'Eau Seine-Normandie (2004)** *L'état des lieux du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands*, (p.82-83)
- Aloisi J.-C., Gadel F. (1992)** *Mécanismes sédimentogénétiques et évolution d'un écosystème lagunaire méditerranéen : l'étang de Vendres (Hérault)* - *Vie et milieu* n°42-2, (p.165-183)
- Aloisi J.C., Monaco A., Thommeret J. et Thommeret Y. (1975)** *Evolution paléogéographique du plateau continental languedocien dans le cadre du Golfe du Lion. Analyse comparée des données sismiques, sédimentologiques et radiométriques concernant le Quaternaire récent.* - *Revue de géologie dynamique et de géographie physique* n°17-1, (p.13-22)
- Ambert M. (1986)** *Le milieu naturel des étangs à l'époque médiévale* in : Les étangs à l'époque médiévale d'Aigues-Mortes à Maguelone - Musée archéologique de Lattes, (p.19-29)
- Ambert M., Chabal L. (1992)** *L'environnement de Lattara : potentialités et contraintes.* - *Lattara* n°5, (p.9-26)
- AquaExpert ; CEH (2004)** *Le rôle du cascaïl (Ficopomatus enigmaticus) dans le fonctionnement naturel des étangs littoraux du Languedoc-Roussillon.* - DIREN Languedoc-Roussillon , SMGEO , CG 11, (150p.)
- Baldock T.E., Weir F., Hughes M.G. (2007)** *Morphodynamic evolution of a coastal lagoon entrance during swash overwash.* - *Geomorphology* n°95-3/4, (p.398-411)
- Banas D., Capizzi S., Masson G., Leglize L., Wagner P., Pihan J.C. (2002)** *Nouvelles trappes à sédiment destinées aux milieux peu profonds vidangeables* - *Revue des sciences de l'eau* n°15, (p.263-272)
- Barrusseau J.P., Giresse P., Planchais N., Radakovitch O. (1992)** *La sédimentation lagunaire des derniers siècles en Languedoc-Roussillon.* - *Vie et Milieu* n°42-3/4, (p307-320)
- Beauchamp J. (2005)** *Cours de sédimentologie* - Université de Picardie <http://www.u-picardie.fr/~beaucham>
- Bellucci L.G. , Frignani M. Cochran JK, Albertazzi S., Zaggia L., Cecconi G. , Hopkins H. (2007)** *²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs as chronometers for salt marsh accretion in the Venice Lagoon, links to flooding frequency and climate change* - *Journal of Environmental Radioactivity* n°97-2/3, (p.85-102)
- Bertin X. , Chaumillon E., Sottolichio A. (2004)** *Evolution d'une embouchure tidale en réponse au comblement de la baie associée: la baie de Marennes-Oléron et le Pertuis de Maumusson* - VIII^{èmes} Journées Nationales Génie Civil et Génie Côtier - Compiègne, session 2, septembre 2004, (p.149-155)
- Bertin X., Chaumillon E. (2006)** *The implication of oyster farming in increasing sedimentation rates in a macrotidal bay : the Marennes-Oléron Bay, France* - Editions de la station biologique de Roscoff - Cahiers de biologie marine n°47-1, (p.19-22)
- Bertin X., Chaumillon E., Sottolichio A., Pedredos R. (2005)** *Tidal inlet response to sediment infilling of associated bay and possible implications of human activities : the Marennes-Oleron bay and the Maumusson Inlet* - *Continental Shelf Research* n°25, (p.1115-1131)
- Boucher de La Richarderie G. (1808)** *Bibliothèque universelle des voyages* - Treuttel et Würtz - Réédition en 1970 par Du Monde, tome 3 -section XIII "Voyages en Portugal et en Espagne", (p.498-499)
- Bouffet M. (1894)** *Atlas des ports maritimes de France, notice de Port La Nouvelle* - Ministère des Travaux Publics
- Boutière H. (1974)** *L'étang de Bages-Sigean, modèle de lagune méditerranéenne.* - *Vie et Milieu* n°24-1B, (p.23-58)
- Bout-Roumazeilles V., Combourieu-Nebout N., Peyron O., Cortijo E., Landais A., Masson-Delmotte V. (2007)** *Connection between South Mediterranean climate and North African atmospheric circulation during the last 50000 years BP North Atlantic cold events* - *Quaternary Science Review* n°26, (p.3197-3215)

- Brambati A., Carbognin L., Quaia T., Teatini P., Tosi L. (2003)** *The Lagoon of Venice : geological setting, evolution and land subsidence* - Journal of International Geoscience n°26-3, (p.264-268)
- Caldara M., Pennetta L., Simone O. (2002)** *Holocene evolution of the Salpi lagoon (Italy)* - Journal of Coastal Research, special issue n°36, (p.124-133)
- Campy M., Meybeck M. (1995)** *Les sédiments lacustres* - in Limnologie générale, Pourriot R., Meybeck M., Editions Masson, Paris, (p.185-226)
- Carter J., Owens P.N., Walling D.E., Leeks G.J.L. (2003)** *Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system* - The Science of the Total Environment n°314-316,
- Cataliotti-Valdina D. (1978)** *Modalités et bilan de la sédimentation pélagique dans un milieu margino-littoral : le complexe lagunaire de Bages-Sigean* - Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (203p.)
- Centre d'Etudes Hydrobiologiques (2003)** *Etat des connaissances scientifiques sur le ver constructeur de récifs Ficopomatus enigmaticus, dit "cascaïl"* - DIREN Languedoc-Roussillon , SMGEO , CG 11, (87p.)
- CETE Méditerranée (2001)** *Evolution du littoral sableux du Golfe du Lion – Rapport de 1ère phase d'étude*, SMNLR, (54p.)
- Courteau R. (2007)** *L'évaluation et la prévention du risque du tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer.* - Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, (168 p.)
- Crawford C.M., Macleod C.K.A., Mitchell M. (2003)** *Effects of shellfish farming on the benthic environment* - Aquaculture n°224-1/4, (p.117-140)
- Dabat M.H., Rudloff M.A. (1998)** *La valeur de préservation d'une lagune méditerranéenne menacée de comblement* - Rapport de contrat pour le G.I.P. Hydrosystèmes, Université de Montpellier I LAMETA, (29p.)
- Davis R.A., Fitzgerald D.M. (2003)** *Beaches and coasts* - Blackwell Publishing, (419p.)
- De Beaumont L.E. (1845)** *Leçons de géologie pratique* - Tome 1, Editions P. Bertrand, (558p.)
- Degetto S. , Cantaluppi C. (2004)** *Radiochemical methodology for the determination of the mass balance of suspended particulate materials exchanged at the inlets of the Venice Lagoon.* - Journal of Marine Systems n°51, (p.77-94)
- Dias J.M., Lopes J.F., Dkeyser I. (2000)** *Tidal propagation in Ria de Aveiro lagoon (Portugal)* - Phys. Chem. Earth (B) n°25-4, (p.369-374)
- Dinis J.L., Henriques V., Freitas M.C., Andrade C., Cosata P. (2006)** *Natural to anthropogenic forcing in the Holocene evolution of three coastal lagoons (Caldas da Rainha valley, Portugal)* - Quaternary International n°150, (p.41-51)
- Do Amaral P.G.C., Ledru M.P., Di Branco F.R., Giannini P.C.F. (2006)** *Late Holocene development of a mangrove ecosystem in southeastern Brazil (Itanhaém, state of São Paulo).* - Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology n°241-3/4, (p.608-620)
- Dokigo L. (1967)** *Les divagations des cours inférieurs des fleuves principaux débouchant dans le littoral de la haute Adriatique, au Nord du Pô, et l'extension des embouchures.* - Symposium on River Morphology, Berne, 25 sept. au 7 oct. 1967, (p.74-84)
- Douglas G. , Ford P., Palmer M., Noble R., Packett R. (2005)** *Identification of sediment sources in the Fitzroy river basin and estuary, Queensland, Australia* - Cooperative Research Centre for Coastal Zone, Technical Report n°13, (38p.)
- Drévès L., Chaussepied M. (2001)** *Restauration des écosystèmes côtiers* - IFREMER - Colloque Restauration des écosystèmes côtiers Brest, 8 et 9 nov. 2000, (376p.)
- Duboul-Ravazet C., Martin R. (1981)** *La sédimentation Holocène dans trois étangs du littoral du Languedoc-Roussillon* - Recueil des travaux du centre de recherche de sédimentologie marine de Perpignan, (p.69-85)
- Duport E., Gilbert F., Poggiale J.C., Dedieu K., Rabouille C., Stora G. (2007)** *Benthic macrofauna and sediment reworking quantification in contrasted environments in the Thau Lagoon* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°72-3, (p.522-533)
- Ehrhold A. (1999)** *Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire en régime macrotidal : la baie du Mont Saint Michel.* - Thèse de doctorat de l'université de Caen, (303p.)

- Fabricius K.E. (2005)** *Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs : review and synthesis* - Marine Pollution Bulletin n°50, (p.125-146)
- Fiandino M. (2004)** *Flux de matières en suspension des fleuves côtiers se jetant dans l'étang de Berre.* - La Houille Blanche n°4, (p.97-101)
- Fiandrino A., Laugier T. (2007)** *Modélisation de l'impact de l'ouverture de graus à travers le lido sur la circulation des masses d'eau dans la lagune de Thau en période estivale* - Rapport intermédiaire, IFREMER (35p.)
- Fisher J.J. (1968)** *Barrier island formation discussion* - GSA Bulletin n°79-10, (p.1421-1426)
- Fitzgerald D.M, Kraus N.C., Hands E.B. (2000)** *Natural mechanisms of sediment by-passing at tidal inlets.* - US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, CHETN IV-30, (10p.)
- Fontolan G., Pillon S., Delli-Quadri F., Bezzi A. (2007)** *Sediment storage at tidal inlets in northern Adriatic lagoons : Ebb-tidal delta morphodynamics, conservation and sand use strategies* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°75, (p.261-277)
- Frignani M., Langone L., Ravaioli M., Sorgente D., Alvisi F., Albertazzi S. (2005)** *Fine-sediment mass balance in the western Adriatic continental-shelf over a century time scale.* - Marine Geology n°222-223, (p.113-133)
- Gerino M., Frignani M., Mugnai C., Bellucci L.G., Prevedelli D., Valentini A., Castelli A., Delmotte S., Sauvage S. (2007)** *Bioturbation in the Venue Lagoon : Rates and relationship to organisms* - Acta Oeologica n°32, (p.14-25)
- GIEC (2007)** *Bilan 2007 des changements climatiques* - 4^{ème} rapport de synthèse du GIEC, OMM & PNUE, Genève, (103p.)
- Gilbert G.K. (1885)** *The topographic features of lake shores* - US Geologic Survey 5th annual report, (p.67-123)
- Gindre D. (2005)** *La régulation des populations de ragondins (Myocastor coypus) sur l'étang de l'Or (Hérault, France)* - Aestuarina n°6 – in. Paroles des Marais Atlantiques : La gestion des espèces exotiques envahissantes en zones humides, (p.183-191)
- Girard J.L. (1992)** *Le comblement des étangs* - Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon, (62p.)
- Goel M. K., Sharad K.J., Agarwal P. K. (2002)** *Assessment of sediment deposition rate in Bargi Reservoir using digital image processing* - Journal des Sciences Hydrologiques n°47(S), (p.81-92)
- Golbuu Y., Vicotr S., Wolanski E., Richmond R.H. (2003)** *Trapping of fine sediment in a semi-enclosed bay, Palau, Micronesia* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°57, (p.941-949)
- Gong W., Shen J., Jia J. (2008)** *The impact of human activities on the flushing properties of a semi-enclosed lagoon: Xiaohai (Hainan, China)* - Marine Environmental Research n°65, (p.62-76)
- Gouze E., Raimbault P., Garcia N., Bernard G., Picon P. (2008)** *Apports de nutriments et de matières en suspension à l'étang de Berre (France) : contribution des crues au bilan de matière.* - Comptes Rendus Geosciences n°340-4, (p.233-244)
- Graf G., Rosenberg R. (1997)** *Bioresuspension and biodeposition : a review* - Journal of Marine Systems n°11, (p.269-278)
- Grant J., Hatcher A., Scott D.B., Pocklington P., Schafer C.T., Winters G.V. (1995)** *A multidisciplinary approach to evaluating impacts of shellfish aquaculture on benthic communities* - Estuaries n°18, (p.124-144)
- Grenz C., Alliot E., Baudinet D., Héris L., Massé H. (1992)** *Impact des opérations de dévasage sur les flux de nutriments à l'interface eau-sédiment (Bassin de Thau – France)* - Vie et Milieu n°42-2, (p.157-164)
- Grillo S. (1992)** *Le difficile équilibre entre l'eau et la terre : projet de conservation de la lagune de Venise au XVII^{ème} siècle* – Mémoire de DEA, EHESS, Paris
- Grillo S. (2004)** *L'équilibre de la lagune vénitienne au XVII^{ème} siècle : naissance de l'approche moderne.* - in. Eau et développement dans l'Europe moderne sous la direction de S. Ciriaco, Editions MSH, Paris, (p.169-182)
- Guelorget. O., Perthuisot. J.P. (1983)** *Le domaine paralique: expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement.* - Travaux du laboratoire de géologie, Presses de l'ENS, Paris, (136p.)

- Guelorget O., Frisoni G.F., Ibrahim A., Jauzein A., Medhioub K., Clastere J., Maurin A., Rouchy J.M., Perthuisot J.P. (1984)** *Ombilics hydrauliques et chenaux, zones singulières des bassins paraliqes. Leurs caractéristiques biologiques et sédimentaires.* - 5ème congrès Européen de Sédimentologie, Marseille, (abst. 202-203)
- Guelorget O. (1985)** *Entre mer et continent : contribution à l'étude du domaine paraliq -* Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, (721p.)
- Guerzoni S., Molinaroli E., Chester R. (1997)** *Sahara dust inputs to the western Mediterranean Sea : depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications.* - Deep-Sea Research II n°44-3/4, (p.631-654)
- Hearn C.J., Lukatelich R.J., McComb A.J. (1994)** *Coastal lagoon ecosystem modelling.* - Coastal Lagoon Processes - edited by B.Kjerfve, (p.471-505)
- Hoyt J.H. (1967)** *Barrier island formation* - GSA Bulletin n°78-9, (p.1125-1136)
- IFREMER (2006)** *Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc-Roussillon : Bilan des résultats 2005* - Rapport RSL 06, (450p.)
- IFREMER (2008)** *Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc-Roussillon : Bilan des résultats 2007* - Rapport RSL 08, (363p.)
- Johnson D.W. (1919)** *Shore processes and shoreline development* - Hafner Publishing Co, New York, (584p.)
- Kitheka J.U., Obiero M., Nthenge P. (2005)** *River discharge, sediment transport and exchange in the Tana estuary, Kenya* - Estuarine Coastal and Shelf Sciences n°63, (p.455-468)
- Kunii H. (2000)** *Lake Shinji and Lake Nakaumi : land reclamation history* - Japanese Journal of Limnology n°61-2, (p.192-194)
- Larras J. (1964)** *Embouchures, estuaires, lagunes et deltas.* - Editions Eyrolles, (172p.)
- Le Callonnec L., Person A., Renard M., Létolle R., Nebout N., Ben-Khelifa L., Rubanov I. (2005)** *Données préliminaires sur les changements géochimiques de la mer d'Aral au cours des périodes de bas niveau depuis les derniers 9000 ans* - Comptes Rendus Geosciences n°337-12, (p.1035-1044)
- Le Roux S. (2008)** *Les vertus écologiques des bivalves.* - Le Marin, Vendredi 11 mai 2008, (p.8)
- Lentheric C. (1876)** *Les villes mortes du Golfe du Lion* – Plon, Réédition en 1989 par J. Bonnot, Paris, (524p.)
- Les Ecologistes de l'Euzière (1986)** *L'étang de Thau : fiche technique d'étude du milieu* - Ville de Sète, CRDP LR, (225p.)
- Liu, K., Fearn, M. L. (1993)** *Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama* – Geology n°21, (p.793-796)
- Lumborg U., Pejrup M. (2005)** *Modelling of cohesive sediment transport in a tidal lagoon - an annual budget.* - Marine Geology n°218, (p.1-16)
- Maanan M. (2003)** *Etude sédimentologique du remplissage de la lagune de Sidi Moussa* - Faculte des sciences El Jadida, (176p.)
- Madsen A.T., Murray A.S., Andersen T.J., Pejrup M. (2007)** *Temporal changes of accretion rates on an estuarine salt marsh during the late Holocene : Reflection of local changes ?* - Marine Geology n°242, (p.221-233)
- Magistrato alle Acque-Servizio Informativo (1993)** *Evoluzione morfologica della Laguna di Venezia in confronto batimetrico tra la batimetria del 1992 e del 1970* - Servizio Informativo
- Mallet A.L., Carver C.E., Landry T. (2006)** *Impact of suspended and off-bottom Eastern oyster culture on the benthic environment in eastern Canada* - Aquaculture n°255-1/4, (p.362-373)
- Mallet C., Howa H., Garlan T., Sottolichio A., Le Hir P., Michel D. (2000)** *Utilisation de techniques numérique et statistique pour décrire la circulation sédimentaire de l'embouchure de la Gironde.* - Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA, Sciences de la Terre et des planètes n°331-7, (p.491-497)
- Martin-Buscail R. (1978)** *Evolution holocène et actuelle des conditions de sédimentation dans le milieu lagunaire de Salses Leucate* – Thèse l'université Toulouse III, (210p.)

- Martin R., Gadel F. Y., Barusseau J. P. (1981)** *Holocene evolution of the Canet-St Nazaire lagoon (Golfe du Lion, France) as determined from a study of sediment properties.* - *Sedimentology* n° 28-6, (p.823-836)
- Masmoudi S., Yaïch C., Yamoun M. (2005)** *Evolution et morphodynamique des îles barrières et des flèches littorales associées à des embouchures microtidales dans le Sud-Est tunisien.* - *Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre* n°27, (p.65-81)
- Mc Cormack G. (1998)** *Nakaumi* - *Kyoto Journal* n°37, (6p.)
- Mc Gee W. D. (1890)** *Encroachments of the sea* - *The Forum* (Ed. by L.S. Metcalf) v.9, (p.437-449)
- Mc Tainsh G., Strong C. (2007)** *The role of aeolian dust in ecosystems* - *Geomorphology* n°89, (p.39-54)
- Mermillod-Blondin F., Carcaillet F., Rosenberg R. (2005)** *Biodiversity of benthic invertebrates and organic matter processing in shallow marine sediments: an experimental study* - *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* n°315-2, (p.187-209)
- Mesnager V., Ogier S., Bally G., Disnar J.R., Lottier N., Dedieu K., Rabouille C., Copard Y. (2007)** *Nutrient dynamics at the sediment-water interface in a Mediterranean lagoon (Thau, France): Influence of biodeposition by shellfish farming activities* - *Marine Environmental Research* n°63-3, (p.257-277)
- Mitchell I.M. (2006)** *In situ biodeposition rates of Pacific oysters (Crassostrea gigas) on a marine farm in Southern Tasmania* - *Aquaculture* n°257, (p.194-203)
- Mizugaki S., Nakamura F., Araya T. (2006)** *Using dendrogeomorphology and ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb radiochronology to estimate recent changes in sedimentation rates in Kushiro Mire, Northern Japan, resulting from land use change and river channelization.* - *CATENA* n°68-1, (p.25-40)
- Molinarioli E., Guerzoni S., Sarretta A. (2007)** *Links between hydrology and sedimentology in the lagoon of Venice, Italy* - *Journal of Marine Systems* n°68, (p.303-317)
- Morton R.A., Ward G.H., White W.A. (2000)** *Rates of sediment supply and sea-level rise in a large coastal lagoon (Laguna Madre)* - *Marine Geology* n°167, (p.261-284)
- Nichols M., Allen G.P. (1981)** *Sedimentary process in coastal lagoons* - *Marine Sciences* n° 33, (p.27-80)
- Oliveira A., Fortunato A.B., Rego J.R.L. (2006)** *Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Obidos lagoon (Portugal)* - *Continental Shelf Research* n°26, (p.917-942)
- Paskoff R. (2001)** *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, le mythe et la réalité* - Institut Océanographique, Paris, (200p.)
- Paulini I. & G. (1601)** *Un codice veneziano del 1600 per le acque e le foreste* - Libreria dello Stato, Roma, 1935
- Perthuisot J.P., Guelorget O. (1992)** *Morphologie, organisation hydrologique, hydrochimie et sédimentologie des bassins paraliques* - *Vie et Milieu* n°42-2, (p.93-109)
- Phleger F.B. (1969)** *Some general features of coastal lagoons.* - *Coastal lagoons, a symposium, UNAM & UNESCO* - Mexico Nov. 1967, (p.5-26)
- Planchais N. (1985)** *Analyse pollinique du remplissage Holocène de la lagune de Canet.* - *Ecologia Mediterranea* n°11-1, (p.117-127)
- Planchais N. (1987)** *Impact de l'Homme lors du remplissage de l'estuaire du Lez (Palavas, Hérault) mis en évidence par l'analyse pollinique.* - *Pollens et Spores* n°29-1, (p.73-88)
- Plus M., Maurer D., Stanisière J.-Y., Dumas F. (2006)** *Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale : le Bassin d'Arcachon* - *Rapport IFREMER RST/LER/AR/06.007*, (48p.)
- Pouvreau S., Bodoy A., Buestel D. (1999)** *In situ suspension feeding behaviour of the pearl oyster, Pinctada margaritifera: combined effects of body size and weather-related seston composition* - *Aquaculture* n°181-1/2, (p.91-113)

- Psutty N. P., Martinez M. L., Lopez-Portillo J. (2008)** *Interaction of alongshore sediment transport and habitat conditions at laguna La Mancha. Veracruz, Mexico.* - Colloque international "Le littoral : subir, dire, agir" - Lille, 16 au 18 janvier 2008, (7p.)
- Régy P. (1868)** *Rapport de l'ingénieur en chef sur l'assainissement du littoral méditerranéen de l'Hérault.* - Archives départementales de l'Hérault
- Rivera-Monroy V.H., Day J.W., Twilley R.R., Vera-Herrera F., Coronado-Molin C. (1995)** *Flux of nitrogen and sediment in a fringe mangrove forest in Terminos lagoon, Mexico* - Estuarine Coastal and Shelf Sciences n° 40, (p.139-160)
- Romani M., Carreno M., Belair C. (2008)** *Répondre à l'élévation du niveau de la mer en Languedoc-Roussillon* - Pole Relais Lagunes, CEN LR - La Lettre des Lagunes Hors-Série n°1, (19p.)
- Ruiz F., Rodriguez-Ramirez A., Caeceres L.M., Rodriguez-Vidal J., Carretero M.I., Abad M., Olias M., Pozo M. (2005)** *Evidence of high-energy events in the geological record: Mid-holocene evolution of the southwestern Donana National Park (SW Spain)* - Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology n°229, (p.212-229)
- Sabatier P. (2006)** *Reconstitution paléoclimatique des événements extrêmes dans le Golfe d'Aigues-Mortes à travers l'étude des archives sédimentaires des lagunes palavasiennes* – Mémoire de Master 2 recherche sous la direction de Dezileau L., Université de Montpellier 2, (48p.)
- Sabatier P., Dezileau L., Condomines M., Briquieu L., Colin C., Bouchette F., Le Duff M., Blanchemanche P. (2008)** *Reconstruction of paleostorm events in a coastal lagoon. (Hérault, South of France)* - Marine Geology n°251-3/4, (p.224-232)
- Schmidt S., Gonzalez J.L., Lecroart P., Tronczyński J., Billy I., Jouanneau J.M. (2007a)** *Bioturbation at the water-sediment interface of the Thau Lagoon : impact of shellfish farming* - Aquatic Living Resources n°20, (p.163-169)
- Schmidt S., Jouanneau J-M., Weber O., Lecroart P., Radakovitch O., Gilbert F., Jezequel D. (2007b)** *Sedimentary processes in the Thau Lagoon (South France): from seasonal to century time scales* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°72-3, (p.534-542)
- Schmittner K.E. (1996)** *Scénarios de comblement de l'étang de Canet-St Nazaire* - Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie Marine de Perpignan, Centre d'Etudes de Projets et Centre Régional de la Productivité et des Études Économiques de l'Université de Montpellier 1, (30p.)
- Schwartz M.L. (1971)** *The Multiple Causality of Barrier Islands* - Journal of Geology n°79, (p.91-94)
- SCP FERRIER-LEDUC-BOYER (2001)** *Bilan bathymétrique de l'étang de Bages-Sigean* - Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, (12p.)
- Seabergh W.C., Kraus N.C. (2003)** *Progress in management of sediment by bypassing at coastal inlets : natural baypassing, weir jetties, jetty spurs and engineering aids in design* - JSCE - Coastal Engineering Journal n°45-4, (p.533-563)
- Serandrei-Barbero R., Albani A., Donnici S., Rizzetto F. (2006)** *Past and recent sedimentation rates in the lagoon of Venice* - Estuarine Coastal and Shelf Sciences n°69, (p.255-269)
- Serano-Suarez B.E. (2004)** *The Sinu' river delta on the northwestern Caribbean coast of Colombia: Bay infilling associated with delta development* - Journal of South American Earth Sciences n°16, (p.623-631)
- Simeoni U., Fontolan G., Tessari U., Corbau C. (2007)** *Domains of spit evolution in the Goro area, Po delta, Italy* - Geomorphology n°86, (p.332-348)
- SOGREAH (1999)** *Etude de l'impact hydrosédimentaire des aménagements prévus dans le cadre du projet de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel* - Assistance à Maîtrise d'Ouvrage pour le Ministère de l'Environnement
- Switzer A.D., Bristow C.S., Jones B.G. (2006)** *Investigation of large-scale washover of a small barrier system on the southeast Australian coast using ground penetrating radar.* - Sedimentary Geology n°183-1/2, (p.145-156)
- Tessier B., Certain R., Barusseau J-P., Henriot J-P. (2000)** *Évolution historique du prisme littoral du lido de l'étang de Thau (Sète, Sud-Est de la France). Mise en évidence par sismique réflexion très haute résolution* - Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Série IIA, Sciences de la Terre et des planètes n°331-11, (p.709-716)

- TETRA TECH. INC. (2001)** *Bolinas Lagoon Watershed Study : Input Sediment Budget* - US Army Corps of Engineers, (84p.)
- Touchart L. (2007)** *Géographie de l'étang : des théories globales aux pratiques locales*. - Editions l'Harmattan, Paris, (228p.)
- Verger F. (2001)** *Colmatage et génie civil aux environs du Mont-Saint-Michel* - Mappemonde n°63, (p.25-28)
- Walling D.A., Webb B.W. (1996)** *Erosion and sediment yield: a global overview* - IAHS Publication n°236, (p.3-19)
- Walsh J.P. , Nittrouer C.A. (2004)** *Mangrove-bank sedimentation in a mesotidal environment with large sediment supply, Gulf of Papua*. - Marine Geology n°208-2/4, (p.225-248)
- Wilke M., Boutière H., Muller M. (2000, 2001, 2002)** *Etude de faisabilité d'interventions légères susceptibles d'améliorer la circulation des eaux à l'intérieur de la lagune de La Palme (Aude) et de freiner la sédimentation naturelle*. - CEH
1^{ère} partie (2000) : bilan hydrologique, (63p.)
2^{ème} partie (2001) : bilan sédimentaire et mécanismes de comblement, (58p.)
3^{ème} partie (2002) : propositions d'interventions, (58p.)
- Zalasiewicz J., Williams M., Smith A., Barry T.L., Coe A.L., Bown P.R. , Brenchley P., Cantrill D., Gale A., Gibbard P., Gregory F.J., Hounslow M.W., Kerr A.C., Pearson P., Knox R., Powell J., Waters C., Marshall J., Oates M., Rawson P., Stone P. (2008)** *Are we now living in the Anthropocene ?* - GSA Today n°18-2, (p.4-8)
- Zenkovitch V.P. (1959)** *On the genesis of cusped spits along lagoon*. - Journal of Geology n°67, (p.269-277)
- Zonta R., Collavini F., Zaggia L., Zuliani A. (2005)** *The effect of floods on the transport of suspended sediments and contaminants : A case study from the estuary of the Dese River*. - Environment International n°31-7, (p.948-958)
- Zuo Z., Eisla D., Gieles R., Beks J. (1997)** *Accumulation rates and sediment deposition in the northwestern Mediterranean* - Deep-Sea Research II n°44-3/4, (p.597-609)

Bibliographie thématique

Processus de comblement des lagunes :

- Dynamiques terrestres

- Bellucci L.G. , Frignani M. Cochran JK, Albertazzi S., Zaggia L., Cecconi G. , Hopkins H. (2007)** *²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs as chronometers for salt marsh accretion in the Venice Lagoon, links to flooding frequency and climate change* - Journal of Environmental Radioactivity n°97-2/3, (p.85-102)
- Dokigo L. (1967)** *Les divagations des cours inférieurs des fleuves principaux débouchant dans le littoral de la haute Adriatique, au Nord du Pô, et l'extension des embouchures.* - Symposium on River Morphology, Berne, 25 sept. au 7 oct. 1967, (p.74-84)
- Douglas G. , Ford P., Palmer M., Noble R., Packett R. (2005)** *Identification of sediment sources in the Fitzroy river basin and estuary, Queensland, Australia* - Cooperative Research Centre for Coastal Zone, Technical Report n°13, (38p.)
- Fiandino M. (2004)** *Flux de matières en suspension des fleuves côtiers se jetant dans l'étang de Berre.* - La Houille Blanche n°4, (p.97-101)
- Golbuu Y., Vicotr S., Wolanski E., Richmond R.H. (2003)** *Trapping of fine sediment in a semi-enclosed bay, Palau, Micronesia* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°57, (p.941-949)
- Gouze E., Raimbault P., Garcia N., Bernard G., Picon P. (2008)** *Apports de nutriments et de matières en suspension à l'étang de Berre (France) : contribution des crues au bilan de matière.* - Comptes Rendus Geosciences n°340-4, (p.233-244)
- Kitheka J.U., Obiero M., Nthenge P. (2005)** *River discharge, sediment transport and exchange in the Tana estuary, Kenya* - Estuarine Coastal and Shelf Sciences n°63, (p.455-468)
- Molinaroli E., Guerzoni S., Sarretta A. (2007)** *Links between hydrology and sedimentology in the lagoon of Venice, Italy* - Journal of Marine Systems n°68, (p.303-317)
- Rivera-Monroy V.H., Day J.W., Twilley R.R., Vera-Herrera F., Coronado-Molin C. (1995)** *Flux of nitrogen and sediment in a fringe mangrove forest in Terminos lagoon, Mexico* - Estuarine Coastal and Shelf Sciences n° 40, (p.139-160)
- Serano-Suarez B.E. (2004)** *The Sinu' river delta on the northwestern Caribbean coast of Colombia: Bay infilling associated with delta development* - Journal of South American Earth Sciences n°16, (p.623-631)
- Walling D.A., Webb B.W. (1996)** *Erosion and sediment yield: a global overview* - IAHS Publication n°236, (p.3-19)
- Walsh J.P. , Nittrouer C.A. (2004)** *Mangrove-bank sedimentation in a mesotidal environment with large sediment supply, Gulf of Papua.* - Marine Geology n°208-2/4, (p.225-248)
- Zonta R., Collavini F., Zaggia L., Zuliani A. (2005)** *The effect of floods on the transport of suspended sediments and contaminants : A case study from the estuary of the Dese River.* - Environment International n°31-7, (p.948-958)

- Dynamiques marines

- Baldock T.E., Weir F., Hughes M.G. (2007)** *Morphodynamic evolution of a coastal lagoon entrance during swash overwash.* - Geomorphology n°95-3/4, (p.398-411)
- Bertin X. , Chaumillon E., Sottolichio A. (2004)** *Evolution d'une embouchure tidale en réponse au comblement de la baie associée: la baie de Marennes-Oléron et le Pertuis de Maumusson* - VIII^{èmes} Journées Nationales Génie Civil et Génie Côtier - Compiègne, session 2, septembre 2004, (p.149-155)
- Bertin X., Chaumillon E., Sottolichio A., Pedredos R. (2005)** *Tidal inlet response to sediment infilling of associated bay and possible implications of human activities : the Marennes-Oleron bay and the Maumusson Inlet* - Continental Shelf Research n°25, (p.1115-1131)
- Degetto S. , Cantaluppi C. (2004)** *Radiochemical methodology for the determination of the mass balance of suspended particulate materials exchanged at the inlets of the Venice Lagoon.* - Journal of Marine Systems n°51, (p.77-94)
- Dias J.M., Lopes J.F., Dkeyser I. (2000)** *Tidal propagation in Ria de Aveiro lagoon (Portugal)* - Phys. Chem. Earth (B) n°25-4, (p.369-374)
- Ehrhold A. (1999)** *Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire en régime macrotidal : la baie du Mont Saint Michel.* - Thèse de doctorat de l'université de Caen, (303p.)
- Fitzgerald D.M, Kraus N.C., Hands E.B. (2000)** *Natural mechanisms of sediment by-passing at tidal inlets.* - US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, CHETN IV-30, (10p.)
- Fontolan G., Pillon S., Delli-Quadri F., Bezzi A. (2007)** *Sediment storage at tidal inlets in northern Adriatic lagoons : Ebb -tidal delta morphodynamics, conservation and sand use strategies* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°75, (p.261-277)
- Liu, K., Fearn, M. L. (1993)** *Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama* - Geology n°21, (p.793-796)
- Lumborg U., Pejrup M. (2005)** *Modelling of cohesive sediment transport in a tidal lagoon - an annual budget.* - Marine Geology n°218, (p.1-16)
- Madsen A.T., Murray A.S., Andersen T.J., Pejrup M. (2007)** *Temporal changes of accretion rates on an estuarine salt marsh during the late Holocene : Reflection of local changes ?* - Marine Geology n°242, (p.221-233)

Morton R.A., Ward G.H., White W.A. (2000) *Rates of sediment supply and sea-level rise in a large coastal lagoon (Laguna Madre)* - Marine Geology n°167, (p.261-284)

Oliveira A., Fortunato A.B., Rego J.R.L. (2006) *Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Obidos lagoon (Portugal)* - Continental Shelf Research n°26, (p.917-942)

Putty N. P., Martinez M. L., Lopez-Portillo J. (2008) *Interaction of alongshore sediment transport and habitat conditions at laguna La Mancha. Veracruz, Mexico.* - Colloque international "Le littoral : subir, dire, agir" - Lille, 16 au 18 janvier 2008, (7p.)

- Dynamiques biologiques

Bertin X., Chaumillon E. (2006) *The implication of oyster farming in increasing sedimentation rates in a macrotidal bay : the Marennes-Oléron Bay, France* - Editions de la station biologique de Roscoff - Cahiers de biologie marine n°47-1, (p.19-22)

Dupont E., Gilbert F., Poggiale J.C., Dedieu K., Rabouille C., Stora G. (2007) *Benthic macrofauna and sediment reworking quantification in contrasted environments in the Thau Lagoon* - Estuarine Coastal and Shelf Science n°72-3, (p.522-533)

Gerino M., Frignani M., Mugnai C., Bellucci L.G., Prevedelli D., Valentini A., Castelli A., Delmotte S., Sauvage S. (2007) *Bioturbation in the Venue Lagoon : Rates and relationship to organisms* - Acta Oeologica n°32, (p.14-25)

Graf G., Rosenberg R. (1997) *Bioresuspension and biodeposition : a review* - Journal of Marine Systems n°11, (p.269-278)

Gindre D. (2005) *La régulation des populations de ragondins (Myocastor coypus) sur l'étang de l'Or (Hérault, France)* - Aestuaria n°6 - in. Paroles des Marais Atlantiques : La gestion des espèces exotiques envahissantes en zones humides, (p.183-191)

Grant J., Hatcher A., Scott D.B., Pocklington P., Schafer C.T., Winters G.V. (1995) *A multidisciplinary approach to evaluating impacts of shellfish aquaculture on benthic communities* - Estuaries n°18, (p.124-144)

- Dynamiques éoliennes

Aagaard T., Davidson-Arnott R., Greenwood B., Nielsen J. (2004) *Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution* - Geomorphology n°60-1/2, (p.205-224)

Bout-Roumazeilles V., Combourieu-Nebout N., Peyron O., Cortijo E., Landais A., Masson-Delmotte V. (2007) *Connection between South Mediterranean climate and North African atmospheric circulation during the last 50000 years BP North Atlantic cold events* - Quaternary Science Review n°26, (p.3197-3215)

Ruiz F., Rodriguez-Ramirez A., Caeceres L.M., Rodriguez-Vidal J., Carretero M.I., Abad M., Olias M., Pozo M. (2005) *Evidence of high-energy events in the geological record: Mid-holocene evolution of the southwestern Donana National Park (SW Spain)* - Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology n°229, (p.212-229)

Simeoni U., Fontolan G., Tessari U., Corbau C. (2007) *Domains of spit evolution in the Goro area, Po delta, Italy* - Geomorphology n°86, (p.332-348)

Switzer A.D., Bristow C.S., Jones B.G. (2006) *Investigation of large-scale washover of a small barrier system on the southeast Australian coast using ground penetrating radar.* - Sedimentary Geology n°183-1/2, (p.145-156)

Le Roux S. (2008) *Les vertus écologiques des bivalves.* - Le Marin, Vendredi 11 mai 2008, (p.8)

Mermillod-Blondin F., Carcaillet F., Rosenberg R. (2005) *Biodiversity of benthic invertebrates and organic matter processing in shallow marine sediments: an experimental study* - Journal of Experimental Marine Biology and Ecology n°315-2, (p.187-209)

Mesnage V., Ogier S., Bally G., Disnar J.R., Lottier N., Dedieu K., Rabouille C., Copard Y. (2007) *Nutrient dynamics at the sediment-water interface in a Mediterranean lagoon (Thau, France): Influence of biodeposition by shellfish farming activities* - Marine Environmental Research n°63-3, (p.257-277)

Mitchell I.M. (2006) *In situ biodeposition rates of Pacific oysters (Crassostrea gigas) on a marine farm in Southern Tasmania* - Aquaculture n°257, (p.194-203)

Pouvreau S., Bodoy A., Buestel D. (1999) *In situ suspension feeding behaviour of the pearl oyster, Pinctada margaritifera: combined effects of body size and weather-related seston composition* - Aquaculture n°181-1/2, (p.91-113)

Schmidt S., Gonzalez J.L., Lecroart P., Tronczyński J., Billy I., Jouanneau J.M. (2007a) *Bioturbation at the water-sediment interface of the Thau Lagoon : impact of shellfish farming* - Aquatic Living Resources n°20, (p.163-169)

Guerzoni S., Molinaroli E., Chester R. (1997) *Sahara dust inputs to the western Mediterranean Sea : depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications.* - Deep-Sea Research II n°44-3/4, (p.631-654)

McTainsh G., Strong C. (2007) *The role of aeolian dust in ecosystems* - Geomorphology n°89, (p.39-54)

Zuo Z., Eisla D., Gieles R., Beks J. (1997) *Accumulation rates and sediment deposition in the northwestern Mediterranean* - Deep-Sea Research II n°44-3/4, (p.597-609)

- Remblaiements et impacts anthropiques

Caldara M., Pennetta L., Simone O. (2002) *Holocene evolution of the Salpi lagoon (Italy)* - Journal of Coastal Research, special issue n°36, (p.124-133)

Dinis J.L., Henriques V., Freitas M.C., Andrade C., Cosata P. (2006) *Natural to anthropogenic forcing in the Holocene evolution of three coastal lagoons (Caldas da Rainha valley, Portugal)* - Quaternary International n°150, (p.41-51)

Girard J.L. (1992) *Le comblement des étangs* - Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon, (62p.)

Gong W., Shen J., Jia J. (2008) *The impact of human activities on the flushing properties of a semi-enclosed lagoon: Xiaohai (Hainan, China)* - Marine Environmental Research n°65, (p.62-76)

Grenz C., Alliot E., Baudinet D., Héris L., Massé H. (1992) *Impact des opérations de dévasage sur les flux de nutriments à l'interface eau-sédiment (Bassin de Thau – France)* - Vie et Milieu n°42-2, (p.157-164)

Kunii H. (2000) *Lake Shinji and Lake Nakaumi : land reclamation history* - Japanese Journal of Limnology n°61-2, (p.192-194)

Mc Cormack G. (1998) *Nakaumi* - Kyoto Journal n°37, (6p.)

Verger F. (2001) *Colmatage et génie civil aux environs du Mont-Saint-Michel* - Mappemonde n°63, (p.25-28)

Zalasiewicz et al. (2008) *Are we now living in the Anthropocene ?* - GSA Today n°18-2, (p.4-8)

Méthodes d'estimation du comblement :

Touchart L. (2007) *Géographie de l'étang : des théories globales aux pratiques locales.* - Editions l'Harmattan, Paris, (228p.)

- Méthodes directes (bilan sédimentaire, sédimentologie)

Banas D., Capizzi S., Masson G., Leglize L., Wagner P., Pihan J.C. (2002) *Nouvelles trappes à sédiment destinées aux milieux peu profonds vidangeables* - Revue des sciences de l'eau n°15, (p.263-272)

Campy M., Meybeck M. (1995) *Les sédiments lacustres* - in Limnologie générale, Pourriot R., Meybeck M., Editions Masson, Paris, (p.185-226)

Degetto S., Cantaluppi C. (2004) *Radiochemical methodology for the determination of the mass balance of suspended particulate materials exchanged at the inlets of the Venice Lagoon.* - Journal of Marine Systems n°51, (p.77-94)

Frignani M., Langone L., Ravaioli M., Sorgente D., Alvisi F., Albertazzi S. (2005) *Fine-sediment mass balance in the western Adriatic continental-shelf over a century time scale.* - Marine Geology n°222-223, (p.113-133)

Morton R.A., Ward G.H., White W.A. (2000) *Rates of sediment supply and sea-level rise in a large coastal lagoon (Laguna Madre)* - Marine Geology n°167, (p.261-284)

Tetra Tech. Inc. (2001) *Bolinas Lagoon Watershed Study : Input Sediment Budget* - US Army Corps of Engineers, (84p.)

- Méthodes indirectes (évolution surfacique et bathymétrie)

Girard J.L. (1992) *Le comblement des étangs* - Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon, (62p.)

Goel M. K., Sharad K.J., Agarwal P. K. (2002) *Assessment of sediment deposition rate in Bargi Reservoir using digital image processing* - Journal des Sciences Hydrologiques n°47(S), (p.81-92)

Magistrato alle Acque-Servizio Informativo (1993) *Evoluzione morfologica della Laguna di Venezia in confronto batimetrico tra la batimetria del 1992 e del 1970* - Servizio Informativo

SCP Ferrier-Leduc-Boyer (2001) *Bilan bathymétrique de l'étang de Bages-Sigean* - Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, (12p.)

- Modélisation sédimentaire

Hearn C.J., Lukatelich R.J., McComb A.J. (1994) *Coastal lagoon ecosystem modelling.* - Coastal Lagoon Processes - edited by B.Kjerfve, (p.471-505)

Lumborg U., Pejrup M. (2005) *Modelling of cohesive sediment transport in a tidal lagoon - an annual budget.* - Marine Geology n°218, (p.1-16)

Mallet C., Howa H., Garlan T., Sottolichio A., Le Hir P., Michel D. (2000) *Utilisation de techniques numérique et statistique pour décrire la circulation sédimentaire de l'embouchure de la Gironde.* - Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA, Sciences

de la Terre et des planètes n°331-7, (p.491-497)

Plus M., Maurer D., Stanisière J.-Y., Dumas F (2006) *Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale : le Bassin d'Arcachon* - Rapport IFREMER RST/LER/AR/06.007, (48p.)

SOGREAH (1999) *Etude de l'impact hydrosédimentaire des aménagements prévus dans le cadre du projet de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel* - Assistance à Maîtrise d'Ouvrage pour le Ministère de l'Environnement

Webographie

BEACHMED : <http://www.beachmed.it>

Cépralmar : <http://www.cepralmar.org>

Conservatoire des Espaces Naturels du Languedoc-Roussillon : <http://www.cenlr.org>

EUROSION : <http://www.euroSION.org>

Géosciences Montpellier : <http://www.gm.univ-montp2.fr>

GLADYS (Groupe Languedoc-Roussillon d'étude de l'hydrodynamique et de la dynamique sédimentaire littorale) : <http://www.gladys-littoral.org>

GREDOPAR (Groupe d'étude du domaine paralytique) : <http://membres.lycos.fr/gredopar>

IFEN (Institut Français de l'Environnement) : <http://www.ifen.fr>

IFREMER : <http://www.ifremer.fr>

laboratoire environnement-ressources : <http://www.ifremer.fr/lerlr>

Textes Juridiques de la République Française : <http://www.legifrance.gouv.fr>

Mont Saint Michel, site du projet de restauration du caractère maritime :
<http://www.projetmontsaintmichel.fr>

Pôle Relais Lagunes Méditerranéennes : <http://www.pole-lagunes.org>

Réseau de Suivi Lagunaire : <http://rsl.cepralmar.com>

SYSCOLAG (programme de recherche sur les systèmes côtiers et lagunaires) :
<http://www.ifremer.fr/syscolag>

Table des matières

Liste des sigles employés.....	2
Avant propos.....	3
Sommaire.....	4
Introduction.....	5
I-Le comblement des milieux paraliques : problématique et enjeux.....	6
I.1) Les milieux paraliques : des écosystèmes entre terre et mer.....	6
I.1.1. Le fonctionnement général du milieu paralique.....	6
I.1.2. La sédimentologie des milieux paraliques.....	7
a-La nature des matériaux déposés.....	7
b-L'organisation des faciès sédimentaires : un double gradient.....	7
c-La sédimentation physico-chimique.....	8
I.2) L'écosystème lagunaire : un bassin paralique particulier.....	9
I.2.1. Les lagunes : définition et répartition mondiale.....	9
I.2.2. La formation des lagunes.....	10
a-Les premières hypothèses sur l'apparition des lagunes.....	10
b-La théorie actuelle.....	11
c-L'origine des étangs côtiers méditerranéens.....	11
I.2.3. L'évolution envisageable des lagunes.....	12
a-L'ouverture et la submersion du lido.....	12
b-La fermeture et le comblement du milieu.....	13
I.3) Que sait-on vraiment du processus de comblement ?.....	13
I.3.1. Une problématique d'ampleur mondiale.....	13
I.3.2. L'état actuel des connaissances.....	14
a-Mécanismes du comblement.....	15
b-Les méthodes d'estimation.....	16
I.4) La perception du comblement et ses enjeux.....	16
I.4.1. Une vision du milieu qui varie selon les époques.....	16
I.4.2. Les enjeux actuels des milieux lagunaires.....	17
II-Les mécanismes du comblement des lagunes.....	19
II.1) Les dynamiques terrestres.....	19
II.1.1. Les apports sédimentaires du bassin versant.....	19
a-Mécanismes en jeu.....	19
b-Typologie des matériaux transportés.....	20
c-Influence anthropique.....	21
II.1.2. Le processus d'avancée terrestre.....	22
a-Mécanisme de progradation deltaïque.....	22
b-Mécanisme de conquête végétale.....	22
II.2) Les dynamiques marines.....	24
II.2.1. Les échanges sédimentaires à travers les passes.....	24
a-Mécanismes généraux.....	24
b-Sédimentation dans un bassin macro-tidal.....	24
c-Sédimentation dans un bassin micro-tidal.....	25
II.2.2. Le phénomène de migration du lido et l'effet des tempêtes.....	26
a-Mécanismes en jeu.....	26
II.2.3. Influence anthropique.....	27
a-Les modifications du cordon littoral.....	27
b-La construction de digues bloquant le transport sédimentaire.....	27
c-Les impacts du changement climatique.....	28
II.2.4. Le risque potentiel de tsunami.....	28
II.3) Les dynamiques biologiques internes.....	30
II.3.1. La sédimentation biogène.....	30
a-Mécanismes en jeu.....	30
b-Influence anthropique : eutrophisation et aquaculture.....	31

II.3.2. Les effets des organismes sur la répartition des sédiments.....	32
a-Mécanismes de bioturbation.....	32
b-Effet des organismes fixés.....	32
c-Influence anthropique : organismes proliférants.....	33
II.4) Les dynamiques éoliennes.....	34
II.4.1. Les apports sédimentaires éoliens.....	34
a-Sédiments éoliens d'origine lointaine.....	34
b-Sédiments éoliens d'origine locale.....	34
c-Influence anthropique.....	35
II.4.2. Le vent : un moteur pour la dynamique hydro-sédimentaire de la lagune.....	35
II.5) Les remblaiements artificiels.....	36
II.5.1. Un état des lieux du phénomène.....	36
a-Disparités temporelles et géographiques.....	36
b-Réclamations sur les lagunes du Languedoc-Roussillon.....	36
II.5.2. La législation en vigueur.....	37
a-Loi littorale.....	37
b-Loi sur l'eau et les milieux aquatiques.....	37
c-Autres protections.....	38
Conclusion : l'importance relative des facteurs de comblement.....	39
III- Les méthodes d'estimation du comblement.....	40
III.1) Le bilan sédimentaire.....	40
III.1.1. La méthodologie mise en œuvre.....	40
a-Échantillonnage.....	40
b-Calcul du comblement.....	41
III.1.2. Interprétation et bilan de la méthode.....	41
III.2) L'étude sédimentologique par datation de carottages.....	41
III.2.1. La méthodologie mise en œuvre.....	41
a-Échantillonnage.....	41
b-Techniques de datation.....	42
c-Calcul du comblement.....	43
III.2.2. Interprétation et bilan de la méthode.....	43
III.3) L'évolution surfacique par vues aériennes.....	43
III.3.1. La méthodologie mise en œuvre.....	43
a-Données nécessaires.....	43
b-Calcul du comblement.....	44
III.3.2. Interprétation et bilan de la méthode.....	44
III.4) L'évolution tridimensionnelle par suivi bathymétrique.....	45
III.4.1. La méthodologie mise en œuvre.....	45
a-Acquisition des données.....	45
b-Traitement des données.....	45
c-Calcul du comblement.....	46
III.4.2. Interprétation et bilan de la méthode.....	47
III.5) Le potentiel de la modélisation hydro-sédimentaire.....	47
III.5.1. La mise au point d'un modèle.....	47
a-Données et connaissances préalables.....	47
b-Développement et test.....	47
c-Calculs et interprétations.....	48
III.5.2. La modélisation sédimentaire et le comblement.....	48
Conclusion : avantages et inconvénients des méthodes d'estimation.....	50
IV- L'évolution des lagunes du Languedoc-Roussillon.....	51
IV.1) Les études et données disponibles au niveau local.....	51
IV.2) Repères chronologiques et évolution historique des lagunes.....	53
IV.3) État des lieux et situation de chacun des étangs.....	54
IV.3.1. Étang de Canet-Saint-Nazaire.....	54
a-Évolution historique.....	54
b-Modes de comblement.....	55
c-Évolution future.....	56

IV.3.2.Étang de Salses-Leucate.....	56
a-Évolution historique.....	56
b-Modes de comblement.....	58
c-Évolution future.....	58
IV.3.3.Étang de La Palme.....	59
a-Évolution historique.....	59
b-Modes de comblement.....	60
c-Évolution future.....	60
IV.3.4.Étangs du Narbonnais.....	60
a-Évolution historique.....	60
b-Modes de comblement.....	62
c-Évolution future.....	63
IV.3.5.Étang de Vendres.....	64
a-Évolution historique.....	64
b-Modes de comblement.....	65
c-Évolution future.....	65
IV.3.6.Étang de Thau.....	65
a-Évolution historique.....	65
b-Modes de comblement.....	66
c-Évolution future.....	66
IV.3.7.Étangs Palavasiens	67
a-Évolution historique.....	67
b-Modes de comblement.....	68
c-Évolution future.....	70
IV.3.8.Étang de Mauguio ou de l'Or.....	70
a-Évolution historique.....	70

b-Modes de comblement.....	70
c-Évolution future.....	71
IV.4)Travaux d'estimation du comblement sur les étangs palavasiens.....	72
IV.4.1.Le site étudié : le complexe lagunaire du golfe d'Aigues-Mortes.....	72
a-Nouveaux points de carottages.....	72
b-Mise en place d'une station de mesure.....	73
IV.4.2.Étude du comblement par carottages.....	74
a-Analyse des sédiments.....	74
b-Estimation de la vitesse de comblement.....	75
IV.4.3.Étude de l'évolution bathymétrique.....	76
IV.4.4.Perspectives : la mise au point d'un outil d'estimation du comblement.....	76
Conclusion : bilan de la situation des étangs face au comblement.....	78
Conclusion et perspectives.....	79
Bibliographie alphabétique.....	80
Bibliographie thématique.....	87
Webographie.....	90
Table des matières.....	91
Table des illustrations.....	94
Glossaire.....	96

Table des illustrations

Sauf mention contraire, les illustrations sont des réalisations personnelles.

Page de couverture :

fond : extrait de la carte des côtes méditerranéennes, photographie : étang de Pierre Blanche

Figures

Figure 1: Classification géomorphologique des principaux types de milieux paraliques.....	6
Figure 2: Échelle de confinement d'un écosystème paralique (Guelorget, 1985 modifié).....	6
Figure 3: Dominantes sédimentologiques du domaine paralique.....	7
Figure 4: Organisation des faciès sédimentaires d'un bassin paralique.....	8
Figure 5: Les trois théories de base pour la formation des lagunes.....	10
Figure 6: Segmentation d'une lagune en plusieurs bassins (Zenkovitch, 1959 modifié).....	13
Figure 7: Érosion, dépôt et capacité de transport des particules dans un cours d'eau.....	19
Figure 8: Taille des particules transportées durant une crue du Dese (Zonta, 2005).....	20
Figure 9: Relation entre le débit et les matières en suspension au cours du temps lors d'une crue du Dese (Zonta, 2005).....	20
Figure 10: Schéma d'évolution de la mangrove d'Itanhaém (Do Amaral, 2006, modifié).....	23
Figure 11: Avancée de la végétation sur le milieu lagunaire.....	23
Figure 12: Transports sédimentaires dans le grau de l'étang de La Palme entre 1998 et 2001.....	25
Figure 13: La migration du cordon littoral sous l'effet des tempêtes.....	26
Figure 14: Trace de dépôts lagunaires anciens en milieu marin.....	26
Figure 15: Évolution du lido de Sète depuis l'Antiquité (Tessier et al., 2000).....	27
Figure 16: Évolution du lido de l'étang de Pierre-Blanche entre mars 1982 et mai 1983 (Paskoff, 2001).....	27
Figure 17: Contribution des débris végétaux au comblement (Wilke M. - CEH).....	30
Figure 18: Les cinq modes de bioturbation des sédiments.....	32
Figure 19: Récifs de cascails (<i>Ficopomatu enigmaticus</i>).....	33
Figure 20: Terrier de ragondin (<i>Myocastor coypus</i>) dans la berge d'un cours d'eau.....	33
Figure 21: Influence du vent sur la circulation interne de la lagune de Thau (Fiandrino et Laugier, 2007 modifié).....	35
Figure 22: Circulation des eaux de surface et formation d'un ombilic hydraulique dans le lac Mélah.....	35
Figure 23: Schéma récapitulatif des processus de comblement des lagunes.....	39
Figure 24: Principe de l'analyse d'évolution surfacique.....	44
Figure 25: Principe de traitement des données bathymétriques.....	46
Figure 26: Principe de l'analyse d'évolution bathymétrique.....	46
Figure 27: Principe d'élaboration d'un modèle.....	48
Figure 28: Schéma théorique d'un modèle de comblement en lagune méditerranéenne.....	49
Figure 29: Contexte géochronologique de la formation des lagunes.....	53
Figure 30: Évolution des lagunes Méditerranéennes.....	53
Figure 31: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Canet (Duboul-Ravazet et Martin, 1981).....	54
Figure 32: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Salses-Leucate (Duboul-Ravazet et Martin, 1981).....	57
Figure 33: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Bages-Sigean (Duboul-Ravazet et Martin, 1981).....	61
Figure 34: Coupe interprétative du remplissage sédimentaire de l'étang de Vendres (Aloisi et Gadel, 1992).....	64
Figure 35: Érosion du delta du Salaison.....	71
Figure 36: Zone de conquête terrestre.....	71
Figure 37: Campagne de carottage dans l'étang de Pierre Blanche.....	73
Figure 38: Mise en place de la station de mesures Laguna.....	74
Figure 39: Corrélations des résultats sur une carotte de l'étang de Pierre Blanche.....	75
Figure 40: Le comblement des étangs de Pierre Blanche et du Prévost d'après la granulométrie.....	76

Tableaux

Tableau 1: Quelques exemples de sites littoraux soumis au comblement sédimentaire.....	14
Tableau 2: Historique des principaux tsunamis en Méditerranée.....	29
Tableau 3: Remblaiements officiels dans les étangs du Languedoc-Roussillon (Girard, 1992).....	36
Tableau 4: Importance relative des facteurs de comblement des bassins s.....	39
Tableau 5: Principales méthodes d'estimation pour la réalisation d'un bilan de matière.....	40
Tableau 6: Caractéristiques des éléments utilisés en datation radiométrique.....	42
Tableau 7: Avantages et inconvénients des techniques d'estimation du comblement des étangs.....	50
Tableau 8: Calcul approché des durées de comblement des étangs par le SMNLR (Girard, 1992).....	51
Tableau 9: Les données bathymétriques disponibles sur les étangs du Languedoc-Roussillon.....	51
Tableau 10: Études spécifiques menées sur le comblement des étangs du Languedoc-Roussillon.....	52
Tableau 11: Scénarios de comblement de l'étang de Canet-Saint-Nazaire (Schmittner, 1996).....	56
Tableau 12: Avancement des analyses des carottes sédimentaires.....	74
Tableau 13: Synthèse de la problématique comblement sur les étangs du Languedoc-Roussillon.....	78

Cartographies

Carte 1: Distribution des milieux lagunaires sur les côtes mondiales.....	9
Carte 2: Les diverses origines des étangs sur les côtes Méditerranéennes françaises.....	12
Carte 3: Le risque de tsunami sur les côtes méditerranéennes françaises.....	29
Carte 4: Protections des lagunes du Languedoc-Roussillon.....	38
Carte 5: Évolution de la surface de l'étang de Canet depuis le XVIIIème siècle (Duboul-Ravazet et Martin, 1981 modifié).....	55
Carte 6: Évolution de la surface de l'étang de Leucate depuis le XVIIIème siècle.....	58
Carte 7: Évolution de la surface de l'étang de La Palme depuis le XVIIIème siècle.....	59
Carte 8: Configuration de la baie de Narbonne avant l'ère Chrétienne (Bouffet, 1894).....	61
Carte 9: Évolution de la surface des étangs Narbonnais depuis le XVIIIème siècle (Girard, 1992 modifié).....	62
Carte 10: Évolution bathymétrique de l'étang de Bages-Sigean entre 1961-78 et 2001.....	63
Carte 11: Évolution de la surface de l'étang de Vendres depuis le XVIIème siècle (Aloisi et Gadel, 1992 modifié).....	65
Carte 12: Évolution de la surface de l'étang de Thau au cours des deux derniers siècles.....	66
Carte 13: Évolution des étangs Palavasiens depuis le XVIIIème siècle.....	68
Carte 14: Comblement de l'étang de Pierre Blanche par l'action de la mer au cours des derniers siècles.....	69
Carte 15: Évolution de l'étang d'Ingril entre 1971 et 1988.....	69
Carte 16: Évolution de l'étang du Grec entre 1971 et 1987.....	69
Carte 17: Évolution de l'étang de l'Or depuis le Moyen-Âge (Ambert, 1992 modifié).....	70
Carte 18: Localisation du site d'étude et données sédimentologiques disponibles.....	72
Carte 19: Localisation des carottages dans les étangs palavasiens.....	73

Glossaire

Certaines des définitions suivantes sont extraites du glossaire « environnement littoral » de l'Ifremer :

<http://www.ifremer.fr/envlit/glossaire/>

Aber : mot breton désignant une **ria**.

ADCP : acronyme de *Acoustic Doppler Current Profiler*, appareil de mesure basé sur le décalage de fréquences des ondes acoustiques lors d'un mouvement de l'observateur ou de l'émetteur (effet Doppler). Il est utilisé pour la mesure des courants et des flux de matières en suspension en milieu aquatique.

Baie : concavité du littoral, généralement ouverte vers le large et de l'ordre de grandeur de la dizaine de kilomètres.

Bioturbation : processus par lequel des organismes vivants modifient par leur activité les particules de sols ou de sédiments. C'est un phénomène de mélange et de transformation qui peut aboutir au transfert d'éléments entre différents compartiments de l'écosystème (par exemple la remise en suspension de nutriments dans les lagunes).

Bouchon vaseux : zone de turbidité maximale (sédiments fins en suspension) particulière aux estuaires, comprise entre des eaux douces peu chargées en suspension à l'amont et les eaux salées marines en aval. Sa situation spatiale n'est pas stable. Elle évolue au gré des conditions hydrologiques (débits, cycles de marée ...).

Cascail : nom donné à Arcachon et en Languedoc aux récifs formés par les colonies de l'annélide tubicole *Ficopomatus enigmaticus*. Ce ver est cosmopolite en France, en milieu confiné et turbide.

Colloïde / colloïdal : suspension homogène de particules très fines (2 à 200 nm) dans un liquide ou un gel. Les particules colloïdales ont une vitesse de sédimentation extrêmement lente qui les fait s'apparenter à des éléments dissous.

Delta allongé : delta avec de nombreux bras dont la morphologie influencée par les marées forme des chenaux méandrés avec de larges embouchures (exemple : le Gange).

Delta cuspidé : forme de delta possédant un nombre réduit de bras et où les sédiments à l'embouchure sont remaniés par les houles en formant des lobes, des plages et des flèches sableuses (exemple : le Rhône).

Delta digité : delta possédant de nombreux bras en éventail s'avancant dans la mer, il est formé par une dynamique fluviale très puissante (exemple : le Mississippi).

Delta estuarien : delta dont la morphologie très influencée par les marées forme un large entonnoir à l'embouchure avec des bancs sableux longilignes et des chenaux bordés par une zone intertidale (exemple : le Colorado).

Delta lobé : forme de delta possédant un nombre réduit de bras et où les sédiments à l'embouchure sont remaniés par les houles en formant des lobes (exemple : le Nil).

Écotone : zone de transition entre deux écosystèmes distincts.

Estuaire : type d'embouchure de fleuve en un bras unique de forme évasée et où la mer remonte dans le chenal avec les marées.

Évaporite : roche constituée de sels minéraux ayant précipités depuis une eau sursaturée.

Fjord : vallée glaciaire envahie par la mer suite à une transgression marine.

Floc ou Flocculat : amas de particules en suspension qui se forme lorsque les charges électriques de ces particules changent (ce qui les fait s'attirer). Un flocculat associe des particules minérales et des particules organiques ainsi que de grandes quantités d'eau.

GPS : acronyme de *Global Positioning System*; système de positionnement géographique (en latitude et en longitude) basé sur la réception des émissions radio d'un ensemble de satellites artificiels.

Herbu : marais s'installant dans une aire submersible par pleine mer de vives-eaux et peuplé de végétation halophile.

Krigeage : méthode d'interpolation spatiale de données basée sur des calculs statistiques.

Lagon : bassin paralique presque totalement fermé par une barrière corallienne.

Lagune : bassin paralique presque totalement fermé par un cordon de sables ou de galets.

Lagune estuarienne : lagune allongée perpendiculairement à la côte soumise à des débits fluviaux et des marées importantes.

LiDAR : acronyme de *Light Detection And Ranging* ; système de mesure topographique et bathymétrique par laser aéroporté.

Marnage : différence de hauteur d'eau, observée ou calculée, en un lieu et pour un jour donné entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer de la marée.

Macro-tidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée importantes (plus de 4 à 5 mètres).

Mangrove : formation végétale des marais maritimes des régions intertropicales constituée par des palétuviers.

Méso-tidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée moyennes (entre 2 et 4 mètres).

Micro-tidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée faibles (moins de 2 mètres).

Ombilic hydraulique : zone de convergence des courants internes dans certaines lagunes. Souvent située à proximité d'un grau, cette zone concentre le phytoplancton ce qui entraîne une forte sédimentation de matière organique.

Palétuviers : espèce d'arbre caractéristique de la mangrove (famille des Rhizophoracées), possédant des " racines-échasses " lui permettant de se développer dans des milieux vaseux peu stables. Ce sont des halophytes.

Paralique : qualifie un écosystème aquatique littoral qui est en contact avec la mer par une communication étroite. C'est un système de transition entre le milieu marin et le milieu continental.

Pélitique : caractérise un sédiment constitué de particules détritiques fines (50 à 63µm) formant des vases littorales et présentant un rapport très faible entre leur masse et leur surface de contact. Elles collent facilement entre elles et servent de liant entre les particules plus grossières. Elles sont facilement remises en suspension et peuvent voyager très loin avant redéposition.

Petit âge glaciaire : période climatique froide ayant touché l'Europe et l'Amérique du Nord entre les XVI^{ème} et XIX^{ème} siècles. Au niveau du littoral languedocien, elle s'est traduite par une plus grande occurrence des tempêtes marines et des crues cévenoles.

Progradation : avancée d'une construction sédimentaire (plage, delta...) en raison d'un bilan positif de sédimentation dans lequel les sédiments se déposent en avant les uns des autres plutôt qu'au-dessus des autres.

Proxy : variable mesurée qui est différente du phénomène proprement étudié mais y est corrélée ce qui permet de l'estimer. Les proxys sont souvent utilisées afin d'outrepasser des problèmes d'échantillonnage et d'analyse, ou bien pour retrouver des valeurs du passées (comme la reconstitution du climat par exemple).

Pseudo-fèces : matière rejetée par les organismes filtreurs (bivalves) et qui ne sera pas ingérée pour être consommée.

Radioélément (ou radioisotope) : atome naturel ou artificiel possédant des propriétés radioactives, c'est-à-dire qu'il se transforme en un autre élément en émettant par modification de son noyau des rayonnements corpusculaires (particules α , β ou électrons) ou électromagnétiques (rayons γ ou X).

Réclamations : terres conquises sur un plan d'eau (mer, étang) par remblaiement pour réaliser des aménagements divers.

Ria : vallée fluviale envahie par la mer à la suite de la transgression marine holocène. Elle est caractérisée par une faible sédimentation qui a laissé à peu près intacts les rivages issus de la transgression.

Roselière : formation végétale des zones marécageuses où poussent des roseaux. Les roselières constituent un des maillons essentiels de l'écosystème (épuration des eaux, abris pour la faune...).

Salins : installations dédiées à la l'exploitation du sel (saliculture).

Sansouire : type d'herbu présent dans les zones méditerranéennes (lagunes, Camargue...).

Schorres : zone côtière constituée par des vasières colonisées par la végétation halophile. Sur les côtes d'Europe occidentale, ce sont essentiellement des graminées (spartine et pucinellie). Elles constituent des touffes isolées qui finissent par devenir contiguës par extension. Ces touffes se peuplent de nouvelles espèces dans leurs partie centrale peu à peu surélevée par le dépôt et l'accumulation de vase.

Sebkha : bassin paralique des milieux arides en faible communication avec la mer et qui est pas ou peu alimenté par des cours d'eau (souvent uniquement lors des orages), il en résulte une formation importante d'évaporites.

Sismique-réflexion : technique de recherche scientifique permettant d'étudier la nature et la structure des formations géologiques en étudiant la réflexion d'ondes envoyées dans le sous-sol. Après traitement informatique des signaux, une image sismique du sous-sol est obtenue.

Spectrométrie XRF : technique d'analyse géochimique permettant de connaître la composition en éléments chimiques d'un échantillon en fonction de son spectre de fluorescence émis lors d'un bombardement avec des rayons X.

Système d'Information Géographique (SIG) : base de données géographiques relatives à un territoire déterminé plus ou moins étendu. Elle est constituée de cartes géoréférencées attachées à diverses données. Les nombreux outils associés aux SIG sont utilisés pour saisir, conserver, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier des phénomènes afin de produire l'information nécessaire pour aider les décideurs.

Système géodésique : système de coordonnées géographiques rendant compte de la sphéricité de la Terre. Il permet de déterminer avec précision les dimensions et les distances pour établir des cartes.

Transgression marine : élévation progressive du niveau marin liée aux variations climatiques sur le long terme. La vitesse de transgression marine correspond à la vitesse de remontée du niveau marin moyen.

Tsunami (ou raz-de-marée) : violente ondulation de la mer provoquée par un accident tectonique sous-marin brutal : tremblement de terre, effondrement ... Les vagues ainsi créées se propagent à grande vitesse (plusieurs centaines de km/h) avec des longueurs d'onde de plusieurs kilomètres et peuvent avoir des amplitudes de plusieurs dizaines de mètres, provoquant des gros dégâts sur les côtes qu'elles frappent.

RÉSUMÉ

La valeur patrimoniale et économique des lagunes est considérable. Cependant, ces plans d'eau littoraux semblent disparaître lentement sous l'effet du comblement sédimentaire. Dans l'optique d'une gestion durable du milieu il convient donc de s'intéresser à ce phénomène. C'est pourquoi le Réseau de Suivi Lagunaire (RSL) du Languedoc-Roussillon a lancé une étude afin de synthétiser l'état actuel des connaissances.

Divers mécanismes sont à l'origine du comblement des milieux lagunaires, ces mécanismes sont souvent amplifiés par les activités humaines aux abords de la lagune et dans son bassin versant :

- dynamiques terrestres et aménagements des cours d'eau
- production biologique intense et eutrophisation
- apports marins et impact des évolutions climatiques
- apports éoliens
- remblaiements artificiels

L'évaluation de ce comblement sédimentaire peut être réalisée par diverses méthodes qui s'avèrent complémentaires pour apprécier l'importance de la problématique :

- méthodes directes : bilan de matière, carottage du sédiment
- méthodes indirectes : évolution surfacique, suivi bathymétrique

Les résultats antérieurs concernant l'estimation du comblement sur les étangs du Languedoc-Roussillon montrent une forte disparité vis à vis de leur sensibilité au comblement. L'échéance du remplissage sédimentaire varie de quelques décennies (étang de Canet) à plusieurs millénaires (étang de Thau).