HAL
open science

# Accentuation récente de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)

Lucile Etienne

## ▶ To cite this version:

Lucile Etienne. Accentuation récente de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie). Géographie. Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité; Université de Sfax (Faculté des Lettres et Sciences Humaines), 2014. Français. NNT : . tel-01075029

**HAL Id: tel-01075029**

**https://theses.hal.science/tel-01075029**

Submitted on 16 Oct 2014

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

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

Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité
Ecole Doctorale 382 « Economies, Espaces, Sociétés, Civilisations »

Université de Sfax (Faculté des Lettres et Sciences Humaines)
Ecole Doctorale ED08FLSHSF01 « Lettres, Arts et Humanités »

Thèse de Doctorat de Géographie
Géographie et environnement (Université Paris 7)
-
Doctorat en Sciences Géographiques (Université de Sfax)

# Accentuation récente de la vulnérabilité liée au recul du trait de côte et à l'extension des sebkhas dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)

**Lucile ETIENNE**

Thèse en cotutelle internationale
dirigée par Gérard BELTRANDO (Université Paris-Diderot)
et
Abdelkarim DAOUD (Université de Sfax)

Thèse préparée au sein de l'UMR 8586 du CNRS (PRODIG) et du Laboratoire Eau, Energie, Environnement de l'Université de Sfax

Soutenue publiquement le 24 septembre 2014

Membres du jury :

| | | |
|---|---|---|
| Gérard Beltrando | Professeur à l'Université Paris Diderot | Directeur |
| Abdelkarim Daoud | Professeur à l'Université de Sfax | Directeur |
| Lydie Goeldner-Gianella | Professeure à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne | Présidente |
| Ameur Oueslati | Professeur à l'Université de Tunis I | Rapporteur |
| Patrick Pigeon | Professeur à l'Université de Savoie | Rapporteur |
| Thierry Saint-Gérand | Professeur à l'Université de Caen | Examinateur |

Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité
Ecole Doctorale 382 « Economies, Espaces, Sociétés, Civilisations »

Université de Sfax (Faculté des Lettres et Sciences Humaines)
Ecole Doctorale ED08FLSHSF01 « Lettres, Arts et Humanités »

Thèse de Doctorat de Géographie
Géographie et environnement (Université Paris 7)
-
Doctorat en Sciences Géographiques (Université de Sfax)

# Accentuation récente de la vulnérabilité liée au recul du trait de côte et à l'extension des sebkhas dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)

**Lucile ETIENNE**

Thèse en cotutelle internationale
dirigée par Gérard BELTRANDO (Université Paris-Diderot)
et
Abdelkarim DAOUD (Université de Sfax)

Thèse préparée au sein de l'UMR 8586 du CNRS (PRODIG) et du Laboratoire Eau, Energie, Environnement de l'Université de Sfax

Soutenue publiquement le 24 septembre 2014

Membres du jury :

| | | |
|---|---|---|
| Gérard Beltrando | Professeur à l'Université Paris Diderot | Directeur |
| Abdelkarim Daoud | Professeur à l'Université de Sfax | Directeur |
| Lydie Goeldner-Gianella | Professeure à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne | Présidente |
| Ameur Oueslati | Professeur à l'Université de Tunis I | Rapporteur |
| Patrick Pigeon | Professeur à l'Université de Savoie | Rapporteur |
| Thierry Saint-Gérand | Professeur à l'Université de Caen | Examinateur |

# Remerciements

A la fin du travail de rédaction de ma thèse, me voilà soulagée et heureuse de pouvoir présenter mon travail à ceux qui voudront bien le lire. Si vous avez atteint cette première page de texte, vous êtes sur la bonne voie, continuez ☺.

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse, les Pr. Daoud et Beltrando pour la confiance qu'ils m'ont accordée au cours de cette thèse.

Un chaleureux merci à Mr Beltrando mon directeur de thèse Professeur à Paris Diderot, qui a cru en moi dès le M1 et qui m'a permis d'atteindre le doctorat. Merci de m'avoir poussée toujours plus loin, et m'avoir fait comprendre que je pouvais faire mieux, encore mieux. J'ai appris à travailler grâce à vous, vous m'avez guidée sans me contraindre, m'avez soutenue et permis d'ouvrir la porte du monde de la recherche. En discutant avec d'autres doctorants, j'ai pris conscience de la qualité de l'encadrement dont j'ai pu bénéficier. Merci également à Mr Daoud, mon codirecteur de thèse Professeur à Sfax, pour m'avoir fait partager vos connaissances sur l'archipel que ce soit sur le terrain ou à l'université, pour vos relectures précises de mon travail tout au long de ces quatre années et vos conseils qui m'ont beaucoup apporté. Merci également pour votre investissement qui a permis la mise en place et le bon fonctionnement de la cotutelle internationale dont j'ai bénéficié et par la suite du projet Campus France qui m'a grandement aidé.

Merci aux Pr. Lydie Goeldner-Gianella, Pr. Ameur Oueslati, Pr. Patrick Pigeon et Pr. Thierry Saint-Gérand de me faire l'honneur d'être dans le jury de cette thèse et pour l'intérêt qu'ils lui portent.

Je souhaite remercier Monsieur Dahech qui me connait depuis le M1 et qui m'a fait découvrir les différents aspects du travail de terrain : observations, relevés, mesures etc… d'abord à Sfax puis à Kerkennah. Merci également pour votre disponibilité sans faille. Merci également à Riadh Bouaziz, pour ses explications géomorphologiques indispensables et sur le terrain ; grâce à vous, j'ai mieux compris les différentes formations de l'archipel de Kerkennah. Merci à Emilie Lavie pour m'avoir prêté les appareils de mesures de salinité ; à Max également pour son aide lors de ces mesures. Merci au pôle image qui a permis l'acquisition de l'image SPOT5, absolument indispensable à la réalisation de ce travail. Miléna, merci pour ta disponibilité et ta gentillesse. Merci également à Jean-Claude Berges pour les corrections atmosphériques.

Un chaleureux merci à Essia et Salem Dahech qui m'ont accueilli chez eux toujours très gentiment et amicalement. Mr et Mme Kammoun chez qui j'ai logé et qui ont tout mis en œuvre pour que je me sente à l'aise (y compris acheter un câble internet de 10 mètres et m'aider à faire face aux petites bêbêtes qui me dérangeaient). Une pensée particulière pour Mme Baklouti qui m'a fait découvrir la ville de Sfax, en particulier la médina et avec qui j'ai goûté des choses merveilleuses.

Merci Imen pour m'avoir fait rire et aux deux Khaled pour m'avoir conduit un peu partout dans l'archipel.

Un très grand merci à toutes les personnes qui ont bien voulu répondre au questionnaire et à celles qui ont discuté plus avant des problèmes touchant l'archipel de Kerkennah. Merci également aux étudiants qui m'ont accompagnée sur le terrain, vous avez été super et beaucoup plus résistants que moi au soleil de plomb !

★ ★ ★

Merci à tous ceux qui m'ont précédée dans la « Beltrando-Team », ils m'ont ouvert les yeux sur le fonctionnement du doctorat (je pense en particulier à Sarah et Malika, merci d'avoir pris le temps de me raconter et de me guider). Merci à toute l'équipe des salles des doctorants avec lesquels j'ai partagé de bons moments à Olympiade ou à Olympe de Gouge. Elodie, merci de m'avoir mis le pied à l'étrier et poussé à aller voir Mr Beltrando en M1, timide que j'étais. Anne-Laure, Ariane, Benoit, Candide, Coura, Gashin, Laurent, Louis, Maryem, Mélanie, Quentin, Romain, Safa, Sako, Salman et Sarah merci de votre présence, les discussions que nous avons pu avoir m'ont beaucoup apporté.

Un grand merci aussi à tous les chercheurs que j'ai pu rencontrer ou lire, qui me guident dans mon travail et me confortent dans mon choix d'orientation professionnelle. Merci à tous ceux qui m'ont aidée et qui ont marqué mon parcours d'apprentie géographe : Nicolas Delbart, Emilie Lavie, Malika Madelin, François Bétard, Monique Fort (merci aussi pour vos cours passionnés et passionnants), Gilles Arnaud Fassetta et Josyane Ronchail. Charles le Cœur, le stage de Dinard en votre compagnie était très enrichissant. Karl Hoarau, vous m'avez donnée l'envie de poursuivre en géographie physique. Merci également de m'avoir permis de donner des cours à l'université de Cergy.

★ ★ ★

Je souhaiterais maintenant remercier mes amis et ma famille qui m'ont tous soutenue pendant cette longue période d'étude. La p'tite Julia, tu en as bien bavé mais maintenant c'est fini, tu vas tout casser et faire une belle carrière, j'en suis persuadée !! Merci pour nos lonnnngues conversations téléphoniques… Viovio et sa petite famille : la vraie vie de famille ça existe, j'ai hâte. Sted, merci de nous faire marrer au théâtre ou en dehors.

Un très grand et tout particulier merci à Florence, mon amie, investie, généreuse, sincère, courageuse… j'en passe. Merci pour tous les moments traversés ensemble depuis 4 ans, drôles comme moins drôles, on se serre les coudes. Un grand merci également à Emilie et Malika pour m'avoir consolée, reboostée ou réconfortée quand j'en avais besoin.

Enfin, merci à toute ma famille. Grand-père tu es la première personne de mon entourage proche qui s'est engagée dans l'environnement. C'est grâce à toi si j'ai commencé à m'y intéresser et que j'ai choisi la voie dans laquelle je suis aujourd'hui. Pour cela je te remercie du fond du cœur, je suis fière

d'être ta petite fille. Mamie, merci de prendre soin de moi quand j'ai besoin d'un retour aux sources et que je rentre manger des pinces de crabes et du Kig Ar Farz au Conquet.
Je ne serai pas là où je suis aujourd'hui sans mes parents. Votre soutien sans faille et sur tous les plans pendant ces années universitaires a été essentiel. Merci de m'avoir installé un petit coin douillet, de m'avoir chouchoutée pendant les durs moments de la rédaction, de m'avoir soutenue financièrement et surtout, surtout, d'avoir cru en moi et de m'avoir laissée choisir ma voie. A mon p'ti frère et ma p'tite sœur, un immense merci pour me faire tellement rigoler !!! Marie-lou, vive la Bretagne, bon vent pour l'an prochain, j'espère que tu vas aimer. Hugo, un jour je viendrais avec toi faire un tour au Chili, au sommet du monde, voir ces arbres si étonnants dont tu m'as parlé.

Merci également à Blandine, Jean-Marc et Coline Demilly, j'ai passé de très très bons moments, étalée dans les fauteuils sur la terrasse à regarder les chats et les oiseaux dans le jardin. Merci pour votre soutien sans faille également. Coline, tu prends ton envol après bien des rebondissements par toujours très marrant. Profite bien !!

Un merci tout particulier à Adrien qui m'accompagne dans la vie depuis plus de 8 ans. Merci d'avoir confiance en moi et de me soutenir, de me réconforter et de me motiver à chaque étape, à chaque passage difficile. Ton éloignement forge notre patience, notre courage et notre attachement l'un à l'autre. Il nous rend plus fort et même si c'est dur, long et fastidieux, on va y arriver.

Quelques mots pour remercier toutes les personnes qui ont lu et parfois relu ce manuscrit pour m'aider à l'améliorer et aussi en corriger l'aurteau-graffe.

Merci aux étudiants que j'ai pu avoir en cours, à Yvette et à José de Cergy, les moments passés avec vous furent des bols d'air durant la thèse. Merci aux chanteurs, auteurs, développeurs de jeux vidéo, scénaristes, acteurs etc. qui m'ont permis de me détendre tout au long de ces 4 années de thèse, il parait que faire des pauses est indispensable pour rester productif…

★ ★ ★

# Résumés

**Accentuation récente de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)**

L'archipel de Kerkennah, situé dans le golfe de Gabès en Tunisie, est composé d'une dizaine de petites îles dont le relief est très plat et la lithologie meuble et fragile. Les espaces les plus bas sont occupés par des sebkhas, espaces salés et stériles. L'évolution du climat et l'élévation relative du niveau de la mer ainsi que les évolutions importantes des modes de vie et de production locaux ont conduit à des changements majeurs dans l'occupation du sol. Dans ce contexte, cette thèse vise à comprendre l'évolution de la vulnérabilité liée à la dynamique du trait de côte et à la salinisation des sols depuis les années 1960. Des études diachroniques de photo-interprétation et télédétection ont été réalisées afin d'observer et mesurer l'évolution de l'occupation du sol, du trait de côte et de l'extension des surfaces de sebkhas. Grâce à ces études et à des relevés de terrain, il est apparu que les côtes subissent majoritairement une érosion significative (0,12m/an) et que les surfaces de sebkhas s'étendent. Ces phénomènes physiques, associés aux évolutions de l'occupation des sols et aux modes de gestion parfois peu adaptés, ont conduit à une augmentation de la vulnérabilité. Les résultats d'un questionnaire, proposé à 139 personnes, laissent penser que la population locale perçoit le retrait de la côte et la salinisation des sols comme étant des phénomènes préoccupants et dangereux. Ainsi le contexte local est plutôt cohérent avec des phénomènes dommageables réels et une population qui semble les connaître. Cependant, la gestion littorale dans l'archipel ne semble prendre en compte ni la vulnérabilité existante, ni la perception et les connaissances de la population locale. Même si la gestion intégrée des zones côtières est préconisée en Tunisie, elle n'est pas mise en place dans l'archipel de Kerkennah.

**Mots clés** : Vulnérabilité, littoral, sebkha, perception, archipel de Kerkennah, Tunisie

---

**Recent accentuation of the vulnerability linked to coastline mobility and soil salinization in the Kerkennah archipelago (Tunisia)**

The Kerkennah archipelago, located in the Gabes Gulf in Tunisia is composed of 10 little islands with a very low landforms a soft and fragile lithology. The lowest areas are occupied by sabkha, which are sterile and salty. The climate evolution, the relative sea level rise and the important evolution in the local production mode and lifestyle caused changes in the land use. In this context, we tried to understand the evolution of vulnerability linked to the coastline mobility and to the soil salinization since the 60's. Diachronic studies of photointerpretation and remote sensing have been performed to observe and quantify the evolution of land use, of the position of the coastline and of the extension of the sebkhas. From this studies and field data, it was found that the coasts are undergoing significant erosion (0.12m/y) and that the sabkha are extending. Those physical phenomena associated to the evolutions of land use and to management methods sometimes unadapted, conduct to the increase of the vulnerability linked to the coastline mobility and the soil salinization. The results of a survey proposed to 139 people suggest that the local population perceives the coastline retreat and the soil salinization as worrying and dangerous phenomena. So the local context is quite consistent with real damaging phenomena and a population that seems to be aware of it. However the littoral management in the archipelago doesn't seem to take into account neither the vulnerability nor the perception and the knowledge of the local population. So, even if the integrated coastal zone management is recommended in Tunisia, it is not set up in Kerkennah.

**Keywords**: Vulnerability, littoral, sabkha, perception, Kerkennah archipelago, Tunisia

# Sommaire

*Introduction générale* ..... *1*

*Partie 1 L'archipel de Kerkennah : vulnérabilité croissante et milieu fragile* ..... *7*

**Chapitre 1. Vulnérabilité et perception des dangers de l'époque moderne à nos jours** ..... **9**

**Chapitre 2. Accentuation récente de la vulnérabilité liée au climat et au niveau de la mer à l'échelle de la Méditerranée et du golfe de Gabès** ..... **35**

**Chapitre 3. Kerkennah : un territoire aux vulnérabilités multiples** ..... **69**

*Partie 2 Données et méthodes nécessaires à la mesure de la vulnérabilité* ..... *101*

**Chapitre 4. Présentation des données** ..... **105**

**Chapitre 5. Méthodologies de la thèse** ..... **129**

*Partie 3 Caractériser et comprendre la vulnérabilité* ..... *145*

**Chapitre 6. L'évolution du trait de côte entre 1963 et 2010** ..... **147**

**Chapitre 7. L'évolution de l'occupation du sol et des surfaces des sebkhas de l'archipel entre 1963 et 2010 211**

**Chapitre 8. Perception des risques d'extension des sebkhas et de recul de la côte par la population locale et leur gestion** ..... **259**

*Conclusion générale* ..... *297*

*Références* ..... *303*

*Table des figures* ..... *317*

*Table des tableaux* ..... *321*

*Table des matières* ..... *323*

# Introduction générale

La population résidant à moins de 100 km de la mer et à moins de 100 m d'altitude représente ¼ de la population mondiale (GIEC, 2007). Les milieux côtiers sont donc attractifs et concentrent de très nombreux enjeux tels que des centres urbains, des activités économiques ou encore des complexes touristiques (GIEC, 2007). L'étude de leur vulnérabilité face à l'évolution climatique en cours est donc importante. Il faut en effet connaître les impacts des évolutions récentes des sociétés et du climat sur ces milieux.

*« Les territoires insulaires constituent, par leur forte exposition aux aléas naturels (marées, vents, érosion), leur diversité biologique et, parfois aussi, leur relief relativement bas, des indicateurs sensibles des effets du changement climatique et de leurs évolutions » (Bertrand & Richard, 2010)*

De plus :

*« Les petits systèmes insulaires représentent, par leur taille et leur nature spécifique, d'excellents laboratoires des dynamiques socio-territoriales contemporaines ». (Bouchard et al., 2010)*

Ainsi, l'étude des petits systèmes insulaires est nécessaire et dépasse l'échelle des îles mais concerne également les espaces littoraux en général.

L'archipel de Kerkennah est situé en Tunisie dans le golfe de Gabès à 20km au large des côtes de Sfax. Il est composé de petites îles dont les deux plus grandes, Gharbi (48 km²) et Chergui (99 km²) sont habitées par une population de 14500 habitants permanents répartis dans onze localités majoritairement côtières. Les îles et îlots de l'archipel sont connus pour leur fragilité géomorphologique (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1986) :

- La topographie est particulièrement basse puisque l'altitude maximale ne dépasse pas 13 mètres au-dessus du niveau de la mer et la proportion de terres basses (dont l'altitude ne dépasse pas 2,5 m) représente plus de 50% de la surface de l'archipel. Au sein de ces espaces, les plus bas sont composés de sebkhas (45% de la surface de l'archipel) dans lesquelles les activités anthropiques sont réduites du fait d'une salinité élevée et de l'inondation périodique de leurs fonds. Cette topographie basse rend l'archipel vulnérable aux submersions marines et à la salinisation des sols.

- La lithologie est majoritairement tendre et facilement érodable. La couche la plus dure de l'archipel est une croûte calcaire assez peu épaisse et parfois affleurante dans l'archipel. Cette croûte est cependant fragilisée par l'homme qui d'une part l'a utilisée depuis l'Antiquité jusqu'aux années 1990 dans la construction de bâtiments et d'autre part la fragilise parfois dans les champs pour pouvoir cultiver.

A ces deux facteurs naturels s'ajoutent ceux du réseau hydrographique naturel très limité et de la faible pluviométrie. Ces deux facteurs de vulnérabilité font (i) de la ressource en eau potable un bien rare et (ii) des apports sédimentaires de la terre vers la mer presque inexistants ce qui, associé à la lithologie fragile, rend les côtes particulièrement vulnérables à l'érosion marine.

Trois facteurs sont en pleine évolution et ont une influence importante sur l'archipel de Kerkennah :

Le climat qui évolue vers l'aridité, avec une élévation des températures les plus hautes et des épisodes caniculaires plus intenses et plus longs (Dahech & Beltrando, 2012) tandis que les précipitations stagnent (Norrant & Douguédroit, 2005). Les phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration sont donc plus intenses, ce qui augmente le stress hydrique pour la végétation et l'aridification perturbe le fonctionnement naturel des sebkhas (Etienne *et al.*, 2012).

Le niveau de la mer s'élève dans le nord du golfe de Gabès du fait de la subsidence importante (Slim *et al.*, 2004; Saidani, 2007). Ceci implique des intrusions d'eau marine dans la nappe souterraine, une remontée du toit de cette nappe, une érosion côtière accrue, une salinisation des sols et donc l'extension des sebkhas.

La société qui se modernise et évolue depuis l'indépendance (Rhouma *et al.*, 2005; Rhouma & Labidi, 2006) par (i) l'ouverture de l'archipel vers le continent, (ii) l'élévation du niveau d'éducation - qui ont provoqué un exode des jeunes vers le continent ; (iii) l'évolution, voire la transformation des systèmes de production agricole et de pêche. Ces modifications sociétales ne sont pas toutes sans conséquences sur l'environnement et les aménagements humains ne sont pas forcément adaptés à un climat changeant ni à l'élévation du niveau de la mer (Bounouh, 2010; Oueslati, 2011; Kebaïli Tarchouna, 2013).

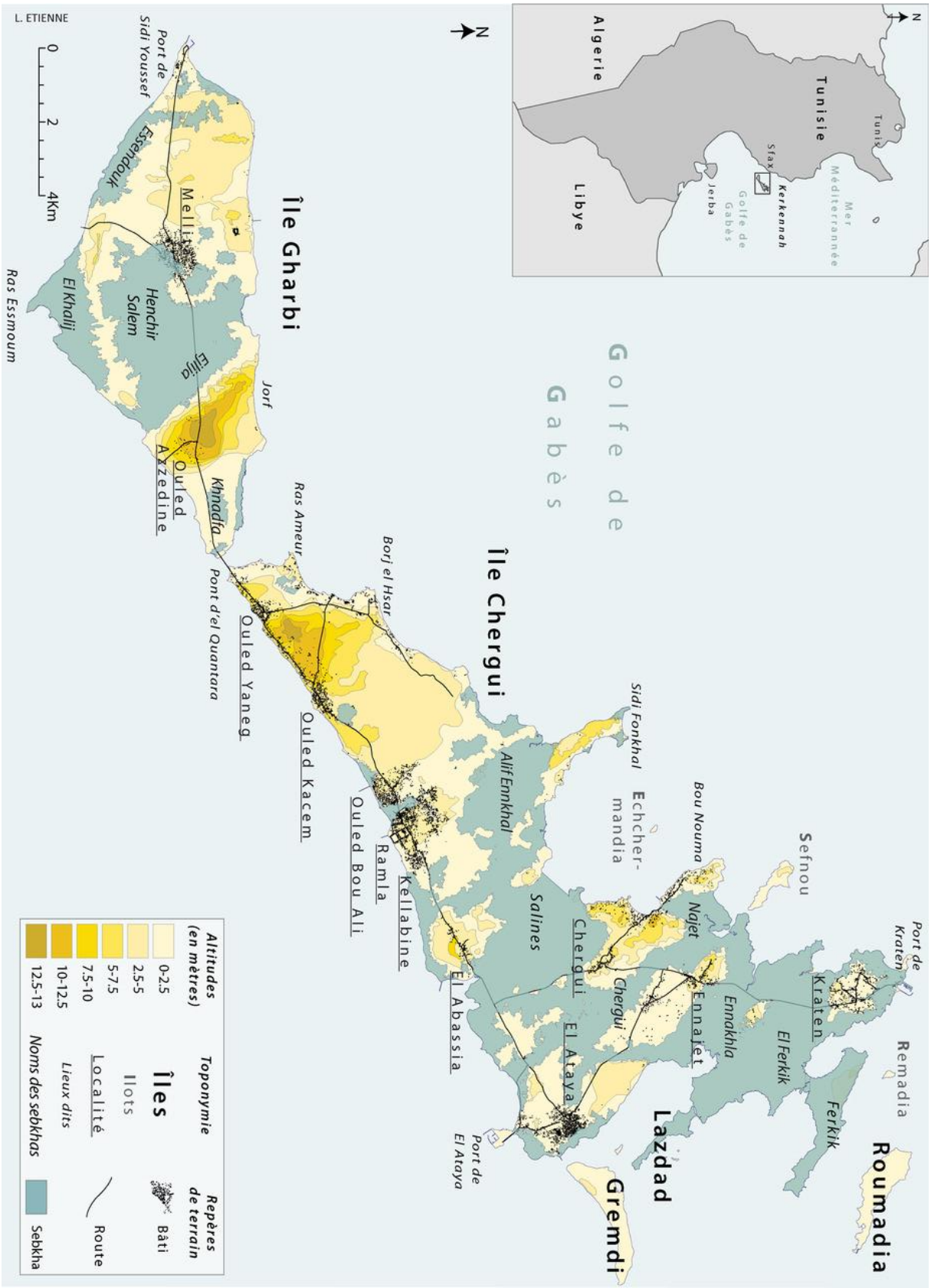



***Figure 1: Topographie et toponymie de l'archipel de Kerkennah***

Les travaux récents portant sur les risques et leur appréhension repensent le couple aléa-vulnérabilité. Il apparaît aujourd'hui fondamental de tenir compte du caractère global des risques en prenant en considération les facteurs physiques (naturels) et humains qui les composent sans que les uns ou les autres ne soient délaissés (Pigeon, 2002; Veyret & Reghezza, 2005; Briones Gamboa, 2008). Ainsi, les approches globales, systémiques ou territoriales sont favorisées et il apparaît indispensable de traiter des territoires étudiés dans leur ensemble en pointant des enjeux précis (Metzger & D'Ercole, 2009). Le territoire étudié est la pièce maitresse des études sur la vulnérabilité. Il est influencé par des éléments d'échelles plus vastes (climat par exemple) et par des éléments qui le composent et agissent sur lui-même. La vulnérabilité de ce territoire ne pourra être appréhendée que par la prise en compte de l'ensemble des facteurs qui interagissent et provoquent/annulent, accentuent/diminuent la vulnérabilité.

Cette thèse se place directement dans cette optique globale et tente de comprendre l'évolution de la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah en Tunisie face aux changements de l'environnement (climat et niveau de la mer) et aux évolutions sociétales dans l'archipel.

Partant des postulats ci-avant présentés, d'une fragilité naturelle et de changements majeurs dans et autour de l'archipel, ce travail de thèse cherche à évaluer la vulnérabilité qui est liée à la mobilité du trait de côte, à l'extension des surfaces de sebkhas et à la société entre les années 1960, c'est-à-dire juste après l'indépendance et aujourd'hui.

Nos résultats chercheront donc à répondre à trois hypothèses en adoptant une approche globale et systémique :

- L'érosion marine est importante et les sebkhas se sont étendues depuis les années 1960.
- Plusieurs facteurs naturels et anthropiques entrent en jeu pour expliquer ces phénomènes.
- Les vulnérabilités se sont aggravées depuis les années 1960.

Tout cela permettra de répondre à la problématique en tentant de montrer le caractère indispensable de la prise en compte des aspects sociaux et physiques (ou naturels) pour traiter de la vulnérabilité grâce à une approche globale et systémique.

La thèse est organisée en 3 parties et 8 chapitres selon un plan classique : Etat de l'art / données et méthodes / présentation et analyses des résultats.

La **Partie 1** porte sur le cadre conceptuel et géographique de la thèse. Le **Chapitre 1** traite, par une approche historique et épistémologique des concepts nécessaires à l'analyse du sujet. Il a pour objectif de présenter les différentes approches, des plus anciennes aux plus récentes, de conception et d'appréhension des risques et de la vulnérabilité dans le but d'expliquer notre approche. Le **Chapitre 2** résume les facteurs de vulnérabilité de plus vaste échelle que celle de l'archipel, les variations du climat et du niveau de la mer ayant affecté l'archipel et l'ensemble du bassin méditerranéen depuis l'Antiquité. Le **Chapitre 3** porte sur la présentation de l'archipel de Kerkennah par le biais de ses vulnérabilités et des enjeux qui nous préoccupent et qui sont la préservation des terres arables et constructibles ainsi que la pérennité des infrastructures et activités humaines.

La **Partie 2** porte sur la présentation des données utilisées (**Chapitre 4**) et les méthodes générales mises en œuvre pour les traiter (**Chapitre 5**). Ainsi seront présentées les méthodes de calage des photographies aériennes puis de photo-interprétation, toutes deux utilisées à des fins différentes dans les chapitres de résultats. Au début de chaque chapitre de résultats seront présentées les méthodes spécifiques employées pour répondre à des questions précises.

La **Partie 3** présente les résultats obtenus dans cette thèse et les discute. Chaque chapitre y est organisé de la même manière et présente d'abord les méthodes spécifiques à sa thématique, ensuite les résultats y sont exposés, enfin une discussion concernant les résultats y est présentée. Le **Chapitre 6**, traite de l'évolution du trait de côte entre 1963 et 2010. Le **Chapitre 7** concerne l'évolution de l'occupation du sol et des surfaces de sebkhas. Le **Chapitre 8** s'intéresse à la perception de la population et aux gestions mises en place pour protéger l'archipel face à l'érosion côtière et à l'extension des sebkhas.

# Partie 1

## L'archipel de Kerkennah : vulnérabilité croissante et milieu fragile

Cette première partie présente le cadre conceptuel et géographique dans lequel se place cette thèse.

Le **Chapitre 1** porte sur le cadre théorique et conceptuel de la thèse en présentant les différentes notions indispensables à sa compréhension. Les termes du champ lexical de la vulnérabilité y seront définis via une approche historique et épistémologique en partant d'exemples tirés des mythes fondateurs anciens (comme Gilgamesh ou la Bible) dans lesquels les événements naturels dommageables sont des punitions divines pour aboutir aux approches actuelles des risques et de la vulnérabilité par le biais d'approches globales, systémiques et territoriales.

Le **Chapitre 2** est une présentation des différents éléments d'échelle globale ou régionale influençant l'archipel de Kerkennah. Il s'agira donc de comprendre d'une part l'évolution climatique en Tunisie, depuis l'Antiquité

jusqu'à aujourd'hui et les projections climatiques entre l'actuel et 2100 et d'autre part, les variations du niveau marin qui ont affecté l'archipel depuis l'Antiquité.

Le **Chapitre 3** présente l'archipel de Kerkennah, qui constitue le cadre géographique de cette thèse par le biais de ses vulnérabilités en étudiant d'abord celles propres aux petites îles qui sont des milieux fragiles puis en étudiant la constitution géologique et les caractéristiques géomorphologiques de l'archipel ; ensuite les formes du relief et les contraintes qu'elles représentent pour l'installation humaine et enfin le peuplement de l'archipel, les ressources en eau disponibles

# Chapitre 1.

## Vulnérabilité et perception des dangers de l'époque moderne à nos jours

---

Ce chapitre propose d'examiner le cheminement de pensée qui a amené au développement des notions de risque, d'aléa et de vulnérabilité par le biais d'une approche à la fois historique et épistémologique dans le but d'abord d'expliquer les expériences menées avant les années 2000 voire 2010 pour traiter des risques naturels et ensuite d'expliquer que la dichotomie aléa/vulnérabilité doit désormais être dépassée pour être remplacée par des approches globales et systémiques.

Un premier sous-chapitre détaille la perception des dangers durant l'époque contemporaine, depuis la révolution industrielle jusqu'aux années 1990-2000. Il met ainsi en avant que, malgré l'apparition de la notion de vulnérabilité, la perception des risques était avant tout aléa-centrée. Enfin, il pointe la complexité de la notion de vulnérabilité et les limites des études aléa ou vulnérabilité centrées.

Un second sous-chapitre présente les nouvelles approches des années 2000 qui promeuvent les études systémiques, dans lesquelles la géographie se veut globale et intégrée.

## 1. L'époque moderne, la transition vers une remise en question du divin

Depuis l'Antiquité et la création de l'écriture, des témoignages de la perception et de la gestion des risques naturels nous sont parvenus. Ainsi, à partir de l'Antiquité et jusqu'à la fin du Moyen-Âge les phénomènes dangereux étaient majoritairement considérés comme relevant du domaine du divin et donc étaient considérés comme des fatalités (Lancel, 2005; Leguay, 2005). Ces catastrophes étaient donc le plus souvent attribuées à un ou plusieurs dieux et étaient considérées comme des messages ou des punitions divines. Cependant, même si le phénomène est rare, dès l'Antiquité, des observations, descriptions très précises et tentatives de compréhension des phénomènes naturels apparaissent comme lorsque Pline le Jeune décrit l'éruption du Vésuve en 79 apr. J.C. (Pline le Jeune, Épîtres, livre VI, lettre 16 in Breton, 1870) ou que Thucydide, en 426 avt. J.C., pour la première fois, établit une relation entre un séisme sous-marin et un tsunami (Thucydide in Lancel, 2005). L'époque moderne va voir la transition vers la remise en question du divin et l'apparition d'une potentielle responsabilité des Hommes dans les catastrophes.

L'époque moderne fut marquée par la montée en puissance de l'Etat central, un renouveau philosophique avec les Lumières, la découverte du nouveau monde qu'est l'Amérique, le développement de nouvelles technologies... Ces évolutions de la société et en particulier l'influence des philosophes de la période des Lumières vont entraîner un glissement de la perception des risques et des événements naturels, du phénomène divin aux phénomènes physiques et rationnels. La notion de fatalité recule et, désormais, les conséquences des aléas peuvent être expliquées par l'activité humaine (Berry, 2006; Garnier, 2007; Quenet, 2010). Des prémices de législation émergent assez rapidement et la place accordée aux manifestations divines s'estompe petit à petit, en particulier pour les risques d'inondations et d'incendies qui sont finalement des aléas fréquents. En étudiant le risque d'inondations dans les villes normandes au XVII et XVIII$^{e}$ siècle, Garnier (2007) constate qu'un gradient apparaît entre grandes villes côtières ouvertes au commerce international et les petites villes intérieures. Dans les premières, lors de catastrophes, les processions et autres

invocations à Dieu sont très peu fréquentes voire inexistantes tandis que dans les petites villes, la perception des phénomènes de crues et d'inondations demeurent des manifestations purement divines (Garnier, 2007). Pour les risques plus rares comme les tremblements de terre, la situation est la même dans toutes les villes où les causes du danger sont interprétées comme relevant du divin, ce qui arrange parfois les affaires royales :

> *« Les secousses peuvent être aussi des présages, relevant de l'art de la divination ou de l'astrologie. […] Sous Louis XIII, la monarchie ne se prive pas d'exploiter la valeur de présage des séismes pour discréditer les protestants […] » (Quenet, 2010).*

Le rôle d'un Etat fort et moderne prend place après les années 1750 et l'Etat commence à prendre en charge la protection des individus lors de catastrophes, instaure les défiscalisations temporaires et les aides à la reconstruction se développent (Garnier, 2007; Quenet, 2010). Dès lors, la société évolue : les prières ne sont plus les seuls remèdes contre les catastrophes (Kervern & Rubise, 1991; Kervern, 1995), la « société de la peur » disparaît (Fabiani & Theys, 1987). La question de la responsabilité de l'Homme dans les pertes lors de catastrophes est alors posée.

Le premier à avoir identifié et provoqué un large débat autour d'une possible responsabilité des hommes dans les risques et les catastrophes est Rousseau, en 1755, après le tremblement de terre qui surprit Lisbonne pendant l'office de la Toussaint (Figure 2).

Pour répondre à Voltaire qui écrit:

> *« Dieu s'est vengé […] Ô ciel, ayez pitié de l'humaine misère ! »*

Rousseau réplique en ces termes :

> *« La nature n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages, et que si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également, et plus légèrement logés, le dégât eût été beaucoup moindre, et peut-être nul »*
> puis *« si les habitants s'étaient dispersés ou logés autrement […] on les eut vus, le lendemain à vingt lieues de là, tout aussi gais que s'il n'était rien arrivé »*
> *(Fabiani & Theys, 1987; Garnier, 2007)*

***Figure 2: Gravure du tremblement de terre de Lisbonne, le 1er novembre 1755. Il fut suivi d'un tsunami (Original au Museu da Cidade, Lisbon)***

Pour la première fois, la catastrophe n'est plus uniquement divine ou naturelle mais comporte bien une dimension anthropique. Ceci bouleverse les débats scientifiques et religieux de l'époque et cristallise un nouveau paradigme selon lequel les hommes peuvent comprendre les événements naturels qui les touchent et peuvent donc agir pour en atténuer les effets. Dès lors que des mesures de prévention, de protection et de gestion des crises sont possibles, l'acceptation du danger s'amenuise (Fabiani & Theys, 1987; Quenet, 2010). Ainsi :

> *« Cette menace nouvelle (les tremblements de terres fréquents après 1755) fait à son tour du mal physique un scandale. […] Pour la première fois depuis des siècles, le degré de risque accepté par les hommes a changé […]. La période moderne conduit bien, d'une part, à une prise en charge étatique des dangers, d'autre part à la naturalisation et à la laïcisation des catastrophes.» (Quenet, 2010 p. 21)*

Grâce à ce tournant et à cette prise de conscience, la notion d'acceptation des risques va beaucoup évoluer. En France en particulier, l'Etat central prend le rôle de responsable et de réparateur, indemnisant les populations lors d'événements dévastateurs, rôle et actions dont est issue l'idée d'Etat providence (Glatron in Moriniaux, 2003). Il instaurera les corps d'ingénieurs comme les Ponts et Chaussées ou les Eaux et Forêts et l'introduira dans le risque d'un paramètre sociétal : la vulnérabilité (Laganier, 2006).

## 2. L'époque contemporaine, émergence du concept de vulnérabilité face à celui de l'aléa

### 2.1. La révolution industrielle, le paradigme de l'extrême et la notion d'aléa

L'approche technique qu'apportent les ingénieurs dans l'étude des catastrophes permet d'introduire, entre autres, les notions de risque et de responsabilité (Laganier, 2006; Quenet, 2010). Les ingénieurs tentent de contrôler les événements et développent des techniques de protection, de maîtrise des aléas et des risques, en particulier dans le domaine des risques de crues avec la construction d'ouvrages d'ingénierie hydraulique tels que des digues, barrages ou encore l'assèchement des zones humides etc. (Laganier, 2006).

*« La conception de la gestion des risques d'alors, fondée sur les lois de l'hydrologie, est construite sur l'idée d'une évacuation rapide des eaux vers l'aval par remodelage du linéaire fluvial. » (Laganier, 2006)*

Avec l'industrialisation, de nouveaux risques technologiques apparaissent : la peur de la catastrophe glisse du naturel vers le technologique. Cependant, comme le suggère Lamartine en 1842, lors de l'accident ferroviaire de Meudon, le risque technologique est vécu comme le prix à payer de la modernité et du progrès (Fargette, 2001). Lamartine déclara après l'accident de Meudon du 8 mai 1842, alors que la catastrophe avait provoqué la mort de 55 personnes (Figure 3) :

*«La civilisation aussi est un champ de bataille où beaucoup succombent pour la conquête et l'avancement de tous. Plaignons les, plaignons nous mais marchons » (Fargette, 2001).*

***Figure 3: Accident ferroviaire de Meudon de 1842. (Détail, Collection du musée de l'Ile-de-France, original au Château de Meudon)***

Les ingénieurs considèrent que malgré le caractère vulnérable de la société et des hommes, seul le contrôle des éléments naturels (ou technologiques) peut diminuer l'intensité des catastrophes. Cette approche aboutira à la notion de risque, définie comme étant fonction de l'aléa et de la vulnérabilité. En théorie, dans cette vision, l'aléa et la vulnérabilité ont le même poids et le risque est le point de rencontre de ces deux éléments. Or dans les études techniques et scientifiques, la pondération de l'aléa prime largement sur celui de la vulnérabilité (lorsque celle-ci est prise en compte) et les deux éléments sont traités séparément.

Dans l'étude des risques naturels, l'aléa représente l'élément physique, actif et naturel, facteur de danger lorsqu'il impacte une société humaine fragile, passive et vulnérable. La société en est réduite à subir des dommages et répond plus ou moins facilement après la crise (Cutter *et al.*, 2003; Dauphiné, 2003; Pigeon, 2005; Aschan-Leygonie & Baudet-Michel in Becerra & Peltier, 2009; Hufschmidt, 2011).

Dans les approches aléa-centrées, l'aléa est le centre et le point de départ des études de réduction des risques (paradigme de l'extrême, Figure 4). Il est l'élément étudié le plus en profondeur et la vulnérabilité reste le parent pauvre de la définition. Cette approche est particulièrement pratique lorsqu'il s'agit de répondre à des décideurs politiques pour la mise en place de plan de protection/prévention, etc. concernant les risques (Veyret & Reghezza, 2006). Il s'agit alors de maîtriser la nature pour protéger les hommes qui subissent des dégâts ou des dommages chiffrables. Les études fondées sur ce paradigme, dit de l'extrême, sont toujours fréquentes :

Définition de la vulnérabilité utilisée en 2012 par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ou IPCC en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change) :

*« Propension ou prédisposition à subir des dommages » (IPCC et al., 2012)*

Définition de risque par les assises nationales (françaises) des risques naturels de 2012 :

*« Nous avons pu voir dans ces assises que le risque était pour les experts un croisement entre une vulnérabilité et un aléa. » (Ministère de l'Ecologie du Developpement durable des Transports et du Logement, 2012)*

D'abord considérés comme forcément exogènes à la société, les aléas ont acquis, petit à petit, un caractère endogène. Ils peuvent alors être de 3 types : soit ils sont purement naturels

(effets des avalanches, inondations ou impacts d'une sècheresse sur la végétation…), soient ils sont purement humains (effet d'un crash économique, d'une guerre…) soit ils sont à la fois naturels et anthropiques (effets d'une sècheresse associés à ceux d'une guerre) (Tableau 1).

Les aléas peuvent également être de natures différentes et s'inscrire dans des échelles spatio-temporelles variées (Tableau 1). Ainsi un tremblement de terre, une submersion marine ou une éruption volcanique, correspondant à des événements extrêmes, rapides, concis dans le temps et dans l'espace, s'apparentent à un choc, un événement, un point de rupture dans le temps et dans l'espace. Le changement climatique, une vague de chaleur ou la dégradation des sols sont des perturbations plus lentes et plus insidieuses dont la tendance aggrave lentement la situation. Il s'agit plus d'un stress auquel le système est soumis et auquel il va devoir répondre (Turner *et al.*, 2003; Gallopin, 2006).

Le déclanchement/aggravation de ces perturbations peut être provoqué par des éléments naturels (éclair provoquant un feu de forêt, tempête provoquant une submersion…), anthropiques (feu criminel, avalanche déclenchée par un skieur…) ou les deux comme par exemple la mauvaise gestion des sous-bois favorisant l'extension de la zone concernée par le feu (Pigeon, 2005; Becerra & Peltier, 2009; D'Ercole & Metzger, 2011).

***Tableau 1: Exemple des différents types d'aléas, endogènes, exogènes et mixtes, en fonction de leurs échelles spatio-temporelles***

| | | **Aléa Endogène** | **Exogène** | **Mixte** |
|---|---|---|---|---|
| **Echelle spatiale globale** | **Echelle de temps court** | Explosion nucléaire type Tchernobyl | Tremblement de terre | Catastrophe de Fukushima : Tsunami + explosion nucléaire |
| | **Echelle de temps long** | Guerre mondiale | Sècheresse, vague de chaleur ou de froid | Développement de maladies dû à la pauvreté et à une vague de froid |
| **Echelle spatiale locale** | **Echelle de temps court** | Manifestations ponctuelles, troubles de l'ordre public | Submersion marine | Inondations dues à de fortes précipitations et à des aménagements mal conçus |
| | **Echelle de temps long** | Embargo | Erosion d'une falaise | Dégradation des sols due à une mauvaise gestion agricole et des ressources en eau limitées |

### 2.2. Les années 1970, paradigme radical et prise en compte de la vulnérabilité

L'évolution de la notion de vulnérabilité est liée au questionnement induit d'une part par des phénomènes naturels qui évoluent peu (phénomènes relativement de même intensité et fréquence) et d'autre part l'augmentation des pertes (humaines ou financières) lors des catastrophes. Cet état des lieux questionne le chercheur quant à la part réelle de l'aléa dans les risques (O'Keefe *et al.*, 1976). Les problèmes théoriques et ceux rencontrés sur le terrain pour la mise en œuvre du paradigme « de l'extrême » ont abouti à une évolution majeure dans l'approche des risques naturels : la remise en question du paradigme « extrême » pour aboutir à un nouveau paradigme dit « radical » pour lequel la vulnérabilité détrône l'aléa dans l'étude des risques (Figure 4). La prise en compte de la vulnérabilité, et plus globalement de la société est alors apparue comme fondamentale pour l'étude des risques pour un grand nombre d'auteurs d'abord anglo-saxons puis français (Par exemple : Hewitt, 1983; Cutter, 1996; Brooks, 2003; Pigeon, 2005). De ces deux approches sont nés plusieurs autres paradigmes accordant plus ou moins de place à la vulnérabilité et à l'aléa pour étudier le risque. Gilbert in Becerra et Peltier (2009), propose 3 nouveaux paradigmes (Figure 4). Le premier, fort, implique que la vulnérabilité a un rôle plus important que l'aléa dans la définition du risque. Le deuxième, modéré, implique que la vulnérabilité et l'aléa ont un rôle équivalent et le troisième et dernier, faible, implique que seul l'aléa existe dans la définition de risque (Figure 4)

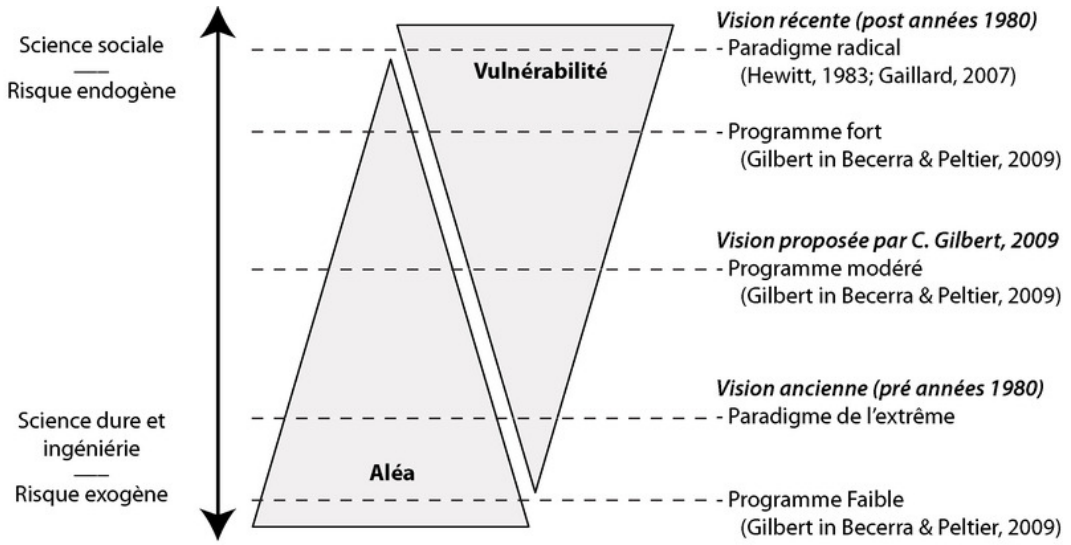



***Figure 4: Attention portée à l'aléa et à la vulnérabilité selon l'approche classique de l'étude des risques et ses évolutions***

Cependant, malgré toutes ces propositions, il semble complexe de se défaire de la notion d'aléa, fort, actif et naturel contre celle de vulnérabilité, faible, passive et purement anthropique. Cette conception du risque doit aujourd'hui être dépassée (Pigeon, 2005; Becerra & Peltier, 2009; D'Ercole & Metzger, 2011) d'autant qu'elle favorise la dichotomie entre aléa et vulnérabilité, entre nature et société et même entre géographie physique et géographie humaine. Dépasser ces cloisonnements arbitraires et étudier les relations entre les différents éléments des systèmes paraît aujourd'hui indispensable (Pigeon, 2005; Veyret & Reghezza, 2005; Veyret & Reghezza, 2006; Meur-Ferec, 2009; D'Ercole & Metzger, 2011). Ainsi :

> *« La géographie des risques devrait se présenter comme une géographie globale, au-delà des clivages entre géographie physique et humaine » (Pigeon, 2005 p. 16)*

La définition théorique de la vulnérabilité est beaucoup moins évidente que celle de l'aléa. Cutter (2006) comptabilise, entre 1980 et 1995, 19 définitions de la vulnérabilité dans la littérature anglo-saxonne sans qu'un consensus n'ait pu être trouvé depuis. 2 axes principaux ressortent de ces nombreuses définitions :

- D'abord un axe qui évalue la vulnérabilité comme une capacité à recevoir des dommages, autrement appelée vulnérabilité externe. Avant les années 1990, la vulnérabilité était étudiée par le biais de l'endommagement subi par un groupe humain (vulnérabilité externe donc risque exogène à la société). Cela sous-entend la notion de coût et donc de quantification du phénomène. La quantification a cela de très pratique qu'elle permet de cartographier aisément les effets du phénomène dévastateur (Pigeon, 2005).

- Ensuite un axe dans lequel la vulnérabilité est définie comme étant la capacité de réponse de la société face à une crise, un danger ou vulnérabilité interne (D'Ercole et al., 1994; Dauphiné, 2003; Becerra & Peltier, 2009). Après les années 1990 la vulnérabilité intègre, sous l'impulsion de sociologues, une dimension sociale et culturelle qui, bien que beaucoup moins pratique pour les représentations cartographiques, donne une nouvelle dimension à sa définition. Les risques deviennent potentiellement endogènes à la société éprouvée (Fabiani & Theys, 1987).

La première définition sous-entend que la société qui subit est totalement passive durant l'événement : elle « subit » les effets des aléas, attend que la crise passe. La seconde implique que la société ne peut que réagir consécutivement à la crise et non s'y préparer. Soumise aux réalités de terrain, cette vision de la vulnérabilité ne tient pas et de nombreux auteurs la

qualifient d'obsolète. La vulnérabilité attend toujours un cadre d'étude universel (Pigeon, 2005; Gallopin, 2006; Nathan in Becerra & Peltier, 2009).

Les cadres d'étude de la vulnérabilité sont multiples mais restent axés sur l'aléa. En effet, Nathan, in Becerra et Peltier (2009) dénombre et critique 5 cadres conceptuels. Il juge que chacun des cadres d'analyse a ses inconvénients et ses avantages mais qu'aucun n'est suffisamment complet pour être utilisé universellement. Les principales critiques que l'auteur tire de ces cadres d'études, sont la trop faible prise en considération des relations entre les différents facteurs de vulnérabilité et la confusion qu'il peut y avoir dans les définitions des concepts. Par exemple, l'aléa et la vulnérabilité sont confondus dans le cadre d'étude *Livelihoods*. Les qualités très différentes selon les cadres d'études vont de l'aspect complet des études par *découpages analytiques* à la prise en compte des différentes échelles (*5 composants*) ou encore au caractère dynamique et pluridisciplinaire du cadre *PAR (Pressure and Release).* Deux rapports à l'aléa ressortent de ces différentes approches de la vulnérabilité. D'abord les études qui n'intègrent qu'un seul type d'aléa et analysent la vulnérabilité par rapport à ce type d'aléa. Ensuite les études qui analysent la vulnérabilité à plusieurs types d'aléas. Les deux approches, bien qu'elles soient peu utilisées conjointement, ne sont pas antinomiques et si l'analyse de la vulnérabilité face à un type d'aléa permet une approche ciblée et ponctuelle, l'analyse de plusieurs types d'aléas et de la vulnérabilité qui leur est liée, permet de regrouper les analyses ponctuelles et d'avoir une approche plus globale et générale.

Afin de s'affranchir de l'aléa, certaines études portent sur les facteurs de vulnérabilité. Ces facteurs sont des éléments naturels ou anthropiques qui vont accentuer la vulnérabilité d'un ou plusieurs éléments du territoire (Figure 5). Ils sont définis par les auteurs selon, d'abord ce qu'ils souhaitent étudier et ensuite, selon les réalités des terrains sur lesquels ils travaillent. De ces différents facteurs, les auteurs déterminent qualitativement la vulnérabilité. Il existe finalement autant d'études et autant de terrains différents qu'il existe d'auteurs. Aucun consensus sur les facteurs de vulnérabilité n'apparaît que l'on se trouve en zone urbaine ou rurale, en pays développé ou en développement etc… (Tableau 2). La multitude de ces facteurs permet toutefois de ne pas oublier d'élément devant être pris en compte dans l'étude de la vulnérabilité (Figure 5).

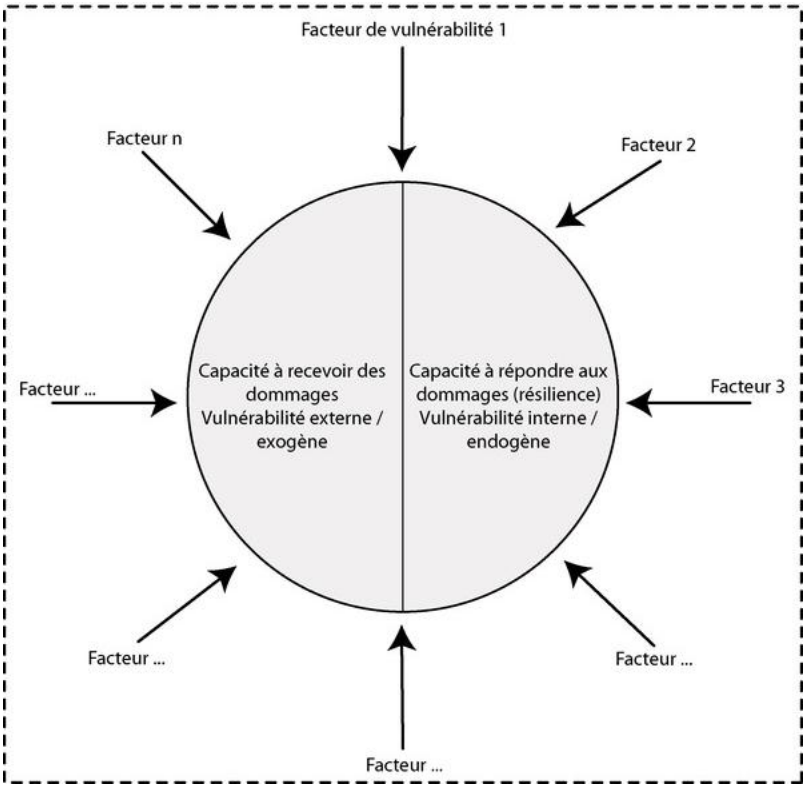



***Figure 5: Facteurs d'influence sur les vulnérabilités***

La profusion de cadres d'études et les nombreux facteurs pouvant être pris en compte rendent les analyses de la vulnérabilité peu aisées et renforcent le sentiment d'évidence de l'aléa face à un concept de vulnérabilité plus flou, moins évident, moins universel et finalement moins simple (Füssel, 2007). Ceci explique que les études actuelles soient toujours majoritairement aléa-centrées.

Malgré le caractère pratique du découpage en plusieurs études que propose l'analyse par les facteurs de vulnérabilité, tout l'enjeu sera, par la suite, de réussir à prendre en compte tous les facteurs de vulnérabilité, de les lier ou de les combiner, d'en étudier les interrelations et d'en tirer une synthèse, une estimation de la vulnérabilité (Nathan in Becerra & Peltier, 2009).

L'approche de la vulnérabilité par les systèmes semble désormais incontournable car ils permettent de prendre en compte l'ensemble des éléments étudiés et d'appréhender l'ensemble des relations qu'elles soient spatiales ou temporelles.

***Tableau 2: Facteurs de vulnérabilité selon 4 auteurs francophones entre 1994 et 2009***

| D'Ercole *et al.* (1994) | Theys (2002) | Texier (2009) | Nathan in Becerra et Peltier (2009) |
|---|---|---|---|
| ***Accélération de la croissance démographique et urbaine et mode d'occupation du sol*** | ***Dépendance directe*** : autonomie limitée, intégration forte, mono-spécialisation, sensibilité à un facteur limitant | ***Le degré de préparation individuelle ou collective*** : représentations et perceptions des risques encourus, niveau d'éducation, expérience, qualité des politiques de prévention des risques | ***Facteur de vulnérabilité physique :*** Présence et densité de population, habitat, réseaux, biens et services en zone à risque. Incapacité d'un enjeu à résister ou à se remettre |
| ***Facteurs socio-économiques:*** exode rural, spéculation foncière, pratiques clientélistes, recherche de proximité des centres actifs de la ville | ***Dépendance indirecte:*** insertions dans un réseau, connectivité forte, sensibilité à de nombreuses variables interdépendantes, causalité en boucle | ***L'état sanitaire*** : robustesse de l'individu, âge, sexe mobilité, densité de population, résistance de l'habitat et des biens de production | ***Facteur de vulnérabilité socio-écologique*** perturbations écosystémiques induites par l'homme et qui aggravent l'aléa naturel |
| ***Facteurs psychosociologiques*** : perception et mémoire du risque, sentiment d'insécurité | ***L'opacité*** : absence de vision globale de système, nombreuses boîtes noires | ***La résilience*** : capacité d'un système à résister et à reconstruire suite à l'occurrence d'un aléa | ***Facteur de vulnérabilité juridico-légal :*** régulations législatives insatisfaisantes pour prévenir, atténuer, se préparer et faire face |
| ***Facteurs culturels et historiques:*** adoption des modèles occidentaux, fatalité et résignation (croyances religieuses) | ***L'insécurité :*** exposition à des risques multiples, faible protection | | ***Facteur de vulnérabilité institutionnel :*** Idem judico-légal mais pour les dispositifs institutionnels |
| ***Facteurs techniques de vulnérabilité :*** mauvaise qualité des constructions inadaptées au milieu | ***La fragilité :*** résistance ou fiabilité insuffisante | | ***Facteur de vulnérabilité technique :*** savoirs inadéquats et/ou mauvaise utilisation des techniques de gestion des risques |
| ***Facteurs fonctionnels*** : gestion des crises | ***L'ingouvernabilité*** : faible capacité d'adaptation à l'imprévisible, rigidité, opacité… | | ***Facteurs de vulnérabilité politiques :*** facteurs politiques empêchant la préparation, prévention |
| ***Facteurs institutionnels et politico-administratifs*** | ***La centralité*** | | ***Facteurs de vulnérabilité socio-économiques :*** facteurs qui augmentent la susceptibilité aux catastrophes et réduisent les capacités d'autoprotection |
| | ***Faible résilience*** : incapacité à survivre ou à s'adapter à la catastrophe, risques d'irréversibilité forte, rupture socialement inacceptable etc. | | ***Facteurs de vulnérabilité psychologiques et culturels :*** facteurs augmentant la susceptibilité aux catastrophes et réduisant les capacités d'autoprotection |
| | ***La potentialité des pertes (enjeux)*** | | |

## 3. Les années 2000, approche systémique et spatiale

### 3.1. Les systèmes et socio-écosystèmes

Dans le cadre d'études sur les conséquences du changement climatique, les définitions des aléas et de la vulnérabilité se sont largement affinées et modifiées et ont trouvé un nouveau cadre conceptuel permettant d'atténuer, voire d'effacer la dichotomie entre les deux termes : les systèmes et les socio-écosystèmes. Les approches française et anglo-saxonne se rejoignent aujourd'hui et toutes s'accordent pour dire que le risque n'est pas seulement la résultante du point de contact entre un aléa et une vulnérabilité mais est également et fortement défini par l'ensemble des interactions qui les relient (Pigeon, 2002; Veyret & Reghezza, 2005; Briones Gamboa, 2008). L'étude des risques ne se concentre plus seulement sur l'approche physique mais intègre également une approche sociale et pluridisciplinaire la plus large possible.

Les systèmes étudiés en géographie, qu'ils soient sociaux ou naturels, ont tous des bases communes et utilisent des modes de représentation identiques. Quatre définitions de « système » conçues par des géographes vont permettre de mettre en lumière ces points communs.

Brunet *et al.* (1996) donnent la signification étymologique du système et réaffirment la notion de relation entre différents éléments instaurée par Von Bertalanffy (2012). Ces relations sont le fondement même de la systémique et peuvent être de différentes natures.

> *« Ensemble organisé d'interactions entre des éléments ; du grec systema : qui tient ensemble, mais avec l'idée d'union (syn) en un tout organisé voire stable, histani, comportant la racine sta. Un système a une structure, que s'efforce de représenter le schéma de système ou modèle logique généralement sagittal, figurant les éléments (ou boîtes, voire boîtes noires), les liaisons orientées entre ceux-ci, les points de distribution ou d'amplification » (Brunet et al., 1996)*

De Rosnay (1975) ajoute que les éléments du système, ainsi que leurs relations, sont organisés. Ces interactions peuvent être plus ou moins rapides ou lentes, vastes ou restreintes dans l'espace, c'est-à-dire dynamiques. Il intègre la notion de finalité d'un système et donc évoque la potentielle évolution du système pour atteindre un objectif (équilibre du système). Il utilise également le terme « ensemble » qui donne un caractère indissociable aux éléments du système pour que celui-ci soit complet et fonctionnel.

*« Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but » (De Rosnay, 1975)*

Von Bertalanffy (2012), dans la réédition de son ouvrage « *Le système général* », va plus loin et pousse le caractère indissociable des éléments du système pour aboutir à la certitude qu'un système « général », un système pouvant englober l'ensemble du monde et de ces éléments, existe :

> *« De tout ce qui précède se dégage une vision stupéfiante, la perspective d'une conception unitaire du monde jusque-là insoupçonnée. Que l'on ait affaire aux objets inanimés, aux organismes, aux processus mentaux ou aux groupes sociaux, partout des principes généraux semblables émergent » (Von Bertalanffy, 2012)*

L'approche par la systémique permet la compréhension des phénomènes naturels ou anthropiques en étudiant l'ensemble des éléments qui entrent en jeu dans leur déclanchement, diffusion, propagation etc. et l'ensemble des relations qui les unissent. Les différents éléments du système s'influencent les uns les autres via des relations plus ou moins fortes, plus ou moins directes et de manière plus ou moins hiérarchique. De Rosnay (1975) utilise le terme de complexité pour qualifier les systèmes permettant d'expliquer et de comprendre les phénomènes géographiques. Cet auteur utilise une représentation graphique basée sur un schéma fléché dans lequel des éléments sont reliés entre eux par un réseau de flèches. La complexité est liée, d'abord au nombre d'éléments du système, à leurs caractéristiques et à leurs relations entre eux (si une caractéristique d'un élément varie, cela aura une influence sur les autres éléments du système), ensuite aux relations qu'entretient le système avec son environnement (Peguy, 2001; Durand, 2010). Les systèmes font partie d'un environnement (éléments d'échelles plus vastes) avec lequel ils vont avoir ou non des interactions. Dans le cas où le système n'a aucune relation avec son environnement, alors il sera considéré comme fermé (entropie). A l'inverse, lorsque le système a des relations avec son environnement, alors il est dit ouvert (néguentropie) (Figure 6). Cette idée d'ouverture ou de fermeture du système pose la question de ses limites. En géographie, elles sont avant tout spatiales mais peuvent aussi être politiques ou économiques si le phénomène étudié est de cet ordre. Tout ce qui est en dehors de cette limite constitue l'environnement du système. Les éléments de l'environnement influencent et peuvent être influencés par les éléments du système étudié et font eux même partie d'un système d'échelle plus vaste. De la même manière le système étudié peut être considéré comme l'environnement d'un sous-système. Son organisation est

basée sur le type de relations que vont entretenir les éléments du système entre eux et leurs relations avec son environnement, etc… et correspond à un :

> *« agencement de relations entre composants ou individus qui produit une nouvelle unité possédant des qualités que n'ont pas ses composants » (Durand, 2010)*

Prenons l'exemple d'un agrosystème. Il est le système étudié compris dans un système plus vaste, lui-même composé d'éléments (climatiques par exemple) qui l'influencent. Il est également l'environnement dans lequel se développent des réseaux trophiques (sous-systèmes) qui lui sont propres. Ces sous-systèmes seront à leur tour influencés par l'agrosystème en termes d'espèces animales et végétales (adaptées au type de sols, de plantes, climat etc.). Ces espèces l'influenceront en retour par leurs actions dans l'agrosystème (pâturage, dispersion des graines etc…). Dans le cadre de cette thèse, le système étudié correspond à l'archipel de Kerkennah et est délimité par la barrière naturelle que constitue la mer Méditerranée. Ainsi les sous-systèmes et le système « Kerkennah » seront toujours ouverts sur leur environnement car en relation avec des systèmes d'échelles plus vastes d'ordre climatique (échelle régionale ou mondiale) ou politique (échelle étatique) par exemple.

Plusieurs types de relations existent entre, à la fois les éléments du système étudié entre eux, et entre le système et son environnement : D'abord les relations simples où l'élément 1 influence l'élément 2, qui peuvent être positives ou négatives. Ensuite, les interactions où l'élément 1 influence l'élément 2 et réciproquement, qui peuvent conduire à la stabilité du système, son emballement ou son extinction. Enfin, les rétroactions où un élément ou un groupe d'éléments s'influencent eux-mêmes ce qui peut conduire à une boucle de rétroaction positive (emballement) ou négative (extinction) (Figure 6).

Les éléments du système et les relations entre eux peuvent varier au cours du temps lorsqu'un événement vient perturber le fonctionnement « habituel » du système étudié. Ces changements sont le résultat, soit de perturbations naturelles internes, soit externes au système ouvert étudié, soit le fait d'événements anthropiques dommageables.

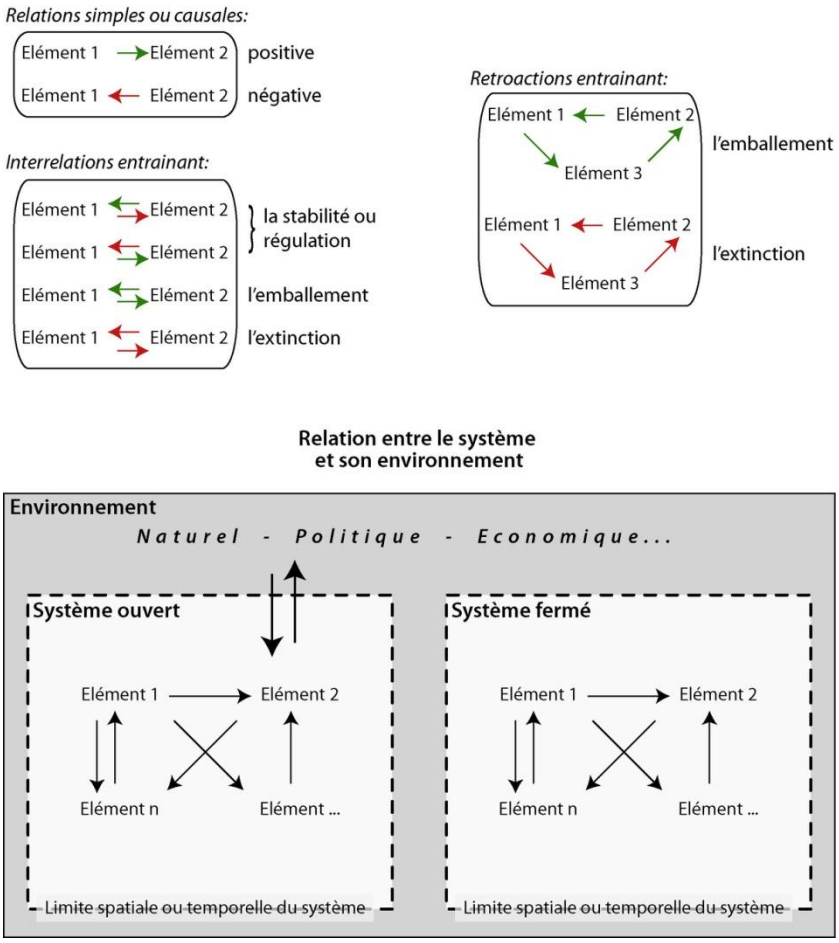



***Figure 6: Types de relations en systémique***

Les changements dans l'évolution du système se produisent après une période « calme », de stabilité, durant laquelle le système engrange de l'énergie (ex : biomasse, population dans une ville, production agricole etc…) à la suite de quoi se produit une perturbation (anthropique, de l'environnement ou intrinsèque au système) qui va conduire à plusieurs scénarios évolutifs possibles (Gunderson & Holling, 2001). Par exemple, les hommes (élément 1), puisent des ressources dans le milieu naturel (élément 2). Si ces ressources sont renouvelables et que les prélèvements sont durables, alors le système est en équilibre. Mais si les extractions sont excessives et que les ressources sont fossiles, alors le système va devoir faire face à une pénurie et s'adapter. L'évolution du système dans le temps peut être majeure et la physionomie du territoire être totalement bouleversée (Moine, 2006).

Dans son ouvrage, « *La théorie du système général* », Le Moigne (1994) propose une classification des processus d'équilibration du système général après une ou plusieurs perturbations de ces finalités ou de l'environnement (Figure 7)

| Relation du Système Général avec : | | SES PROJETS (FINALITÉS) : | |
|---|---|---|---|
| | | PERMANENTE | CHANGEANTE |
| SON ENVIRONNEMENT : | PERMANENTE | *Phase 1*<br>*RÉGULATION*<br>(HOMÉOSTASE) | *Phase 3*<br>*ADAPTATION STRUCTURELLE*<br>(TRANS-FORMATION) |
| | CHANGEANTE | *Phase 2*<br>*ADAPTATION :*<br>*1. Par PROGRAMME*<br>(HOMEORHÈSE)<br>*2. Par RE-CODAGE*<br>(HOMEOGENÈSE) | *Phase 4*<br>*ÉVOLUTION STRUCTURELLE*<br>(MORPHOGENÈSE) |

***Figure 7: Le référentiel de l'équilibration du Système Général : phases 1, 2 et 3 : morphostase ; phase 4 : morphogenèse : il n'y a plus équilibration, mais évolution structurelle. (Tiré de Le Moigne, 1994)***

L'évolution d'un système peut être de trois ordres. Elle peut être stable (Figure 7 - phase 1), c'est-à-dire que le système s'autorégule dans les relations internes qu'entretiennent les différents éléments qui le constituent et celles avec l'environnement dont il dépend. Les finalités du système ne varient pas sans que, pour autant, les relations entre les éléments soient figés (De Rosnay, 1975; Le Moigne, 1994; Von Bertalanffy, 2012). Par exemple, un agrosystème dans lequel l'environnement reste inchangé et où la finalité « production agricole » reste identique, même lorsque les propriétaires des parcelles changent (Figure 7 - phase 1). C'est ce que désignent, plus récemment Djament-Tran *et al.* (2011) comme le maintien du système.

Le système peut également connaître des adaptations, soit parce que son environnement change, soit parce que ses finalités changent (Figure 7 - phase 2 et 3). Dans les deux cas, les éléments du système ou le système lui-même (c'est-à-dire les relations entre les éléments du système et ses relations avec l'environnement) peuvent être vulnérables face aux perturbations. Face aux changements, les éléments du système ou le système lui-même vont développer une capacité de réponse. Il devient alors résilient (Holling, 1973). La perturbation du système par l'environnement est typique des systèmes locaux bouleversés par des changements d'ordres climatiques (comme l'augmentation du déficit hydrique ou l'élévation du niveau de la mer) ou globaux (mise en place de politiques à une échelle plus vaste). Les systèmes qui y sont soumis doivent alors s'adapter pour que leur finalité reste la même. Le Moigne (1994) explique que l'adaptation se fait alors par « programme » et que le système

doit s'adapter à des changements non souhaités et non prévus en mettant en place de nouveaux éléments, des relations entre éléments ou, dans les systèmes sociaux, en mettant en place des processus d'innovation afin d'arriver à un nouvel état stable (Figure 7 – phase 2). Par exemple, dans le cas d'un agrosystème viticole, les effets du réchauffement climatique (qui fait partie de l'environnement du système) pousseront les agriculteurs à s'adapter. Si la finalité du système reste identique, c'est-à-dire la culture de la vigne, alors les viticulteurs devront mettre en place des stratégies comme l'irrigation (nouvel élément du système) ou remplacer les cépages originels par d'autres, plus adaptés à la chaleur (processus d'innovation).

Les auteurs étudiant ce type de phénomène utilisent le terme de résilience écologique et la mettent en œuvre dans le cadre des études des écosystèmes et des socio-écosystèmes (Gunderson & Holling, 2001; Serre *et al.*, 2012). Bien que l'origine de ce concept soit attribuée à différentes sciences comme l'écologie, la psychologie ou encore l'ingénierie (Gunderson & Holling, 2001; Djament-Tran *et al.*, 2011), ces définitions se rejoignent sur son caractère pluridisciplinaire. Djament-Tran *et al.* (2011) constatent qu'il existe plusieurs approches théoriques et méthodologiques d'appréhension de la résilience. Ainsi pour l'approche de Holling (1973), qui étudie les écosystèmes, la résilience désigne la capacité d'un système à persister et à maintenir les relations qui lient les éléments entre eux, tout en absorbant les changements de son environnement. Lorenz (2010), qui étudie les socio-systèmes, parle de reconstruction, que ce soit au sens métaphorique ou au sens pratique. La résilience est également définie comme étant la capacité à faire face (coping), à anticiper, gérer l'événement dommageable et s'en remettre (recover), à répondre à un choc en modulant temporairement le système sans pour autant perdre ses fonctions, c'est-à-dire à s'adapter ou plutôt à se renouveler (renewal) (Walker *et al.*, 2004; Serre *et al.*, 2012). Ces approches sont toutes issues de l'approche de la résilience éco-systémique qui est adaptée à des systèmes imprévisibles et à des études prônant la persistance du système, son adaptation et permettant son évolution (Gunderson & Holling, 2001). A l'opposé, certains ingénieurs utilisent comme synonyme les termes résilience et résistance. Leurs travaux promeuvent le retour à l'équilibre initial du système (constance du système) par des actions de contrôle. En théorie, ceci n'est adapté qu'aux très rares systèmes dont l'évolution est prévisible (Gunderson & Holling, 2001). Dans la pratique, même si les systèmes ne sont pas prévisibles, les aménagements d'ingénieries de contrôles sont très souvent utilisés pour répondre aux risques. Ces différentes approches (d'écologues et d'ingénieurs) sont en opposition, ce qui implique de grandes

différences dans les approches des risques, de la vulnérabilité et de la résilience (Walker *et al.*, 2004; Djament-Tran *et al.*, 2011; Serre *et al.*, 2012). La résilience, tout comme la vulnérabilité, met en avant les dynamiques non linéaires des systèmes, les effets de seuils et l'incertitude des événements futurs. Elle étudie les périodes de changements qu'ils soient rapides ou lents et comment les dynamiques (non linéaires) agissent sur les différentes échelles spatiales et temporelles (Folke, 2006).

Dans le cas où les finalités du système changent mais pas l'environnement (Figure 7 - phase 3), le système va subir une adaptation structurelle sous la pression d'un événement perturbant, en modifiant ou en important des idées, des éléments d'autres systèmes, tout en gardant son identité, c'est-à-dire sans se « trahir » et devenir un nouveau système totalement différent du précédent. Il n'y a pas mort du système initial puis reconstruction. Par exemple, un agrosystème bocager pourra changer la finalité « agriculture de bocage » par « agriculture de type openfield » sans pour autant perdre son identité « agrosystème » (Figure 7 – phase 3). Ce changement structurel est désigné, plus récemment, par Djament-Tran *et al.* (2011) comme étant la bifurcation du système.

Le système, dans un processus d'équilibrations, peut également devoir faire face à des perturbations de son environnement et des perturbations de ses finalités (Figure 7 – phase 4). C'est le cas lorsqu'un agrosystème soumis au changement climatique passe d'un système bocager à openfield. C'est précisément dans ce type de contexte que se place l'objet de cette thèse. L'archipel de Kerkennah est soumis à la fois aux évolutions climatiques, environnementales et à l'évolution de la société, que ce soit en rapport avec le climat ou non (élévation du niveau de vie, meilleures relations avec le continent etc.). Cette transformation combine les effets des phases 2 et 3 de la Figure 7.

Lorsque les tentatives d'adaptation échouent et que le système ne peut pas trouver de nouvel équilibre sans se trahir, il s'effondre (ou collapse) et, après renouvellement, devient différent de l'état initial : des éléments, des finalités et un système de relations différent se mettent en place qui vont trouver un nouvel équilibre (Serre *et al.*, 2012). Ce fut le cas d'îles dans la baie de Chesapeake aux Etats-Unis qui furent soumises à une élévation relative du niveau de la mer au XIX$^{ème}$ siècle ce qui a conduit ses habitants à fuir après des tentatives d'adaptation comme le montre la Figure 8 (Arenstam Gibbons & Nicholls, 2006).

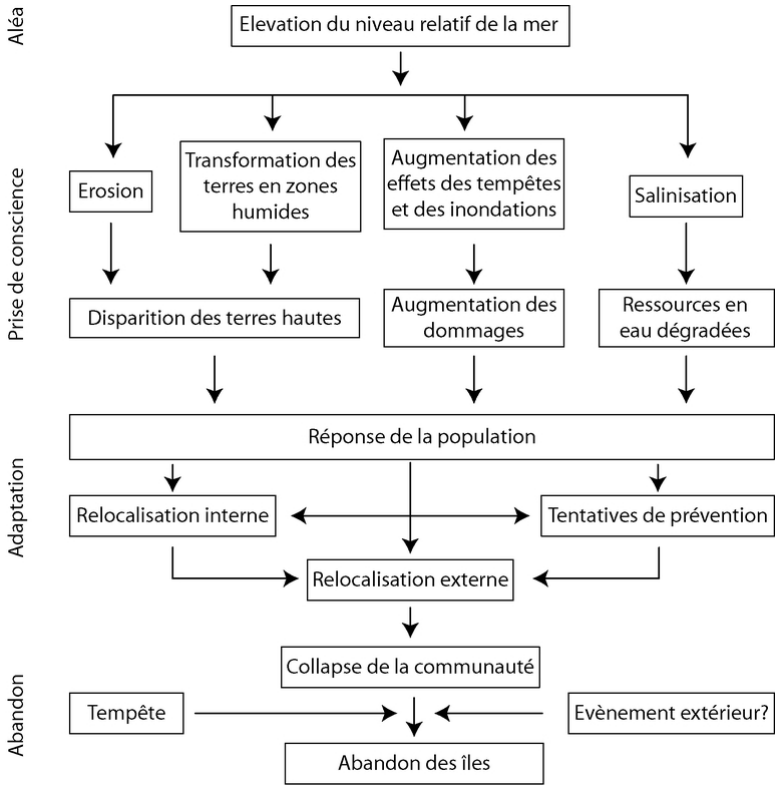



***Figure 8: Chaîne d'événements depuis l'élévation du niveau de la mer à l'abandon de l'île comme observé sur l'île de Hollande, Chesapeake Bay, Etat Unis (Tiré de Arenstam Gibbons & Nicholls, 2006 traduit de l'anglais)***

L'élévation relative du niveau de la mer (perturbation de l'environnement) a conduit à des perturbations physiques importantes qui ont elles-mêmes influencé la vie de la population et accru aussi bien la vulnérabilité de l'île que celle des insulaires (Figure 8). Les habitants furent contraints à changer de professions, passant de l'agriculture à la pêche et tentèrent de stopper le recul de la côte par divers aménagements. Mais cela n'a pas permis aux terres de conserver un quelconque potentiel agricole en raison de la salinisation des terres et de leur disparition par érosion marine. Les habitants quittèrent l'île qui ne pouvait leur offrir de services suffisants pour survivre et, dès lors que l'école et les commerces fermèrent, l'île fut désertée (Figure 8) (Arenstam Gibbons & Nicholls, 2006). Le nouveau fonctionnement du système « île » sera complètement différent de l'état initial.

La prise en compte des relations reliant les différents éléments du système est particulièrement importante car elle permet une étude globale et une approche plus juste de la vulnérabilité, de sa transmission et de l'évolution des systèmes. De plus, il est désormais indispensable de mener des études les plus complètes possible en intégrant à la fois les systèmes physiques et naturels et les systèmes humains : c'est le cas des études portant sur les socio-écosystèmes.

La prise de conscience de l'importance des relations reliant les éléments du système et engendrant la vulnérabilité a été particulièrement bénéfique. Des études ont été menées sur les relations entre éléments sociaux et naturels pour étudier les risques et la vulnérabilité ; c'est le cas des études sur les socio-écosystèmes. Les composantes anthropiques et naturelles et l'ensemble des relations qui les relient sont étudiées dans des systèmes complexes développés par les anglo-saxons appelés « socio-ecological systems (SES) » ou « coupled human-environmental systems » (Turner *et al.*, 2003; Adger, 2006; Folke, 2006; Füssel & Klein, 2006; Gallopin, 2006; Smit & Wandel, 2006; Füssel, 2007; Malone & Engle, 2011). Les socio-écosystèmes sont principalement utilisés par les chercheurs dans le cadre des études concernant les impacts du changement climatique, que ce soit à l'échelle locale ou à l'échelle globale (Cutter & Finch, 2008). L'abolition de la séparation des systèmes sociaux (ou socio-systèmes) et naturels (ou écosystèmes) et l'étude des relations qui lient chaque élément du socio-écosystème pose la question de la différence, s'il y en a, entre les systèmes sociaux et les écosystèmes. Pour certains comme Adger (2006) l'Homme et l'ensemble de ses actions sont un élément comme un autre de la nature:

> *« Le concept d'un système socio-écologique reflète l'idée que l'action humaine et les structures sociales font partie intégrante de la nature et donc toute distinction entre systèmes sociaux et naturels est arbitraire. » (Adger, 2006 traduit de l'anglais)*

De ce fait, la vulnérabilité naturelle devient un déterminant de la vulnérabilité socio-économique et inversement (Klein & Nicholls, 1999; Brooks, 2003). Ceci revient à concevoir les socio-écosystèmes comme des systèmes non décomposables ce qui n'exclut pas l'isolement de certains éléments pour des études pratiques (Gallopin, 2006). En effet, la décomposition du système global en sous-systèmes ouverts (le système global est l'environnement du sous-système) permet de décomposer les éléments du sous-système et ainsi de réaliser des études très pointues et très localisées tout en gardant à l'esprit les relations du système avec son environnement.

Pour d'autres, les systèmes sociaux ont certaines spécificités que n'ont pas les systèmes naturels ou écosystèmes et en particulier la capacité d'abstraction qu'ont les sociétés humaines (Lorenz, 2010). Cependant cette spécificité n'est pas contradictoire avec l'étude de la vulnérabilité par les socio-écosystèmes. Il s'agit d'une spécificité d'un élément du système comme un autre pour lequel seront prises en compte des caractéristiques spécifiques (capacité à prendre des mesures préventives par exemple).

Sans utiliser le terme de socio-écosystème, Meur-Ferec (2009), décompose la vulnérabilité en 4 composantes qui, une fois réunies, forment la « vulnérabilité globale » et qui intègrent des paramètres physiques (aléa et enjeux) mais également humains (perception et gestion). Il s'agit donc d'identifier puis d'étudier les relations entre les aléas, les enjeux, la gestion et la perception du risque, ce qui permet d'aboutir au « système vulnérabilité » (Figure 9).

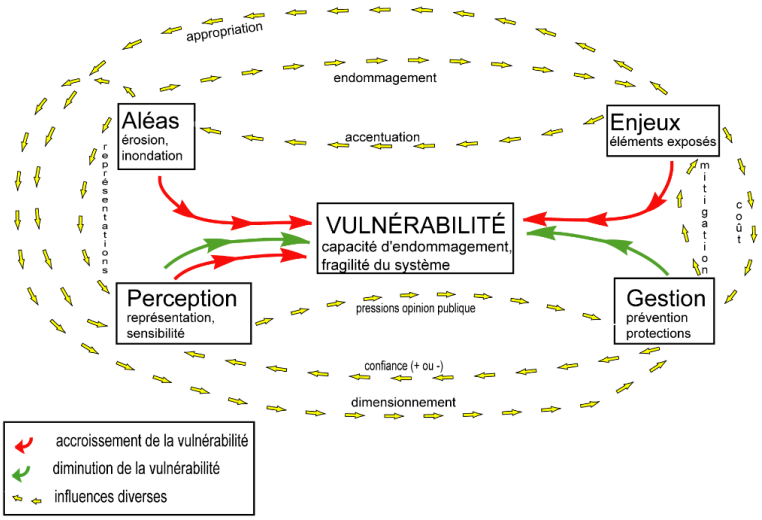



***Figure 9: Le "système vulnérabilité" (Meur-Ferec, 2009)***

La pluridisciplinarité imposée par l'étude des systèmes et la place de la géographie à la croisée des autres sciences, rendent l'analyse systémique en géographie particulièrement intéressante. Cependant, l'approche systémique pure ne suffit pas au géographe qui, par nature, s'intéresse à la spatialité des phénomènes.

### 3.2. La vulnérabilité territoriale

La vulnérabilité territoriale ou l'approche des risques par la vulnérabilité associe, comme les socio-écosystèmes, les caractères sociologiques et naturels des territoires étudiés (November, 2012). La différence majeure entre ces deux approches est le mode de représentation. L'approche par les systèmes accorde plus de place aux éléments qui les composent et à leurs relations tandis que l'approche par le territoire accorde plus d'importance à la spatialité des phénomènes. Dans les deux cas, les relations entre les différents éléments (qu'ils soient territoriaux ou thématiques) sont extrêmement importantes.

La spatialisation des phénomènes étudiés par cartographie et les SIG permet, comme l'approche par les systèmes, de mettre en lumière des relations inédites entre éléments du territoire (Figure 10).

La vulnérabilité territoriale permet de mettre en lumière la différence fondamentale qui existe entre exposition à un aléa et vulnérabilité (Leone & Vinet, 2006). En effet, un élément du territoire pourra être vulnérable sans pour autant être exposé à l'aléa (Figure 10). C'est le cas des relations en chaîne, des relations entre éléments faisant partie d'un réseau. Lorsqu'un des éléments du réseau est exposé à un aléa, les effets de cet aléa pourront être répercutés sur des éléments très éloignés de la zone d'impact, créant une chaîne d'événements négatifs et dommageables. Les événements en chaîne sont particulièrement visibles et appréhendables en milieu urbain (Figure 10) et c'est pourquoi la majeure partie des études traitant de la vulnérabilité territoriale portent sur ces espaces (Laganier, 2006; D'Ercole & Metzger, 2009; Metzger & D'Ercole, 2009; Fleury *et al.*, 2010; November *et al.*, 2011; November, 2012).

Cette approche n'est pas destinée uniquement aux milieux urbains mais à tout territoire étudié. Le territoire a pris beaucoup de définitions et a pu remplacer le terme d'« espace » ou se confondre avec le terme « espace géographique » (Brunet *et al.*, 1996; Moine, 2006). Le territoire a une part définie spatialement et délimitée par des frontières plus ou moins nettes.

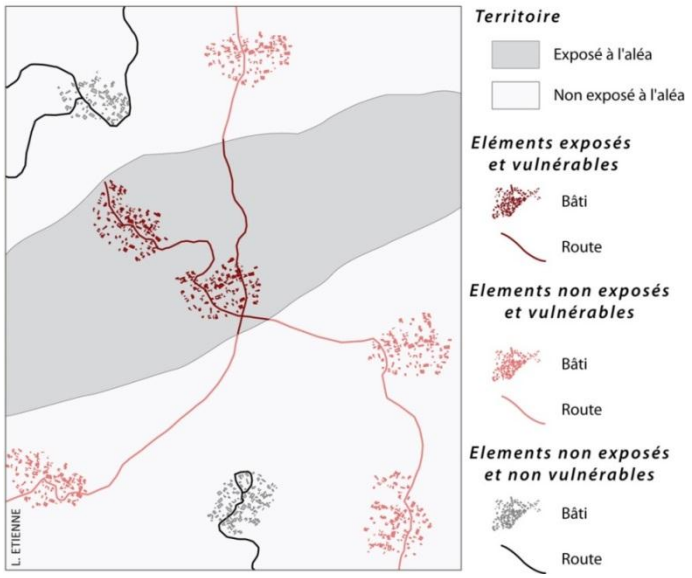



***Figure 10: Notion d'exposition et de vulnérabilité dans le cadre de l'approche spatiale de la vulnérabilité : exemple de diffusion de la vulnérabilité par un réseau routier***

Mais il peut également être vécu et relever d'un caractère non plus matériel mais plutôt psychologique, un sentiment d'appartenance à un groupe social uni, réparti au sein d'un espace physique. Le sentiment d'appartenance à ce territoire, matériel et physique mais aussi psychologique est un des fondements du territoire (Moine, 2006; Rebotier, 2008). Le second fondement concerne la construction du territoire, la volonté de vivre et de construire ce territoire entre différents acteurs que sont, pour Moine (2006), l'Etat, les collectivités territoriales, la société civile, les intercommunalités et les entreprises, auxquels il ajoute les individus. Le territoire est donc la rencontre d'une société ayant une volonté de vivre ensemble dans un espace physique, vécu et perçu.

> *« Le territoire tient à la « projection » sur un espace donné des structures spécifiques d'un groupe humain, qui incluent le mode de découpage et de gestion de l'espace, l'aménagement de cet espace. » (Brunet et al., 1996)*

Enfin, le rapprochement de la notion de territoire et de la notion de système renvoie aux relations qu'entretiennent les différentes approches du territoire (physique ou psychologique) ainsi que celles entre les différents acteurs de construction du territoire. Chaque territoire est ainsi composé de sous-systèmes que sont, entre autres, l'espace géographique physique, les espaces vécus et les espaces perçus (Di Méo, 1998; Moine, 2006). Ces sous-systèmes sont liés entre eux par un système de relations qui permet, d'une part aux espaces vécus et perçus de trouver un cadre physique, des frontières réelles, de conforter le sentiment d'appartenance de la population à son territoire et, d'autre part, aux espaces physiques d'être « envahis » d'une histoire, d'une singularité (Brunet *et al.*, 1996). Les territoires sont des systèmes complexes qui peuvent êtres vulnérables. Ainsi,

> *« une approche holiste de la vulnérabilité s'impose pour décrire et analyser les systèmes complexes (territoriaux, sociaux, organisations, institutions, etc. ) » (Leone & Vinet, 2006, page 11)*

Les auteurs francophones étudiant la vulnérabilité territoriale sont relativement peu nombreux et entrent le plus souvent dans leurs études par le biais d'enjeux parfois majeurs. Ils permettent d'étudier les risques non plus par l'entrée des aléas mais par celui de la vulnérabilité :

> *« Ce point de vue signifie que l'espace géographique considéré par l'analyse des risques et de la vulnérabilité est celui des enjeux territoriaux et non celui des aléas. » (D'Ercole & Metzger, 2009).*

De ce fait, le choix des enjeux étudiés est laissé aux décideurs ou chercheurs instigateurs d'études. Ils peuvent donc être tout à fait différents : environnementaux lorsqu'il s'agit de sauvegarder une plage par exemple, constructions en zone urbaine, politiques, économiques etc… Depuis les années 2000, la notion d'enjeux majeurs est apparue. Il s'agit également d'éléments à protéger mais qui sont centraux ou qui peuvent transmettre leur vulnérabilité lors d'événements dommageables à l'ensemble du territoire (D'Ercole & Metzger, 2009).

La vulnérabilité territoriale passe donc par l'identification des enjeux (ce que l'on veut protéger) et des enjeux majeurs (ceux qui vont diffuser la vulnérabilité au sein du territoire et la transmettre aux enjeux étudiés) en prenant en compte les relations entre les différents éléments du système territorial, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Les éléments ou les relations qui les relient, peuvent induire une vulnérabilité des éléments du système qu'ils soient exposés ou non à l'aléa initial mais également une vulnérabilité du système dans son ensemble, c'est-à-dire la mise en péril du système de relations unissant les éléments étudiés. Ainsi,

> *« Comme nous l'enseigne l'approche systémique, la vulnérabilité d'un territoire n'est pas réductible à la somme des vulnérabilités des enjeux exposés. » (Leone & Vinet, 2006, page 11)*

L'objectif de l'étude de la vulnérabilité territoriale est donc d'appréhender le territoire comme un système géographique dont les éléments, en relation les uns avec les autres, se transmettent et diffusent la vulnérabilité à l'ensemble du territoire (Leone & Vinet, 2006; Serre *et al.*, 2012) par le biais des enjeux. Les enjeux, dans cette thèse, seront décrits dans le **Chapitre 3**, après que les caractéristiques de l'archipel de Kerkennah aient été exposées.

## Conclusion du Chapitre 1

Grâce à l'approche historique de ce chapitre, les visions et les études passées des risques et leurs défauts ont été montrés ce qui permet de placer notre approche parmi celles les plus récentes qui sont à explorer. L'approche adoptée dans la thèse est celle d'une géographie globale qui tente de prendre en compte à la fois la géographie physique et la géographie humaine et qui s'inscrit également dans une approche systémique.

En effet, petit à petit, s'est instaurée l'idée que l'étude des risques devait mieux intégrer à la fois les aléas et la vulnérabilité tout en pointant des enjeux (majeurs ou non) et mettre en avant les relations qui relient les éléments du territoire qu'ils soient physiques ou humains (vécu et perçu) dans une optique systémique. Cette approche, dans les études sur les impacts du changement climatique, implique d'étudier les systèmes et les relations qu'ils entretiennent avec leur environnement et de prendre en compte la spatialité des phénomènes.

Pour réaliser cette thèse, les approches systémique et géographique sont appliquées et dans cette optique, les deux prochains chapitres mettront en évidence :

- Les éléments de l'environnement du système « Kerkennah » qui influent sur sa vulnérabilité (**Chapitre 2**).

- Les éléments intrinsèques de l'archipel qui sont vulnérables et ceux qui constituent les enjeux (**Chapitre 3**).

# Chapitre 2.

## Accentuation récente de la vulnérabilité liée au climat et au niveau de la mer à l'échelle de la Méditerranée et du golfe de Gabès

---

Les variations du climat sont un phénomène naturel qui est, de l'avis de la majorité des chercheurs de la communauté scientifique spécialiste de la climatologie, actuellement influencé par l'Homme (IPCC Working Group III Contribution to AR5, 2014). L'évolution du climat global et régional a une influence sur les systèmes d'échelle locale qui peut aggraver leur vulnérabilité face aux aléas climatiques et marins. Ainsi, la variation des conditions de températures, de pressions, de précipitations ou encore du niveau de la mer devraient influencer les caractéristiques environnementales de l'archipel de Kerkennah et accroitre la vulnérabilité de ces îles et de la population qui y réside. C'est pourquoi il est indispensable, pour comprendre le contexte dans lequel se place ce travail, d'expliquer les variations climatiques et du niveau de la mer en Méditerranée, plus particulièrement le sud du bassin, les côtes de la Tunisie et le golfe de Gabès. En gardant la vocation de l'état de l'art de cette première partie, nous ferons ici une synthèse des variations climatiques à plusieurs échelles spatiales et temporelles.

Dans un premier sous-chapitre le bassin méditerranéen dans son ensemble sera présenté ainsi que les influences climatiques qu'il subit et la circulation des eaux dans le bassin. Le deuxième sous-chapitre présentera les résultats d'études sur les variations climatiques et du niveau de la mer en Tunisie et plus particulièrement dans le golfe de Gabès. Enfin, le dernier sous-chapitre sera consacré aux projections futures (à l'horizon 2100).

# 1. Présentation du climat et des caractéristiques marines du bassin méditerranéen

Le bassin méditerranéen regroupe la mer Méditerranée et les pays qui la bordent. Les conditions climatiques de la région et la circulation des eaux dans le bassin méditerranéen constituent deux éléments de l'environnement du système Kerkennah qu'ils vont fortement influencer.

## 1.1. Les influences climatiques à l'échelle du bassin et de la région de Sfax

Le bassin méditerranéen subit les influences des masses d'air polaire du nord et des masses d'air chaud du sud. Le climat qui en résulte est spécifiquement nommé « méditerranéen » ou « subtropical des façades occidentales des continents », et est influencé par les flux d'ouest océaniques. Il constitue une transition entre des climats frais au nord et des climats arides et chauds au sud. A l'échelle du bassin, les températures sont douces et rarement négatives en hiver au nord du bassin, exceptionnellement négatives au sud et chaudes en été (moyenne estivale de 25°C avec des pics journaliers à plus de 40°C dans le sud du bassin). Les précipitations varient de moins de 300 mm/an au sud (Sfax, Tripoli) à 1200 mm/an au nord (Tirana en Albanie) et sont soumises à une variabilité saisonnière, avec le maximum de précipitations en hiver ou durant les saisons intermédiaires tandis que l'été est sec. Par ailleurs, les pluies tombent de manière brutale et soudaine, ce qui implique une variabilité intra-annuelle importante avec de courtes périodes très pluvieuses (moins de 100 jours de précipitations par an) et des périodes sèches parfois longues. Enfin, il existe une très importante variabilité interannuelle des précipitations.

En plus de la variabilité temporelle des précipitations et des températures, il existe une variabilité spatiale du climat méditerranéen qui dépend de plusieurs facteurs (Beltrando, 2007). La position méridionale des perturbations en hiver, entraîne la formation de dépressions sur l'Atlantique et la Méditerranée et elles y amènent donc des précipitations. Par opposition, leur situation plus septentrionale en été, provoque des pluies sur l'Europe tandis

que la Méditerranée en sera protégée par les hautes pressions venues du sud (i). La présence de l'océan Atlantique apporte de l'humidité et une moindre amplitude thermique aux stations le bordant (littoraux espagnols, portugais et marocains) (ii). La présence de montagnes dans les arrières pays entraîne les mêmes effets (iii). Les effets de la continentalité, qui se font sentir en Espagne et dans les pays du nord-est du bassin, provoquent une plus grande amplitude thermique. Enfin, la présence du Sahara au sud favorise des températures élevées (hivers doux et étés chauds) et des précipitations faibles (iv). Cette variabilité spatiale des précipitations et des températures explique que le nombre de mois écologiquement secs (valeur de précipitations inférieure à 2 fois celle des températures) augmente du nord vers le sud.

A Sfax[1], station météorologique la plus proche de l'archipel de Kerkennah (20 km), le climat est chaud en été (24,9°C en moyenne sur la période 1970-2002), et doux en hiver (12,3°C en moyenne sur la même période). La température moyenne annuelle est quant à elle de 19°C. Les précipitations sont quasi nulles durant les mois estivaux (Figure 11) et faibles durant le reste de l'année (225 mm), ce qui entraîne 9 mois écologiquement secs, synonymes de stress hydrique (Figure 11). Les précipitations connaissent une forte variabilité interannuelle avec des années très peu pluvieuses durant lesquelles il pleut moins de 100 mm (exemple 1987) et d'autres relativement pluvieuses durant lesquelles les totaux dépassent les 400 mm comme en 1982 (Dahech, 2007).

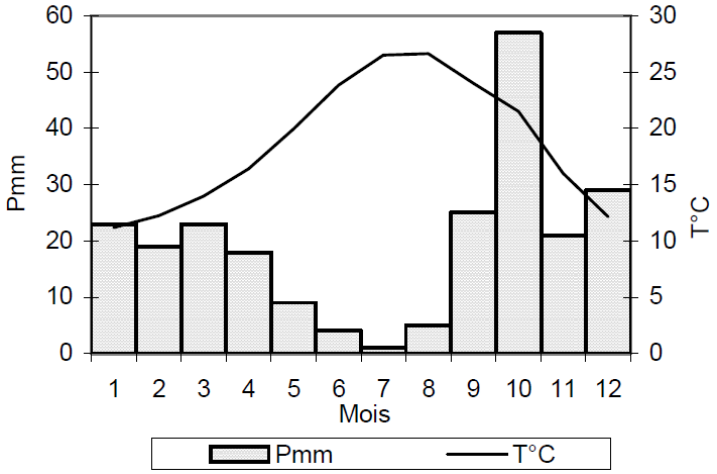



***Figure 11: Diagramme ombrothermique de Sfax ; période 1970-2002. Echelle : P=2T (Tiré de Dahech, 2007)***

[1] Station météorologique la plus proche de l'archipel de Kerkennah. L'influence de l'urbain sur cette station n'est pas négligeable et les valeurs pour l'archipel doivent différer de celles présentées ici.

La direction des vents varie dans l'année et est dominée par des flux d'ouest, nord et nord-ouest durant la période hivernale et par des situations anticycloniques en été (vents d'est, sud, sud-sud-est). Les vents les plus forts sont associés aux directions nord-nord-ouest à sud-sud-ouest et soufflent majoritairement durant les saisons intermédiaires et en hiver (Dahech, 2007) favorisant la formation de tempêtes en mer. La ville de Sfax est en situation d'abri et est protégée des flux humides hivernaux d'ouest et nord-ouest par le massif de la Dorsale. L'ascendance orographique des masses d'air face à ce massif provoque la baisse de la température de l'air ce qui diminue sa capacité à contenir de la vapeur d'eau. Cette dernière va alors se condenser et former des précipitations. Après avoir survolé la Dorsale, les masses d'air arrivent donc à Sfax déchargées de leur humidité (Dahech, 2007). En été, les situations anticycloniques favorisent l'occurrence de temps calmes radiatifs (temps clair, pas de vent synoptique) et l'alternance de brises littorales d'est (durant la journée) et de brises de terre d'ouest durant la nuit (Dahech, 2007). Durant toute l'année, peuvent se produire des épisodes de Sirocco caractérisés par des remontées d'air très chaud et très sec venant du Sahara. Trois situations atmosphériques favorisent le développement de ces épisodes : (i) lorsque la Tunisie se trouve entre deux dépressions bloquées sur le bassin ouest de la Méditerranée ce qui permet le développement d'un flux de sud sur toute la Tunisie ; (ii) lorsqu'une situation anticyclonique s'installe sur le sud-est du pays et permet des remontées d'air saharien sur son flanc ouest ; et enfin, (iii) lorsqu'une dépression se place sur les côtes maghrébines permettant la remontée d'air saharien sur son flanc est (Dahech, 2007).

L'archipel de Kerkennah, situé à 20 km au large des côtes de Sfax (Figure 1) connaît les mêmes situations synoptiques que Sfax. Cependant, l'insularité influence le climat et crée un microclimat insulaire spécifique. L'archipel ne dispose pas de station météorologique permanente officielle mais certaines études utilisent des données ponctuelles obtenues dans les localités d'El Attaya (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001) et de Kellabine (Fehri, 2011). D'après ces données, l'archipel reçoit la même quantité de précipitations que Sfax c'est-à-dire 223,6 mm/an, dont près de 45% tombent en automne, 32% en hiver, 22% au printemps et seulement 1% en été, qui est donc la saison la plus sèche (Fehri, 2011). Cependant, la présence de la mer favorise une plus grande humidité atmosphérique, et les brises de mer (vent frais et humide), qui peuvent durer plusieurs jours, apportent de l'humidité sur l'ensemble des îles et îlots de l'archipel. En raison de la moindre différence de température entre la mer et l'archipel, la vitesse de ces brises y est certainement

plus faible qu'à Sfax, qui subit les effets de la continentalité de l'arrière-pays, auxquels s'ajoutent ceux de l'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène, purement urbain, se matérialise par la concentration de la chaleur dans les villes et par la redistribution plus lente en ville qu'à la campagne de cette chaleur qui se trouve « piégée » en zone urbaine. Ainsi, pendant la journée, les températures enregistrées à Kerkennah et dans le centre-ville de Sfax sont équivalentes (environ 39°C) et plus fraîches que celles de la campagne de Sfax (environ 42°C) (Figure 12). Durant la nuit, en revanche, la température est moins importante à Kerkennah que dans le centre-ville de Sfax (environ 23°C contre 29°C, respectivement) et la campagne est elle aussi rafraîchie (environ 23°C) (Figure 12).

Dans l'archipel, comme à Sfax, les périodes de Sirocco sont synonymes de très forte chaleur et de temps sec entraînant un stress hydrique important, en particulier au printemps, en février, octobre ou novembre, périodes durant lesquelles un même épisode peut durer jusqu'à 4 jours (Dahech, 2007). Cependant, la présence de la mer peut de nouveau tempérer ce phénomène, puisque l'air chaud et sec du Sirocco doit parcourir au minimum 20 km au-dessus de l'eau et peut donc se charger en humidité avant de parvenir aux terres de l'archipel.

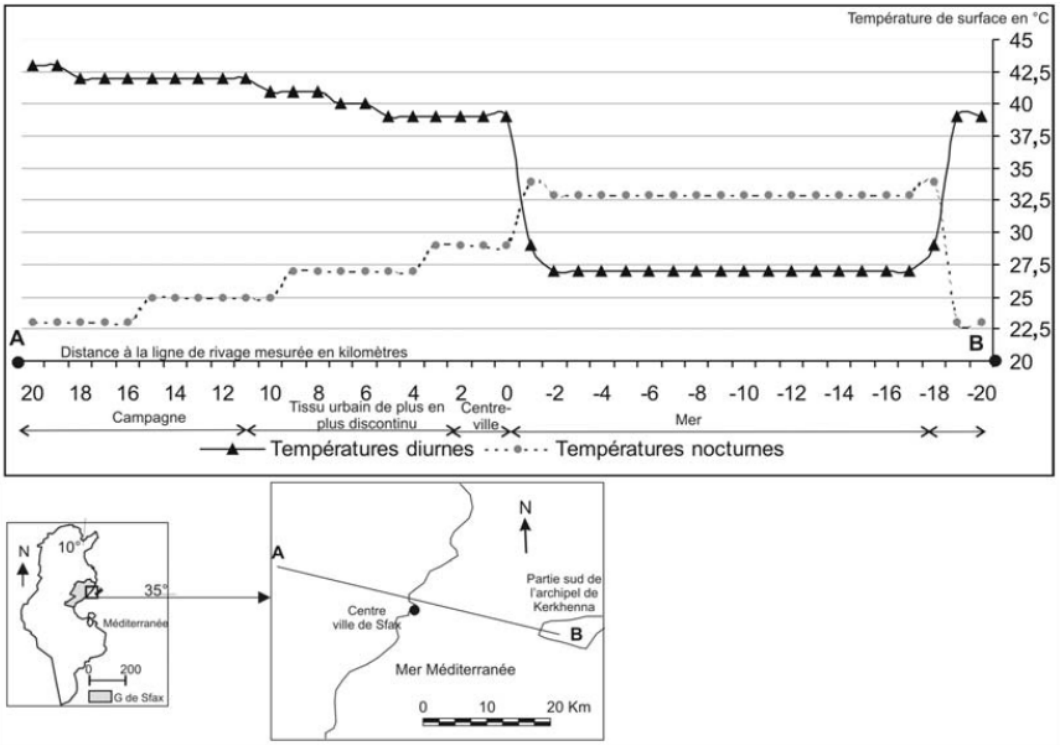



***Figure 12: Variations thermiques moyennes quotidiennes des températures de surface le long d'un transect reliant la campagne de Sfax et la partie sud de Kerkennah durant le mois d'août 2000 d'après l'imagerie NOAA-AVHRR (Tiré de Dahech, 2007)***

Ainsi le climat de la région de Sfax est semi-aride et ne dispose pas de quantités importantes de précipitations. Les faibles et irrégulières précipitations associées à de fortes chaleurs (surtout lors des épisodes de Sirocco) sont des facteurs d'aridifications et donc de vulnérabilité des ressources en eaux disponibles pour la population et pour les végétaux.

Les vents d'ouest ou de nord durant l'hiver ou les saisons intermédiaires favorisent l'occurrence de tempêtes. Elles favorisent l'érosion de la côte exposée surtout lorsqu'elles sont associées à des basses pressions favorisant les submersions marines.

### 1.2. Circulation des eaux dans le bassin et dans le golfe de Gabès

La Méditerranée est une mer semi-ouverte sur l'océan Atlantique avec lequel les échanges d'eau se font par le détroit de Gibraltar, large de seulement 14 km. Malgré sa petite superficie les fonds marins sont parfois profonds (jusqu'à 4000 mètres) et irréguliers, avec des bassins distincts entre ouest et est puis entre mer des Baléares, golfe du Lion, mer de Ligurie et la mer Tyrrhénienne à l'ouest et bassin Ionien et Levantin à l'est auxquels s'ajoutent les mer Egée et Adriatique (Figure 13). Le golfe de Gabès se situe dans le bassin est, au large des côtes de la Tunisie, au sud du détroit de Sicile et à l'ouest de la mer Ionienne.

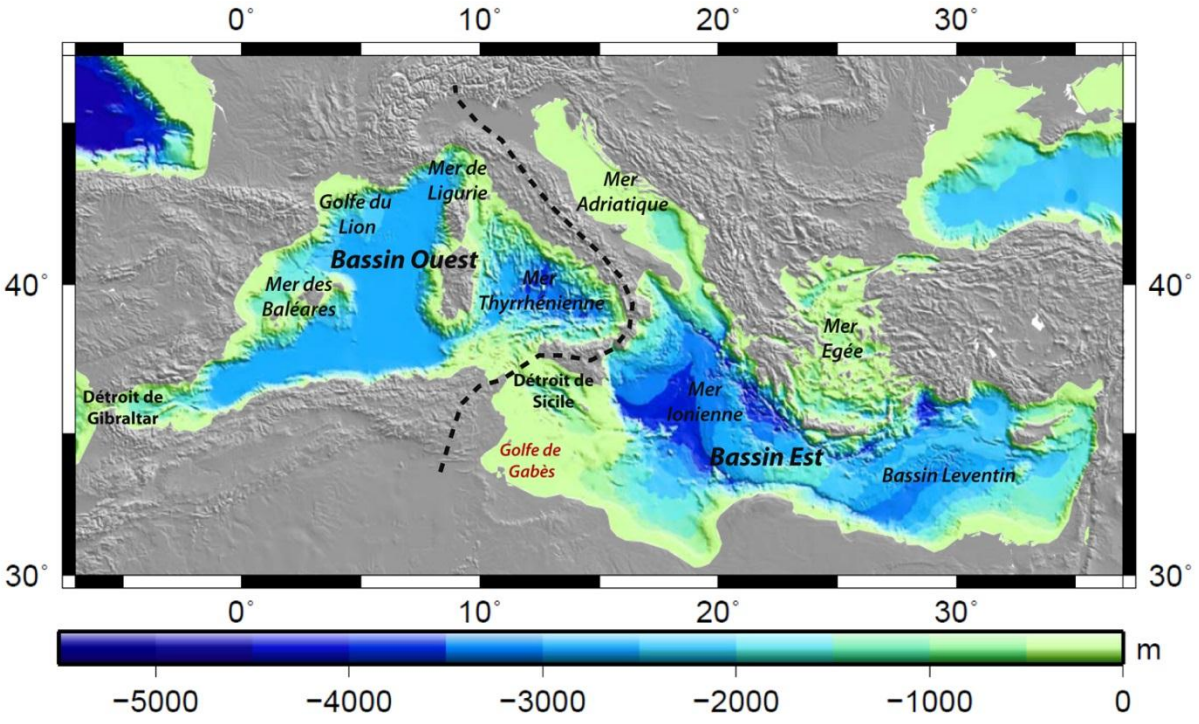



***Figure 13: Bathymétrie méditerranéenne (Adapté de Arabelos et al., 2011)***

Les courants marins en Méditerranée sont contrôlés en grande partie par les flux d'eau entrants et sortants du détroit de Gibraltar (Figure 14). Un courant atlantique (Figure 14 AW) peu profond (entre 0 et 300m) et peu dense se forme au détroit de Gibraltar et traverse la Méditerranée d'ouest en est en longeant les côtes de l'Afrique du Nord, passant au sud de la Sardaigne et de la Sicile et poursuivant son cours jusqu'au sud de la Turquie. Sous l'effet du refroidissement hivernal et de l'évaporation, les conditions physiques de l'eau se modifient : elles deviennent plus froides et plus salées ce qui provoque le *downwelling* du courant qui plonge en eau moyennement profonde (entre 300 et 400m). Dès lors il change de nom pour LIW (Levantine Intermediate Water) et repart vers l'ouest du bassin en se divisant en 3 branches. La première alimente un courant profond (via le même processus de densification de l'eau) au niveau de l'Adriatique, la deuxième un autre courant profond du golfe du Lion et la dernière repart vers l'Atlantique (Pinardi & Masetti, 2000). Les eaux profondes, plus denses, sont prises dans la circulation thermohaline du fond du bassin méditerranéen qui est séparé en deux sous bassins théoriquement indépendants par le détroit de Sicile (Figure 14) (Mermex-Group, 2011). Les eaux denses sont donc prisonnières des deux sous bassins Est et Ouest. Cependant, l'apport permanent d'eau dense vers le fond permet d'une part un renouvellement des eaux profondes et d'autre part la remontée d'eau qui pourra passer le détroit de Sicile ou celui de Gibraltar pour retourner à l'Atlantique (Mermex-Group, 2011).

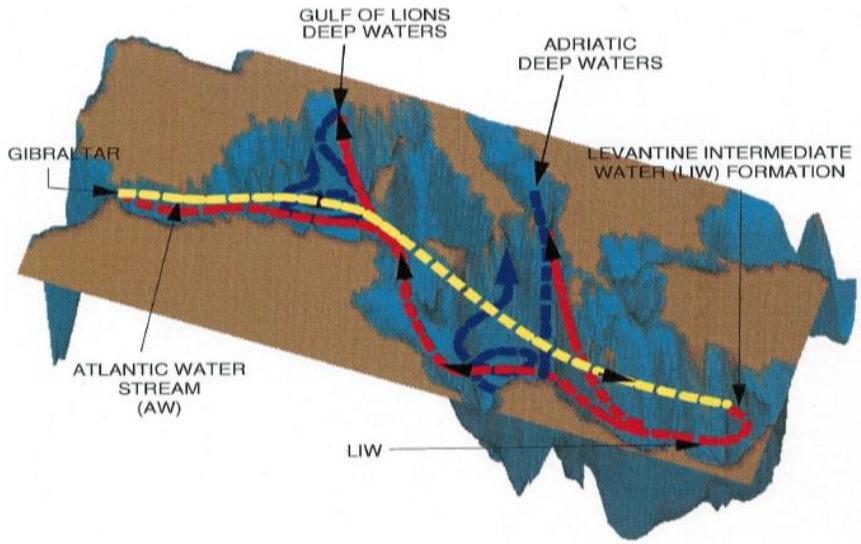
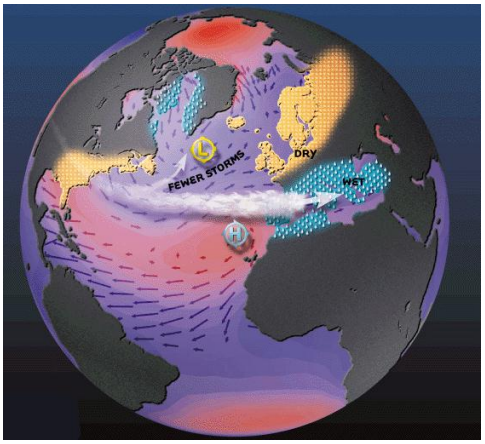


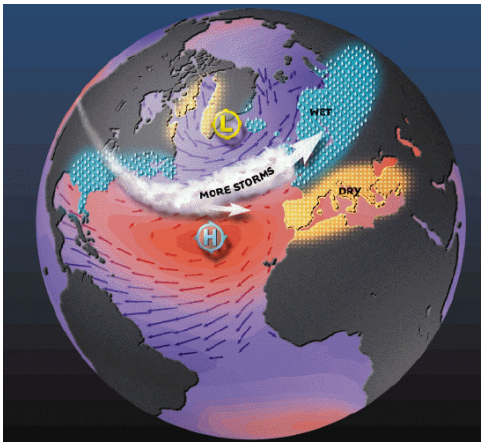

***Figure 14: Représentation schématique de la circulation thermohaline en Méditerranée (Tiré de Pinardi & Masetti, 2000) .***

*Les principaux courants sont représentés par des tirets de différentes couleurs. Les lignes jaunes indiquent le courant AW (Atlantic Water) qui circule en surface. Les lignes rouges indiquent le courant LIW (Low Intermediate Water) qui circule en eau moyennement profonde. Les lignes bleues indiquent les cellules d'eau profonde du nord du bassin méditerranéen.*

Les facteurs climatiques jouent un rôle majeur dans les variabilités de circulation de l'eau dans le bassin que ce soit à l'échelle inter- ou intra-annuelle (Brankart & Brasseur, 1998; Pinardi & Masetti, 2000). Le vent, en poussant l'eau, influe sur la force des courants ainsi que parfois sur leur direction. De forts vents d'Ouest vont entraîner l'entrée de plus grandes quantités d'eau dans le bassin ce qui implique une forte variabilité des quantités d'eau et donc du niveau de la mer. A l'inverse, des vents d'Ouest faibles ou absents n'influent pas sur la quantité d'eau entrant dans le bassin. La NAO ou North Atlantic Oscillation (Figure 15) est un facteur de variabilité climatique sur l'Europe et le bassin méditerranéen dont les effets sont liés au gradient de pression et à la position de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande en particulier en hiver (Hurrell *et al.*, 2003). Lorsque l'indice NAO est négatif et que les vents sont très forts (Figure 15, haut), le niveau de la mer Méditerranée peut être plus élevé que la normale. A l'inverse, lorsque l'indice NAO est positif et que les vents sont faibles (Figure 15, bas), le niveau de la mer Méditerranée peut être plus bas.




Lorsque la phase de NAO est négative, la pression au niveau de l'anticyclone des Açores est plus faible que la normale tandis que celle de la dépression d'Islande est plus élevée que la normale. Le faible gradient de pression provoque des vents faibles et les perturbations sont plus méridionales qu'habituellement. Il fait alors doux et humide sur la Méditerranée.




Lorsque la phase de NAO est positive, la pression au niveau de l'anticyclone des Açores est plus fort que la normale tandis que celle de la dépression d'Islande est moins élevée que la normale. Ce fort gradient de pression provoque des vents forts et les perturbations sont plus septentrionales qu'habituellement. Il fait alors chaud et sec sur la Méditerranée.

***Figure 15: Phases négative (haut) et positive (bas) de la NAO (Ifremer.fr)***

Les flux de chaleur influent également sur la circulation marine en Méditerranée en permettant l'élévation de la température de l'eau et en accentuant son évaporation, donc l'augmentation de la salinité de l'eau, qui favorise sa circulation verticale (Pinardi & Masetti, 2000). Le golfe de Gabès, en raison de sa position géographique en marge de la circulation générale des courants principaux méditerranéens et de sa très faible profondeur, n'est concerné que par un courant secondaire issu de la AW (Atlantic Water) qui se sépare en plusieurs courants de surface après le détroit de Sicile (Figure 16). Ce courant est emprunté par les poissons qui transitent du bassin Ouest vers le bassin Est de la Méditerranée, ce qui a favorisé l'activité de pêche dans le golfe de Gabès depuis l'Antiquité (Slim *et al.*, 2004).

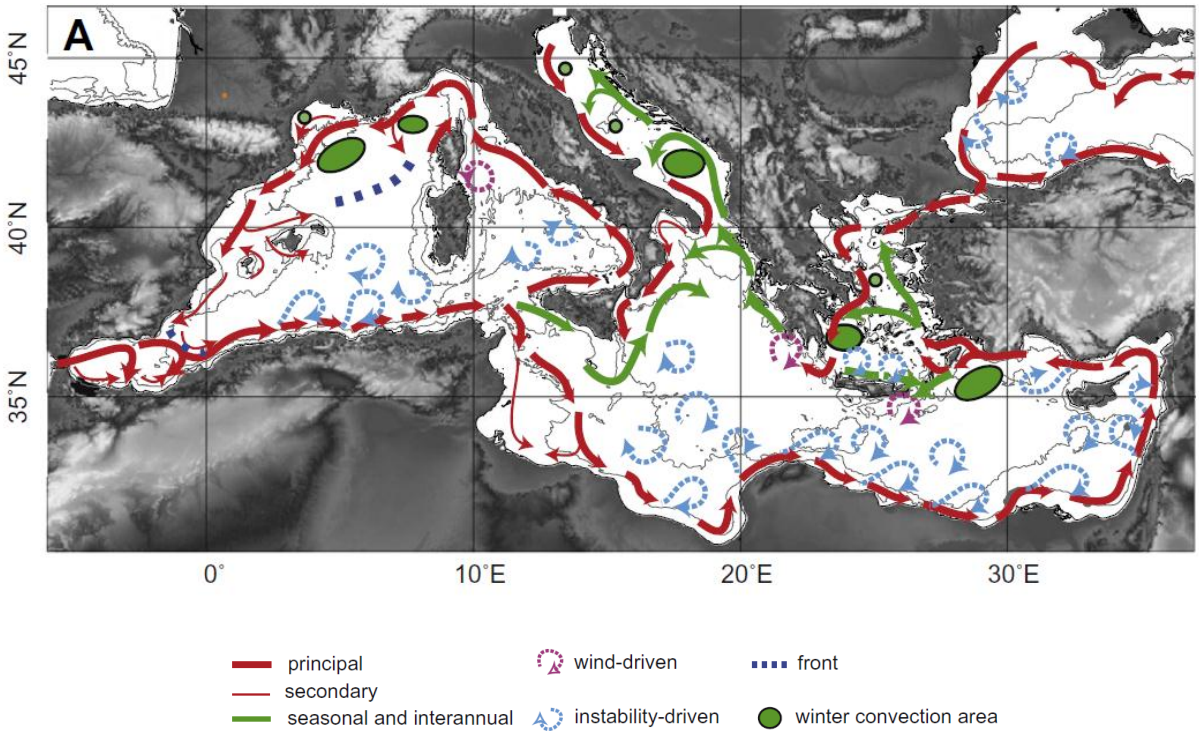



***Figure 16: Circulation des courants marins de surface en Méditerranée (Tiiré de Mermex-Group, 2011)***

## 2. Evolution climatique et niveau marin depuis 2000 ans et accentuation de vulnérabilité dans le sud de la Méditerranée

### 2.1. Un climat de plus en plus chaud et sec depuis l'Antiquité

Plusieurs témoignages et indices géographiques, historiques, archéologiques ou même climatiques suggèrent que le climat méditerranéen était plus humide à la fin de l'Antiquité romaine qu'il ne l'est actuellement et que le climat s'est modifié à cette époque (Paskoff *et al.*, 1991; Oueslati, 1995; Reale & Dirmeyer, 2000; Slim *et al.*, 2004). Les écrits de Teophrastos (371–288 avt J.C.) ou de Pline l'Ancien (23–79 apr. J.C.) décrivent un changement du climat et indiquent, par exemple, que les hêtres dans la province de Rome poussaient au niveau de la mer au 4ème siècle avant J.C. tandis que ces arbres se trouvent de plus en plus en altitude dès le 1er siècle après J.C. L'aire de répartition des hêtres est actuellement limitée à des altitudes supérieures à 1000 mètres en Italie (Reale & Dirmeyer, 2000). Le *« Bellum Africanum »* de Jules César (100–44 avt. J.C.) mentionne également la présence de zones forestières denses en Tunisie, tandis que Titus Livius (59-17 avt. J.C.), et de nouveau Pline l'Ancien (23–79 apr. J.C) relatent la présence d'éléphants vivant en milieu forestier ou dans de vastes pâturages, ce qui suggère que les terres étaient plus humides et végétalisées qu'aujourd'hui (Reale & Dirmeyer, 2000). Entre 30 et 60 après J.C., Columbella alerte ses contemporains sur la baisse de productivité des terres (Reale & Dirmeyer, 2000). En effet, à partir du premier siècle après J.C. dans l'empire romain, les exploitations agricoles sont modifiées, passant de petites exploitations aux latifundia pratiquant la monoculture et non plus la rotation des cultures nécessaire au repos et à la bonification des sols (Reale & Dirmeyer, 2000). S'ajoute à cela, un accroissement de la population et donc de ses besoins en nourriture, qui justifient les campagnes de déforestation ou de défrichement qu'a connues tout le pourtour méditerranéen à cette époque (Rees, 1987). Dans le même temps, des indices géomorphologiques tels que la présence de couches de colluvions contenant des fragments de poteries antiques, recueillis sur les côtes tunisiennes, indiquent une crise rhexistasique, caractérisée par des précipitations plus intenses et une érosion importante des sols meubles (Slim *et al.*, 2004). Ces facteurs expliquent en partie la transition qui s'opère entre -500 et 500, période durant laquelle les forêts sont progressivement remplacées par des steppes, comme en témoignent des relevés de pollens (Van Overloop, 1986). Concernant les températures et les précipitations, et après la phase pluvieuse et fraîche ayant eu lieu entre le II et IIIème siècle apr. J.C., le climat du pourtour méditerranéen évolue et les températures

augmentent jusqu'à la fin de l'optimum médiéval (Acot, 2009) modifiant les cultures possibles (Van Overloop, 1986). Jusqu'en 1500 environ, les températures sont chaudes et le temps varie du sec à l'humide selon des cycles de 300-400ans (Reale & Dirmeyer, 2000). En 1550 débute alors le Petit Age Glaciaire, qui voit un adoucissement marqué qui se termine aux alentours de 1850. Par la suite, les températures repartent à la hausse et cette tendance se poursuit encore de nos jours, accompagnée de précipitations peu importantes (Lamb, 1977; Paepe, 1986).

L'évolution du climat (depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui) est étudiée soit régionalement, c'est-à-dire à l'échelle de la Méditerranée qui est découpée en plusieurs zones d'études (Alpert *et al.*, 2002; Norrant, 2005; Norrant & Douguédroit, 2005; Goubanova & Li, 2007; IPCC, 2012), soit à l'échelle des pays, soit localement à l'échelle de la station et l'a été en particulier pour la ville de Sfax pour les températures et les vents.

L'évolution des cumuls de précipitations en Méditerranée n'est pas uniforme et peu de conclusions franches et robustes ont pu être tirées depuis les années 1950 jusqu'en 2000. L'évolution des cumuls de précipitations est majoritairement non significative mais apparaît parfois positive, parfois négative (Norrant & Douguédroit, 2005). En ce qui concerne le Maghreb, seul le mois de janvier subit une évolution des précipitations négative significative. Des tendances non significatives négatives sont observées pour les mois d'avril et octobre tandis qu'elles sont positives (non significatives) en septembre et en décembre (Norrant & Douguédroit, 2005).

*« Les incertitudes sont globalement plus importantes au nord de l'Europe et dans les régions méditerranéennes, où les tendances sont peu fiables » (IPCC, 2012 traduit de l'anglais)*

Cependant, les types de circulations atmosphériques influencées par les cycles types NAO, AMO (Atlantic Multi-decadal Oscillation) etc, jouent un rôle important dans les variations de précipitations car ils influent sur le déplacement des champs de pression en surface et en altitude (Xoplaki *et al.*, 2004; Norrant, 2005). Ainsi, dans le bassin méditerranéen, 30% de la variabilité des précipitations d'octobre à mars peuvent être expliquées par 4 types de situations de géopotentiel précis, qui ont globalement conduit à une baisse des précipitations depuis les années 1950, tendance entrecoupée de périodes courtes et plus humides comme dans les années 1960 et le début des années 1970 (Xoplaki *et al.*, 2004; Norrant, 2005). Les quantités de précipitations tombées évoluent donc peu mais certains avancent l'hypothèse d'une perturbation du régime des précipitations avec une concentration

des pluies sur moins de jours et des averses plus soutenues et plus violentes (Alpert *et al.*, 2002). La diminution significative des précipitations inférieures à 0,1 mm en janvier sur le Maghreb (Norrant & Douguédroit, 2005) pourrait potentiellement être lié à ce phénomène. Comme le remarque Henia et Benzarti (2006), la Tunisie est un pays qui reçoit relativement peu de précipitations et dans lequel les jours secs sont très nombreux. Les années sèches peuvent se succéder et aboutir à des sècheresses très longues s'étalant sur plusieurs années. Ainsi, les décennies des années 1950 et 1970 ont été relativement pluvieuses tandis que celles des années 1920 et 1940, 1960 et 1980 ont été sèches voire très sèches (Hénia in Arnould & Hotyat, 2003). Comme chez les autres auteurs travaillant à l'échelle du bassin méditerranéen, il n'existe pas de tendance significative dans les totaux de précipitations sur la Tunisie même s'il existe une diminution de la ressource en eau due à des facteurs anthropiques et à l'augmentation des températures et donc au plus fort pouvoir évaporant du climat (Henia & Benzarti, 2006). A Sfax non plus, aucune tendance significative n'est observée concernant les précipitations (Figure 17).

Les températures de l'air ont quant à elles augmenté depuis les années 1950 dans le monde et en Méditerranée (Maheras & Kutiel, 1999; Xoplaki, González-Rouco, *et al.*, 2003). Cette augmentation a été étudiée spécifiquement à Sfax par Dahech et Beltrando (2012) et par Daoud et Dahech (2012) qui ont montré d'une part l'élévation des températures et d'autre part décrit les causes potentielles de cette élévation. Comme la tendance générale en Méditerranée, le climat de Sfax est plus chaud aujourd'hui que dans les années 1950 ce qui a entrainé un allongement et une intensification (température plus chaudes) de la période estivale. Le stress hydrique induit par cette élévation des températures est d'autant plus important que cette dernière n'est pas associée à une élévation des précipitations.

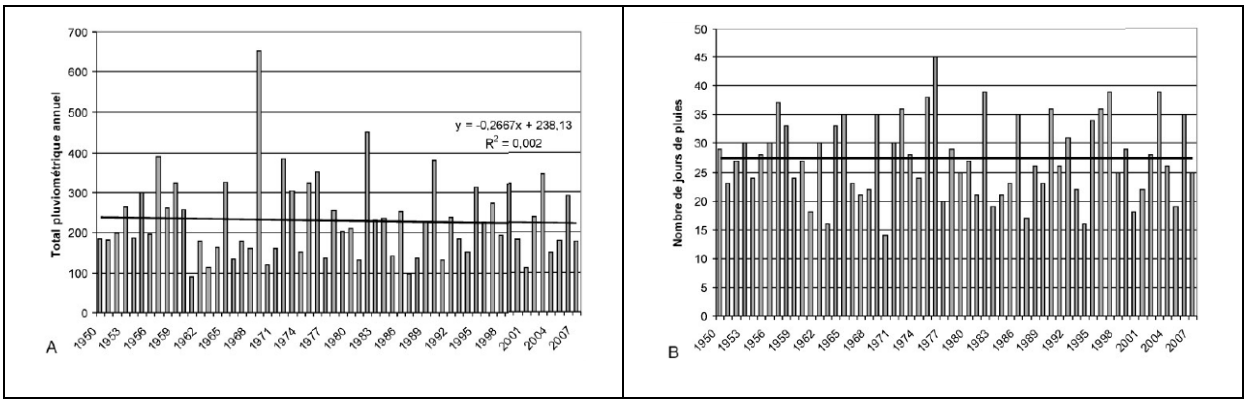



***Figure 17: Variabilité interannuelle du total pluviométrique (A) enregistré dans l'aérodrome de Sfax entre 1950 et 2007 (Tiré de Daoud & Dahech, 2012, données de l'INM)***

En conséquence, l'évapotranspiration potentielle augmente donc également, et le fait avec une plus grande rapidité aujourd'hui qu'avant la fin des années 1970 (Xoplaki, Gonzalez-Rouco, *et al.*, 2003) ou 1984, année de rupture de tendance à Sfax (Dahech & Beltrando, 2012). Dans cette dernière étude, trois périodes successives homogènes se dégagent et sont successivement plus chaudes que la précédente (Tableau 3) : (i) 1950 à 1984, période durant laquelle les températures minimales moyennes sont de 13°C, les températures maximales moyennes atteignent les 24°C ; (ii) 1985 à 1997, les températures minimales moyennes gagnent 1,1°C (14,1°C) et les températures maximales, 0,6°C (24,6°C) ; (iii) 1998 à 2007, les températures minimales moyennes gagnent encore 1°C pour atteindre 15,1°C tandis que les températures maximales moyennes gagnent 0,8°C et atteignent 25,4°C. Ce sont donc les températures minimales qui ont le plus augmenté en gagnant 2,1°C en presque 60 ans (Dahech & Beltrando, 2012).

***Tableau 3: Evolution des températures moyennes maximales et minimales entre 1950 et 2007 à Sfax (Tiré de Dahech & Beltrando, 2012)***

| | 1950-1984 | 1985-1997 | 1998-2007 |
|---|---|---|---|
| T°C moyennes minimales | 13 | 14,1 | 15,1 |
| T°C moyennes maximales | 24 | 24,6 | 25,4 |

Les causes de cette augmentation ne sont pas corrélées significativement avec la NAO ni avec la MOI (Mediterranean Oscillation Index, indice qui prend en compte la différence de géopotentiel entre le Caire et Alger) sauf pour les températures moyennes maximales. L'augmentation des températures à Sfax ne peut donc pas être reliée à ces indices (sauf pour les températures moyennes maximales) mais peut l'être aux vitesses et directions des vents (relations statistiques significatives).

En effet, les situations de hautes pressions centrées sur la Sicile sont plus fréquentes depuis les années 1990 et permettent des remontées d'air très chaud et sec méridional en provenance du Sahara (Dahech, 2007). Cette explication régionale de déplacement des anticyclones et dépressions jouant sur la direction des vents peut également s'appliquer à l'archipel de Kerkennah. Les forts taux de corrélation entre vents de sud et températures minimales et températures maximales sont respectivement de 0,7 et 0,58, ce qui signifie que la variabilité des températures est expliquée à 70 % par la variabilité de l'occurrence de vent de sud et à 58% pour les températures minimales. Ceci implique l'existence d'autres facteurs

explicatifs de l'augmentation des températures en particulier les températures minimales. A une échelle très locale, Dahech et Beltrando (2012) ont identifié le développement urbain de la ville de Sfax comme l'un des facteurs de variabilité. En effet, sur la période étudiée, l'extension urbaine autour du centre historique de la ville a atteint la station de mesure de Sfax El Maou. Associée à ce développement horizontal de la ville, la densification (et verticalisation) du bâti a entrainé la formation d'un îlot de chaleur urbain. Celui-ci contribue à l'augmentation de la température à la station de Sfax et ne peut être pris en compte pour l'archipel de Kerkennah. Les tendances d'augmentation des températures minimales et maximales qui atteignent respectivement 0,38°C/décennie et 0,27°C/décennie à Sfax (Dahech & Beltrando, 2012) devraient donc être positives mais moindres dans l'archipel.

La direction des vents ainsi que leur force ont également évolué depuis les années 1970. La force des vents moyens a augmenté de 0,7 m/s entre 1970 et 2002 (Figure 18) tandis que la direction dominante est passée d'est à nord depuis 1983. Les vents de secteur sud sont en augmentation tandis que ceux de secteur ouest ont connu une baisse importante depuis 1982 (Dahech, 2007). L'augmentation de la vitesse du vent à Sfax a une origine régionale et concerne donc également l'archipel de Kerkennah. Elle est liée à la MOI et à l'augmentation de la différence de pression entre Alger (bassin Ouest) et le Caire (bassin Est). Cette différence de pression implique le développement de vents plus puissants entre les deux masses d'air. La corrélation positive de 0,7 entre la vitesse du vent à Sfax et la MOI apparaît significative entre la vitesse du vent à Sfax et la MOI (Dahech, 2007). Les situations de calme (vents inférieurs à 2 m/s) sont de moins en moins observées à Sfax à l'inverse des situations venteuses qui le sont de plus en plus.

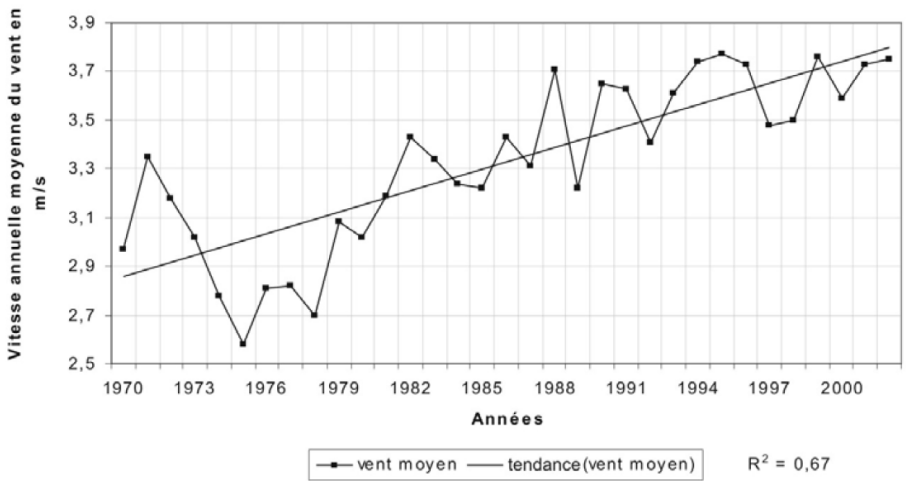



***Figure 18: Vitesse annuelle moyenne du vent à Sfax entre 1970 et 2002 (Tiré de Dahech, 2007)***

Les vents violents (supérieurs à 16 m/s) sont plus fréquents en hiver avec une direction nord ou ouest et au printemps avec une direction nord, nord-nord-est, nord-nord-ouest et nord-ouest mais ils ne sont observés que 13,5 jours par an en moyenne (Dahech, 2007). Les vents plus modérés supérieurs à 11 m/s sont eux aussi caractérisés par des situations synoptiques et des directions ouest à nord en hiver et pouvant également souffler de l'est en été. Les vents soufflant entre 6 et 11 m/s sont majoritairement marqués par des directions est à sud-sud-est et correspondent à la brise de mer au printemps et en été (Dahech, 2007). Les vents les plus violents, lorsqu'ils sont associés à des basses pressions, permettent l'apparition de la houle et provoquent l'occurrence de tempêtes.

La Tunisie est située dans la zone de transition entre des conditions sahariennes et très sèches au sud et telliennes et plutôt humides au nord. La combinaison du rayonnement solaire intense, des températures de plus en plus élevées, de l'humidité relative faible surtout lors des épisodes de Sirocco et enfin l'occurrence de vents chauds et secs (Sirocco) venus du sud expliquent le pouvoir évaporant du climat tunisien et par déduction, du climat de la région de Sfax et de l'archipel de Kerkennah (Ben Boubaker et al. in Arnould & Hotyat, 2003).

## 2.2. La hausse globale du niveau marin

### 2.2.1. Causes de variations du niveau de la mer

Les variations du niveau de la mer ne sont pas uniformes, que ce soit à l'échelle globale ou à l'échelle du bassin méditerranéen. Elles sont dues à plusieurs phénomènes d'échelles spatio-temporelles variables qui conduisent à l'élévation, la stagnation ou l'abaissement du niveau de la mer à l'échelle régionale, voire locale. Les forces qui agissent sont le déplacement des centres d'actions atmosphériques et la variation des pressions atmosphériques, les mouvements tectoniques, l'apport en eau dans les bassins, la fonte des glaces et les effets stériques.

Les variations régionales du niveau de la mer sont dues aux déplacements des centres d'actions atmosphériques (anticyclones et dépressions), qui permettent la variation de la pression atmosphérique et influent sur les gradients de pressions entre ces centres d'actions. Cela joue donc sur la force et la vitesse du vent. A l'échelle du globe, plusieurs ensembles ont été mis en évidence. Ceux qui influencent le plus le golfe de Gabès sont la NAO et la MOI. Durant la phase positive de la NAO, les pressions atmosphériques sur la Méditerranée sont élevées, donc potentiellement, un niveau de la mer moins élevé. A l'inverse, en phase de

NAO négative, l'influence sur le bassin Méditerranéen est inverse, c'est-à-dire des pressions moins importantes, donc potentiellement, un niveau de la mer plus élevé (Hurrell *et al.*, 2003; Jeandel & Mosseri, 2011). La MOI présente un fonctionnement assez similaire, mais concerne une région plus réduite, puisqu'elle ne mesure les différences de pression qu'entre le Caire et Alger. Associées à d'autres facteurs qui sont décrits ci-après, les variations de pressions atmosphériques ont une influence sur le niveau de la mer à l'échelle saisonnière, annuelle ou interannuelle. Cette variation de pression entraîne une variabilité très importante du niveau de la mer en Méditerranée et atteint parfois 100 mm d'une année sur l'autre (Meyssignac, 2012).

Outre les champs de pressions, le niveau de la mer est également perturbé par les mouvements tectoniques influençant la forme des bassins. La Méditerranée est un bassin de petite taille formé par la rencontre de deux plaques continentales : la plaque africaine remontant vers la plaque eurasiatique. Le golfe de Gabès est soumis à une subsidence active attestée depuis la fin de l'Antiquité par des indices archéologiques (Oueslati, 1994) qui seront détaillés dans le sous-chapitre suivant.

Le volume des eaux continentales arrivant jusqu'à la mer varie avec le climat. Des conditions climatiques fraîches et humides favorisent les transferts d'eau des continents vers les mers et océans. A l'inverse, un climat sec et chaud favorise l'évaporation et donc ralentit les apports d'eau douce vers les mers. Toker *et al.* (2012) ont ainsi montré que le niveau de la mer en Israël entre 900 et 1300 était de 130 à 850mm moins élevé qu'aujourd'hui et expliquent ce phénomène par une succession de phases de NAO positives entraînant de faibles précipitations et une hausse des températures. Ces deux facteurs auraient en effet influencé négativement le débit du Nil et donc indirectement augmenté la salinité des eaux. Les impacts anthropiques sont également importants car les installations humaines (pompages, barrages et autres réservoirs) retiennent les eaux douces et bloquent la circulation vers les mers et océans ce qui favorise la baisse du niveau de la mer de quelques millimètres (Figure 19 - 5) (Llovel, 2010). Dans le cas du Nil, la subsidence importante du delta depuis 7500 ans est renforcée actuellement par l'impact du barrage d'Assouan qui bloque les sédiments en amont et par l'élévation du niveau de la mer : ce qui devrait impliquer une élévation du niveau de la mer d'environ 1 mètre d'ici 2100 dans le delta (Stanley, 1988).

La fonte des glaces a un impact rapide et important sur le niveau des mers. Les masses glacées sont séparées en deux types : les glaciers de montagne d'une part et les calottes glaciaires d'autre part. Les glaces marines ne sont pas prises en compte car le principe d'Archimède implique que la variation du volume d'eau gelée en mer n'a pas d'impact sur le

niveau de la mer (Llovel, 2010). Les variations climatiques et le blocage / largage des eaux englacées expliquent les grandes variations du niveau de la mer lors des phases glaciaires et interglaciaires. La fonte des glaciers de montagne et des petites calottes de glace a un impact plus important sur le niveau de la mer que la fonte des inlandsis (Figure 19 - 3 et 4). La fonte des 150 000 glaciers continentaux provoquerait une élévation du niveau marin de 0,6 ± 0,07m (Radić & Hock, 2010). La fonte des glaces, en particulier celle des grandes surfaces englacées (inlandsis antarctique et Groenland principalement) provoque l'enfoncement ou le rebond des terres qui les supportent. Ainsi, en plus de faire varier le niveau absolu du niveau de la mer, ce jeu d'englacement / fonte permet des variations du niveau relatif du niveau de la mer. Ces mouvements, particulièrement lents correspondent souvent au rebond postglaciaire et sont encore actifs aujourd'hui bien que les grands inlandsis aient disparu il y a 8000 ans (Pirazzoli, 1998). De l'échelle saisonnière à l'échelle pluri-décennale, les effets stériques (variation de la salinité et des températures) ont un rôle majeur dans les variations du niveau de la mer (Figure 19 – 1).

| | 1993-2009 | 2003-2009 |
|---|---|---|
| (1) Expansion stérique | 1.1 +/- 0.1<br>(*Levitus et al.* [2009] | 0.62 +/- 0.4<br>(*Llovel et al.* [2010b]) |
| (2) Masse des océans | — | 1.8 +/- 0.34<br>(*Llovel et al.* [2010b]) |
| (3) Glaciers de montagne | 1.1 +/- 0.25<br>(*Cazenave and Llovel* [2010]) | 1.15 +/- 0.37<br>(*Meier et al.* [2007],<br>*Cogley* [2009]) |
| (4) Antarctique<br>Groenland | 0.3 +/- 0.15<br>0.4 +/- 0.15<br>(Estimations fig 3.5) | 0.5 +/- 0.05<br>0.6 +/- 0.05<br>(Estimations fig 3.5) |
| (5) Eaux continentales | — | -0.22 +/- 0.05<br>(*Llovel et al.* [2010a]) |
| Somme (1)+(3)+(4)+(5) | 2.9 +/- 0.35 | 2.65 +/- 0.55 |
| (6) Niveau de la mer Observé | 3.3 +/- 0.4 | 2.7 +/- 0.4 |
| Différence | 0.4 +/- 0.4 | 0.05 +/- 0.68 |

***Figure 19: Bilan de la hausse du niveau marin entre 1993-2009 et 2002-2009 en mm/an (Tiré de Llovel, 2010)***

Le thermo-eustatisme correspond à la relation entre la température de l'eau et son volume. L'élévation des températures de l'eau se traduit par une augmentation de son volume et donc une élévation du niveau de la mer. A l'inverse, la diminution de la température de l'eau se traduit par une baisse de son volume et donc une baisse du niveau de la mer. Ceci est vrai à l'échelle pluriannuelle mais également à l'échelle annuelle : le niveau de la mer Méditerranée varie entre hiver et été d'environ 20 cm comme le montre la Figure 20.

La variation de la salinité est aussi un facteur de variation du niveau marin (halo-eustatisme) comme l'a montré l'étude de Toker *et al.* (2012) en Israël, et ce serait 10% de l'élévation globale du niveau de la mer (en millimètres) entre 1957 et 1994 qui serait due à la diminution de la part de sel dans les eaux marines (Antonov *et al.*, 2002). Des études d'altimétrie spatiale, permettant de connaître l'altitude précise sur une surface océanique, ont suggéré que 70 % des changements dans les variations du niveau des eaux seraient dus aux seuls effets stériques (Tsimplis *et al.*, 2008).

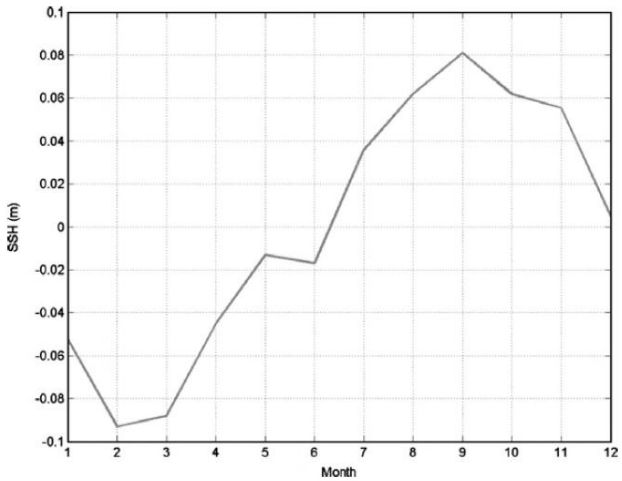



***Figure 20: Moyenne mensuelle du niveau de la mer (SSH = hauteur du niveau de la mer) en Méditerranée calculée en mètres sur 9 ans (Tiré de Sušelj et al., 2008)***

### 2.2.2. Le niveau de la mer depuis 2000 ans dans le golfe de Gabès

Le niveau de la mer depuis l'Antiquité a été étudié sur le pourtour méditerranéen via différents types de mesures, à commencer par des indices archéologiques (Paskoff *et al.*, 1991; Oueslati, 1994; Lambeck *et al.*, 2004; Slim *et al.*, 2004; Pirazzoli, 2005; Carayon, 2008; Toker *et al.*, 2012) ou historiques (Camuffo *et al.*, 2000; Slim *et al.*, 2004) désignant les localisations des ports et autres installations humaines. Les anciens niveaux de la mer sont

également estimés à partir d'indices géologiques, géomorphologiques ou encore biologiques comme l'étude des dinoflagellés, micro-organismes aux lieux d'habitats spécifiques et dont la présence dans les sédiments renseignent sur les conditions d'un milieu à une époque donnée (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1994; Jedoui *et al.*, 1998; Morzadec-Kerfourn, 2002; Morhange & Pirazzoli, 2005; Pirazzoli, 2005). Cependant, de telles études restent très localisées et ce n'est que par le regroupement de multiples données et archives que des tendances régionales peuvent être tracées.

A l'échelle de la Méditerranée, la situation est très contrastée avec des vestiges de ports et ouvrages maritimes parfois complètement recouverts par l'eau de mer, et parfois au contraire situés plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Ces deux situations dénotent respectivement une avancée de la mer sur la terre ou son recul (Carayon, 2008). L'ouvrage de Slim *et al.* (2004) se concentre sur les côtes de la Tunisie où la situation est beaucoup plus nette. En effet, la grande majorité des sites tunisiens montrent une tendance nette au recul du trait de côte par érosion ou submersion des vestiges antiques. L'étude de 87 sites du golfe de Gabès (dont plusieurs concernent l'archipel de Kerkennah) a montré que 41 sont en cours d'érosion, 19 ne sont pas érodés mais sont plus proches de la mer que durant l'Antiquité et 22 montrent un trait de côte stable. Pour les 5 sites restants, qui sont localisés près d'embouchures d'oueds ayant permis des apports de sédiments et un colmatage, le trait de côte avance (Slim *et al.*, 2004). Kerkennah est un site remarquable d'érosion des vestiges antiques par la mer. Ceux-ci sont visibles à la fois sur les côtes basses et dans les falaises (Figure 21) et l'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre 2 m près de l'archipel de Kerkennah grâce au jeu de la subsidence particulièrement active au nord du Golfe (Oueslati, 1986; Paskoff *et al.*, 1991; Slim *et al.*, 2004). Les effets de l'élévation relative du niveau de la mer autour de l'archipel ont eu des impacts très importants sur la physionomie même des îles. Pline l'Ancien indique que l'archipel mesure, dans l'Antiquité, l'équivalent de 37 km de long sur 18,5 de large. Aujourd'hui, l'archipel est long de 30 km sur 14 km de large ce qui prouve l'avancée non négligeable de la mer sur la terre. Slim *et al.* (2004) supposent que certains îlots, aujourd'hui isolés, étaient rattachés aux îles principales et en particulier l'îlot Gremdi car des vestiges de voies antiques ont été découvertes entre l'île de Chergui et l'îlots.

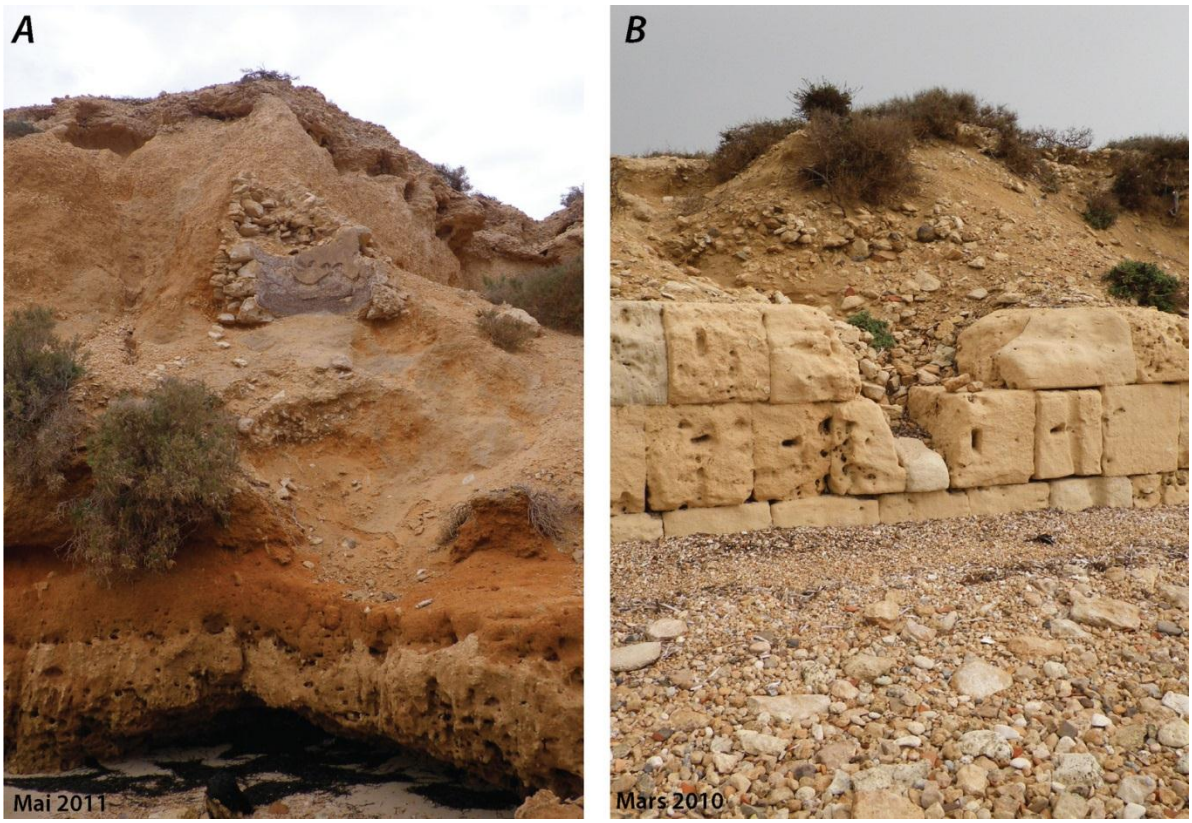



***Figure 21: Vestiges antiques : A, fond de citerne dans les falaises de Jorf (photo personnelle prise en mai 2011); B, murs antiques sur l'estran devant le site de Borj El H'sar (photo personnelle prise en mars 2010)***

D'autres études se fondent sur les relevés des marégraphes (Cazenave *et al.*, 2002; Fenoglio-Marc, 2002; Calafat & Gomis, 2009; Meyssignac *et al.*, 2011) qui permettent de mesurer le niveau de la mer relatif et sont parfois utilisés pour valider les modèles de variations du niveau de la mer ou les données d'altimétrie spatiale. A Sfax, marégraphe le plus proche de l'archipel de Kerkennah, les mesures ont été prises de manière discontinue de 1884 à 1949 (Pouvreau, 2008) et montrent une élévation rapide du niveau de la mer, au moins entre 1910 et 1935 :

> *« Les enregistrements du marégraphe de Sfax, pour la période 1910 – 1935, fait apparaître une montée de 15 cm du niveau moyen de la mer, soit une élévation quatre fois plus rapide que celle d'origine eustatique qui caractérise l'océan mondial depuis la fin du XIXème. » (Slim et al., 2004)*

Depuis 1999 et jusqu'en 2006 des mesures ont été prises à partir de marégraphes à flotteur. La différence entre les dernières mesures de l'année 1946 et les nouvelles mesures font état d'une élévation du niveau de la mer dans le port de Sfax de 17 cm soit une élévation de 2,8 ± 0,2 mm/an (Saidani, 2007). Ce chiffre est nettement supérieur au chiffre donné par

Slim *et al.* (2004) qui concernait une période antérieure. Ceci tend à démontrer que l'élévation du niveau de la mer à Sfax est plus rapide qu'auparavant.

Les études les plus récentes d'évolution du niveau de la mer se fondent sur des études spatiales satellitaires. Les données satellites Topex/Poseidon et ERS 1 et 2 sont très utilisées mais ne sont disponibles que depuis peu de temps. C'est pourquoi les études tentent de reconstruire à l'échelle mondiale ou régionale les niveaux marins, soit sur la courte période de disponibilité des données, soit modélisent les niveaux antérieurs avec validation grâce aux marégraphes (Cazenave *et al.*, 2002; Fenoglio-Marc, 2002; Larnicol *et al.*, 2002; Criado-Aldeanueva *et al.*, 2008; Mangiarotti & Lyard, 2008; Tsimplis *et al.*, 2008; Calafat & Gomis, 2009; Llovel, 2010; Arabelos *et al.*, 2011; Vigo *et al.*, 2011; Meyssignac, 2012). La principale différence entre les mesures des marégraphes et les mesures d'altimétrie repose sur le type de mouvements enregistrés. En effet, les marégraphes permettent de mesurer le niveau de la mer par rapport à la terre et donc d'enregistrer les variations relatives. Au contraire, les mesures spatiales enregistrent le niveau absolu du niveau de la mer. En Méditerranée, la tendance globale est à l'élévation du niveau de la mer (Figure 22), toutes les études s'accordent sur ce point (Meyssignac *et al.*, 2011). Le niveau moyen de la mer Méditerranée aurait augmenté de 1,4 mm/an entre 1970 et 2004.

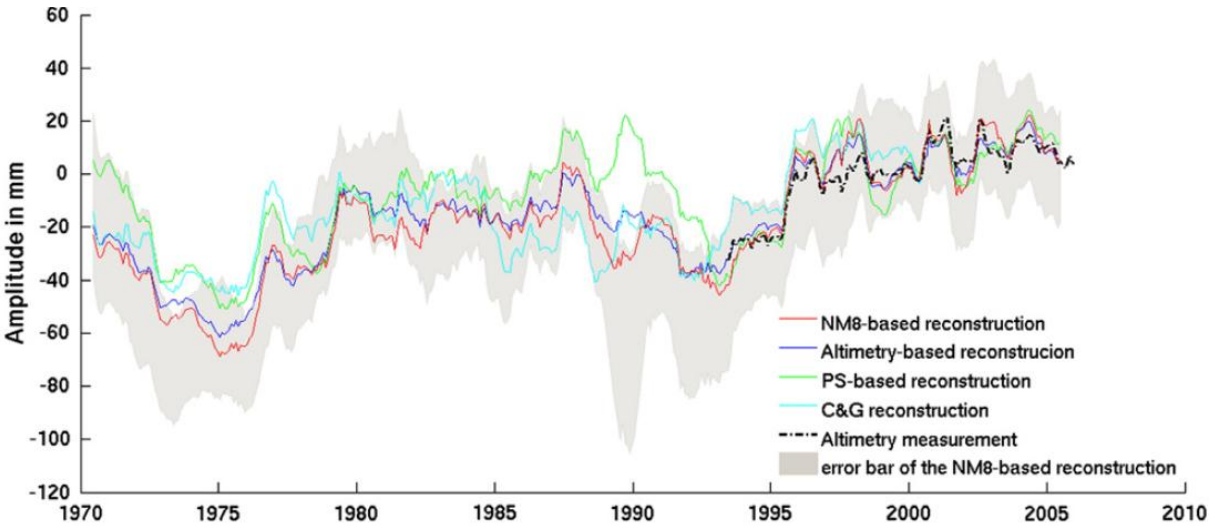



***Figure 22: Niveau marin moyen du bassin méditerranéen (Tiré de Meyssignac et al., 2011)***
*Données d'altimétrie spatiale (ligne pointillée noire ; Reconstruction altimétrique (ligne bleue) ; Reconstruction du C&G (ligne bleue claire) ; Reconstruction du PS (ligne verte) et la reconstruction NM8 (ligne rouge). Les lignes ont été moyennées sur 12 mois.*

Cependant, les reconstitutions récentes du niveau de la mer (depuis le début des années 1990) montrent qu'il existe une variabilité spatiale avec des zones de baisses et des zones d'élévations du niveau de la mer (Figure 23). Ainsi, le niveau de la mer Ionienne subit une baisse tandis que celui de la mer Egée et du bassin Levantin connaît une hausse (Cazenave *et al.*, 2002). Les écarts à la moyenne sont cependant peu importants et ne dépassent pas 3 mm (Meyssignac, 2012). Larnicol *et al.* (2002) ont montré que ces variations locales étaient dues à de multiples facteurs, dont les principaux sont l'effet stérique (signal majoritaire) et la circulation des eaux dans les bassins. Dans le bassin Levantin par exemple, les eaux profondes étaient originaires de la mer Adriatique pour toute la période qui précède les années 1990. Par la suite, plusieurs facteurs climatiques (hivers froids en 1992-1993 par exemple) ont perturbé le processus de formation des eaux froides et les eaux de la mer Adriatique ont été supplantées par celles, plus denses et plus froides, provenant de la mer Egée. Les caractéristiques des eaux profondes de ces bassins ont donc été perturbées durant toute la décennie 1993-2003 par le phénomène de l'EMT ou Eastern Mediterranean Transient (Meyssignac, 2012).

En ce qui concerne la région du golfe de Gabès, plusieurs reconstructions altimétriques ont été réalisées en utilisant divers types de données satellites et donnent des résultats sensiblement différents. Une première étude (Cazenave et al., 2002) utilise les données provenant des satellites Topex/Poseidon et ERS et analyse l'ensemble de la Méditerranée via un échantillon de points dont l'un est localisé entre l'archipel de Kerkennah et l'île de Lampedusa. Les résultats pour ce point indiquent une élévation du niveau de la mer de 9,5 ± 2,5 mm/an entre 1993 et 1997. D'après la carte complète de la Méditerranée (Figure 23), extrapolée à partir des données de tous les points de l'échantillon, le nord du golfe de Gabès a connu une hausse du niveau de la mer de 6 à 10 mm/an en moyenne entre 1993 et 1998. Dans une seconde étude, Calafat et Gomis (2009) ont utilisé des données provenant des satellites Topex/Poseidon, ERS 1 et 2, Jason 1 et ENVISAT. Leurs résultats donnent des valeurs légèrement inférieures à celles évoquées précédemment puisque, selon ces auteurs, le golfe de Gabès aurait connu une élévation du niveau de la mer de seulement 0 à 5 mm/an en moyenne entre 1993 et 1998 puis entre 1999 et 2005. Cette même étude s'est également attachée à déterminer les niveaux marins depuis 1945 et propose que l'élévation du niveau de la mer autour de l'archipel de Kerkennah n'ait été que de 0,9 mm/an en moyenne entre 1945 et 2000.

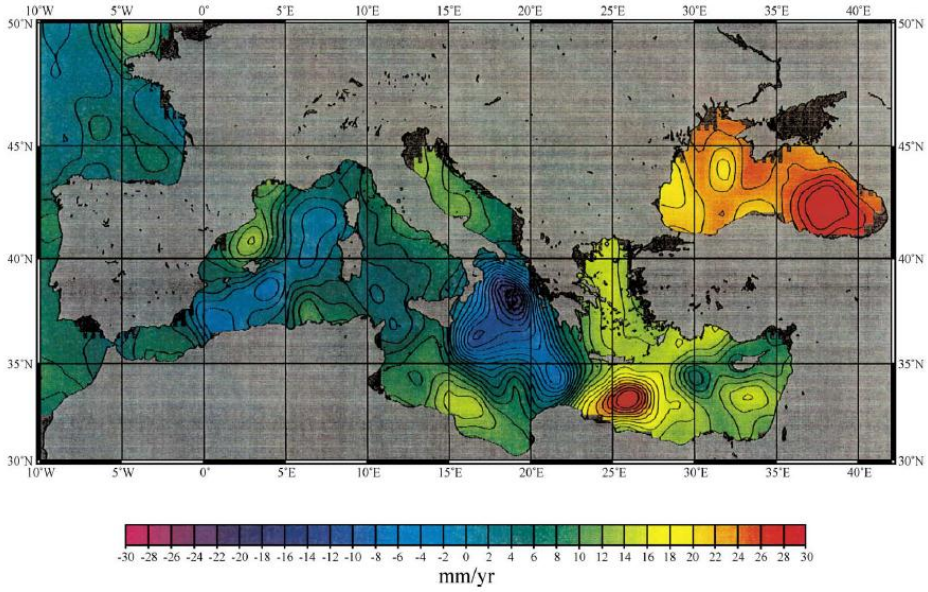



***Figure 23: Tendance du niveau de la mer Méditerranée (variation linéaire avec le temps) issue de données Topex/Poseidon pour la période 1993 – 1998 (Tiré de Cazenave et al., 2002)***

Ce chiffre, très inférieur à celui mesuré par le marégraphe de Sfax qui relève une élévation de 2,8 mm/an entre 1946 et 2006 (Saidani, 2007), peut s'expliquer par la nature des mesures des niveaux marins. L'estimation réalisée par reconstruction des niveaux marins à partir d'un modèle d'altimétrie spatiale correspondant au tiers de l'élévation mesurée par le marégraphe. Tout laisse penser que l'élévation du niveau de la mer à Sfax et à Kerkennah est entre autre due à la tectonique et est liée à la subsidence qui se poursuit aujourd'hui.

L'élévation des températures de l'air, les changements de directions et de vitesses des vents les plus forts et l'élévation du niveau de la mer absolu ou relatif ont des impacts importants, à la fois sur la géographie des îles de Kerkennah et sur la vie de ses habitants. Durant les saisons venteuses, la vitesse du vent étant plus importante, les tempêtes de nord et d'ouest, ainsi que la houle, provoquent en effet des dommages d'autant plus importants que le niveau de la mer est élevé. Ces effets combinés sont d'une part des eaux plus hautes et donc plus érosives, surtout lors des marées hautes de vives eaux et d'autre part des surcotes plus importantes avec un pouvoir de submersion et d'érosion plus grand lors des tempêtes connues à Kerkennah sous le nom de « *Marrouba* ». Des exemples de ce phénomène sont visibles, notamment sur la côte basse égyptienne.

*« Sur la côte Egyptienne, une augmentation du niveau moyen de la mer Méditerranée de 0,3 m a pour conséquence de rendre 100 fois plus fréquents les événements qui font ponctuellement augmenter le niveau de la mer de 0,5 m »*
*(Meyssignac, 2012)*

## 3. Projection du climat futur

### 3.1. Climat futur et aridité

Les modèles climatiques, globaux ou régionaux permettent de faire des projections climatiques futures, c'est-à-dire d'établir des tendances climatiques sur le long terme, sans prédire le temps qu'il fera, ni définir l'occurrence précise d'événements extrêmes dans le temps et dans l'espace (Cassou & Guilyardi in Jeandel & Mosseri, 2011). En cela, ils sont différents des modèles météorologiques, qui visent à prévoir le temps à court terme et à des échelles locales. Selon l'IPCC (2007), la définition d'un modèle climatique est la suivante :

> *« Représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction et qui tient compte de la totalité ou d'une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut être représenté par des modèles d'une complexité variable : autrement dit, pour une composante ou une combinaison de composantes donnée, on peut définir une hiérarchie de modèles différant par certains aspects tels que le nombre de dimensions spatiales, le degré de représentation explicite des processus physiques, chimiques ou biologiques ou le degré d'inclusion des paramétrages empiriques. Les modèles de la circulation mondiale couplés atmosphère/océan/glaces de mer (MCGAO) fournissent une représentation d'ensemble du système climatique. Une évolution se dessine vers des modèles plus complexes à chimie et biologie interactives. Les modèles climatiques sont des outils de recherche utilisés pour l'étude et la simulation du climat ainsi qu'à des fins opérationnelles, notamment pour les prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles. » (IPCC, 2007)*

Les modèles tentent de recréer numériquement la complexité du réel en prenant en compte une multitude de variables, climatiques ou autres. Y sont intégrés également des facteurs de forçage comme les rejets de gaz à effet de serre, convertis en équivalent $CO_2$. Le processus de modélisation du climat nécessite un découpage de l'atmosphère en cubes dont le volume, qui varie selon les modèles, définit la résolution spatiale des projections.

> *« La résolution d'un modèle atmosphérique de prévision du temps actuel est de 15 km en horizontal pour une centaine de niveaux verticaux, tandis que celle des modèles climatiques globaux est de 100 à 300 km en horizontal pour seulement 50 niveaux verticaux. » (Legras in Jeandel & Mosseri, 2011).*

Cette différence s'explique par la complexité des modèles climatiques de projection, qui doivent prendre en compte, de manière dynamique, un plus grand nombre de facteurs. Ils ne

peuvent cependant pas modéliser toutes les composantes de l'atmosphère, de la terre et des océans ainsi que toutes les forces qui les contraignent (c'est-à-dire la réalité dans son ensemble), car cela représenterait un temps de traitement trop important, des ressources en énergie gigantesques et une puissance de calcul informatique encore inaccessible (IPCC, 2007).

L'IPCC (2007) a construit 6 scénarios d'émission de GES futurs (Figure 24) et a simulé leurs répercussions possibles sur les variables du système climatique : températures, niveau de la mer etc.

Le scénario A2 est le plus pessimiste et prévoit une augmentation des GES selon la même tendance que celle observée depuis les années 1980 - 1990. Les scénarios A1 (A1B, A1T, A1F1) sont fondés sur des augmentations puis stabilisations ou baisses des émissions de GES (dus à un développement économique rapide avec croissance de la population très hétérogène et développement de nouvelles technologies moins polluantes).

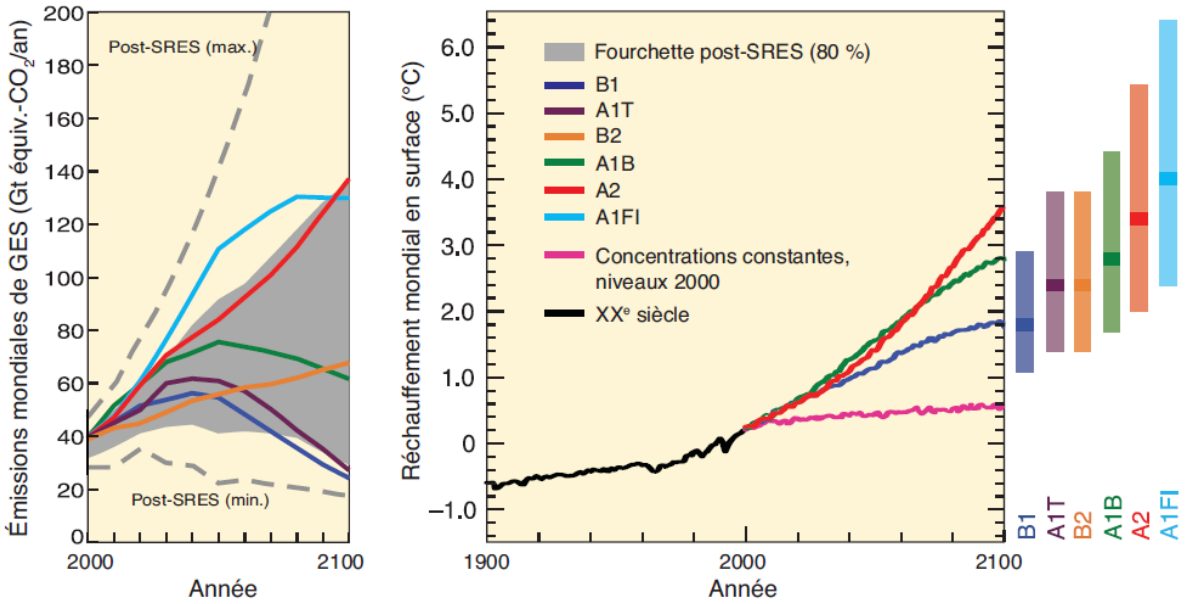



***Figure 24: Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface (Tiré de IPCC, 2007).***

*A gauche : Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO2) en l'absence de politiques climatiques : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80e percentile des scénarios publiés depuis le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les lignes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO2, le CH4, le N2O et les gaz fluorés. À droite : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multi-modèles du réchauffement en surface pour les scénarios A2, A1B et B1, en prolongement des simulations relatives au XXe siècle. Ces projections intègrent les émissions de GES et d'aérosols de courte durée de vie. La courbe en rose ne correspond pas à un scénario mais aux simulations effectuées à l'aide de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) en maintenant les concentrations atmosphériques aux niveaux de 2000. Les barres sur la droite précisent la valeur la plus probable (zone foncée) et la fourchette probable correspondant aux six scénarios de référence du SRES pour la période 2090-2099. Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980-1999.*

Le scénario B1 ressemble à l'A1 mais le développement mondial est homogène avec une évolution rapide vers un mode de gestion plus raisonné (utilisation efficace des ressources), une recherche de solutions mondiales du point de vue économique, social et environnemental. Dans le scénario B2 les solutions recherchées sont locales et axées sur la protection de l'environnement et l'équité sociale (IPCC, 2007). Dans chacun des cas, les modèles prévoient une hausse globale et continue des températures d'ici à 2100, avec des fourchettes s'étalant de +1 à +3°C pour la prévision la plus optimiste (B1) jusqu'à +2,5 à +6,5°C pour la plus pessimiste (A1F1) (Figure 24).

Les modèles régionaux, d'échelle plus fine ou le *downscaling* des modèles globaux, permettent d'estimer le climat d'une région avec une meilleure résolution que celle imposée pour les modèles globaux. Pour le bassin méditerranéen, et indifféremment du scénario choisi concernant les GES, les projections indiquent toutes une élévation des températures et une baisse des quantités de précipitations sur le sud de la Méditerranée et en Tunisie (Gao & Giorgi, 2008; Giorgi & Lionello, 2008). Les chiffres avancés sont de +2 à +5°C pour les températures, et -10 à -50% de précipitations en Tunisie pour la période 2070 - 2100 (Goubanova & Li, 2007; Gao & Giorgi, 2008; Hertig & Jacobeit, 2008). L'élévation des températures est légèrement moindre sur l'ensemble de la mer Méditerranée, en raison de l'inertie thermique de l'eau (Giorgi & Lionello, 2008).

L'IPCC (2007) a moyenné les résultats de 21 modèles sur l'Europe et la Méditerranée concernant les projections des températures et des précipitations sur la période 2080 – 2100 par rapport à la période 1980 – 1999 en utilisant le scénario A1B (Figure 25). Les résultats sont flagrants et les modèles prévoient tous une élévation des températures jusqu'à 4°C sur la Méditerranée ce qui a été confirmé en 2014 par le même organisme. Le sud de la Méditerranée devraient connaître une diminution des précipitations jusqu'à -50% (IPCC Working Group III Contribution to AR5, 2014) mais les modèles ne sont pas unanimes et certains (jusqu'à 7 selon les mailles) ont projeté une élévation des précipitations (Figure 25).

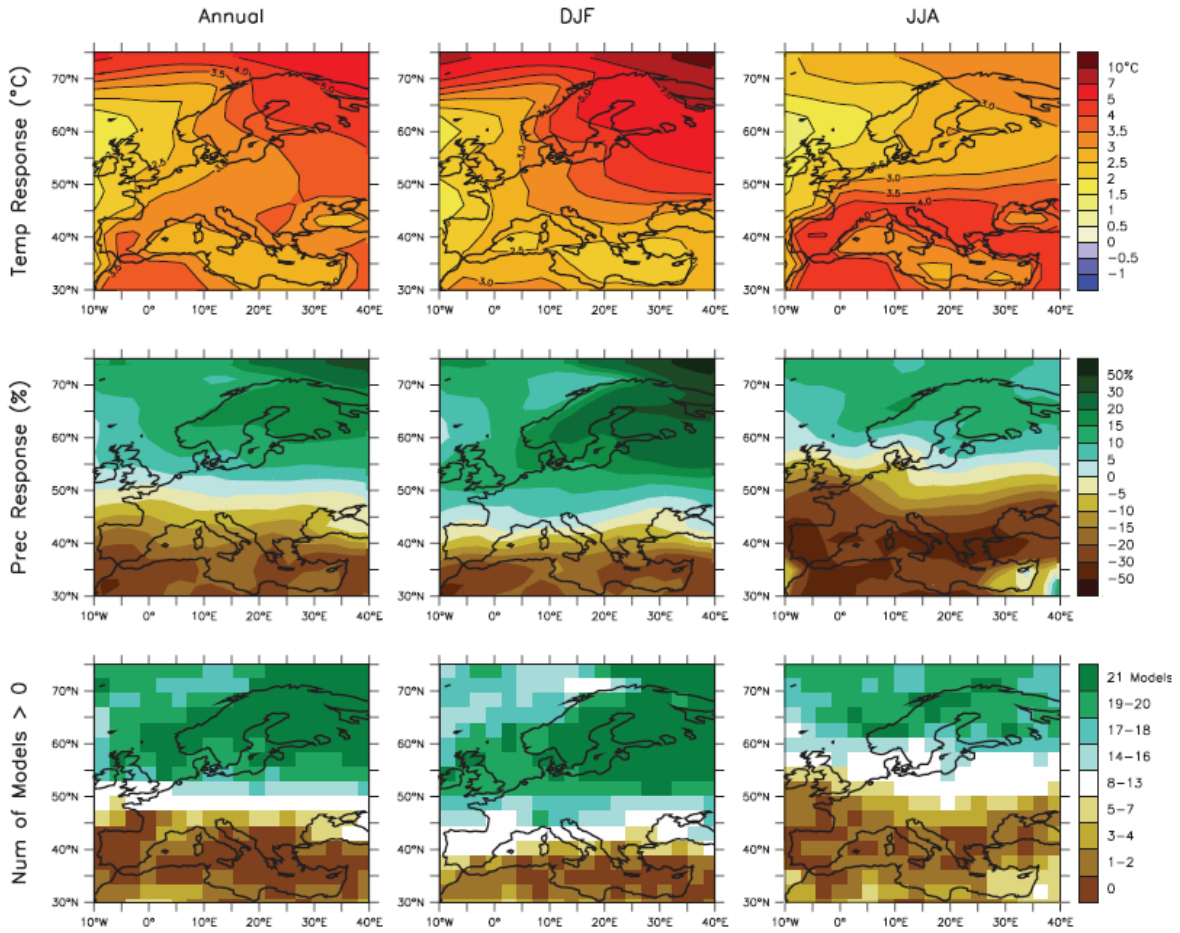



***Figure 25: Changement de températures et précipitations en Europe, scénario A1B (Tiré de IPCC, 2007)***
*Première ligne : Changement de températures entre les périodes 1980 – 1999 et 2080 – 2099 : Moyenne annuelle, DJF et JJA. Moyenne de 21 modèles. Seconde ligne : idem première ligne mais pour les changements de précipitation. Troisième ligne : Nombre de modèles (sur les 21 étudiés) qui projettent une augmentation des précipitations*

A l'échelle du golfe de Gabès, Lamon *et al.* (2013) ont projeté le climat en comparant les périodes 1961-1990 aux périodes 2021-2050 et 2071-2100 en utilisant le modèle A1B à l'aide de plusieurs modèles climatiques, hydrodynamiques et de qualité des eaux. Comme pour les modèles plus généraux, cette étude confirme l'élévation des températures en été et en hiver dans le golfe. D'ici à 2100, les températures estivales devraient s'élever de 3,5 à 4°C tandis que les températures hivernales devraient s'élever de 2 à 2,5°C. Cette étude projette une élévation des précipitations de 0,2 mm/jour en été et jusqu'à 0,6 mm/jour en hiver.

Ces modifications de températures et de précipitations sont liées au déplacement des centres d'actions de pression atmosphérique et selon les prévisions, les situations anticycloniques devraient en effet être plus fréquentes sur la Méditerranée. Giorgi et Lionello (2008) ont compilé 17 modèles, étudié les changements climatiques selon les scénarios A1B,

B1 et A2 et les résultats de cet ensemble de modèles (nommé Multi Global Model Ensemble) montrent que les pressions atmosphériques devraient être différentes entre les périodes 1961 – 1990 et 2071 – 2100. Ainsi sur la Tunisie, les pressions devraient être plus élevées en hiver, printemps et automne, et moins élevées en été (Figure 27). A l'échelle du golfe de Gabès, la vitesse du vent devrait être plus importante en été et à l'inverse, plus faible durant l'hiver (Lamon *et al.*, 2013). Les situations anticycloniques vont de pair avec les situations plus calmes et sont moins favorables à la formation de tempêtes. Cette situation explique donc que les modèles projettent de plus faibles précipitations et des températures plus élevées sur la Méditerranée du sud. Les modèles prévoient également une plus grande variabilité interannuelle des précipitations durant toutes les saisons c'est-à-dire un climat de plus en plus incertain avec des années nettement plus pluvieuses que d'autres (Meehl & Telaldi, 2004; Goubanova & Li, 2007; Giorgi & Lionello, 2008). L'élévation des températures associée à cette baisse des précipitations devrait faire tendre le climat vers l'aride en particulier au sud de la Méditerranée.

Gao et Giorgi (2008) ont calculé l'indice de Budyko ($Al_B$) : $Al_B = R/(LP)$

où R est radiation nette moyenne annuelle ; P, les précipitations moyennes annuelles et L, la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Les résultats de la formule caractérisent le climat en fonction de l'humidité selon l'échelle suivante (Tableau 4). Les résultats obtenus montrent que le sud de la Méditerranée est déjà une région aride, voire subissant un manque d'eau (Figure 26 - a). Selon les prévisions, la valeur de l'indice devrait être plus élevée dans le futur, à la fois dans le cas du scénario A2 (Figure 26 - d et f) ou du scénario B2 (Figure 26 - e et g). Ceci suggère donc un probable aridification d'ici à 2100 dans le sud de la Méditerranée et par conséquent un manque d'eau et un stress hydrique accrus (Gao & Giorgi, 2008).

***Tableau 4: Signification des résultats du calcul de l'indice de Budyko***

| Valeur de l'indice de Budyko | Type de climat et paysage |
|---|---|
| 0 – 1,1 | Humide – paysage de steppe à forêt |
| 1,2 – 2,3 | Semi humide – paysage de savane |
| 2,4 – 3,4 | Semi–aride – paysage de semi-désert |
| 3,5 – 10 | Aride – paysage désertique |
| Sup à 10 | Hyper aride – paysage désertique |

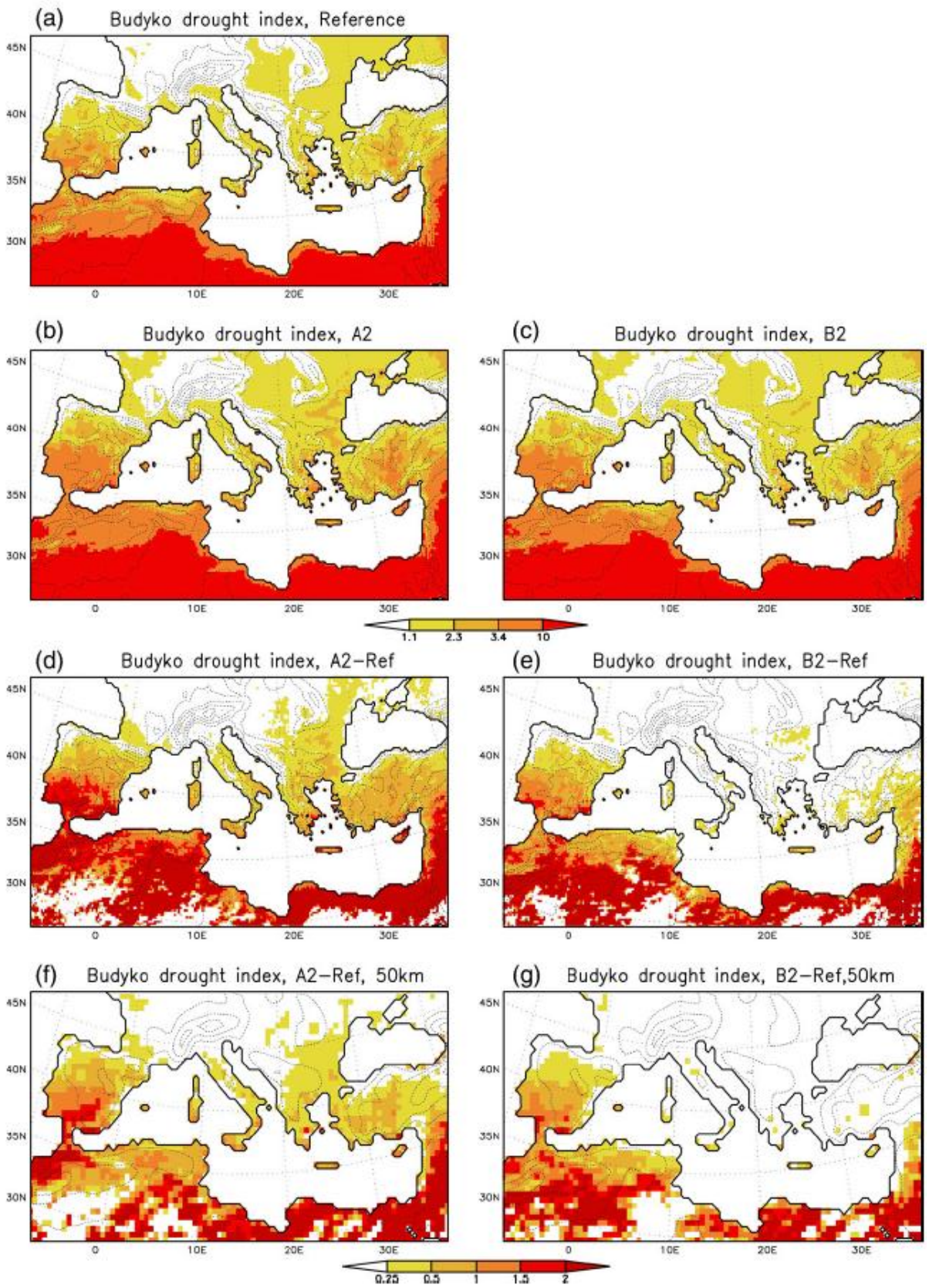



***Figure 26: Indice d'aridité de Budyko (Tiré de Gao & Giorgi, 2008)***

*a. Simulation de référence; b. simulation pour le scénario A2 ; c. simulation pour le scénario B2 ; d. différence d'AIB entre le scénario A2 et la simulation de référence ; e. différence d'AIB entre le scénario B2 et la simulation de référence ; f. Idem d mais pour une simulation à 50km ; g. idem e mais pour une simulation à 50km.*

### 3.2. Conditions marine futures

Les changements de pression atmosphérique (liée à la NAO en particulier), les modifications de la circulation des eaux dans les sous-bassins de la Méditerranée, la perturbation des apports en eau dans le bassin (en provenance de l'Atlantique, de la mer Noire mais aussi des fleuves), l'évolution des concentrations en sel et les variations de températures des eaux de surface et en profondeur ont et auront des effets sur le niveau de la mer (Tsimplis *et al.*, 2008; Jordà *et al.*, 2012). Les faibles précipitations projetées par les modèles, de même que l'élévation des températures de l'air et les rétentions d'eau douce sur les fleuves alimentant la Méditerranée auront des impacts au moins locaux sur le niveau de la mer absolu ou relatif (Meyssignac, 2012). Le réchauffement et la salinisation des eaux devraient avoir lieu en même temps et se compenser au moins en partie. L'expansion thermique devrait également être compensée par l'élévation des pressions atmosphériques moyennes sur l'année et plus précisément en hiver, printemps et automne (Figure 27).

> *« Ainsi, la contribution de la pression atmosphérique à l'élévation du niveau de la mer sera un petit changement négatif, c'est à dire une baisse du niveau de la mer de 2 cm dans certaines parties de la mer Méditerranée ». (Tsimplis et al., 2008 traduit de l'anglais)*

De plus:

> *La variabilité interannuelle à multi-décennale des pics de niveau marin résulte […] de l'interaction entre les forçages climatiques agissant à différentes échelles spatio-temporelles.(Ullmann, 2008)*

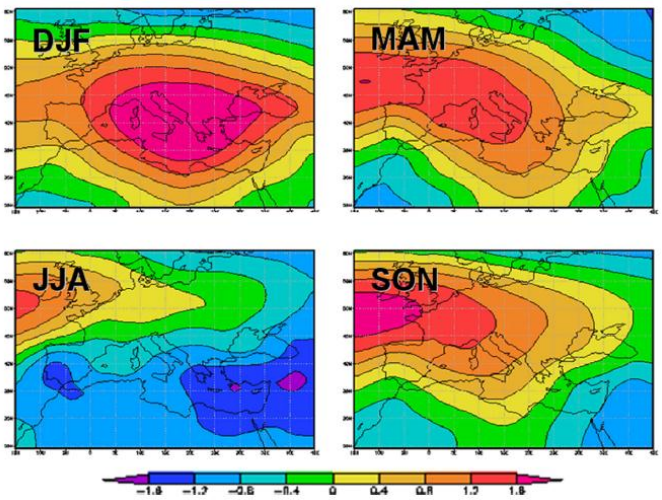



***Figure 27: Evolution des pressions au niveau de la mer pour les 4 saisons en mb selon le scénario A1B. Différence entre la période 1961 – 1990 et 2070 – 2100 (Tiré de Giorgi & Lionello, 2008)***

En prenant en compte uniquement les facteurs atmosphériques, les différents modèles s'accordent sur le fait que les variations du niveau de la mer ne seront pas significatives d'ici 2100, voire même qu'elles seront légèrement négatives (Ullmann, 2008; Jordà *et al.*, 2012). Quel que soit le scénario choisi, les variations saisonnières devraient également être non significatives ou de faible amplitude (Figure 28). Ainsi, pour le scénario B1, les émissions de GES sont les plus faibles et les variations du niveau de la mer ne sont pas statistiquement significatives sauf en hiver, saison durant laquelle la baisse maximale concerne la mer Adriatique (-0,5 mm/an). Pour les scénarios A1B et A2, l'été est la seule saison durant laquelle les variations du niveau de la mer ne sont pas significatives. Par ailleurs, l'élévation de la mer sur les côtes devrait être moins importante qu'au cœur des bassins (Tsimplis *et al.*, 2008). Le scénario A2, pour lequel il est prévu une élévation croissante et constante des émissions de GES, montre des tendances plus nettes avec des baisses du niveau de la mer plus marquées que pour le scénario A1B (Figure 28). Cette baisse atteindrait -0,8 mm/an dans l'Adriatique.

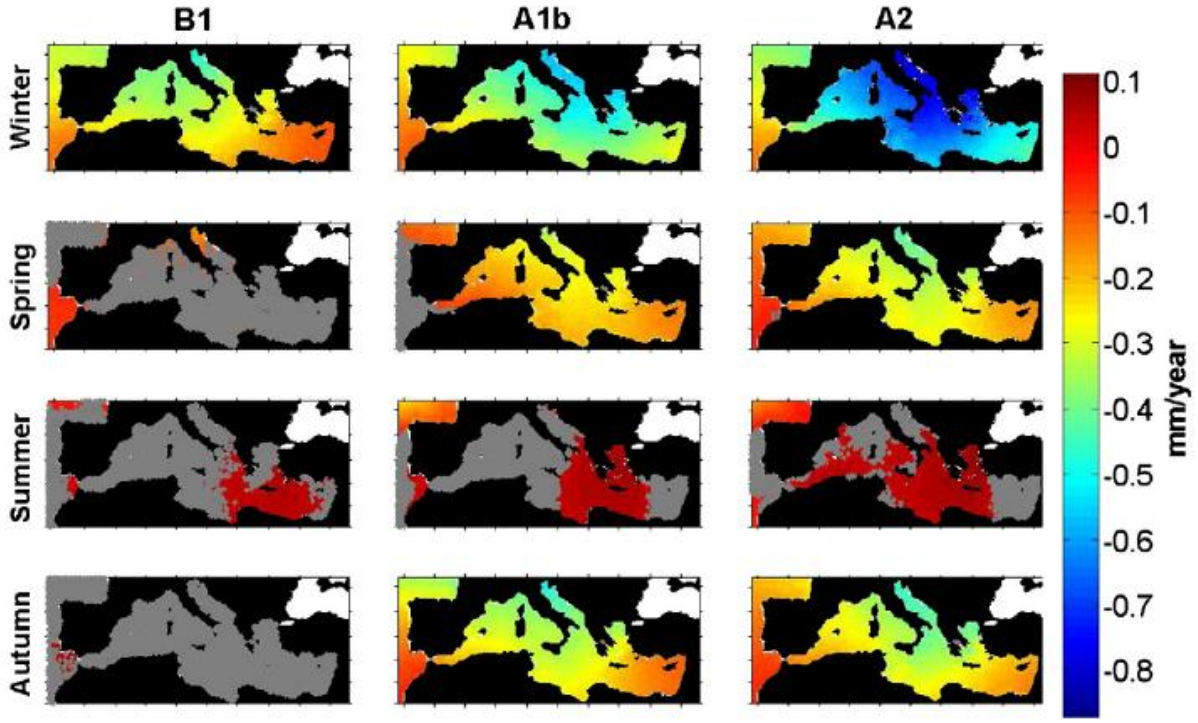



***Figure 28: Tendances saisonnières du niveau de la mer induit par la pression atmosphérique et le vent selon différents scénarios climatiques (Tiré de Jordà et al., 2012).***
*Les zones grises indiquent les points où la tendance n'est pas significative statistiquement.*

Ajoutons que plus les émissions de GES dans l'atmosphère sont importantes, plus les tendances saisonnières de baisse du niveau marin devraient être importantes si celui-ci n'est forcé que par les facteurs atmosphériques (Jordà *et al.*, 2012). Par ailleurs, l'occurrence de plus en plus fréquente de phases positives de la NAO est liée à la hausse des concentrations de GES dans l'atmosphère depuis 40 ans environ (Visbeck *et al.*, 2001; Ullmann, 2008). Cette fréquence importante des phases positives de NAO entraînera des conditions climatiques plus stables, et favorisera les temps calmes et donc la diminution de l'activité cyclonique telle qu'elle est observée depuis la 2$^{nde}$ moitié du XX$^{ème}$ siècle dans l'ouest du bassin méditerranéen (Schubert *et al.*, 1998; Lionello *et al.*, 2006; Ullmann, 2008).

Autour des côtes de la Tunisie, l'élévation des températures des eaux (d'environ 2,6°C) et l'augmentation de la salinité (d'environ 0,5 PSU) auront un effet inverse et les effets stériques devraient s'annuler (Figure 29) ce qui signifie que la contribution des effets stériques à l'élévation du niveau de la mer devraient y être quasi nuls (Tsimplis *et al.*, 2008).

Sur les côtes de la Tunisie, si seules les conditions atmosphériques (pressions et vents) et les températures des eaux ainsi que leur salinité (effets stériques) sont prises en considération, le niveau de la mer ne devrait pas évoluer significativement d'ici 2100. Ceci suggère que les variations du niveau marin, potentiellement enregistrées au cours du prochain siècle, seront dues d'une part aux mouvements verticaux liés à la subsidence des côtes du nord du golfe de Gabès qui implique une élévation relativement importante du niveau relatif de la mer (Slim *et al.*, 2004; Saidani, 2007) et d'autre part aux submersions dues aux tempêtes.

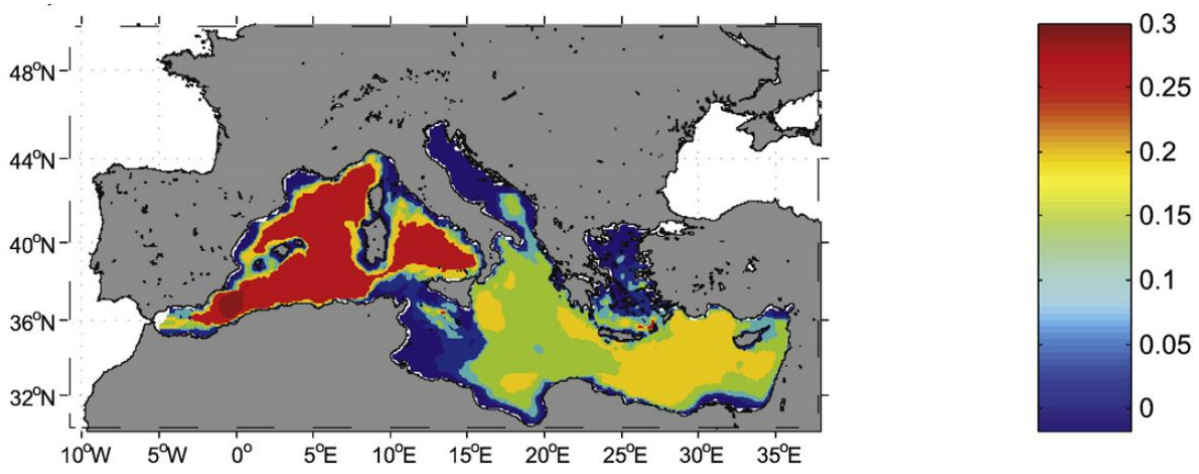



***Figure 29: Effet stérique sur l'élévation du niveau de la mer (Tiré de Tsimplis et al., 2008)***
*Différence entre les effets stériques des périodes 1961 – 1990 et 2070 – 2099*

## Conclusion du Chapitre 2

Les évolutions du climat depuis au moins deux millénaires influencent les conditions de vie des habitants du pourtour méditerranéen et donc de l'archipel de Kerkennah qui est passé d'un climat plutôt humide (époque à laquelle Kerkennah étaient citée comme « grenier à blé ») à un climat méditerranéen semi-aride actuellement (9 mois écologiquement secs durant la période estivale, 255 mm de précipitation moyenne par an, température moyenne annuelle de 19°C)

Les évolutions climatiques depuis la moitié du XX$^{ème}$ siècle montrent une augmentation des températures de l'air et une élévation du niveau de la mer.

Dans le futur et d'après les résultats fournis par les modèles du climat, les températures de l'air devraient poursuivre leur élévation. Les précipitations devraient, quant à elles, décroître dans le sud de la Méditerranée ce qui aboutirait à une aggravation des sècheresses et de l'aridité. Enfin, les tendances concernant le niveau absolu de la mer ne sont pas claires et pourraient finalement ne pas évoluer d'ici 2100. De plus il ne semble pas possible de conclure sur l'augmentation du nombre des tempêtes sur la région. L'archipel de Kerkennah étant soumis à une subsidence active (dont les indices seront décrits dans le chapitre suivant), le niveau relatif de la mer devrait, lui, augmenter.

Ainsi l'élévation des températures et du niveau de la mer sont des facteurs de vulnérabilité car ils accentuent, pour le premier l'évaporation et la sècheresse (car il n'est pas contré par une augmentation des précipitations) et pour le second l'érosion marine, les intrusions d'eau salée dans les nappes phréatiques et la salinisation des sols.

# Chapitre 3.

## Kerkennah : un territoire aux vulnérabilités multiples

---

Après nous être accordés la définition du terme de vulnérabilité et avoir présenté le contexte géographique dans lequel s'insère l'archipel, ce chapitre 3 a pour objectif de décrire puis d'analyser les vulnérabilités de l'archipel. Ces vulnérabilités, systémiques si l'en est, sont à la fois naturelles et anthropiques.

Ce chapitre est ainsi divisé en quatre sous-parties en allant du général au particulier et en débutant par les éléments « naturels » pour finir par l'aspect anthropique. La première sera consacrée à la définition des îles et de leurs spécificités ou particularités par rapport aux autres territoires. Il s'agira de comprendre comment se place l'archipel par rapport aux autres îles en particulier en termes de vulnérabilité. La deuxième sous-partie présentera les fragilités intrinsèques et physiques de l'archipel de Kerkennah, par le biais d'une synthèse bibliographique sur les conditions de mise en place de ses formations géologiques. La troisième sous-partie présentera les différents espaces de l'archipel, par le biais d'une mise à jour cartographique réalisée, dans le cadre de cette thèse, principalement par photo-interprétation. Il s'agira de présenter les différents îles et îlots qui composent l'archipel de Kerkennah, les différentes localités présentes sur les deux îles principales, et les paysages ou espaces typiques qu'il renferme. L'accent sera en particulier mis sur les sebkhas et les zones littorales, qui sont les terrains d'études que j'ai privilégiés tout au long de mon travail de thèse. Enfin, la dernière sous-partie présentera la dynamique de la population de l'archipel et les techniques mises en place pour répondre au manque d'eau chronique qu'il subit actuellement.

## 1. Définition et spécificités des milieux insulaires

Une des premières questions qui intéresse le géographe travaillant sur un milieu insulaire est de savoir si les îles sont des espaces d'études comme les autres, possédant toutefois des spécificités propres ; comme les vallées qui font partie des milieux montagnards, les îles font-elles parties des milieux littoraux ? Si non, doivent-elles être considérées comme spécifiques, à l'instar des milieux urbains, et donc bénéficier d'un domaine d'étude à part entière comme le propose Abraham Moles qui crée la notion de Nissonologie (du grec : *nissos* ; l'île) (Bonnemaison, 1991). La définition de ce qu'est une île et l'étude de ses spécificités permet de répondre à cette question.

Une île, tel que le mot est défini dans le langage courant, correspond à "une terre entourée d'eau de toute part". Cette définition est cependant très insuffisante pour la communauté scientifique, et de nombreux auteurs la discutent ou la remettent en question (Bonnemaison, 1991; Brunet *et al.*, 1996; Brunet, 1997; Taglioni, 2003). Un paramètre important est la surface à partir de laquelle un territoire isolé par l'eau est, ou n'est plus, considéré comme une île. Brunet (1997) le prend en compte et propose ainsi de définir les îles comme étant des :

> *« Terres entourées d'eau de tous côtés, d'un seul tenant et dont la surface est comprise entre un million de kilomètres carrés et un demi-kilomètre carré.»*
> *(Brunet, 1997)*

Il exclut ainsi l'Australie et le Groenland, considère la Nouvelle Guinée comme étant la plus grande (mais aussi la plus haute) île du monde, et respecte la définition des archipels qui sont des groupements d'îles et îlots séparés. La limite inférieure de 50ha (0,5km²) marque la limite entre îles et îlots (Brunet, 1997). Cette classification, selon la surface, a été affinée par Taglioni (2003), qui ajoute qu'une île peut être considérée comme "petite", dès lors que sa surface est inférieure à la valeur seuil de 11 000 km², qui correspond à la limite de taille entre les îles des Grandes Antilles par opposition à celles des Petites Antilles. A l'opposé des paramètres chiffrés utilisés par Brunet (1997), Péron (1993) définit la taille des îles en fonction des représentations des populations et propose :

*« Une île est considérée comme petite quand chaque individu qui y vit a conscience d'habiter un territoire clos par la mer. Une île est considérée comme "grande" lorsque l'ensemble de la société a conscience d'être insulaire, alors que les individus peuvent ignorer ou oublier qu'ils habitent une île » (Péron, 1993).*

Les îles ne sauraient, cependant, être définies uniquement par leur taille. D'autres notions entrent en jeux dont :

*« des caractères physiques spécifiques aux milieux insulaires : morphologie littorale, effet du relief multipliant les zones microclimatiques, variété des paysages sur une superficie réduite, endémisme, biologique, fragilité des écosystèmes » (Benjamin & Godard, 1999).*

La notion d'isolement apparaît également comme primordiale. L'isolement des îles par une masse d'eau, et ce que cet isolement implique, fonde l'un des piliers de l'insularité (Bonnemaison, 1991). Les terme d'îléité (qui correspond aux représentations individuelles et sociétales des îles (Bonnemaison, 1991)) et d'insularisme (qui serait la *« propension qu'ont souvent les insulaires à cultiver à l'excès leur spécificité, pour mieux affirmer leur identité culturelle ou bénéficier d'avantages non moins spécifiques »* Taglioni in Sevin (2010)) ont permis de mieux définir le champs de l'étude sur les îles. L'isolement physique conduit à de nombreuses spécificités territoriales. D'un point de vue naturaliste, l'endémisme de certaines espèces vivantes est remarquable et l'isolement peut créer, à l'échelle de l'évolution de ces organismes, des exemples inédits de nanisme ou de gigantisme. C'est le cas, par exemple, sur l'île de Florès en Indonésie où des ossements d'hominidés de petite taille, ainsi que ceux d'éléphants nains, ont été découverts (Van Hateren, 2012). Du point de vue géologique, les atolls, les récifs coralliens ou encore les îles volcaniques, présentent des dynamiques d'érosion et de formation spécifiques. Du point de vue climatique, les îles présentent souvent un micro climat créé par la proximité de la mer. Cette proximité est naturellement maximale pour les petites îles, comme celles de l'archipel de Kerkennah, où l'éloignement de la mer n'excède pas 5 km. Influencé par un climat semi-aride et connaissant fréquemment des épisodes de très forte chaleur, l'archipel bénéficie de conditions climatiques spécifiques, créées par la proximité de la mer, en particulier lors de périodes calmes (situations radiatives) qui favorisent la formation de brises littorales (Dahech, 2007).

Cependant, et bien que des spécificités insulaires existent, elles ne sont toutefois pas suffisantes pour faire des îles des milieux à part entière. L'îléité et l'insularisme relèvent de la

perception que les hommes ont des îles. Pour beaucoup, l'île est plus qu'un concept physique de terre et d'eau, elle est une construction sociale et systémique qu'il est indispensable de prendre en compte dans les études de ce type d'espaces (Péron, 1993; Taglioni, 2003; Bouchard *et al.*, 2010). Cependant la pensée déterministe qui voudrait que l'homme des îles soit réduit à sa condition d'insulaire est à proscrire même si certains d'entre eux le revendiquent (Taglioni, 2006). Le caractère principal des îles reste leur isolement et la rupture qui existe entre elle et le continent qu'il soit physique (par l'eau) ou humain (identité insulaire, sentiment d'appartenance à un groupe) (Bonnemaison, 1991; Taglioni, 2003). Le sentiment d'appartenance à un groupe d'îliens est souvent très fort mais ressemble au sentiment d'appartenance régionale que l'on retrouve aujourd'hui en Europe et plus particulièrement en Flandre, en Corse, en Catalogne ou en Ecosse où la population revendique son appartenance au même groupe allant, pour ces exemples, jusqu'à revendiquer leur indépendance. De même, l'isolement n'est pas propre aux îles. Une vallée excentrée et reliée au reste du monde par un simple chemin sera beaucoup plus isolée que certaines îles. Il en est de même pour le sentiment d'appartenance à un groupe humain, qui n'est pas spécifique aux îles et se retrouve partout et à différentes échelles. Les spécificités économiques et politiques existent pour les petits états insulaires qui se revendiquent d'un « destin commun », et qui, malgré un éloignement parfois important, prennent des mesures identiques (David, 2010). Mais ces spécificités se limitent aux états insulaires car les îles relevant d'Etats « continentaux » n'ont pas leur propre économie ni politique globale ; la spécificité politique est moins évidente pour elles. Economiquement et culturellement parlant, il serait faux de penser que l'installation humaine durable sur une île sera compromise par la petite taille de cette dernière. Pourtant, et bien qu'en effet les catastrophes naturelles y soient plus durement ressenties, que les ressources naturelles y soit limitées et parfois inexistantes ou encore que le chômage y soit souvent plus fort, certaines petites îles, telles que Hong Kong et Singapour, connaissent une très grande prospérité (Taglioni, 2003). Pour la majorité des auteurs, les îles présentent des spécificités, mais ne sont pas elles-mêmes des milieux spécifiques.

> *« la spécificité insulaire ne réside pas dans un ou plusieurs caractères qui seraient absolument propres aux îles, mais dans les interactions multiples de données hétérogènes » (Péron, 1993 p. 235).*

> *« L'île n'est donc pas un objet géographique spécifique, mais les phénomènes géographiques, économiques, politiques et sociaux qui s'y déroulent sont souvent amplifiés par l'insularité, l'îléité et l'insularisme ; c'est peut-être là sa plus grande spécificité. » (Taglioni, 2003).*

De plus

> *« Les petits systèmes insulaires représentent, par leur taille et leur nature spécifique (alliant insularité et « petitesse »), d'excellents laboratoires des dynamiques socio-territoriales contemporaines » (Bouchard et al., 2010).*

L'intérêt d'étudier les petites îles est qu'elles semblent être des indicateurs de ce qu'il pourrait se passer sur les plus grandes îles ou continents dans le contexte d'une évolution climatique car, plus durement touchées par les phénomènes naturels, elles y sont également potentiellement plus vulnérables (Nicholls & Hoozemans, 1996). Comme l'affirment Péron (1993), Taglioni (2003) et Bouchard (2010), l'étude des systèmes insulaires est primordiale pour comprendre les dynamiques qui les caractérisent et entrevoir peut-être ce qu'il pourrait advenir de zones côtières à l'avenir.

**En résumé, une petite île serait un espace clos, entourée d'eau de tous côtés, de taille inférieure à 11 000 km² et supérieure à 0,5 km², plus ou moins isolée du reste du monde. Ses conditions physiques sont spécifiques et une petite île serait plus vulnérable aux évolutions climatiques et environnementales actuelles que les continents. Enfin, la population d'une petite île serait consciente de sa situation géographique particulière.**

Cette définition, tirée de la synthèse bibliographique précédente convient bien aux cinq plus grandes îles de l'archipel des Kerkennah que sont d'abord, Gharbi et Chergui, dont les superficies sont respectivement de 48 km² et 99 km² puis Gremdi (1,9 km²), Roumadia (1,5 km²) et Lazdad (0,7 km²). Les autres îles étant bien plus petites (entre 0,5 et 0,002 km²) elles entrent dans la catégorie des îlots (Figure 30). On compte ainsi une dizaine d'îlots dans l'archipel et certains sont parfois si petits qu'ils ne possèdent pas même de nom. Comme le remarquent plusieurs auteurs, l'archipel, très bas (maximum de 13 mètres au niveau de Ouled Azzedine), de structure fragile et composé de matériaux souvent peu solides, subit les transformations environnementales liées à l'évolution climatique en cours ou aux pratiques anthropiques peu durables (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001; Fehri, 2011).

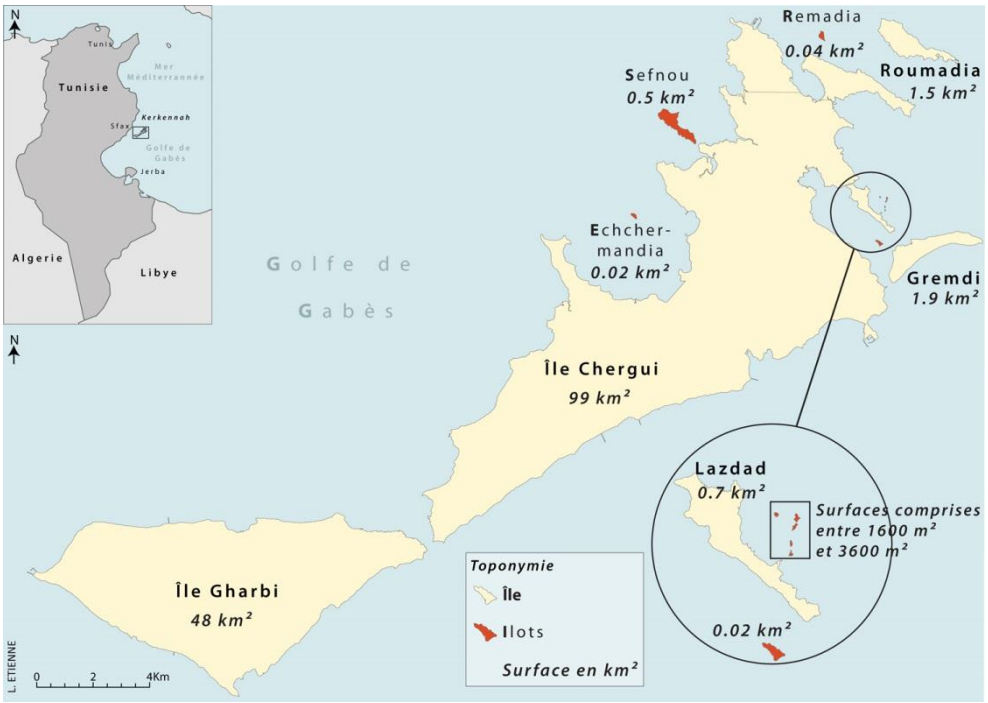



***Figure 30 : Localisation, toponymie et surface des îles et îlots de l'archipel***

L'archipel est relié au continent par un bac, qui ne peut accoster que dans un port aménagé. Ce lien quotidien avec le continent et les migrations pendulaires, en font un archipel relativement peu isolé. L'attachement des Kerkenniens à leurs îles est très fort, en témoigne le retour estival de près de 100 000 îliens habitant sur le continent durant le reste de l'année pour des raisons professionnelles ou autres.

Selon la classification des îles d'Aubert de la Rüe reprise par Germanaz puis par Bernardie et Taglioni en 2005, il existe 11 types d'îles définis en fonction de leur processus de formation et de leur éloignement des masses continentales. Les îles de l'archipel de Kerkennah entrent dans la catégorie des îles de désarticulation, c'est-à-dire isolées du continent par variation du niveau marin, dépendantes et continentales car géologiquement solidaires du continent (Figure 31). Etant situé dans le golfe de Gabès, l'archipel de Kerkennah émerge en effet du plateau continental à l'ouest de l'agglomération de Sfax. La séparation de l'archipel et du continent a eu lieu lors de la dernière phase de réchauffement qui a provoqué une élévation du niveau de la mer, accentuée dans l'archipel, par une subsidence importante qui se poursuit encore aujourd'hui (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1986).

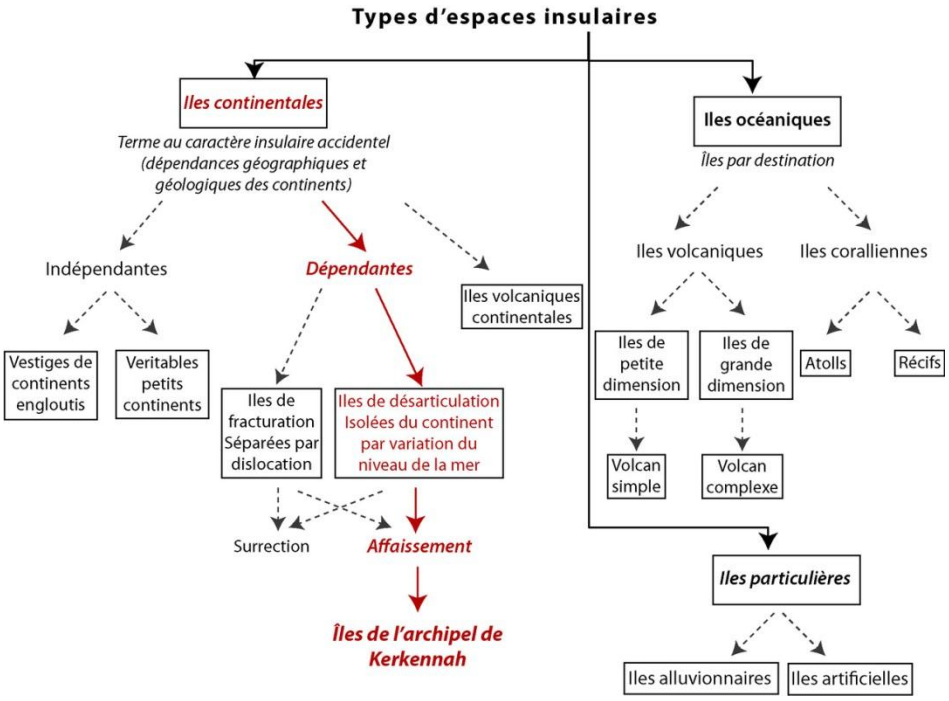



***Figure 31: Typologie des îles et situation des îles de Kerkennah (Repris et modifié de Germanaz in Bernardie & Taglioni, 2005 p. 35)***

## 2. Les formations géologiques de l'archipel, fragilité et vulnérabilité structurale

### 2.1. Fragilité des formations litho-stratigraphiques

Les formations litho-stratigraphiques qui sont battues par les vagues influencent la résistance de la côte à l'érosion. Des formations tendres seront facilement érodables tandis que si elles sont dures, les rythmes d'érosion seront moindres. Ainsi, la vulnérabilité des côtes dépend en partie de ces formations. Aujourd'hui, sur les côtes de l'archipel, les formations visibles appartiennent au mio-Pliocène (Figure 32 - A), Pléistocène (Figure 32 - B) et Holocène (Figure 32 - C) (Paskoff & Oueslati, 1988; Morzadec-Kerfourn, 2002).

La formation la plus ancienne est composée d'une couche d'argiles gypseuses d'âge Mio-Pliocène (Figure 32 - 1). Elle est visible dans le talus de raccordement dominant la sebkha Henchir Salem dans l'île Gharbi, ainsi qu'à la base des falaises d'El Jorf et de Ras Bou Nouma. Au-dessus de ces argiles, se trouve une croûte calcaire d'âge Pléistocène inférieur (Figure 32 - 2). Celle-ci est peu épaisse et se divise en 2 parties. La partie inférieure, comporte 2 horizons :

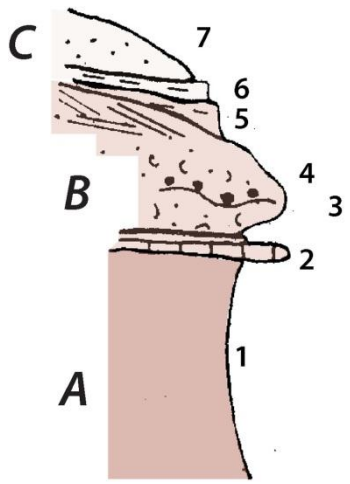



***Figure 32: Stratigraphie des dépôts affleurant à Kerkennah. (Adapté de Oueslati, 1986 p. 190) .***
A. *Formation d'âge Pliocène ; B. Formations d'âge Pléistocène ; C. Formations d'âge quaternaire. 1, Argiles moi-Pliocènes ; 2, Croûte villafranchienne ; 3, Voile limono-sableux du quaternaire ancien ; 4, Eutyrrhénien, formation Rejiche ; 5, Couche limono-sableuse rouge ruisselée würmienne ; 6, Couche limono-sableuse ruisselée d'âge historique ; 7, Sables éoliens actuels et sub-actuels.*

Le premier, d'environ 40 cm, repose directement sur les argiles mio-pliocènes et est composé de dépôts sablo-limoneux à nodules calcaires. Le second horizon, plus épais (80 cm environ), est composé de dépôts argilo-limoneux poudreux. La partie supérieure, de 50 à 80 cm d'épaisseur, est constituée de gros blocs très durs parfois disloqués. Cette couche géologique constitue la partie la plus solide des formations de l'archipel (Oueslati, 1986; Bouaziz, 2008) et a été utilisée jusque très récemment pour la construction de maisons et autres bâtiments. Son utilisation dans le bâtiment est interdite depuis les années 1990 (Kebaïli Tarchouna, 2013) et les pierres utilisées pour les constructions doivent, par obligation légale, provenir de l'extérieur de l'archipel. Cependant sa destruction dans les champs, par les agriculteurs, constitue une véritable fragilisation pour la structure de l'archipel. Au-dessus de cette formation dure, se trouve parfois des dépôts limono-sableux datant du quaternaire ancien (Figure 32 - 3) au-dessus desquels se superpose les grès Tyrrhéniens de la formation Rejiche (Figure 32 - 4). Elle prend elle-même trois formes différentes : la première forme est celle d'un cordon littoral (ou bourrelet) que l'on retrouve à près de 4 mètres d'altitude aujourd'hui. Composée de grès calcaires très riches en faune marine, elle indique un milieu marin peu profond (aujourd'hui transformé en beach rock) et parfois surmonté de dunes (Oueslati, 1986). Les bourrelets, ou crête de cordon littoral, sont présentés sur la Figure 33. La deuxième forme se retrouve là où existaient des falaises à l'époque de la mise en place de la formation Rejiche il y a environ 125000 ans, et seuls des galets subsistent. Enfin une forme infralittorale composée de grès oolithiques légèrement marneux se retrouve dans les sebkhas actuelles qui étaient alors totalement recouvertes par les eaux.

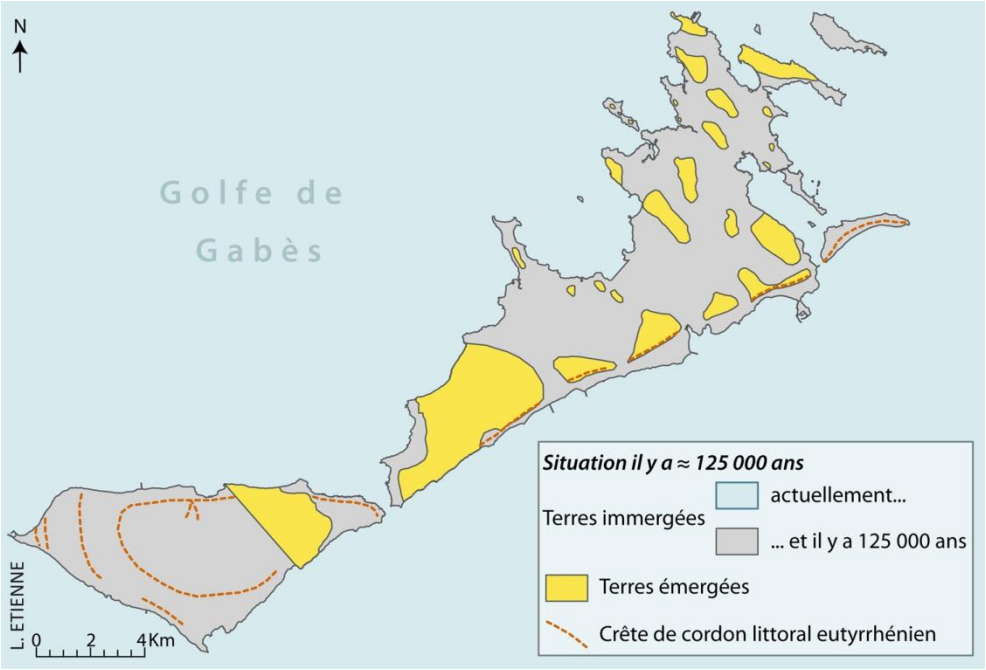



***Figure 33: Bourrelets ou crête de cordon littoral, d'âge eutyrrhénien repérables dans l'archipel des différentes transgressions et régressions marines (Adapté de Oueslati, 1986)***

Les formations mises en place durant la période du Würm sont spécifiques de milieux marins ou côtiers. En effet, durant cette période, le climat entre dans une phase de refroidissement, de glaciation et donc une baisse du niveau de la mer. Des soubresauts viennent perturber cette glaciation et le niveau de la mer ainsi que les précipitations y varient beaucoup (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1994). Oueslati (1994) écrit d'ailleurs dans son chapitre sur le Pléistocène supérieur :

> *« L'opinion actuelle est que les colluvions et les dunes qui les séparent expriment des faits climatiques et eustatiques. Les premières ont été mises en place sous un climat pluvieux contemporain d'un abaissement du niveau de la mer. Les éolianites illustrent par contre des avancées du rivage vers le continent par suite d'une élévation du niveau de la mer, sans toutefois atteindre le niveau actuel. En même temps l'action du ruissèlement s'est affaiblie. »*
> *(Oueslati, 1994)*

Les formations marines proches ou éoliennes, caractérisées par une dune côtière, des sables marins ou des vestiges de plages contenant des coquillages marins, alternent avec des formations purement continentales, caractérisées par des dépôts sablo-limoneux rouges (Figure 32 - 5). Dans l'archipel de Kerkennah ils correspondent à la mise en place des sebkhas avec des environnements de type lagunaire, hypothèse confirmée par des indices floristiques et faunistiques relevés sur place (Morzadec-Kerfourn, 2002).

Durant la période holocène, les formations visibles dans l'archipel de Kerkennah sont récentes puisque d'âge historique. Il s'agit d'une couche limono-sableuse ruisselée (Figure 32 - 6) qui atteste d'une période plus pluvieuse dans l'Antiquité et enfin des sables actuels (Figure 32 - 7) recouvrant l'ensemble des autres formations.

**La vulnérabilité de l'archipel vient en partie de la superposition des différentes formations, relativement peu épaisses et peu dures.** La formation la plus dure est la croûte saumon sur laquelle sont venues se superposer des formations plus ou moins tendres. L'érosion différentielle est donc importante et déstabilise les côtes et les versants.

### 2.2. L'instabilité tectonique

La phase tectonique post-Pléistocène inférieur est celle qui a donné la physionomie actuelle du relief de l'archipel (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1986). Les accidents qui en résultent (Figure 34) remontent à une époque antérieure au Tyrrhénien et postérieure à la mise en place de la croûte calcaire saumon. La longue flexure d'orientation ONO-ESE a marqué le littoral sud est de l'île Chergui (tracé rectiligne de la côte) tandis qu'une multitude de failles d'orientation NO-SE ont créé une succession de horst et de graben, ces derniers formant aujourd'hui les sebkhas de l'archipel. Sur les îles, le relief le plus important est la rupture de pente provoquée par une faille d'orientation NO-SE sur l'île de Gharbi (noté en orange sur la Figure 34).

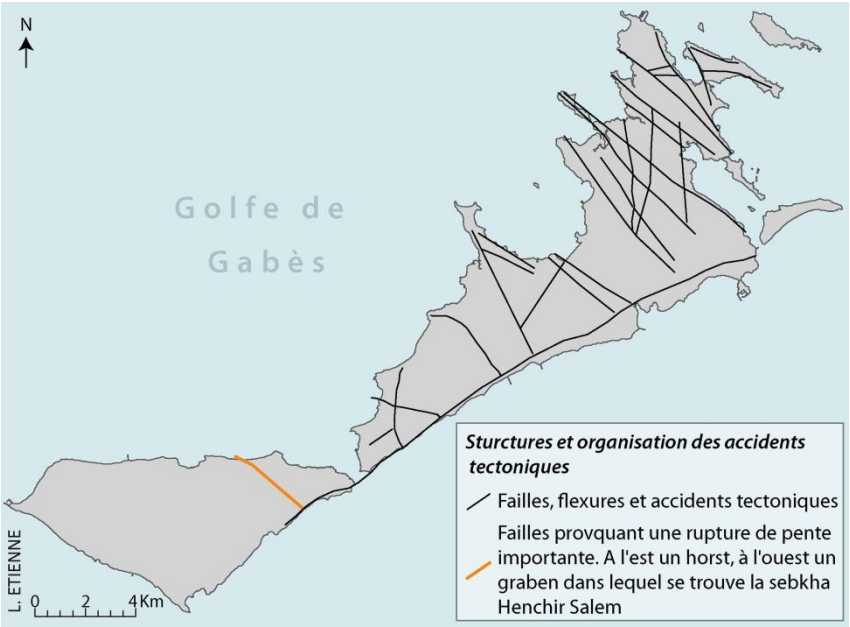



***Figure 34: Failles et flexures de l'archipel (Adapté de Oueslati, 1986).***
*En orange, la faille à l'origine de la rupture de pente la plus importante de l'archipel. A l'est, un horst, à l'ouest un graben et la sebkha Henchir Salem.*

### 2.3. Variation du niveau de la mer à l'échelle du quaternaire supérieur

L'époque du Pléistocène est marquée par plusieurs bouleversements climatiques et une alternance de glaciation/déglaciation ayant entrainé des variations importantes du niveau marin. La physionomie des îles de Kerkennah a varié durant le Pléistocène supérieur et l'archipel a pu être en position continentale, comme au moment de la régression marine lors du dernier interglaciaire il y a environ 20 000 ans (Figure 35 - A), ou n'être composé que d'un chapelet de petites îles voire d'îlots, lors des transgressions marines et en particulier la transgression eutyrrhénienne il y a environ 125 000 ans (Figure 35 - B).

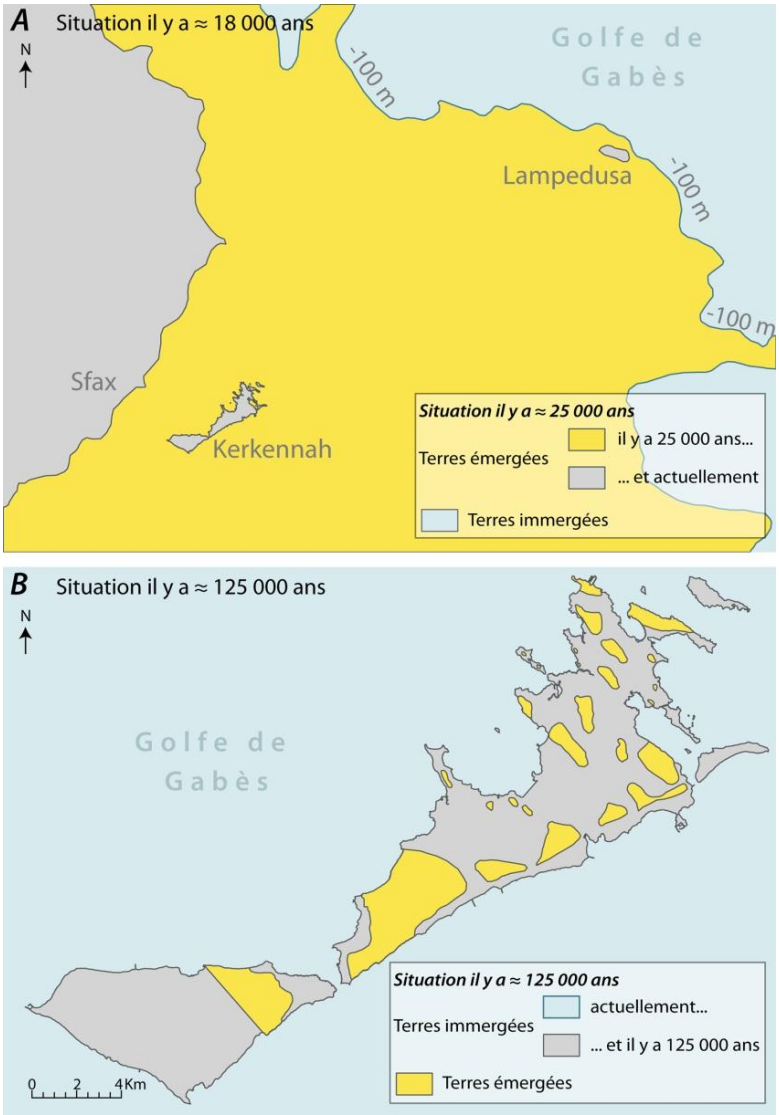



***Figure 35: Variations du niveau marin à l'échelle du quaternaire supérieur (Adapté de Oueslati, 1986)***

## 3. L'occupation du sol contrainte par les formes du relief

### 3.1. Le littoral de l'archipel

Les côtes de l'archipel de Kerkennah sont majoritairement basses et les falaises les plus hautes de l'archipel atteignent au maximum 11 m (Figure 37, p. 82). L'archipel est situé sur le plateau continental du golfe de Gabès où la bathymétrie est très faible (Figure 36). L'isobathe des 200 mètres se trouve parfois à près de 400 km des côtes de l'archipel. Les îles sont entourées de hauts fonds entrecoupés de chenaux pouvant atteindre la profondeur de 13 mètres ce qui contraint fortement leur accessibilité ; les seuls bateaux pouvant atteindre l'archipel doivent forcément les emprunter et être à fond plat comme le sont les *Felouk* ou les *Louds* de Kerkennah. L'origine de ces chenaux est controversée : il pourrait s'agir d'anciens lits d'oueds datant de l'époque où Kerkennah se trouvait en position continentale ou de chenaux de marées sous-marins (Oueslati, 1986) aujourd'hui empruntés par les courants de marées.

Les marées sont, dans le golfe de Gabès, relativement importantes par rapport au reste de la Méditerranée et les marées vives de hautes eaux peuvent atteindre près de 1,8 mètres dans le fond du golfe (Pergent & Kempf, 1993) ; à titre d'exemple, c'est plus qu'à Dakar pourtant située sur la côte Atlantique du Sénégal (Guérin, 2004). Durant les périodes de mortes eaux, la marée n'atteint cependant que 0,3 mètre (Pergent & Kempf, 1993). Entre les chenaux s'intercalent des talus qui eux-mêmes encadrent des dépressions sous-marines appelées *Bhiras* (Figure 36). Celles-ci comportent des eaux très calmes et des champs de posidonies et de caulerpes y croissent aisément, favorisant également la reproduction de différentes espèces animales. La très faible décroissance des profondeurs et les très grandes surfaces ayant une profondeur de 0 à -1 mètre (Figure 36) ont permis aux îliens de développer une technique de pêcheries fixes (les *Cherfias*) qui sont d'ingénieux pièges à poissons fonctionnant grâce aux marées (Louis, 1963). Les fonds marins très peu profonds et la présence de chenaux de marées (Figure 36) engendrent des courants puissants de 2 à 3 nœuds dans les oueds sous-marins (Pergent & Kempf, 1993) et donc un bon renouvellement des eaux ainsi que des valeurs de marée importantes. Cet environnement favorable permet le fort développement de populations halieutiques et donc une activité de pêche florissante depuis l'Antiquité (Slim *et al.*, 2004).

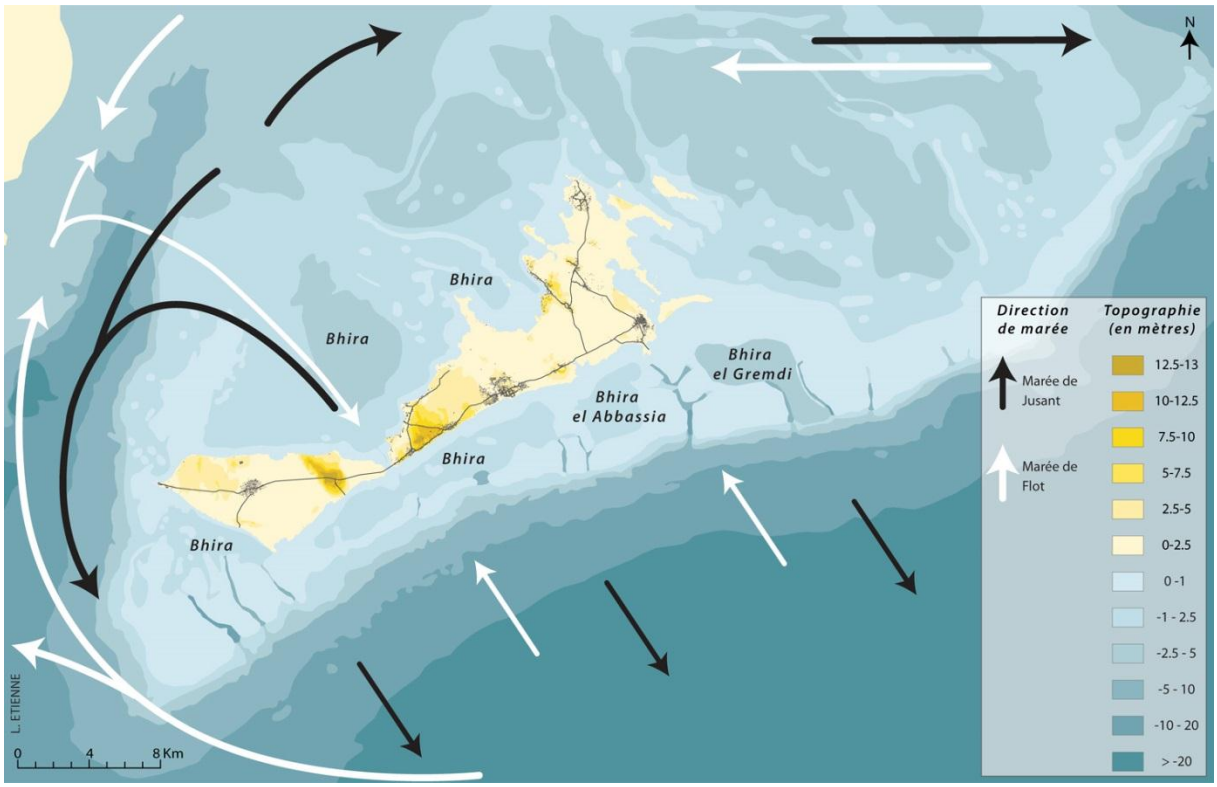



***Figure 36: Topographie sous-marine, courants principaux et marées (source : Carte SHOM 4235)***

La topographie sous-marine, les très faibles profondeurs des fonds marins et les hauts fonds bordant l'archipel au sud-ouest laissent penser que l'archipel ne connaît pas le danger de l'érosion marine liée aux fortes houles ou aux submersions marines. Cependant, il n'est pas rare que les zones basses de l'archipel soient envahies par les eaux et les côtes sont parsemées d'indices d'une érosion active. Les côtes de l'archipel sont assez variées, allant de la falaise vive bien exposée, aux marais maritimes en situation d'abris (Figure 37). Leur tracé est plutôt rectiligne sur les façades sud et ouest des îles. Ces côtes sont également protégées des fortes houles, qui sont relativement rares, par une rupture de pente située à quelques centaines de mètres du rivage ainsi que par les *Bhiras*. Ces obstacles naturels sont autant de brises lames protectrices. A l'inverse, sur la façade nord, le tracé côtier est très découpé (Figure 37) car érodé par les tempêtes marines engendrées par des vents forts arrivant du nord ou du nord-ouest (Dahech, 2007). La hauteur des falaises de l'archipel varie de quelques centimètres à environ 11 mètres au niveau de Jorf. Quels que soient les matériaux dans lesquels elles sont taillées, les falaises sont toutes actives (ou vives) ce qui dénote une érosion actuelle des côtes de l'archipel (Figure 37 - 2, 3, 4 et 5). Les côtes les plus basses sont composées de plages et des sorties de sebkhas ou de marais maritimes (Figure 37 - 6 et 7).

***Figure 37: Types de côtes et exemples photographiques (Données : carte topographique de 1973 et terrain. Photos prises en Mars 2010 et Juin 2011)***

1, *Vue des plus hautes falaises de l'Archipel situées au niveau de Jorf. 2, Falaises de plus de 2 mètres de hauteur au niveau de Jorf. 3, Falaises d'environ 1,7 mètre sur la façade ouest de Sidi Fonkhal. 4, Micro-falaise d'environ 50 cm sur la côte nord de Gharbi. 5, Plage de Sidi Fonkhal. 6, Marais maritime dans la zone touristique de Chergui.*

Les marais maritimes se développent sur des côtes basses, très peu pentues et abritées des courants forts ce qui permet le stockage de matériaux fins. Ils comportent souvent deux espaces particuliers : le premier, le plus proche de l'eau et toujours humide, est composé des matériaux les plus fins souvent vaseux et est dépourvu de végétation, il s'agit de la *Slikke*. Le second, en amont, est également submersible par les marées hautes et est couvert d'un tapis végétal halophile de type salicorne, il s'agit du *Schorre*. L'ensemble du marais maritime est traversé de chenaux de marées permettant l'écoulement des eaux marines (Verger, 1995) et son développement dans l'archipel de Kerkennah est assez spécifique pour qu'un modèle (Figure 38) ai été proposé par Oueslati (1992). Sous l'effet de la subsidence, le sol s'enfonce et la marée inonde la zone basse. Des dépôts marins ainsi que des chenaux de marée apparaissent et permettent l'implantation de végétation halophile sur leurs bords. Le marais maritime progresse ensuite vers l'intérieur des terres. Dans l'archipel, ces formations se situent très souvent sur les bordures maritimes des sebkhas[2] littorales situées dans les zones les plus basses de l'archipel.

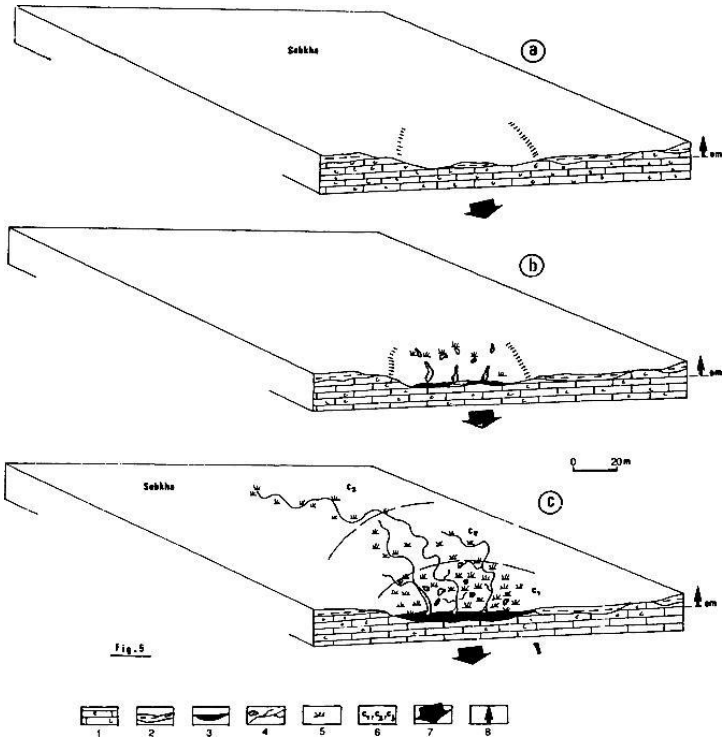



***Figure 38: Modèle de formation des marais maritimes à Kerkennah (Tiré de Oueslati, 1992)***
*1, calcaire tyrrhénien. 2, dépôt fin de sebkha. 3, dépôt vaseux marin. 4, Chenaux de marée et dépressions. 5, végétations halophile. 6, progression du marais vers l'intérieur des terres. 7, subsidence. 8, élévation du niveau de la mer.*

[2] Dans l'ensemble de la thèse, sauf si spécifié, je considère les sebkhas avec leurs zones dépourvues et pourvues de végétation (Chott).

### 3.2. Topographie à l'intérieur des îles et sebkhas de l'archipel

Les sebkhas font partie des différentes formes topographiques regroupées sous le terme générique anglais de « pan » qui inclut 4 sous termes :

> *« les lacs terminaux, les dépôts dans les bassins de drainages internes, les sebkhas côtières et terrestres liées à des formes de terrains inondés ponctuellement, actuellement ou dans un passé géologique récent, par l'eau de l'océan » (Gill, 1996 traduit de l'anglais).*

La nomenclature utilisée ne fait pas consensus chez les géomorphologues (Gill, 1996) et malgré quelques tentatives de cadrage (Briere, 2000; Barth, 2001) les auteurs baptisent différemment les espaces de cuvettes salées et stériles selon leur pays d'origine ou le terrain qu'ils étudient. Ainsi, pour certains auteurs, les termes de *chott, playa, dry lake, vlor, rei, takyre, praia, nor, ngor, pijaz* etc. peuvent être considérés comme des synonymes de sebkhas. Briere (2000) définit finalement les sebkhas comme étant des :

> *« vasières marines marginales dans lesquelles les évaporites minérales se forment dans la zone de capillarité au-dessus d'une nappe d'eau salée » (Briere, 2000 traduit de l'anglais)*

Cette définition ne fait aucune différence entre les sebkhas littorales et continentales or cette distinction est fondamentale (Gill, 1996; Barth, 2001; Yechieli & Wood, 2002). Barth (2001) répond directement à Briere (2000) en affirmant que l'eau souterraine alimentant les sebkhas côtières est d'origine marine donc que la majorité des sédiments le sont également ce qui n'est pas le cas des sebkhas continentales : les minéraux sont caractéristiques et différents pour les deux types de sebkhas (Barth, 2001). Pour Gill (1996), qui étudie l'importance des actions éoliennes, playas et sebkhas sont des termes équivalents : les effets éoliens y sont toujours très importants. Pour cet auteur également, les sebkhas côtières sont différentes des sebkhas intérieures. Il les définit comme étant des :

> *« dépressions salines supratidales formées par une mer antérieurement plus haute et se caractérisant désormais par un lagon ou une baie proche ou à peine au-dessus du niveau de la mer » (Gill, 1996)*

Ceci correspond tout à fait aux sebkhas de l'archipel, puisque ces dernières étaient inondées à la fin du Pléistocène supérieur (Morzadec-Kerfourn, 2002) et se trouvent actuellement en position de cuvette, voire sous le niveau de la mer et que leur sol est salé. Yechieli et Wood (2002) rejoignent Gill (1996) pour ce qui est de la définition des sebkhas

littorales. Ils construisent un modèle d'équilibre conceptuel optimal pour un fonctionnement naturel de la sebkha fondé sur le fait qu'il existe :

> *« […] souvent un équilibre dynamique entre la surface de la nappe d'eau souterraine et les processus éoliens. C'est-à-dire que quand la nappe s'élève et atteint la surface, cette surface va accumuler les sédiments proportionnellement avec la quantité de sédiment disponible et d'autres facteurs. A l'inverse, quand la nappe souterraine s'abaisse, la surface terrestre est érodée par des processus éoliens jusqu'au niveau de la limite de capillarité car les processus éoliens ne peuvent prendre en charge les matériaux sous cette limite » (Yechieli & Wood, 2002 traduit de l'anglais).*

Ce modèle est tout à fait applicable aux sebkhas non aménagées de l'archipel de Kerkennah et est illustré par la Figure 39. Yechieli & Wood (2002) étudient les processus hydrogéologiques des systèmes salins et ils prennent la sebkha littorale comme un modèle du même type que celui d'un bassin versant, en cela qu'elle est un lieu de transition pour des masses d'eaux chargées en sels. Ces masses d'eau, arrivant dans la sebkha littorale, sont composées des eaux de pluies (Figure 39 - Qr) tombant directement dans la sebkha, des eaux de ruissellement (Figure 39 - Qf), des eaux souterraines remontant soit par capillarité soit par remontée directe de la nappe souterraine (Figure 39 - Qgs et Qgd) et d'eaux marines (Figure 39 - Qsw) qui peuvent envahir les sebkhas littorales lors de tempêtes ou parfois de très fortes marées. Les eaux peuvent être expulsées vers l'extérieur du système soit vers l'exutoire naturel de la sebkha c'est-à-dire vers la mer (Figure 39 - Qm) soit par évaporation ou évapotranspiration (Figure 39 - Qe). Ce dernier phénomène reste cependant très faible en raison de la faible couverture végétale contrainte par la salinité. Les sels peuvent provenir des mêmes sources que les eaux et pourront sortir du système avec elles (sauf dans le cas de l'évaporation). Ils pourront également être précipités (voir taux de précipitation des minéraux (Figure 39 - P) et transformation potentielle des sels en éléments gazeux (Figure 39 - G)) ou enfin érodés (Figure 39 - E) et transportés par le vent en dehors de la sebkha (Yechieli & Wood, 2002).

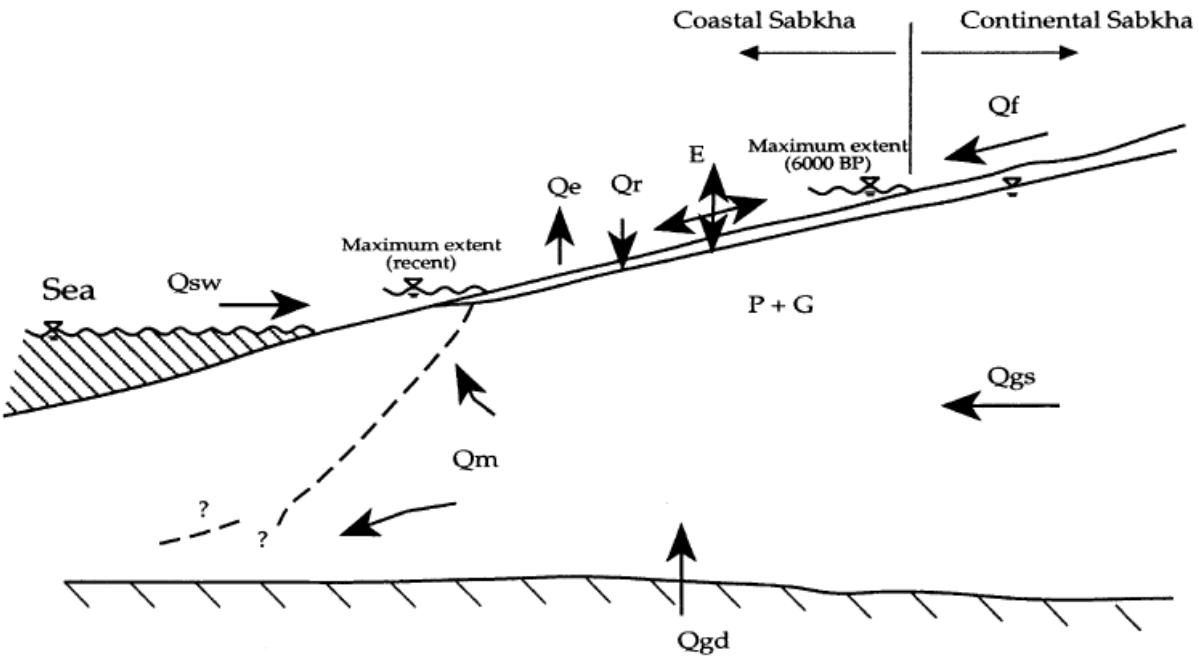



***Figure 39: Composants du bilan de masse d'une sebkha littorale (Tiré de Yechieli & Wood, 2002)***

A Kerkennah, le fonctionnement des sebkhas est le même que celui décrit par Yechieli & Wood (2002) auquel nous pouvons ajouter quelques spécificités, dont le substrat de grès calcaire reposant sous des limons ou un sol sableux (Fehri, 2011) ainsi que la saisonnalité marquée du système (Figure 40). En effet, durant la période estivale, les mois de plein été (juin, juillet et août) connaissent des précipitations nulles ou très faibles, les entrées d'eau ne peuvent donc se faire ni par la pluie ni par le ruissellement. Le niveau de la nappe d'eau souterraine est plus bas et les remontées par capillarité n'atteignent plus la surface. De plus, l'été est synonyme de temps plutôt calme et est peu propice aux tempêtes et aux submersions marines. Concernant les sorties d'eau, elles se font aisément en raison des températures très élevées entraînant des phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration. La sebkha s'assèche alors et un dépôt de sels blanchâtres caractéristique apparaît. Celui-ci pourra être pris en charge par le vent avec les particules fines argileuses au profit des zones bordières, salinisant les sols ou formant des *nebkhas* qui sont des accumulations de matériaux éoliens autour de végétation basse (Figure 40). En hiver, la situation est inverse. Les précipitations sont plus importantes et entraînent un fort ruissellement qui apporte des sels dans les fonds de sebkhas. Ces précipitations permettent d'une part la fixation des matériaux fins comme les sels ou les argiles et d'autre part une remontée de la nappe souterraine dont les eaux atteignent de nouveau la surface par capillarité. Les sebkhas sont alors humides voire inondées dans les zones les plus basses situées sous le niveau de la mer.

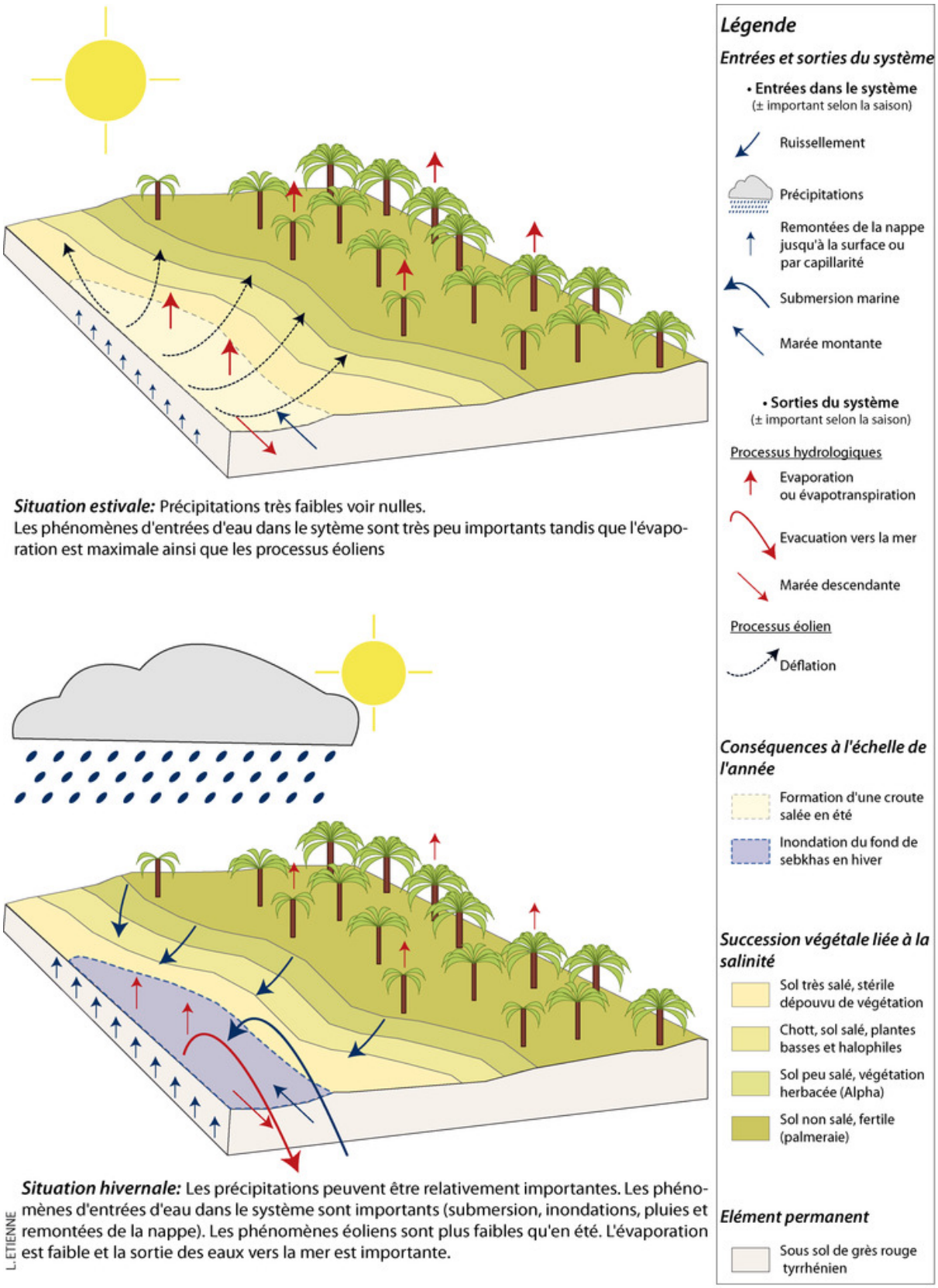



***Figure 40: Fonctionnement normal (sans perturbation naturelle ou anthropique) d'une sebkha de Kerkennah (Inspiré de Yechieli & Wood, 2002; Fehri, 2011)***

Les saisons intermédiaires et hivernales étant plus ventées, des submersions marines peuvent survenir et de l'eau de mer envahir la sebkha. Les quantités de sel reçues sont alors maximales (Figure 40). Les sebkhas de l'archipel sont parfois aménagées et l'exutoire de certaines d'entre elles est fermé par des digues/routes sans buse d'évacuation. L'eau ainsi bloquée dans les terres est évaporée, laissant sur place une quantité de sel très importante. Tandis que la plupart des sebkhas littorales ont naturellement «l'avantage» d'évacuer l'eau salée vers la mer et d'éviter ainsi de concentrer des taux de sels extrêmes, les sebkhas aménagées cumulent donc les deux inconvénients de recevoir l'eau marine et de ne pas pouvoir l'évacuer.

Le fonctionnement naturel de la sebkha est donc influencé par les conditions climatiques de vents, de niveau marin, de niveau de la nappe, de températures etc. Ce fonctionnement peut également être perturbé par les actions humaines, notamment si ces dernières provoquent des variations dans les apports et évacuations d'eau comme dans le cas des digues. Le surpâturage, l'abandon de l'agriculture, la déforestation, la dé-végétalisation et finalement la surexploitation des terrains entraînent également de fortes perturbations dans l'équilibre naturel des sebkhas. Ces phénomènes provoquent en effet une forte salinisation et favorisent l'érosion éolienne, ce qui à terme favorise l'extension des sebkhas (Goudie & Wells, 1995; Gill, 1996).

Les îles de l'archipel de Kerkennah sont très peu élevées et les zones dont l'altitude se situe entre 0 et 2,5 m sont très largement majoritaires (Figure 1, p. 3). Au nord-est de l'archipel, au large de la grande île de Chergui, se dessinent des îlots dont l'altitude est toujours inférieure à 4 mètres (atteinte à Sefnou). Leurs très faibles superficies et l'absence de sources d'eau les rendent inhabitables mais ils ont été utilisés pour faire paître les troupeaux jusqu'à récemment, en particulier les deux îlots les plus grands (Figure 30 : Roumadia (le plus bas des îlots avec une altitude maximale d'1 mètre) et Gremdi) et pour y planter des figuiers ou oliviers (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001). La grande île de Chergui est majoritairement basse (entre 0 et 2,5 mètres) et constituée de sebkhas en particulier à l'est de l'axe Ramla-Sidi Fonkhal. D'est en ouest on trouve les sebkhas El Ferkik, Ennakhla, Najet, Chergui, Abbassia (Figure 41) qui ont été transformées et utilisées comme salines de 1902 à 1922 puis de 1926 à 1932 (Fehri, 2011) et encore aujourd'hui et enfin la sebkha Alif Ennkhal dont l'exutoire vers la mer a été fermé par une digue/route en 2008 (Kebaïli Tarchouna, 2013). C'est sur cette vaste étendue, dont l'altitude ne dépasse pas 1 mètre, et sur les îlots (Figure 1), que se réunissent les oiseaux migrateurs et nicheurs, depuis l'automne jusqu'au printemps. A l'ouest de l'axe précité, les altitudes sont de plus en plus

élevées et atteignent un maximum de 12 mètres à l'est d'Ouled Yaneg avant de redescendre doucement vers le pont d'El Quantara (Figure 41). A l'ouest du pont se trouve l'île de Gharbi. Plus petite que l'île de Chergui, elle présente toutefois l'accident majeur de l'archipel et les falaises les plus hautes au niveau de Jorf (Figure 41). En partant du pont vers l'ouest, on rencontre d'abord une zone basse où se situe la petite sebkha Khnadfa puis les altitudes augmentent pour atteindre 13 mètres à Ouled Azzedine et redescendent très brusquement suivant un talus causé par un accident tectonique le long d'une faille, qui se dessine selon un axe nord-ouest sud-est. S'ensuit une vaste zone basse où l'on trouve les sebkhas Ejlija, Henchir Salem qui viennent presque toucher la localité de Mellita, au sud de l'île la sebkha El khalij puis la sebkha Essendouk (Figure 41).

### 3.3. Localités et surfaces agricoles

Les localités de l'archipel de Kerkennah sont au nombre de 12 et sont réparties principalement sur la côte (Figure 41). Elles sont toutes reliées par un réseau de voies de communications (routes ou pistes). Ramla, qui compte 2069 habitants permanents en 2004 (Tableau 5), est le centre administratif de l'archipel et peut être considéré comme sa capitale. Deux localités ont une population plus importante : Melitta (3473 habitants) et El Ataya (2959 habitants). La première est située au centre de l'île de Gharbi, en position plutôt basse près de la sebkha Henchir Salem. Elle est un « passage obligé » pour qui veut se rendre sur le continent et rejoindre le port de Sidi Youssef (Figure 41). La seconde est située à l'est de Ramla et s'est développée grâce à son port. Les autres localités sont plus petites et comptent moins de 1000 habitants. Sur plusieurs autres espaces de l'archipel, le bâti correspond à des résidences secondaires (Kebaïli Tarchouna, 2013). Ces espaces bâtis sont la zone touristique de Sidi Frej, Bou Nouma et la proximité du port de Sidi Youssef.

L'implantation des localités de l'archipel est contrainte par l'abondance des zones de sebkhas qui sont impropres à la construction de bâtiments de par leur caractère inondable et salé et outre le fait que Ramla, Ouled Bou Ali et Mellita soient bordées par des sebkhas, l'ensemble des autres localités sont situées plus en hauteur (Figure 41). Les zones hors sebkhas sont également occupées par des espaces de palmeraie ou des espaces agricoles pour lesquels l'évolution de la ressource en eau a été déterminante.

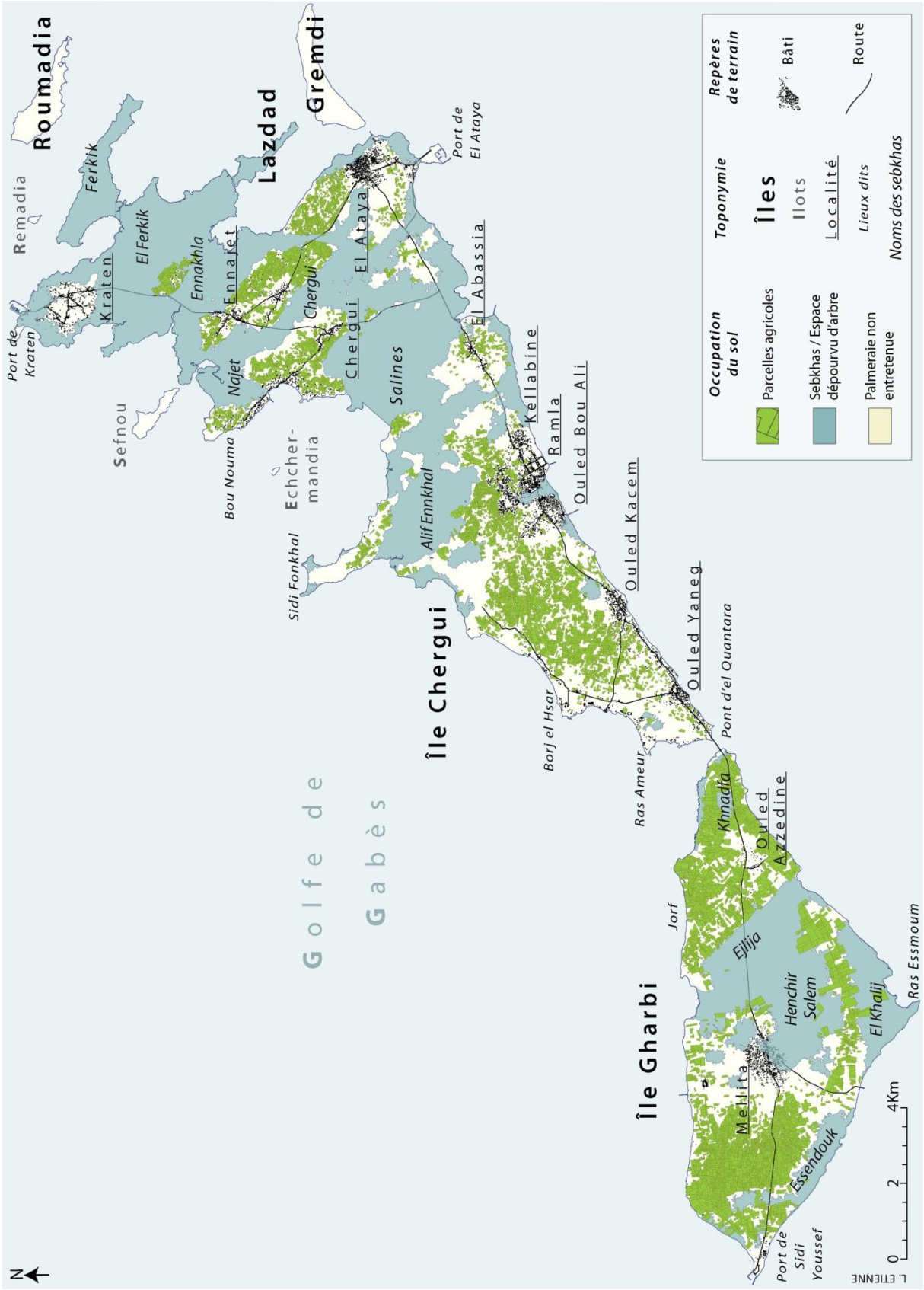



***Figure 41: Occupation du sol en 2010***

***Tableau 5: Population par localités en 2004 (Kebaïli Tarchouna, 2013) source des données : Institut National de la Statistique (INS)***

| Localités | **Nombre d'habitants** | **Nombre de familles** | **Nombre de logements** |
|---|---|---|---|
| Kraten | 1106 | 295 | 421 |
| Ennajet | 944 | 261 | 430 |
| El Ataya | 2959 | 809 | 1263 |
| Chergui | 333 | 108 | 543 |
| Kellabine | 741 | 221 | 464 |
| Ramla | 2069 | 632 | 1136 |
| Ouled Bou Ali | 913 | 282 | 669 |
| Sidi Frej | 578 | 199 | 639 |
| Ouled Kacem, Ouled Yaneg et Ouled Azzedine | 476 | 166 | 549 |
| Mellita | 3473 | 845 | 1263 |
| **Total** | **13592** | **3818** | **7476** |

## 4. Le peuplement de l'archipel et l'évolution des ressources en eau depuis l'Antiquité romaine

L'accès à l'eau est une condition *sine qua non* à l'installation et au maintien d'une population dans son milieu. Contrainte par des conditions climatiques semi-arides et l'absence d'oued ou de rivières pérennes, la population kerkennienne a été et est toujours forcée de trouver d'autres ressources en eau.

### 4.1. Les ressources en eau suffisantes durant l'Antiquité et le Moyen-Âge

Durant l'Antiquité la population utilisait exclusivement les eaux de pluies comme ressources en eau douce. Les quantités d'eau contenues dans les citernes collectives et les puits naturels creusés dans la croûte calcaire (Figure 42) dépendaient des pluies de l'année et ainsi, la vulnérabilité des hommes, de leur bétail et de leurs plantations était particulièrement forte lors des périodes de sècheresse. Cependant, le climat de l'époque et l'adaptation des îliens ont fait de Kerkennah un (petit) grenier à blé durant l'Antiquité ainsi que nous l'apprend le *Bellum Africanum* de Jules César *:*

> *« Lors des guerres civiles entre César et le parti de Pompée, Caius Decimius y avait fait (à Kerkennah), au compte des gens de Pompée, des approvisionnements de blé » (Louis, 1963).*

Plus tard, El Bekri, dans les années 1000 écrit :

*« Comme cette île est très fertile ; les sfaxiens y envoient leurs bestiaux pour y paître » (Louis, 1963).*

Ces textes suggèrent, soit que les conditions climatiques étaient plus favorables et les ressources en eau plus conséquentes à l'époque qu'aujourd'hui ce qui est confirmé par plusieurs études portant sur la détermination des paléoclimats et paléo environnements d'Afrique du nord, soit que les pressions sur les ressources étaient moindres (populations moins importantes) et que l'adaptation à la sècheresse était importante.

Les premières estimations démographiques, aussi incomplètes soient-elles, de la population sont postérieures à l'an 1145, période à laquelle l'archipel est qualifié de *« joli et bien peuplé »* (Jausert, 1838 in (Louis, 1963)) sans plus amples informations. Les îles sont conquises par de nombreux peuples depuis l'Antiquité (Phéniciens, Carthaginois, Romains, Byzantins, Aghlabides, Fatimides, Zirides, Ottomans…) et ce n'est qu'après 1625 et l'arrivée des Turcs dans les régions côtières tunisiennes que l'archipel n'est plus considéré comme réserve de blé ou comme lieu d'exil. La population est plus « libre » et développe une activité commerciale avec le continent en y vendant des produits comme la laine, la viande de mouton, les produits de la pêche, les dattes et autres produits du palmier, ainsi que des olives, figues etc…

***Figure 42: A, Photographie d'une ancienne citerne romaine et B, d'un puits peu profond abandonnés aujourd'hui.***

C’est aussi à cette époque que les premiers villages sont situés à des emplacements plus ou moins fidèles aux localités actuelles qui auraient été, à l’époque, au nombre de 7 (P. D’Ablancourt, 1667 in (Louis, 1963)). En 1839, Felix Flachenacker, rapporte l’existence des 10 villages actuels de l’île de Chergui et de la localité de Mellita sur l’île de Gharbi que l’on peut situer sur la Figure 1 (Louis, 1963).

## 4.2. Accroissement de la population depuis 1890 malgré une ressource en eau rare

### 4.2.1. Dynamique de la population depuis 1890

L’arrivée des français en Tunisie en 1881 ouvre la voie à une certaine modernisation dans l’archipel avec d’une part l’ouverture d’écoles primaires (en 1888, 1900 et 1905) et d’autre part l’installation de dispensaires, de médecins et d’infirmières (Ben Hamida, 2004). Les premières estimations chiffrées de la démographie de l’archipel remontent à 1890, année pour laquelle sont dénombrés 8671 habitants (Tableau 6). Dès 1925, la population dépasse les 13000 habitants et atteindra un pic record en 1936 avec 15130 habitants, chiffre légèrement supérieur à la situation actuelle (Tableau 6). Après cette date, la population décroît selon toute vraisemblance, suite à deux éléments : (i) les années de sècheresse de 1930-1933 et (ii) les effets combinés de la crise économique de 1929 et des pertes liées à la Seconde Guerre Mondiale. Cela a entrainé un exode des zones rurales vers les grandes villes comme Sfax ou Tunis (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001). Cette tendance négative se poursuit jusqu’en 1966. Entre 1966 et 1975, les îles gagnent 1913 habitants ce qui représente une augmentation de 13,2% en 9 ans. Cette croissance survient juste après la déclaration d’indépendance de la Tunisie, mais aussi le développement des moyens de communications avec le continent (apparition et amélioration des services de liaisons îles/continent, par bateaux, depuis 1945 et nationalisés en 1973), l’amélioration du niveau de vie grâce à des aménagements comme l’adduction d’eau potable pour la consommation courante aux logements qui a été initiée en 1945 grâce au forage d’un puits artésien, ou encore l’électrification des bâtiments initiée en 1965. Cependant, l’installation puis la nationalisation du bac reliant l’archipel au continent pour désenclaver les îles a provoqué de nombreux départs vers le continent notamment ceux des jeunes attirés par les écoles supérieures, les universités ou cherchant du travail. Les problèmes économiques liés à la surpêche et à une agriculture peu rentable ont également motivé un grand nombre de départs vers le continent.

***Tableau 6: Effectif de population dans l'archipel depuis 1890 (Institut National de la Statistique (INS); Louis, 1963)***

| Année de recensement | Population |
|---|---|
| 1890 | 8671 |
| 1925 | 13000 |
| 1936 | 15130 |
| 1946 | 14535 |
| 1956 | 13704 |
| 1966 | 12587 |
| 1975 | 14500 |
| 1984 | 14451 |
| 1994 | 14062 |
| 2004 | 14400 |

Après une période faste synonyme de développement commence donc un déclin de la population de 1975 jusqu'en 1994 (Ben Hamida, 2004). Depuis un seul recensement a été effectué en 2004 et la population a de nouveau montré une dynamique de croissance.

Le départ des jeunes et le retour des personnes nouvellement retraitées donnent un aspect spécifique à la pyramide des âges de l'archipel qui montre un vieillissement de la population (Figure 43). En effet, la part des plus âgés est plus importante que celle des autres tranches de la population. De plus, la part des jeunes enfants (0 à 9 ans) est moins importante que leurs aînés dans l'archipel. Cela marque un déclin de la fécondité dans l'archipel. Les personnes qui avaient entre 50-60 ans en 2004, qui sont donc nées dans les années 1950, sont très peu nombreuses.

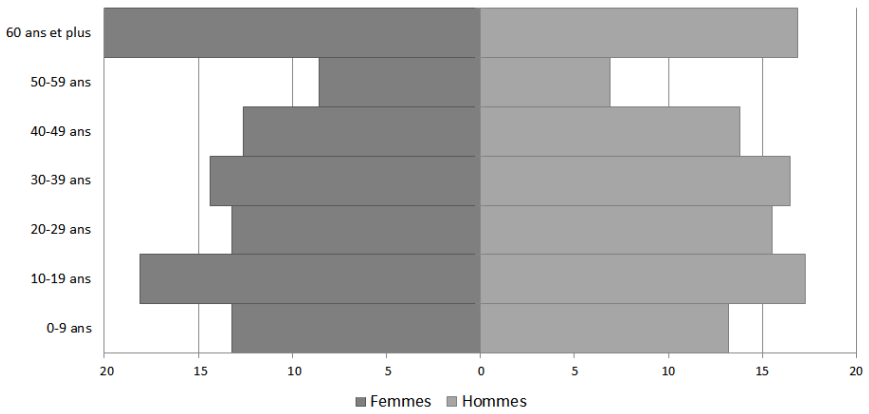



***Figure 43: Pyramide des âges de Kerkennah en % (Institut National de la Statistique (INS))***

### 4.2.2.Le développement des diverses ressources en eau

Lorsque le puits artésien de Bou Nouma a été mis en service en 1953 (Rhouma *et al.*, 2005) et que l'eau qui en est issue a été distribuée dans les habitations de l'archipel en quantité suffisante, le risque de manque d'eau lors des sècheresses s'est nettement amenuisé. Bien que saumâtre (et donc de piètre qualité) cette eau courante a également permis l'irrigation de parcelles cultivées plus grandes que les jardins individuels et a donc amélioré les récoltes (au moins à court terme). Les années suivantes se sont accompagnées d'améliorations techniques liées à la distribution mais également à la production d'eau potable : en premier lieu, les citernes (*Fesquivas* ou *Majels*) individuelles recueillant les eaux de pluie ont été équipées de filtres et les puits (peu profonds mais saumâtres) et citernes collectives ont été abandonnés. Par la suite, une usine de dessalement gérée par la SONEDE a été inaugurée en 1983 à Ramla. Première usine de Tunisie à fonctionner selon le principe de l'osmose inverse, celle-ci permet de dessaler chaque jour 3300 $m^3$ d'eau saumâtre provenant de la nappe profonde et chargée d'environ 3 grammes de sel par litre (Walha *et al.*, 2007). L'ensemble des habitations de l'archipel y est reliée et dispose donc de l'eau courante potable. En 1995 avec la mise en place de zones irriguées drainées, l'agriculture vivrière s'est progressivement transformée en une agriculture plus commerciale avec la plantation d'arbres fruitiers, en particulier d'oliviers. Trois zones ont été créées : à Ramla, Mellita et très récemment à Ouled Azzedine (Figure 44). Les cultures dans ces zones irriguées sont plus diversifiées qu'ailleurs, et bien que l'on y cultive principalement l'olivier, on y trouve également des figuiers, des vignes, des pois et des fèves etc. Cette nouvelle agriculture génère des vulnérabilités fonctionnelles liées à l'apprentissage et à la connaissance de pratiques culturales durables. Hors des zones irriguées, l'agriculture traditionnelle en sec est pratiquée : le palmier reste très présent de même que l'olivier et quelques hectares sont utilisés pour cultiver de l'orge (Figure 44). Le travail d'actualisation cartographique a permis de rendre compte du nombre très important de parcelles agricoles qui sont, très majoritairement situées sur les espaces hauts des îles. La palmeraie de l'archipel, lorsqu'elle ne fait pas partie de parcelles privées, est peu entretenue, surtout depuis la disparition du métier de *Sawwana* (gardien de la palmeraie) dans les années 1980 (Rhouma *et al.*, 2005). Les terres agricoles sont divisées en exploitations de petites tailles qui varient de 0,2 à 0,9ha et il n'est pas rare que les terres appartiennent à une personne et les arbres à une autre, ce qui correspond au mode de faire valoir dit *Rogbia,* toujours en vigueur aujourd'hui (Rhouma *et al.*, 2005).

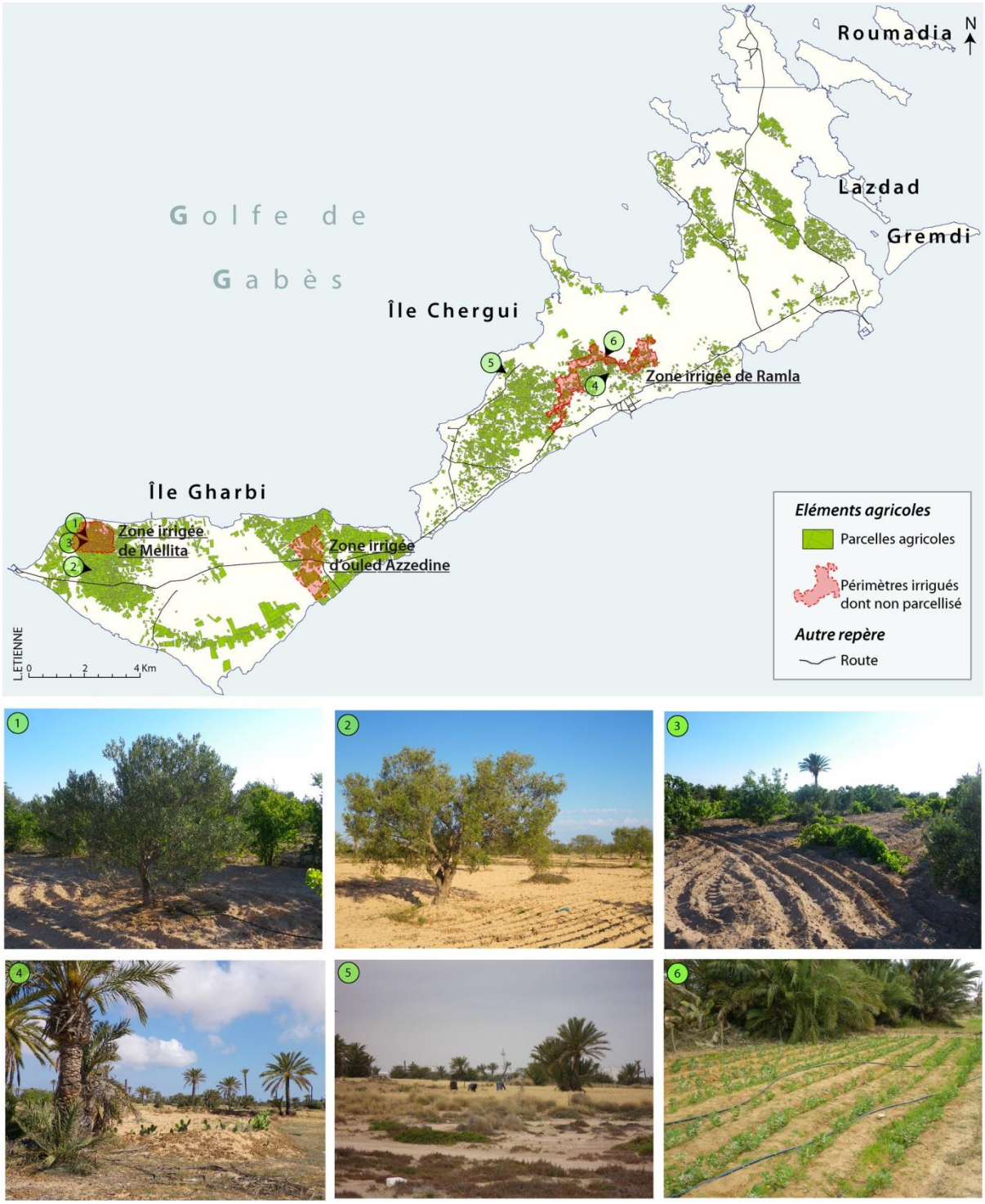



***Figure 44: Localisation des zones irriguées de Kerkennah (D'après le CRDA de Sfax, in Elyakoubi, 2011)***
*1, Olivier dans la zone irriguée de Mellita. Remarquez le petit talus au pied de l'arbre servant à retenir l'eau près du tronc (photo prise en mai 2011). 2, Olivier situé en dehors d'une zone irriguée. Remarquez qu'il n'y a plus le même aménagement autour du pied de l'arbre (photo prise en mai 2011). 3, Alternance des cultures de vignes, de figuiers et d'oliviers dans la zone irriguée de Mellita (photo prise en mai 2011). 4, Parcelle récente près de Ramla en dehors de la zone irriguée (photo prise en décembre 2010). 5, Culture traditionnelle de céréales hors des zones irriguées et gérée par des femmes (photo prise en mai 2011). 6, Petite parcelle de pois et de fèves dans la zone irriguée de Ramla (photo prise en mars 2010)*

## Conclusion du Chapitre 3

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les facteurs de vulnérabilité des îles de l'archipel de Kerkennah. Ils sont de différents ordres :

D'abord l'insularité est un facteur important de vulnérabilité. Les îles et en particulier les petites îles et les îlots tels que Kerkennah sont plus vulnérables aux changements environnementaux comme le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer que les masses continentales.

Ensuite l'archipel est d'autant plus vulnérable que ses structures géologiques sont très majoritairement fragiles et facilement érodables ce qui accentue le risque d'érosion marine, et que les îles qui le composent sont très basses. Ce contexte de fragilité géologique et la faiblesse de la topographie favorisent l'érosion littorale et l'extension des sebkhas qui représentent une grande partie de la superficie de l'archipel (environ 45%). L'archipel est donc vulnérable à la salinisation des sols et à la disparition des terres par avancée de la mer.

Enfin, les infrastructures et activités humaines constituent des enjeux qui sont menacés ce qui constitue également des facteurs aggravant la vulnérabilité.

## Conclusion de la partie 1

Cette première partie a permis de détailler l'approche qui sera utilisée au long du travail, le contexte physique régional qui influence l'archipel de Kerkennah et les caractéristiques des petites îles et îlots de l'archipel.

Ainsi, elle a permis de placer notre approche parmi celles développées par la communauté scientifique. Notre vision se veut globale et systémique c'est-à-dire que notre approche prendra en considération les aspects physiques et sociaux des questions auxquelles nous tenterons de répondre.

A l'échelle régionale, les conditions climatiques et le niveau de la mer varient : le niveau de la mer s'élève plus rapidement autour de l'archipel de Kerkennah qu'ailleurs en Tunisie, par le jeu de la subsidence principalement, tandis que le climat devient progressivement plus chaud.

L'archipel de Kerkennah, situé en Méditerranée, en Tunisie dans le golfe de Gabès, est connu pour sa vulnérabilité physique. La faiblesse de la topographie et la fragilité des couches litho-stratigraphiques sont les facteurs majeurs de cette vulnérabilité. Cette dernière est accentuée par l'insularité et la petitesse des îles de l'archipel. Enfin, des enjeux forts existent puisque les deux plus grandes îles sont habitées. Les localités sont majoritairement concentrées le long du littoral sud est de l'île de Chergui (la plus grande île) et les habitants ont développé des activités de pêche, d'agriculture, de tourisme etc… qu'il convient de maintenir et de protéger. Ainsi le système de l'archipel de Kerkennah, composé de ses éléments physiques et anthropiques, est fragile.

La combinaison d'un climat plus chaud, de l'élévation du niveau de la mer, de la fragilité physique des îles de l'archipel ainsi que la présence d'enjeux questionne quant à la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah face aux phénomènes d'extension des sebkhas et d'érosion littorale. **Pour évaluer l'évolution de la vulnérabilité depuis les années 1960**, date pour laquelle des images aériennes existent, **nous allons mesurer le recul de la côte et l'évolution de l'occupation du sol, phénomènes qui exercent une pression importante sur les sols non salés et constructibles.** Pour cela des données ont été utilisées et traitées grâce à différentes méthodes.

# Partie 2

# Données et méthodes nécessaires à la mesure de la vulnérabilité

La deuxième partie est destinée à présenter les différentes données et méthodes générales utilisées dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah. Différentes approches sont nécessaires à ce travail et des limites temporelles et spatiales s'imposent.

- **Les différentes approches**

La thèse se concentre sur les phénomènes d'érosion des côtes et d'extension des sebkhas. Ils menacent les terres des îles et donc l'intégrité même de l'archipel de Kerkennah. Il s'agit donc d'une part de quantifier l'évolution du trait de côte dont le recul provoque fondamentalement un recul des terres et une avancée de la mer et d'autre part d'évaluer les changements d'occupation du sol et en particulier l'extension des sebkhas. Pour cela nous devrons mener des études plutôt techniques de télédétection et de photo-interprétation. Cette **approche technique** basée sur des données d'imagerie permet d'obtenir des résultats inédits de quantifications ou de mesures de phénomènes en évolution. Cependant, cette approche ne suffit pas à expliquer les phénomènes que nous serons amenés à décrire dans la **Partie 3** de ce travail. Pour ce faire, d'autres

approches, plus géographiques, doivent s'ajouter à l'approche technique initiale pour former un système expliquant l'évolution de la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah. Ces approches sont d'une part **géomorphologique**, descriptive et quelque peu naturaliste avec la description précise du trait de côte, des relevés de terrain sur la côte grâce à des levés GPS (points GPS ou transects descriptifs), des relevés d'échantillons de sols etc… et d'autre part **sociale** avec la mise en place d'un questionnaire permettant d'avoir une idée de la perception de la population de l'archipel concernant la vulnérabilité et plus précisément, les phénomènes de recul de la côte et d'extension des sebkhas.

Les trois approches choisies ont toutes le même objectif de définition de la vulnérabilité dans l'archipel de Kerkennah et se combinent dans une dernière : l'**approche systémique**. Il s'agira donc, dans nos résultats, de mettre en regard les différentes données présentées au **Chapitre 4** qui sont traitées grâce à des méthodes générales dans le **Chapitre 5** puis spécifiques au début de chaque chapitre de la **Partie 3**.

- **Les limites, temporelles des données et spatiales du terrain**

L'archipel de Kerkennah est un territoire relativement petit car où que l'on se trouve sur l'archipel, la mer est toujours à moins de 5 km. Il est possible de traverser assez rapidement et il est donc appréhendable dans son ensemble. Pour cette raison, l'ensemble de l'archipel pourra être intégré dans l'étude de la vulnérabilité. Toutefois, pour des raisons techniques décrites plus tard (cf : p. 130), certains espaces de l'est de l'archipel seront exclus des études de quantifications. Du fait de sa petite taille, l'approche spatiale à l'échelle de l'archipel est souvent utilisée par d'autres auteurs quelle que soit leur approche (Louis, 1963; Ben Hamida, 2004; Rhouma *et al.*, 2005; Projet SMAP III, 2007; Fehri, 2011). Parfois ils ne se limitent pas seulement à l'archipel mais étendent leurs études au reste des côtes tunisiennes (Oueslati, 1992, 1994). Certains, plus rares se cantonnent à certains espaces de l'archipel qui nécessitent un suivi particulier (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001; Comete Engineering, 2001). Dans cette thèse, les approches techniques (recul de la côte et extension des sebkhas) sont menées à une échelle plus fine que celle de l'ensemble de l'archipel. C'est-à-dire que des zooms ont été réalisés par

exemple sur un tronçon de côte ou sur une sebkha de l'archipel, pour pouvoir obtenir des résultats précis et fiables. Les méthodes ont ensuite été généralisées à l'ensemble du trait de côte et à l'ensemble des sebkhas (les méthodes spécifiques à ces études précises sont exposées au début de chaque chapitre de la **Partie 3).**

La question de la temporalité de l'étude s'est posée très rapidement. En effet pour pouvoir quantifier une évolution il faut nécessairement opter pour une approche diachronique. 2 types d'études diachroniques ont été menés : d'abord une étude de télédétection et ensuite une étude par photo-interprétation pour lesquelles les buts étaient différents car la résolution des différentes images ne permet pas d'obtenir les mêmes résultats. La première étude diachronique a été réalisée grâce aux images satellites Landsat 5 TM (cf : p.115) qui ont permis d'obtenir des résultats quant à l'extension des sebkhas entre 1984 et 2011, c'est-à-dire que l'étude réalisée a utilisé les premières images du satellite Landsat 5 TM ainsi qu'une image récente. La seconde étude utilise d'une part les photographies aériennes datant de 1963 (cf : p.111) et d'autre part l'image SPOT 5 datant de 2010 (cf : p.113). L'objectif est de réaliser une étude diachronique sur le plus long pas de temps possible avec des images de bonne qualité afin de pouvoir obtenir des résultats beaucoup plus précis qu'avec l'approche par télédétection. D'un point de vue moins technique, les documents bibliographiques témoignant de la période antérieure aux années 1960 et traitant spécifiquement de l'archipel sont rares, en particulier en ce qui concerne les aspects sociaux. Cependant la thèse de Louis (1963), apporte des éléments importants sur la vie et les pratiques dans l'archipel à cette époque. Il y décrit en particulier les pratiques de pêche et d'agriculture. Les études de Rhouma *et al.* (2005) et de Rhouma et Labidi (2006) reprennent respectivement les principales évolutions des pratiques agricoles et de pêche mais aussi les principales avancées en terme de développement depuis les années 1940 - 1950. Les données disponibles en termes de bibliographie et d'imagerie nous ont poussés à étudier les évolutions environnementales mais aussi les pratiques anthropiques depuis la moitié du XX$^{ème}$ siècle.

# Chapitre 4.

## Présentation des données

---

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes données utilisées pour l'ensemble de la thèse. Le travail s'est opéré autour de deux types de données : cartographiques et de terrain.

Les premières permettent de rendre compte de phénomènes géographiques, spatiaux et donc cartographiables et de créer une base de données cartographiques de l'archipel puis de ses vulnérabilités. Les images utilisées sont de différents types : carte marine, carte topographique, images satellites ou photographies aériennes et toutes apportent des éléments importants pour une étude la plus complète possible de la vulnérabilité dans l'archipel de Kerkennah.

Les secondes, recueillies sur le terrain, permettent d'acquérir l'expérience de terrain et ainsi de découvrir l'archipel. En plus de la découverte d'un nouveau territoire, elles répondent à différents besoins : d'abord l'obtention de données inédites qu'elles soient d'observations ou de relevés de terrain, ensuite la confrontation, la vérification et/ou la confirmation des résultats obtenus durant le travail de bureau.

La grande majorité des études portant sur Kerkennah depuis les années 1980 ont utilisé des données de terrain. Les géologues et géomorphologues ont observé les formations de l'archipel pour améliorer la connaissance de sa structure (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1986). Leur rapprochement avec les archéologues a permis de comprendre l'évolution de la physionomie de l'archipel depuis l'Antiquité romaine, toujours par le biais d'observations de terrain (Slim *et al.*, 2004). Plusieurs études menées soit en géographie soit dans des rapports destinés à la gestion et à la protection de l'archipel ont utilisé des données

issues d'entretiens ou de questionnaires (Pergent & Kempf, 1993; Ben Salem *et al.*, 2002; Rhouma *et al.*, 2005; Rhouma & Labidi, 2006). Avec une approche plus quantitative, d'autres ont réalisé des relevés de terrain. Il s'agit d'échantillons, de carottages, de relevés GPS etc. (Brun, 1992; Morzadec-Kerfourn, 2002; Ben Omrana *et al.*, 2004; Elyakoubi, 2011; Fehri, 2011). Quelques études utilisent des cartes préexistantes ou des images satellites (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001; Elyakoubi, 2011; Fehri, 2011). Les études qui ont été menées utilisent des données plutôt qualitatives comme les observations de terrain ou les entretiens ou questionnaires réalisés auprès de la population. Les phénomènes dommageables tels que le recul de la côte ou l'extension des sebkhas ont déjà été mentionnés à maintes reprises et étudiés à l'aide de ces approches qualitatives qui ont permis de poser les bases des questionnements qui alimentent cette thèse. C'est pourquoi les données choisies dans ce travail permettent de tenter de mesurer l'évolution de certains tronçons de la côte de l'archipel et des surfaces de sebkhas et également de définir la vulnérabilité de l'archipel.

Le chapitre est organisé en deux sous-chapitres. Le premier présente les données d'imagerie et de cartographie. Le second présente les données de terrain en expliquant d'abord le déroulement des différents séjours dans l'archipel puis en détaillant les observations de terrain. Ensuite seront présentés les différents types de relevés de terrain et enfin, la présentation des questionnaires soumis à la population de l'archipel.

## 1. Données de cartographie et d'imagerie

Les données cartographiques et d'imagerie aérienne ou spatiale permettent d'étudier Kerkennah à l'échelle de l'archipel dans sa globalité, à différentes dates et à différentes résolutions. Cette approche globale permettra d'aboutir à la détermination de certains aspects de la vulnérabilité à l'échelle de l'archipel. L'objectif de ce sous-chapitre est de présenter la démarche du choix des différentes images nécessaires aux études menées dans cette thèse. Le choix des images est commandé par différents critères. Ces critères peuvent être très spécifiques à l'étude entreprise et à ses objectifs : dans ce travail, les images sont de qualités diverses mais doivent toutes apporter des informations importantes et inédites quant à la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah. Certaines images seront également comparables entre elles afin de mener des études diachroniques et d'évaluer l'évolution de l'occupation du sol mais aussi du trait de côte ou des sebkhas. Enfin, nous souhaitons travailler à l'échelle de l'archipel donc les images devront, si possible, couvrir l'archipel dans son ensemble. A ces caractéristiques techniques, s'ajoutent des impératifs pratiques que sont la disponibilité des images qui doivent pouvoir être obtenues le plus rapidement possible avec un coût moindre.

### 1.1. Carte SHOM (Service Hydrographique de la Marine)

La compréhension de la physionomie des fonds marins est nécessaire pour comprendre les phénomènes de circulation des eaux et donc de dérive littorale et de déplacement des sédiments le long des côtes mais également des phénomènes érosifs ou d'accrétions. Ainsi, le milieu marin autour de l'archipel de Kerkennah semble bien compris c'est pourquoi notre étude se penchera plutôt sur l'archipel en lui-même. La carte bathymétrique *« Du Ras Kapudia au Ras Ungha ; îles et bancs Kerkennah »* n°4235 du SHOM français datant de 1952 permet d'avoir une vue détaillée des fonds marins entourant l'archipel. D'échelle relativement petite (1 : 152300$^{ème}$), elle couvre l'ensemble des côtes de l'archipel et la côte continentale de la Sheba, au nord, à Maharès, au sud. Elle permet ainsi d'avoir une vue d'ensemble des fonds marins autour de l'archipel et en particulier de rendre compte de la nature des hauts fonds qui l'entourent et qui canalisent les courants de marée dans des chenaux de marée (Oueslati, 1986). Elle est utilisée pour présenter les caractéristiques marines autour de l'archipel (cf. : p.

80) et pour discuter des résultats de l'évolution du trait de côte dans la **Partie 3**. Cependant, la carte est assez ancienne puisqu'elle date de 1952 et les levés qui ont permis de la réaliser datent de 1884 pour les plus anciens. Les reliefs sous-marins ont donc potentiellement évolué même si les plus importants sont toujours présents. En effet, certaines formes sous-marines sont très visibles sur les images récentes de Google Earth et concordent avec celles de la carte marine (Figure 45).

***Figure 45: Correspondance entre les images récentes Google Earth (A) et les levés de 1884 (Carte SHOM 4235) (B) dans les environs du littoral d'El Abassia et de l'île de Gremdi***

### 1.2. Carte topographique

La carte topographique de 1973 au 1 : 25000ème, disponible à l'université de Sfax, est centrée sur la région située entre Sfax et les îles Kerkennah. Elle a été dessinée à partir des photographies aériennes de 1963 et de relevés de terrain de 1973. La partie contenant l'archipel de Kerkennah a été scannée grâce à un scanner A3 avec une résolution de 400 dpi. Elle a ensuite été géoréférencée grâce aux informations présentes sur la carte en Lambert Nord – Tunisie Carthage qui a été traduit ensuite en UTM WGS 84 zone 32 nord. Cette transformation était nécessaire pour l'intégration de cette carte dans le SIG contenant les autres données cartographiques qui ont toutes été géoréférencées selon le même mode que l'image SPOT 5 qui sera décrite plus loin (cf. : p. 113). Cette carte fournit des informations très complètes de toponymie et de description de l'archipel comme les noms de l'ensemble des localités, des sebkhas, des lieux-dits mais aussi des informations sur l'occupation du sol, des données altitudinales et des types de côtes.

D'après nos observations, en particulier pour les données côtières, les types de côtes indiqués sur la carte correspondent bien à ce qui est observé actuellement (notons toutefois que nous comparons ici une carte vieille de 40 ans avec la situation actuelle). Ces informations, qualitatives, sont donc mises en valeurs dans le SIG. Cependant, trois critiques peuvent être émises quant à cette carte. La première est que, suite à la confrontation de la carte avec les photographies aériennes de 1963 (cf. p. 110), une erreur de dessin pouvant atteindre plusieurs mètres a été repérée. Ces erreurs sont particulièrement visibles sur les côtes de l'archipel (Figure 46 - A, B, C, D et E). De fait, cette carte n'a pu être utilisée pour définir précisément la position du trait de côte en 1963, les bordures de sebkhas ou l'emplacement précis des bâtiments, des routes etc. Cette carte topographique a toutefois été utilisée pour expliquer et quantifier le phénomène d'extension des sebkhas Alif Ennkhal et des salines dans la sebkha El Abbasia (Fehri, 2011).

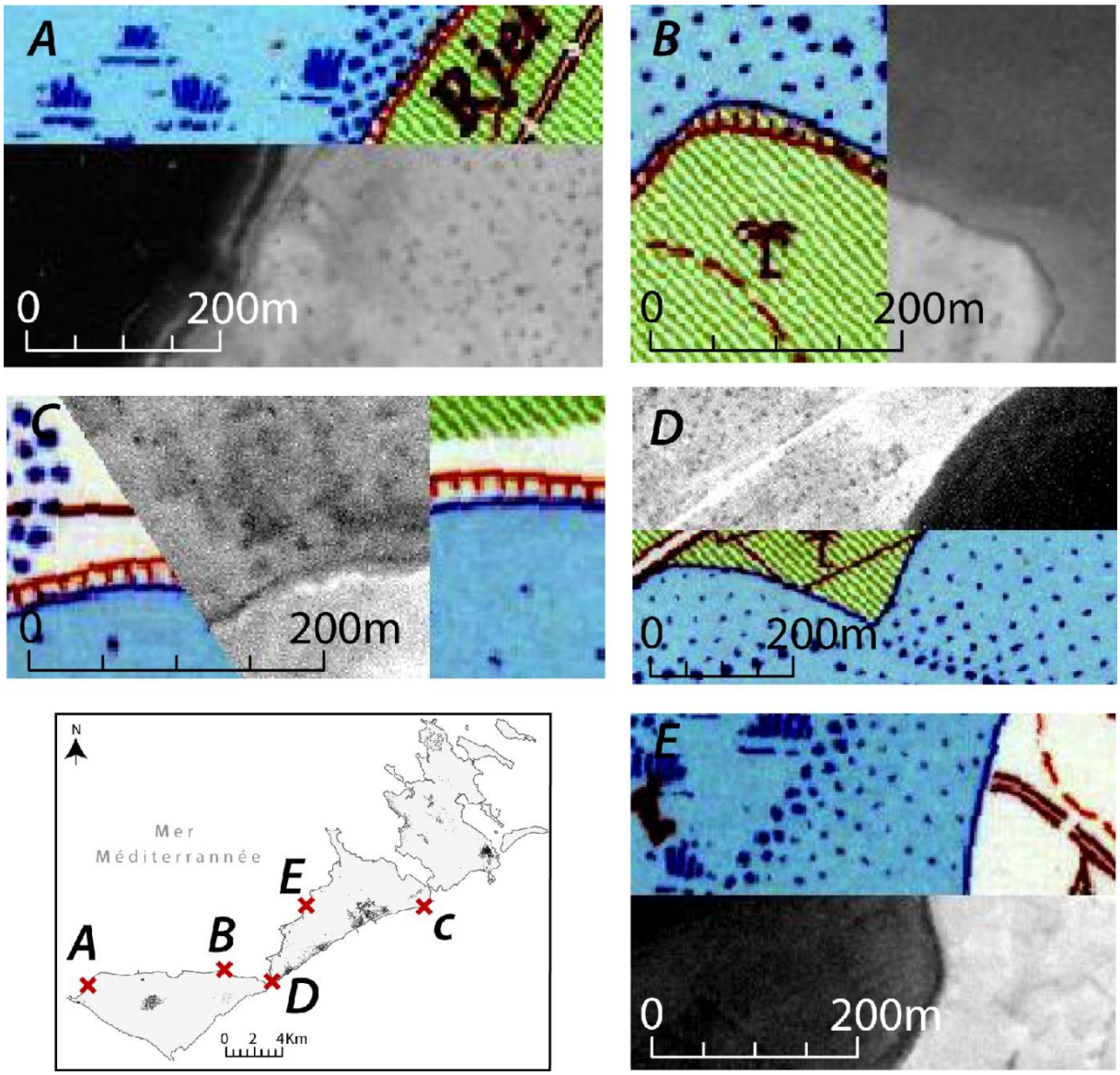



***Figure 46: Exemples d'erreurs de dessin de la carte topographique de 1973 par rapport aux photographies aériennes calées de 1963 ; carte topographique en couleur, photographies aériennes en noir et blanc***

La deuxième critique concerne certaines données topographiques. Les valeurs altitudinales de l'archipel s'échelonnent, d'après cette carte, entre 0 m et 13,5 m. Or, d'après nos observations, certains espaces, dans les zones de sebkhas, sont situés sous le niveau de la mer. Ces données ne sont pas lisibles sur la carte. De plus, l'espacement de 2,5 m entre chaque isohypse est assez grossier, surtout sur des îles où l'altitude maximale dépasse à peine 13 mètres. La troisième et dernière critique concerne la représentation des limites des différents types d'espaces représentés comme par exemple la limite des sebkhas, le trait de côte ou encore les bordures des parcelles agricoles. La méthodologie employée pour tracer ces différentes limites n'est pas présentée sur la carte. Il n'est donc pas possible de les définir une

nouvelle fois sur d'autres images pour une étude diachronique. De ce fait, l'utilisation de ces limites nous paraît compliquée.

Finalement la carte topographique de 1973 donne des informations importantes quant aux altitudes, à la toponymie et aux types de côtes mais n'est pas suffisante pour mener une étude diachronique ou pour mesurer / quantifier la vulnérabilité de l'archipel. Les erreurs de dessins relevées sur la carte ainsi que le caractère non reproductible du dessin nous ont poussés à chercher d'autres sources pour :

- Quantifier l'évolution de la côte qui nécessite une très bonne résolution d'image
- Quantifier l'évolution de la surface des sebkhas. Pour cela nous avions besoin de connaître précisément leurs bordures, leur limite.
- Evaluer l'extension urbaine. En effet, sur la carte, les bâtiments ne sont pas toujours individualisés mais souvent groupés.
- Tracer les zones agricoles ; après comparaison de la carte avec les photographies aériennes de 1963, il est apparu que les parcelles tracées sur la carte étaient parfois des groupements de parcelles sur le terrain.

### 1.3. Photographies aériennes

Les photographies aériennes de 1963 ayant permis la réalisation de la topographie précédemment présentée, sont utilisées comme source de donnée la plus ancienne et couvrant l'ensemble de l'archipel de Kerkennah. Elles permettent, après leur géoréférencement (cf : p.130), d'obtenir une vue globale, ancienne et de bonne qualité de l'archipel.

Le jeu de 59 photographies aériennes, verticales, en noir et blanc, à une résolution de 1/25000$^{ème}$, date de 1963. Elles couvrent l'ensemble de l'archipel de Kerkennah et sont prises verticalement. Elles sont disponibles à l'Office de la Topographie et de la Cartographie (OTC) de Tunisie, à Tunis. La Figure 47 présente l'exemple de la zone des salines de l'archipel. Après leur acquisition, les 59 photographies aériennes ont été scannées une par une à 600 dpi puis intégrées au SIG.

La prise de vue verticale des photographies et le chevauchement de 60% longitudinalement et de 30% latéralement permet une couverture optimale de la zone d'étude.

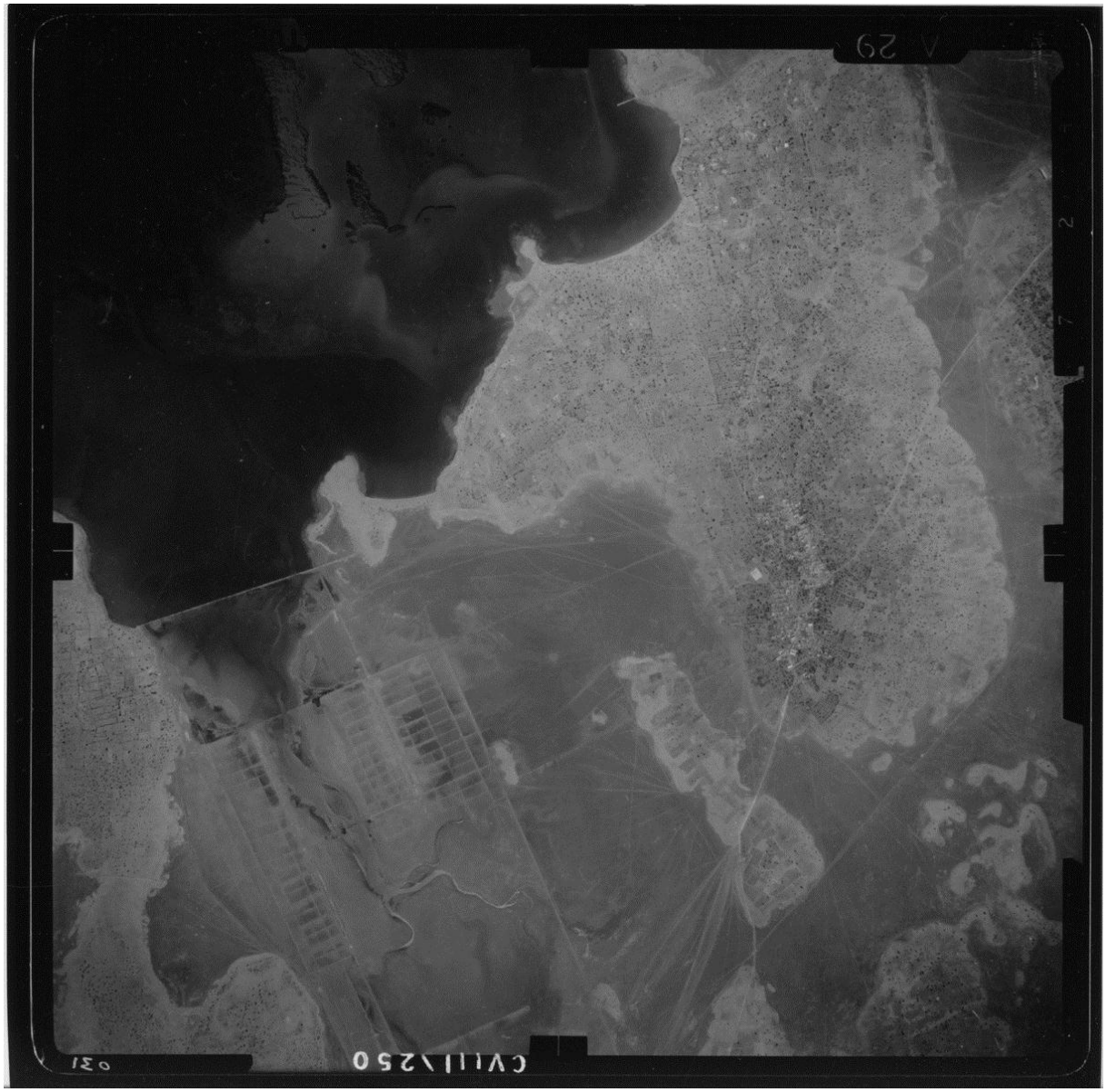



***Figure 47: Photographie aérienne scannée de 1963 avant traitements : Exemple de la zone entourant les salines de l'archipel***

En effet, les chevauchements permettent d'avoir une vue stéréoscopique et de corriger les distorsions. Les photographies aériennes de l'archipel ont été prises un jour de beau temps car elles sont très majoritairement exemptes de nuages ce qui rend accessible l'étude de l'archipel dans son ensemble. Cependant, le reflet du soleil sur la mer et sur les surfaces très claires des îles provoque parfois des différences de luminosité entre images et au sein d'une même image.

Ces photographies aériennes vont permettre d'avoir une vue de l'archipel de l'année 1963 c'est-à-dire une vue relativement ancienne et révolue, pour laquelle le terrain est par définition inaccessible. Elles sont les seules images brutes, non traitées et disponibles datant de cette époque et fournissant une vue de l'ensemble de l'archipel. Grâce à ces images, l'évaluation de l'évolution des conditions environnementales et de l'occupation humaine des années 1960 devient possible ainsi que la comparaison avec une époque plus récente et donc une étude diachronique montrant l'évolution de l'occupation du sol et des vulnérabilités.

### 1.4. Image satellite SPOT 5

L'étude diachronique qui doit permettre d'évaluer l'évolution des zones vulnérables de l'archipel nécessite une image récente et de qualité comparable à celle des photographies aériennes précédemment présentées (cf : p. 110). Des images satellites récentes, issues du satellite SPOT 5[3], de haute qualité, sont distribuées par le CNES via leur site *http://www.isis-cnes.fr/* qui propose un grand nombre d'images de haute résolution à la vente. Le CNES livre les images choisies géoréférencées et ortho-rectifiées (UTM WGS zone 32 nord). La meilleure résolution proposée est de 2,5 m et l'image est fournie en mode panchromatique (Figure 48). L'obtention de cette image panchromatique nommée « Tunisie_100620_T_068_280 SPOTView » prise le 20 juin 2010, journée dont le temps fut clair et sans nuage, a été achetée par le Pôle image de l'Université Paris 7. Les prétraitements de niveau 3 sont déterminés comme suit par SPOT Image :

> *Aussi appelé "orthoimage", le produit de niveau Ortho corrige les erreurs résiduelles de parallaxe dues au relief, grâce à l'utilisation d'un modèle numérique d'élévation. Les corrections géométriques, appelées "orthorectifications", se basent sur un modèle de ré- échantillonnage qui tient compte des distorsions dues aux conditions de prise de vue ainsi que des transformations nécessaires pour transposer l'image dans la projection cartographique requise. Elles se basent sur une modélisation de la dynamique de vol du satellite ainsi que des informations géographiques ou cartographiques constituées par des points d'appui et un modèle numérique d'élévation (MNE). (http://www.isis-cnes.fr/)*

Aucun prétraitement n'est donc à réaliser. Elle est fournie en GeoTIFF ce qui permet son exploitation directe dans les logiciels SIG pour la création de cartes et la superposition avec d'autres couches d'informations. Cette image permet d'avoir une vue de l'ensemble de

[3] Le satellite SPOT a été envoyé à une altitude de 822 km en 2002, à l'inclinaison de 98,7° et suit une orbite polaire héliosynchrone (Centre Canadien de Télédétection).

l'archipel avec une très bonne résolution et donc, comme pour les photographies aériennes, d'avoir un cliché qui permettra, après traitement, de connaître les états de surface de l'archipel en 2010. Afin de rendre comparable les deux images, la résolution a primé sur la couleur. En effet, d'une part il était impossible d'acquérir une image de haute résolution en couleur (résolution minimale pour une image couleur de 5 m) et d'autre part les résultats des méthodes d'extraction des données de l'image de 2010 seront confrontés à ceux des photographies aériennes de 1963 qui sont, elles-mêmes, à une résolution équivalente à 1/25000$^{ème}$.

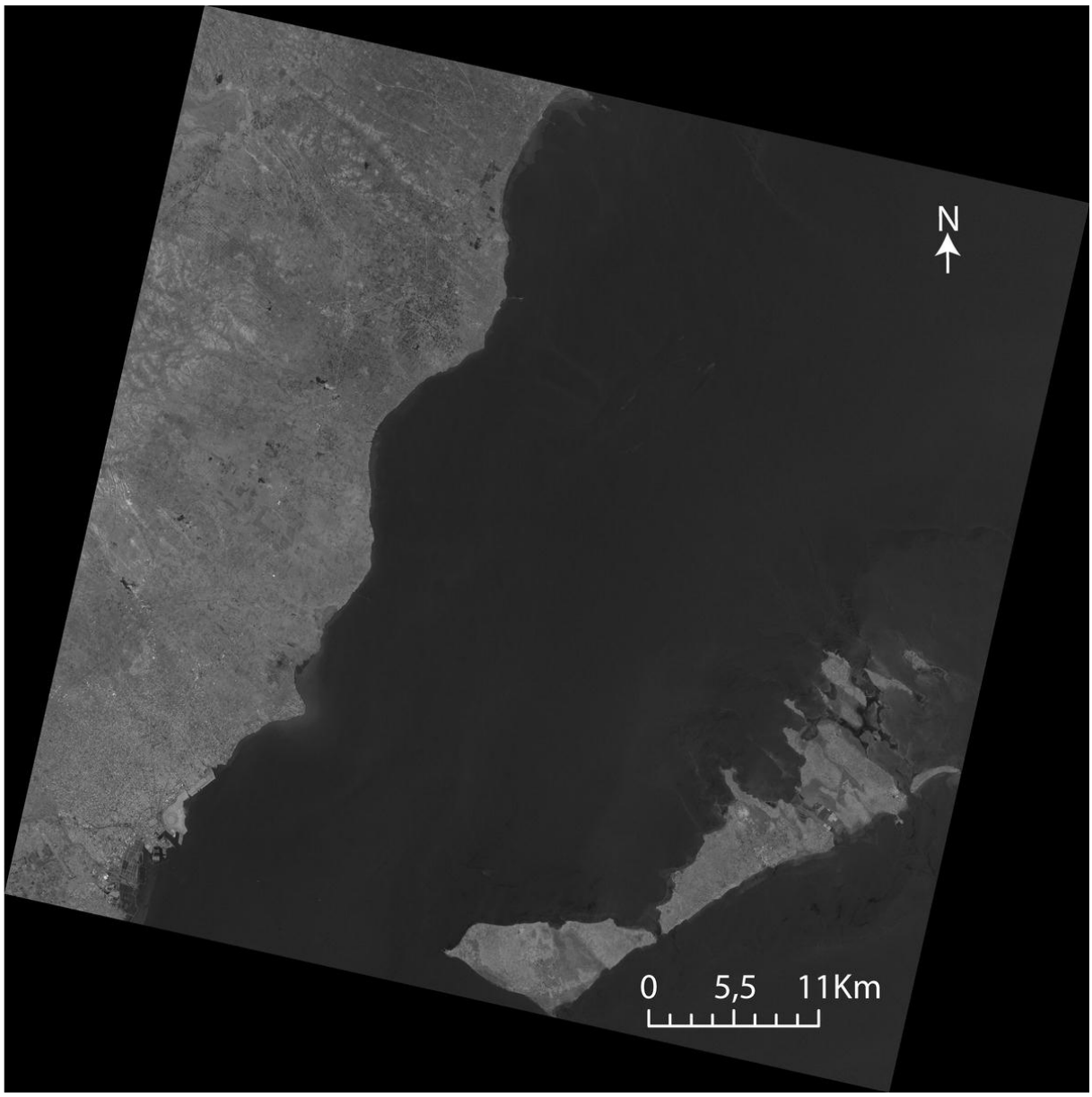



***Figure 48: Scène complète de l'image SPOT 5 « Tunisie_100620_T_068_280 SPOTView »***

### 1.5. Images satellite Landsat 5 TM

L'approche par la télédétection, entamée durant le M2 et largement améliorée durant la thèse a été choisie car elle permet de mettre en lumière des phénomènes indiscernables par la photo-interprétation en utilisant des informations issues du rayonnement électromagnétique de la Terre. Ainsi, il devient possible de connaître les états de surface d'un milieu à une date donnée.

Deux images satellites Landsat[4] 5 TM de 30x30 m de résolution (disponibles via Glovis ; http://glovis.usgs.gov/) ont été obtenues (Figure 50). La première date du 18 juin 1984 (à 9h17 GMT ; élévation solaire : 62,06), la seconde date du 29 juin 2011 (à 9h38 GMT ; élévation solaire : 65,6). Le choix des images s'est porté spécifiquement sur des images issues du satellite Landat 5 TM, d'une part afin que leurs caractéristiques soient similaires et d'autre part car ce satellite est en service depuis le 1er mars 1984 ce qui est assez ancien pour voir des évolutions environnementales. Afin de comprendre les traitements de télédétection qui seront effectués sur ces images, il convient de comprendre comment elles sont créées et conçues. Le processus d'acquisition des images satellite passe par 5 étapes (Centre Canadien de Télédétection). La première est le rayonnement source qui correspond à l'émission d'énergie par le soleil. L'énergie envoyée sur Terre permet d'illuminer la surface. Ce rayonnement est constitué d'ondes électromagnétiques dont la longueur varie. Les longueurs d'ondes (LO) étudiées ici se situent dans un intervalle compris entre les ultra-violets de courte LO et les infra-rouges de longues LO et contenant l'ensemble du spectre du visible (Figure 49). Entre le départ de l'énergie et son arrivée à la surface de la Terre et lors de son renvoi vers le satellite capteur, elle traverse l'atmosphère et interagit avec elle, ce qui constitue la seconde étape. La composition de l'atmosphère a une influence sur l'information qui parvient au capteur. Au-dessus de l'archipel, les informations peuvent surtout être perturbées par la vapeur d'eau lors des journées chaudes durant lesquelles le vent vient de l'est ou par les apports massifs de particules plus ou moins fines transportées par le vent lors des épisodes de Sirocco. La troisième étape est l'interaction entre le rayonnement source et les différents éléments présents à la surface de la terre. Ces éléments vont renvoyer une part de l'énergie source vers l'atmosphère où elle sera captée par un appareil de mesure : il s'agit de l'étape 4. L'énergie renvoyée dépend des caractéristiques physiques de l'objet (clair, sombre, rugueux, lisse etc.). La 5ème étape consiste en la réception des informations par le satellite et

[4] Le satellite Landsat est placé à 705 km de la terre avec l'inclinaison de 98,2° et suit une orbite héliosynchrone (Centre Canadien de Télédétection)

en des traitements sur l'image. Lors de la réception du rayonnement électromagnétique par les capteurs, celui-ci est divisé en bandes spectrales qui permettent l'étude de longueurs d'ondes spécifiques (Figure 49). Le capteur Landsat 5 TM est capable de capter 7 bandes spectrales pour un même pixel dont la résolution spatiale est de 30m, sauf pour la bande 6 pour laquelle la résolution est de 120m. Les fichiers Landsat sont donc constitués de 7 images représentant chacune un canal (ou bande) spectrométrique (Figure 49).

Les 3 premières bandes sont situées dans le visible (Centre Canadien de Télédétection). La bande 1 (de 0,45 - 0,52 µm) représente le bleu et permet la différenciation entre sol nu et végétation ainsi que les zones côtières. La deuxième, le vert (0,52 - 0,60 µm), permet d'apprécier la répartition de la végétation verte. La troisième bande, le rouge (0,63 à 0,69 µm), permet la différenciation entre végétaux sans ou avec feuilles. Les autres bandes se situent dans l'infra-rouge (IR) soit réfléchi (bande 4, 5 et 7) soit émis par la surface terrestre comme c'est le cas de la bande 6 (Centre Canadien de Télédétection). La bande 4 (0,76 - 0,90 µm) est située dans le proche IR et permet d'apprécier la biomasse, les types de plantes présentes sur le milieu et leur santé. Elle permet aussi de déterminer la présence d'humidité dans le sol. Les bandes 5 (1,55 - 1,75 µm) et 7 (2,08 - 2,35) sont situées dans le moyen IR et permettent d'apprécier respectivement la quantité d'eau présente dans le milieu (sol et plantes) et la lithologie ainsi que la présence d'eau dans la végétation. La bande 6 (10,4 - 12,5 µm) est située dans l'IR lointain et donne une information thermique (Figure 49). Dans notre étude l'ensemble des bandes a été utilisé.

Trois des bandes spectrales peuvent être associées pour obtenir une image en couleur de la zone étudiée. Sur la Figure 50, les bandes 2, 3 et 4 sont respectivement associées aux couleurs bleu, vert et rouge. Cette composition colorée, dite standard, permet d'avoir une vue en fausse couleur de l'archipel. Les zones les plus rouges représentent les zones les plus densément végétalisées qui correspondent aux marais maritimes bien visibles dans la partie est de l'île de Chergui, et à leur végétation halophile couvrante ou, au sud-est de l'archipel en 2011 (Figure 50 - B) de la végétation marine de type posidonie. En 2011, des espaces rosés, au nord de l'île de Ghrabi et autour de Ramla correspondent aux zones irriguées qui sont, à cette époque de l'année, les espaces où la végétation arborée est la plus verte. Les zones les plus bleues ou foncées correspondent aux zones en eau ou zones humides comme bien évidement la mer ou les sebkhas de l'archipel qui apparaissent en gris bleuté et les salines, uniquement visibles en 2011.

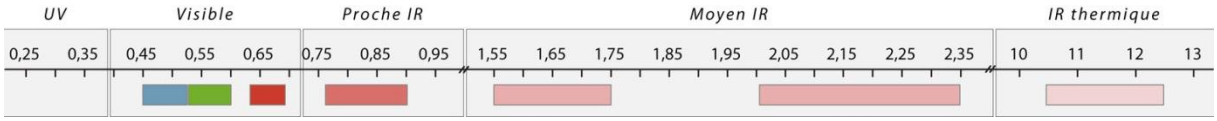



***Figure 49: Répartition des bandes spectrales des images Landsat 5 TM sur le spectre lumineux (unité : µm)***

Les espaces les plus blancs correspondent à des terrains très clairs, secs et dénués de végétation, ils renvoient donc le signal lumineux et correspondent aux sols nus et secs ou aux habitations généralement de couleur blanches.

Les images utilisées dans ce travail ont subi, avant leur mise en ligne, des corrections radiométriques et géométriques de niveau L1T dont la définition est la suivante :

> *« Le niveau de prétraitement des données 1T (L1T) fournit une précision radiométrique et géométrique systématique en intégrant des points de contrôle au sol en utilisant un modèle numérique d'élévation (MNE) pour une bonne précision topographique. La précision géodésique du produit dépend de la précision des points de contrôle au sol et la résolution de la DEM utilisé. » (http://landsat.usgs.gov/descriptions_for_the_levels_of_processing.php).*

L'accessibilité facile et rapide des images a également été prise en compte. Gratuites et disponibles en ligne à un grand nombre de dates, elles sont fournies géoréférencées en format TIFF. Leur choix dépendait également des conditions climatiques du jour et du mois précédant la prise de vue. Ces dernières étaient similaires aux deux dates de prises de vues et caractérisées par un temps anticyclonique (1015 hPa aux deux dates), avec une couverture nuageuse nulle et des températures maximales de 27°C (www.wetterezentral.de et Institut National de la Météorologie), une bonne visibilité (10 km), une humidité relative faible (entre 59 et 61% en 1984 et 2011 respectivement) au moment de la prise de vue et un vent de 6 m/s et 4 m/s ce qui correspond très certainement à une situation de brise littorale. Les mois de mai et juin 1984 et 2011 ont été particulièrement secs puisque seulement 4,9 mm sont tombés en mai 1984 (le 10 du mois) à Sfax tandis qu'aucune précipitation n'est tombée à la station de Sfax durant cette période en 2011. Nous avons opté pour des images prises durant la saison estivale, après une longue période de sécheresse, pour échapper aux confusions que prêtent la végétation spontanée et les cultures en sec aux cultures irriguées. Les dates de prises de vues sont suffisamment éloignées pour laisser voir les évolutions des modes d'occupation du sol dans l'archipel malgré la faible résolution des images (en revanche, les études d'évolution de la côte sont impossibles).

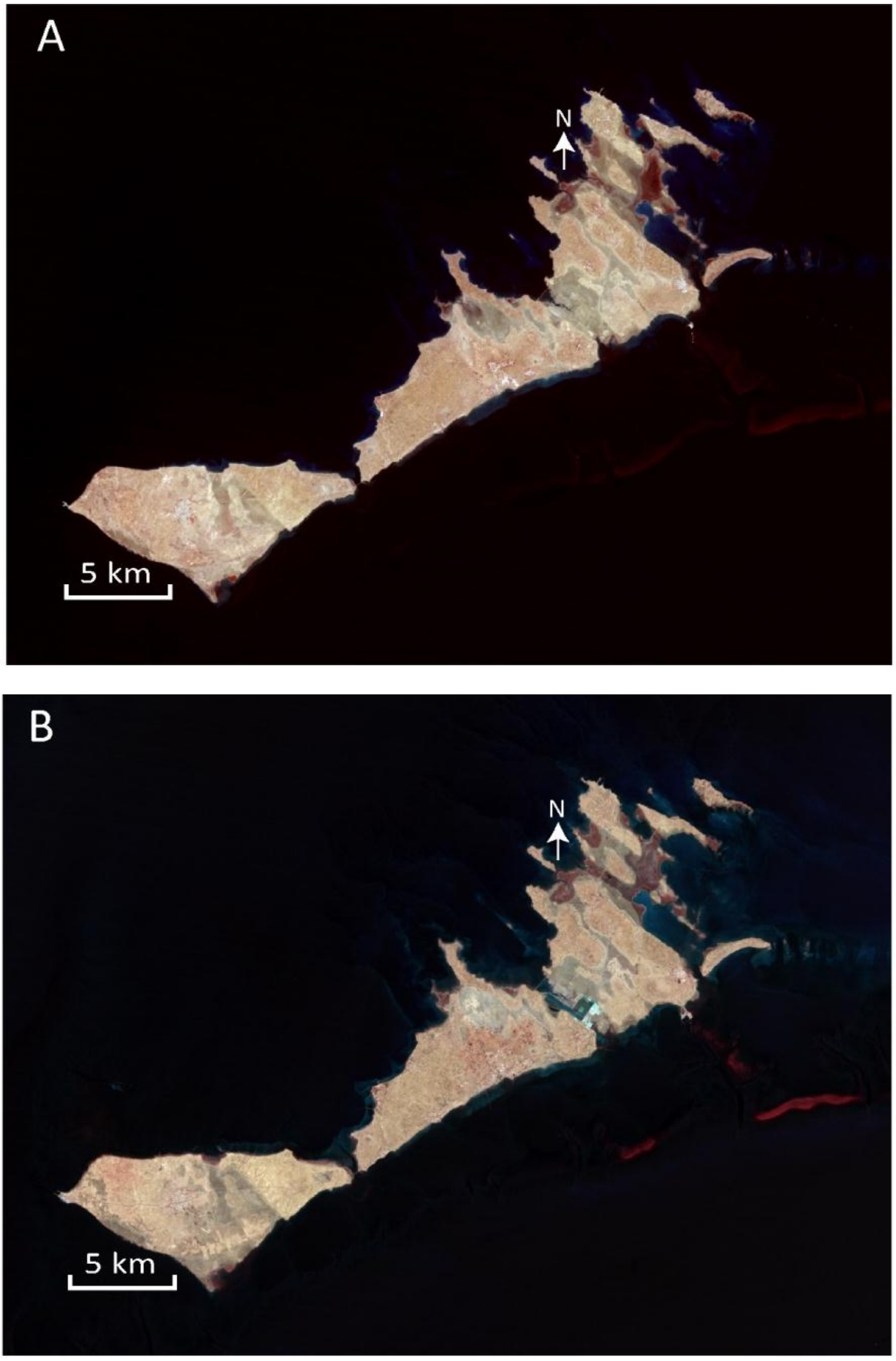



***Figure 50: Compositions colorées standard (Canal 2 en bleu,3 en vert et 4 en rouge) des images Landsat 5 TM du 18 juin 1984 (A) et du 29 juin 2011 (B)***

Les différentes cartes et images utilisées permettent d'obtenir différents types de données, certaines données en seront directement tirées comme sur la carte SHOM et sur la carte topographique (Tableau 7) quand d'autres devront d'abord subir des traitements avant de pouvoir être utilisées dans des études précises de photo-interprétation ou de télédétection comme les photographies aériennes, l'image SPOT 5 et les images satellites Landsat 5 TM (Tableau 7).

***Tableau 7: Récapitulatif des caractéristiques des cartes et images utilisées***

| Images/cartes | | SHOM | Carte topographique | Photographies aériennes | Image Spot 5 | Images Landsat 5TM | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Caractéristiques | Année | 1952 | 1973 | 1963 | 2010 | 1984 | 2011 |
| | Résolution/échelle | 1 :152300 | 1 : 25000 | 1 :25000 | 2,5m | 30m | |
| Exploitation | Qualitatif | X | X | | | | |
| | Mesure d'évolution du trait de côte | | | X | X | | |
| | Mesure d'évolution de l'occupation du sol et des surfaces de sebkhas | | | X | X | X | |

## 2. Données de terrain

Le travail de terrain est primordial car il permet d'appréhender le territoire (pensé, réfléchi et étudié) directement ou plutôt de l'intérieur. Il permet d'acquérir des connaissances factuelles (voir soi-même, apprendre par le geste), de produire de l'information et de mettre en pratique des connaissances reçues (lors de lectures bibliographiques, en cours, formations, colloques, congrès etc.).

Les travaux de terrain sur l'archipel de Kerkennah sont nombreux, variés et la somme des approches (géomorphologique, archéologique, biologique, d'aménagement et de protection de l'environnement et des activités économiques) aboutit à un panel complet des types d'études qui peuvent être menées sur le terrain (cf : p.105).

Les résultats des études de relevés de terrain sur l'archipel de Kerkennah sont, pour la très large majorité, spatialisés. Ces relevés de terrain diffèrent selon les approches. Des coupes géologiques ou des descriptions de formations ont été réalisées dans une approche géomorphologique comme l'a fait en particulier Oueslati (1986). Le repérage précis des

vestiges archéologiques ainsi que leur description a permis de comprendre leur répartition spatiale ainsi que leur degré d'érosion et l'évolution du paysage depuis l'Antiquité. Ces études ont principalement été réalisées par Paskoff *et al.* (1991); Slim *et al.* (2004). Des relevés piézométriques ou d'échantillons de sol par des carottages avec pour objectif la mise en place des zones irriguées dans l'archipel et la qualification des sols ont été réalisés par le Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Sfax. Des études scientifiques ont également utilisé des données de carottage souvent en milieu marin dans le but de décrire la mise en place des sebkhas du golfe de Gabès (Morzadec-Kerfourn, 2002), l'évolution des paysages depuis 20 000 ans (Brun, 1992) et enfin, plus actuel, de décrire précisément la sédimentologie et la morphologie d'une partie de l'archipel (Ben Omrana *et al.*, 2004).

Enfin, 4 études comportant des enquêtes sociologiques ont été menées dans l'archipel traitant, pour trois d'entre elles, de la pêche (Pergent & Kempf, 1993; Ben Salem *et al.*, 2002; Rhouma & Labidi, 2006) ; la dernière portant sur les palmiers et les activités associées dans l'archipel de Kerkennah (Rhouma *et al.*, 2005). Les 3 études sur la pêche récoltent des données de manière différente. L'étude de Pergent et Kempf (1993) porte sur l'activité de pêche en Tunisie et traite des résultats d'entretiens avec les partenaires de l'environnement marin. Ben Salem *et al.* (2002) ont récolté 149 questionnaires auprès des pêcheurs sur l'ensemble des côtes de Tunisie y compris à Kerkennah. Les données récoltées portent sur l'activité de pêche d'un point de vue économique (nombre de bateaux, capacité de pêche, nombre d'employés etc.). Enfin, Rhouma et Labidi (2006) ont organisé 6 réunions de discussion avec les pêcheurs afin d'avoir une vue d'ensemble des activités de pêche dans l'archipel, de cerner les problèmes liés à cette activité et enfin de proposer des solutions. La dernière étude ayant utilisé une approche sociologique porte sur la diversité génétique du palmier dattier dans l'archipel. Rhouma *et al.* (2005), comme dans son étude de 2006 d'ailleurs, utilise la Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP) qui est basée sur les connaissances des populations locales sur la base de réunions, questionnaires, entretiens etc. Elle permet l'acquisition rapide d'informations précises sur les connaissances locales fournies par la population elle-même.

Cinq séjours de plusieurs semaines chacun entre mars 2010 et novembre 2012 ont permis de récolter plusieurs types de données : Les repérages GPS et photographiques ont pour but de créer une base de données ou un inventaire spatial de l'archipel, les relevés de salinité et les transects sur la côte furent réalisés et enfin des questionnaires ont été soumis

afin de recueillir la perception des phénomènes naturels par la population de l'archipel et en particulier le recul de la côte et l'extension des sebkhas. Lors de ces séjours sur les îles, j'ai été accompagnée durant quelques jours par mes encadrants de thèse (les Pr. A. Daoud et G. Beltrando), par un ou deux enseignants-chercheurs de l'université de Sfax (les Dr. R. Bouaziz et S. Dahech) et des étudiants de Licence et de Master de l'université de Sfax.

### 2.1. Photographies et relevés GPS

Au cours des différents séjours sur les îles de Kerkennah, près de 1500 photographies ont été prises, toutes étant localisées grâce à un point GPS. Deux GPS ont été utilisés. Le premier, un GPS Garmin®, GPSmap® 62st à une précision de ± 3 mètres au minimum, le second, un GPS Trimble® GeoXT™ 2005 series Pocket PC à une résolution beaucoup plus fine, à ± 50 cm. Le GPS Trimble® GeoXT™ 2005 series Pocket PC a été utilisé lorsque des points ou des lignes précises devaient être repérés sur le terrain. Ainsi, plusieurs types de données ont été relevées sur le terrain : Des polygones entourant des zones caractéristiques des différents types d'occupation du sol (terrain nu, sebkhas, sebkhas végétalisées, zones habitées…) qui servent pour classer les pixels des images satellites Landsat 5 TM et ainsi, réaliser l'occupation du sol dans l'archipel par la technique de classification dirigée (Figure 51). La réalisation de transects sur la ligne de côte (avec relevés GPS et photographies) a permis la caractérisation des différents types de côtes de l'archipel (Figure 51). Des relevés du taux de salinité ont également été effectués le long de deux transects grâce à l'aide de 3 étudiants de L3 de l'université de Sfax (Figure 52). Des relevés GPS de très bonne résolution (GPS Trimble® GeoXT™ 2005 series Pocket PC) ont permis de relever la ligne de côte sur certaines portions de l'archipel et nous avons pu tracer la bordure de la sebkha Alif Ennkhal en utilisant comme bordure, la limite marquée par l'Alpha (Figure 51).

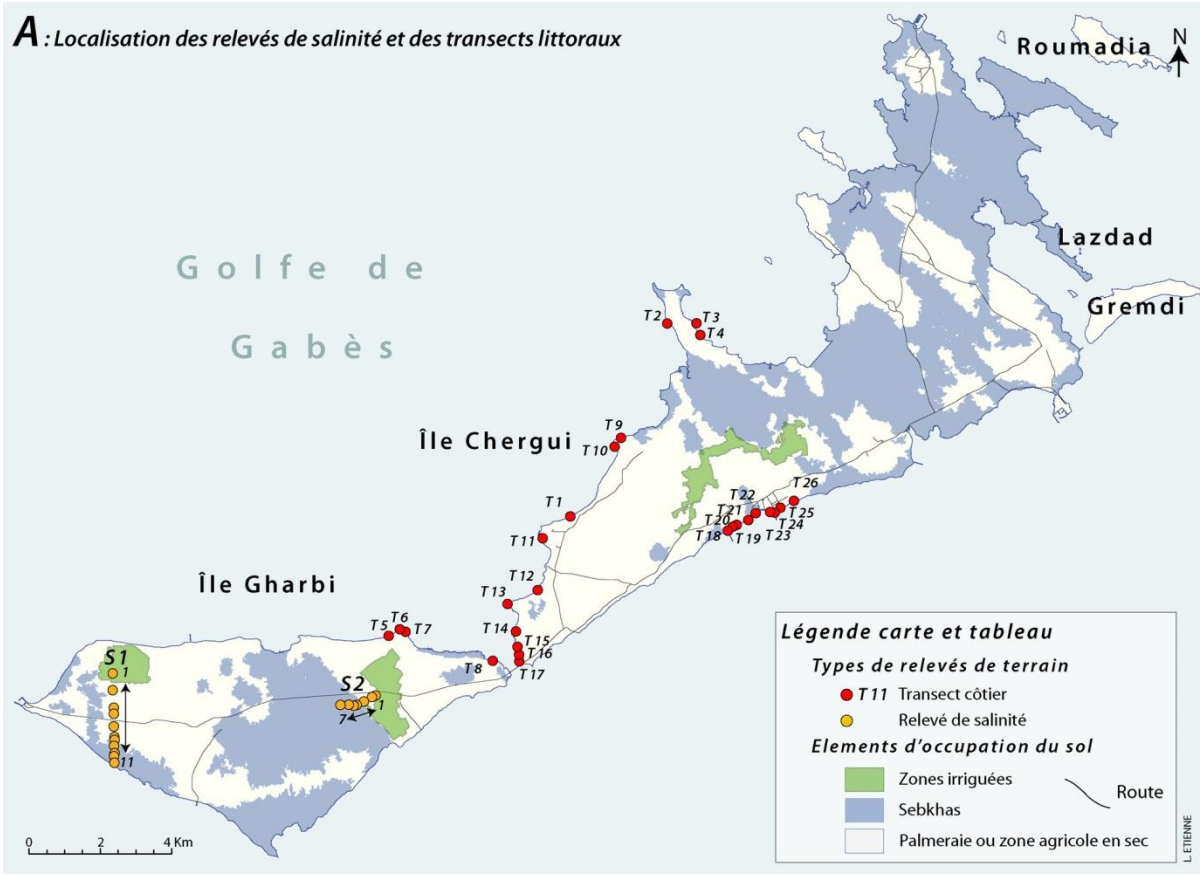
***Figure 51: Exemples types de repérages de terrain effectués entre 2010 et 2012***

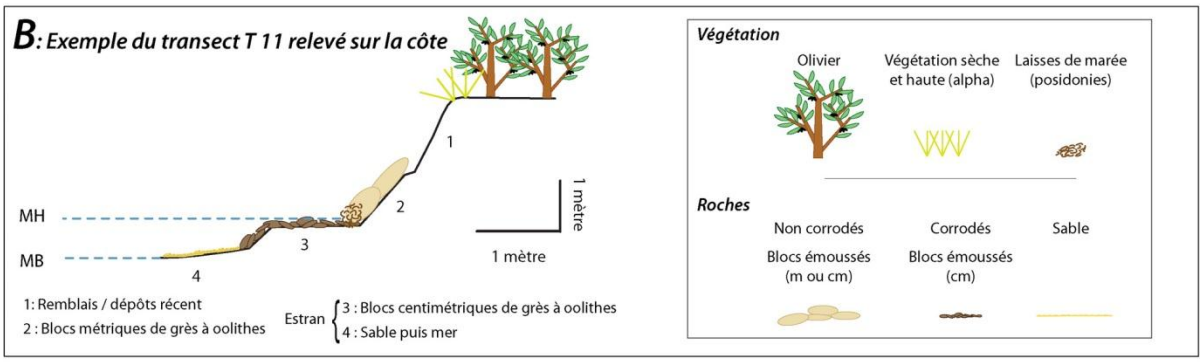
*1, 2, 4 et 5 : Exemples de points d'Amer. 1. Port de Sidi Fonkhal (photo prise en mai 2011) ; 2. Borj el Jazira (photo prise en mai 2012) ; 4. Croisement de route à Ouled Yaneg (photo prise en mai 2011) ; 5. Borj en H'sar (photo prise en mars 2010) ; 3. Relevé GPS du haut de la falaise de Jorf (photo prise en mai 2012) ; 6. Polygone relevé sur le terrain pour la classification dirigée sur les images Landsat 5 TM, ici le polygone servira pour définir le bâti (photo prise en mai 2012).*

### 2.2. Mesures de salinité du sol et transects descriptifs

Deux types de relevés de terrain ont été effectués. D'une part des relevés de salinité et d'autre part, des relevés géomorphologiques sur la côte.

Les relevés d'échantillons réalisés dans le but d'obtenir des valeurs de salinité permettent d'obtenir, le long de transects, des gradients de salinité. L'objectif de ces relevés est de vérifier si la salinité varie en fonction de différents critères comme l'altitude, la physionomie de la végétation ou l'occupation du sol (zone irriguée ou non) et de qualifier cette variation ainsi que la salinité des différents espaces. Des études plus pointues mais cantonnées aux zones irriguées ont été conduites par le CRDA de Sfax lors de leur mise en place en 1995 et indique d'ailleurs que certains sols sont relativement salés dans les zones prévues pour l'irrigation. Les relevés de notre étude ont été réalisés durant deux des séjours. Deux jeux d'échantillons ont été relevés, le premier à 30 cm de profondeur, le second à différentes profondeurs entre 30 et 90 cm. Lorsqu'un échantillon est récolté dans un champ labouré, les sillons, points les plus bas, sont pris comme référence de sol. Malheureusement, l'analyse du second jeu d'échantillons a été rendu impossible car l'une des sondes de mesure de la salinité a été cassée. Seul le 1$^{er}$ jeu d'échantillon a donc été utilisé et présenté ici. Les points choisis pour relever la salinité sont situés le long de deux transects sur l'île Gharbi (Figure 52). Le premier transect mesure 3 km et part de la zone irriguée de Mellita au nord de Gharbi pour rejoindre la mer au sud. Il traverse ainsi la zone irriguée, des parcelles en dehors de la zone aménagée pour l'irrigation et une portion de la sebkha Essendouk. Les échantillons ont été relevés sur 11 points le long du transect. Le second transect part du haut du talus, près d'Ouled Azzedine et descend vers les sebkhas Ejlija sur 1,5 km. Il traverse ainsi des parcelles non encore irriguées en 2011 et un espace de sebkha (Figure 52). Des échantillons ont été relevés sur 7 points le long du transect. Les points de relevé de la salinité ont été déterminés sur le terrain en fonction de la physionomie et de la couverture végétale. Les relevés de salinité sont utilisés qualitativement c'est-à-dire en relatif les uns par rapport aux autres. Ils ont été réalisés le 11 mai 2011 et les valeurs de salinité relevées correspondent aux valeurs de ce jour précisément. Ainsi ils permettent uniquement d'évaluer la salinité relative en début d'été sur les deux transects et en aucun cas des valeurs de salinité moyenne. Après avoir récolté les 18 échantillons de 100 g chacun sur le terrain, ils ont été transportés jusqu'au laboratoire de géographie physique de l'Université Paris Diderot et traités sur place. Le protocole du laboratoire a été utilisé pour relever la salinité et le pH du sol.




**C : Valeur de salinité sur les transects S1 et S2**

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | Salinité µS/cm | 253 | 478 | 752 | 261 | 312 | 2490 | 3000 | 6800 | 6170 | 3310 | 6190 |
| | pH | 8,20 | 8,16 | 8,01 | 8,00 | 8,08 | 8,20 | 7,90 | 8,16 | 7,87 | 7,57 | 7,83 |
| S2 | Salinité µS/cm | 188 | 158 | 590 | 5830 | 6900 | 16300 | 12400 | | | | |
| | pH | 8,19 | 8,33 | 7,87 | 7,61 | 7,46 | 7,57 | 7,54 | | | | |

***Figure 52: Relevés de terrain : Localisation des relevés de salinité et des transects descriptifs réalisés sur le littoral (A) ; Exemple du transect T 11 relevé sur la côte touristique érodée au sud du Grand Hôtel (B) et valeurs des relevés de salinité sur les deux transects (C)***

Ce dernier correspond au protocole NF ISO 11265 qui mélange 1 volume de terre (ici 10 g) pour 5 volumes d'eau (ici 50ml d'eau distillée), lesquels sont agités pendant au moins 30 minutes. Le mélange est ensuite laissé à décanter puis les mesures sont effectuées dans le surnageant. Les échantillons de 100 grammes chacun, ont été séchés puis broyés et tamisés afin de récupérer la fraction fine (< 2mm). Afin de garantir la qualité des résultats plusieurs tests ont été réalisés en variant le temps de décantation et chaque expérience a été réalisée 2 fois dans un souci de validité des résultats. Un premier jeu d'échantillons a été laissé à décanter 12h, un deuxième 2h et un troisième 3h. Les résultats étant similaires, les autres échantillons ont été laissés à décanter 2h. Les mesures de pH, salinité et température ont été effectuées grâce à un capteur Consort 561® et à des sondes pH et salinité correspondantes.

Vingt-six transects décrivant la côte ont été réalisés sur le littoral entre le 17 mai et le 23 juin 2011. Ils ont été réalisés dans le but de décrire précisément certains tronçons de côte et sont majoritairement répartis sur la côté nord de l'archipel et le long de la côte de la localité de Ramla (Figure 52). Afin d'avoir des mesures précises, chaque élément croisant le décamètre a été noté depuis un point fixe repérable sur le terrain vers la mer (arbre, maison, mur…). Les points ont été choisis en fonction du type de côte rencontrée ou d'éléments remarquables comme des vestiges romains, falaises en cours d'effondrement, bâtiment récent attaqué par la mer etc. (Figure 52 - B).

### 2.3. Questionnaires

Des questionnaires ont été proposés à la population des îles en mai 2012 dans le but d'avoir un aperçu de sa perception des évolutions de l'environnement de l'archipel. Les résultats de ces questionnaires sont utilisés de deux manières : D'abord comme résultats bruts permettant de mettre en évidence une perception de la population. Ensuite ces perceptions sont confrontées aux résultats de quantification de la vulnérabilité acquis par d'autres méthodes et grâce à d'autres données puis aux aménagements mis en place dans le cadre de la protection de l'environnement ou du développement de l'archipel. Il s'agira donc d'établir si une cohérence existe entre perception, phénomène dommageable et actions entreprises. La méthode employée pour réaliser ces questionnaires est exposée dans le **Chapitre 8** de cette thèse.

## Conclusion du Chapitre 4

Ce chapitre a présenté l'ensemble des données qui seront utilisées dans ce travail de thèse. Notre choix d'appréhender la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah par une approche géographique en intégrant des aspects de géographie physique mais aussi de géographie humaine, nous a amené à acquérir des données très différentes qui peuvent être séparées en deux groupes :

- Les données qui peuvent être utilisées telles quelles. Il s'agit des données récoltées sur le terrain comme c'est le cas des points GPS, des observations de terrain mais aussi des mesures de salinité ou des transects décrivant la côte ainsi que des questionnaires.
- Les données dont il serait impossible de tirer des informations sans préparation. Il s'agit des photographies aériennes qui doivent être géoréférencées et mosaïquées. L'image SPOT 5 ainsi que les photographies aériennes devront être photo-interprétées. Ces données issues de la photo-interprétation pourront ensuite être utilisées comme données d'où seront issus des résultats. Il s'agit également des images Landsat 5 TM qui devront d'abord faire l'objet de prétraitements et ensuite d'une classification dirigée.

Les données cartographiques, photographiques et les images satellites ont chacunes leurs qualités et leurs défauts mais leur diversité permet toutefois d'appréhender de manière complémentaire et précise les questions abordées dans ce travail. La carte marine du SHOM (datant de 1958) permet de découvrir les fonds marins de l'archipel mais les relevés sont anciens (1884) et les informations sont peut-être à actualiser. La carte topographique de 1973 est parfois mal dessinée et il est impossible de l'utiliser comme donnée de base dans des études de quantification. Cependant, les informations toponymiques et altitudinales y sont nombreuses et bien référencées. Les photographies aériennes (datant de 1963) demanderont beaucoup de temps de calage car chacune ne couvre qu'une petite partie de l'archipel et que les bordures des images sont parfois très déformées. Elles sont par ailleurs disponibles uniquement en noir et blanc ce qui complexifie parfois le travail de photo-interprétation. Cependant elles sont absolument indispensables pour l'étude diachronique d'évolution du trait de côte et de la surface des sebkhas menée dans cette thèse. Elles seront confrontées à l'image satellite SPOT 5 de 2010 qui est fournie en mode panchromatique. Enfin les images Landsat 5

TM (1984 et 2010) sont multi-spectrales ce qui permet des études de télédétection mais leur résolution n'est que de 30 m rendant impossibles des études très précises.

Les données d'observations et de relevés de terrain permettent d'apporter des informations inédites et actuelles sur des sujets proches de la vulnérabilité. Ainsi les données d'observation et de repérage qui ont permis d'avoir une vue d'ensemble et précise de l'archipel : les prises de vue photographiques associées aux relevés GPS ont été d'une grande aide pour appréhender l'archipel précisément. Les relevés de terrain, eux, sont focalisés sur quelques points de l'archipel qui sont, en ce qui concerne les transects sur la côte, décrits très précisément, et qui apportent des informations précises pour les relevés de salinité.

Les questionnaires qui, malgré notre petit échantillon, permettront d'avoir une idée de la perception des habitants de l'archipel concernant les problèmes environnementaux mais aussi l'érosion des côtes et l'extension des sebkhas.

L'ensemble de ces données permet donc d'obtenir des résultats très différents et d'avoir une vision globale mais assez précise de la vulnérabilité de l'archipel en particulier en ce qui concerne les sebkhas et le trait de côte.

# Chapitre 5.

## Méthodologies de la thèse

---

Les méthodes employées sur les données présentées précédemment vont servir à transformer des données brutes en données exploitables desquelles seront tirés des résultats. Les études de cette thèse portent sur les évolutions du trait de côte et celles de l'occupation du sol et en particulier des sebkhas de l'archipel. Toutes les méthodes mises en œuvre permettent d'aboutir à ces résultats. Elles peuvent être classées en deux catégories. La première concerne les méthodes qui permettent d'aider à répondre à toutes les questions. C'est le cas de la méthode employée en photo-interprétation ou celle du calage des photographies aériennes qui permettra de réaliser une mosaïque et ainsi de créer une image de l'archipel en 1963. La seconde catégorie regroupe les méthodes qui sont spécifiques à des points précis comme celles concernant l'étude du trait de côte ou la définition des différents types d'occupation du sol. Ces méthodes spécifiques seront expliquées dans les chapitres traitant précisément de l'étude de l'évolution, du trait de côte (**Chapitre 6**), de l'évolution de l'occupation du sol et plus particulièrement des sebkhas de l'archipel (**Chapitre 7**) et des questionnaires proposés pour évaluer la perception de la population (**Chapitre 8**). Ainsi, ce chapitre détaillera :

- le processus de transformation des 65 photographies aériennes en une mosaïque permettant la réalisation d'une analyse diachronique par photo-interprétation avec l'Image SPOT 5.

- les méthodes générales de la photo-interprétation et de la détection des objets géographiques ce qui permettra d'aboutir à deux cartes d'occupation du sol, l'une de 1963, l'autre de 2010.

## 1. Le calage des photographies aériennes

Notre objectif est de créer un nouvel outil de travail qui prendra la forme d'une mosaïque réalisée à partir des photographies aériennes. Cette mosaïque sera intégrée dans le SIG et comparée avec l'image SPOT 5 avec pour objectif l'analyse diachronique de l'occupation du sol en 1963 et en 2010. Dans le cadre de l'étude de la vulnérabilité, créer cette mosaïque permet de tracer le trait de côte et les bordures de sebkhas à une date pour laquelle aucune autre source de données n'est disponible et de comparer les positions de ces limites en 1963 et en 2010. L'apport de la mosaïque est majeur puisque qu'elle permettra d'une part de quantifier précisément l'évolution de la côte et de la superficie des sebkhas sur une période de 47 ans et d'autre part de confirmer ou d'infirmer ce que d'autres auteurs, avec d'autres approches ont pressenti ou observé grâce aux indices présents sur la côte à savoir une érosion importante et préoccupante de la côte (Paskoff & Sanlaville, 1983; Oueslati, 1986; Comete Engineering, 2001; Ministère de l'intérieur et du développement local & Municipalité de Sfax, 2008) ou l'augmentation de la surface des sebkhas (Rhouma *et al.*, 2005; Fehri, 2011).

Les photographies aériennes de 1963 ont été calées sur l'image SPOT 5 de 2010 de telle sorte que l'erreur due au calage soit, si ce n'est parfaitement nulle, la plus faible possible. Sur ArcGis 10, il est possible de caler une image sur une autre, c'est-à-dire d'assigner les mêmes coordonnées géographiques d'un point précis d'une image à un point précis d'une autre image. Cet exercice de création d'une mosaïque a soulevé plusieurs points problématiques :

- le choix de la méthode de géo-référencement : soit une géo-rectification réalisable grâce à l'utilisation de polynômes de premier, second ou troisième ordre sous ArcGis 10, ou l'utilisation de l'ortho-rectification.
- durant le processus de calage, il est nécessaire de trouver des points communs entre l'image SPOT 5 et les photographies aériennes pour assigner à chaque point commun des photographies, les coordonnées de l'image SPOT 5. Le type et le nombre de points à utiliser afin de caler correctement les photographies aériennes dépendent des points communs aux deux dates et ils sont parfois peu nombreux.

Les photographies aériennes sont assez déformées sur leurs marges (déformations dues à la prise photographique et à l'appareil photographique) et ainsi, seul leur centre a été conservé. Plusieurs études ont pu démontrer que le géo-référencement de photographies aériennes peut être réalisé soit grâce au processus d'ortho-rectification lorsque le terrain est accidenté ou pentu, soit grâce à un processus de géo-rectification simple lorsque le terrain est peu accidenté voir plat (Rocchini & Di Rita, 2005). L'ortho-rectification est un processus qui permet d'atténuer les déformations liées aux reliefs sur une image (Muraz *et al.*, 1999).

> *« Lorsque le terrain est plat et la visée verticale (le plan de l'image photographique est parallèle au terrain [comme c'est le cas pour les images de Kerkennah], l'échelle reste homogène sur l'ensemble de la photographie comme dans le cas d'une carte topographique, et on obtient une reproduction fidèle des formes présentes sur le terrain. Dès que la visée devient oblique ou que le terrain n'est plus plat, l'échelle devient variable d'un point à l'autre de la photographie. L'image n'est plus superposable à une carte et les calculs de distances ou de surfaces deviennent erronés. » (Muraz et al., 1999)*

Ainsi sur des terrains plats, l'utilisation des polynômes de premier et second ordres pour la rectification des images donne des résultats équivalents à une ortho-rectification lors des processus de géo-référencements (Figure 53). En effet les distorsions dues aux reliefs sont faibles et n'ont besoin que d'une faible torsion de l'image pour être atténués, ce que proposent les polynômes de second ordre.

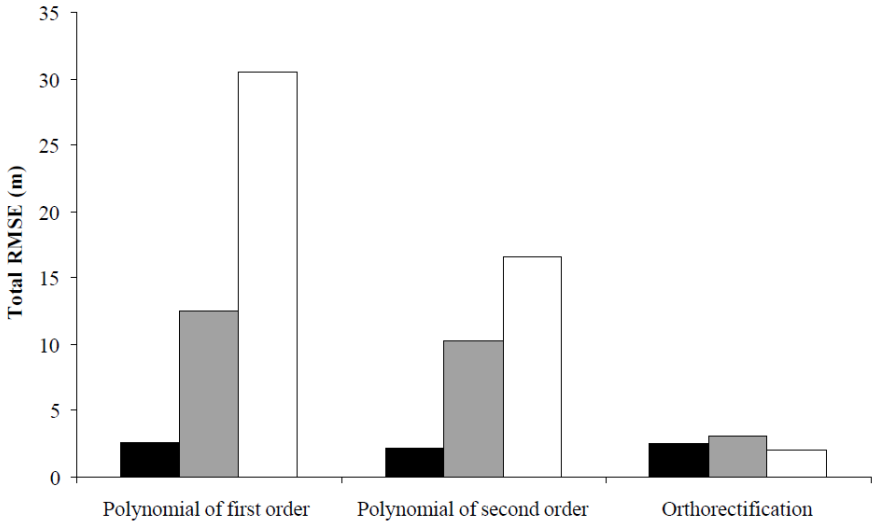



***Figure 53: Géo-rectification ou ortho-rectification dans le cas de terrain plat, de colline ou de volcan (Tiré de Rocchini & Di Rita, 2005)***
*Erreur totale obtenue en utilisant des polynômes de premier ou second ordre ou une ortho-rectification (noir: terrain plat; gris: terrain de colline et blanc : terrain de volcan).*

Le processus de calage permet de géoréférencer des points, or c'est toute l'image qui s'en voit modifiée. L'erreur résiduelle est appelée RMSE ou Root Mean Squar Error (Erreur moyenne quadratique en français) et s'exprime en mètres. A chaque point de l'image à caler (photographies aériennes), des coordonnées géographiques ont été données qui correspondent à d'autres points sur l'image de base (SPOT 5). Lorsque plus de 3 points sont définis, l'image se déforme et les points « jumeaux » peuvent être légèrement décalés, engendrant une erreur. Ces erreurs sont calculées en mesurant la différence entre les valeurs de coordonnées $x$ et $y$ des points « jumeaux » élevés au carré. Ils seront ensuite divisés par 2. L'erreur est ainsi définie individuellement pour l'ensemble des points de calage (ou points jumeaux) (Hughes *et al.*, 2006). Le calcul de l'erreur individuelle s'exprime selon la formule suivante :

$$E_1 = \frac{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2}{2}$$

où $E$ est l'erreur individuelle ; $x_s$ et $y_s$, les coordonnées du point de l'image source et $x_c$ et $y_c$, les coordonnées du point de l'image à caler.

Pour connaître l'erreur quadratique moyenne, ce sont l'ensemble des erreurs individuelles qui sont additionnées puis divisées par le nombre de points « jumeaux ». La racine carrée du résultat correspond à la RMSE. Il s'agit donc de la racine carrée de la moyenne des erreurs individuelles (Hughes *et al.*, 2006). Le calcul de l'erreur moyenne quadratique s'exprime selon la formule suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{E_1 + E_2 + \cdots + E_n}{n}}$$

où $E_1$, $E_2$ et $E_n$ sont l'ensemble des erreurs individuelles et $n$, le nombre de points « jumeaux » ou de calage.

Kerkennah est un archipel relativement plat où les reliefs sont très peu marqués. Les déformations des photographies liées aux reliefs sont donc peu importantes. L'utilisation d'un polynôme plutôt que de l'ortho-rectification pour cette étape a été choisie comme l'ont fait plusieurs auteurs sur d'autres terrains plats (Par exemple Mount *et al.*, 2003; Hughes *et al.*, 2006; Faye *et al.*, 2008; Martinez del Pozo & Anfuso, 2008; Sheik Mujabar & Chandrasekar, 2011; Del Rio *et al.*, 2012). Trois ordres de polynômes sont proposés dans le logiciel ArcGis 10. Lors du calage des images, l'erreur résiduelle est la plus faible lorsque le polynôme de 2$^{nd}$ ordre est utilisé (Figure 54). Le polynôme de 1$^{er}$ ordre ne transforme pas les images qui doivent être géoréférencées. En effet, la déformation des images par ce polynôme consiste en

un déplacement latéral des images. Cela convient donc, par exemple, pour le calage de cartes. Le polynôme de 3ème ordre quant à lui, déforme énormément les images et les erreurs induites par ces déformations sont très importantes (Hughes *et al.*, 2006) comme le montre la Figure 54. C'est pourquoi le polynôme de second ordre a été favorisé.

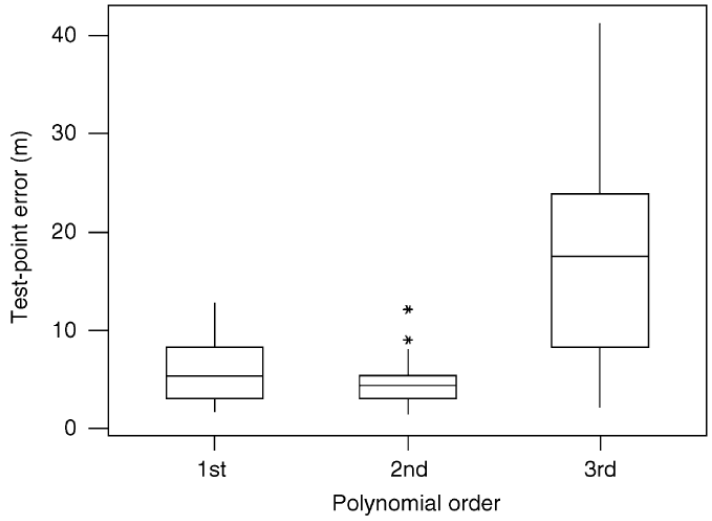



***Figure 54: Erreur résiduelle en mètres en fonction du type de polynôme utilisé avec 31 points de calage (Tiré de Hughes et al., 2006)***

Il existe deux types de points de calage : les points durs (hard points) et les points mous (soft points) définis par Hughes *et al.* (2006). Les premiers sont caractérisés par un angle net ou un coin sur un objet présent à la fois sur l'image de base et sur l'image à caler. Ainsi ils peuvent être des angles de maisons, des croisements de routes etc. Les seconds correspondent à des éléments présents sur les deux images (à caler et de base) mais dont les angles sont irréguliers ou flous, comme la cime des arbres, les buissons, etc. La nature de ces deux types de points implique une erreur de calage plus grande dans le cas de l'utilisation de points mous dans le processus de géoréférencement. L'erreur induite par l'utilisation de points durs est forcément inférieure car les points sont nets et précisément localisables dans l'espace (Hughes *et al.*, 2006). Dans l'archipel, il existe finalement peu de points durs communs aux photographies aériennes et à l'image SPOT 5. Cependant, un nombre très important d'arbres sont visibles, en particulier des palmiers, qui ont persisté entre 1963 et 2010 (la durée de vie d'un palmier peut atteindre 100 ans) et qui ont pu être utilisés comme points de calage (Figure 55 – A et A'). La différence de qualité de points a été minimisée en multipliant le nombre de points de calage utilisés. En effet, la diminution de l'erreur résiduelle dépend beaucoup plus

du nombre de points utilisés pour caler une image que le choix du type de points (mou ou dur) choisis (Hughes *et al.*, 2006). La multiplication de ces points est fondamentale car un nombre trop faible de points peut faire croire à un très bon calage (avec une erreur totale très faible) qui serait factice et uniquement mathématique (Rocchini & Di Rita, 2005). Dans les études de Rocchini et Di Rita (2005) et d'Hughes *et al.* (2006), les auteurs se limitent à respectivement 20 et 31 points de calage et admettent que ce chiffre est peu important. Rocchini et Di Rita (2005) confirment ce constat et ajoutent que ce nombre de points est insuffisant pour stabiliser l'erreur résiduelle, tandis que pour Hughes *et al.* (2006), l'utilisation de 31 points de calage implique une erreur d'environ 4 mètres, ce qui est trop important pour nous.

Dans ce travail, 33 des 59 photo-aériennes obtenues ont été calées grâce à un polynôme du second degré. Ce processus a nécessité 110 points de calage en moyenne par image avec un maximum de 196 points sur une photographie aérienne et dont seuls les bords ont été éliminés et un minimum de 17 points sur une image dont seule une petite partie a été conservée. Cette dernière correspond à la localité de Kraten qui est entourée d'eau au nord et de sebkha au sud. Seul l'espace urbain, qui a pu être calé, a été conservé sur cette image.

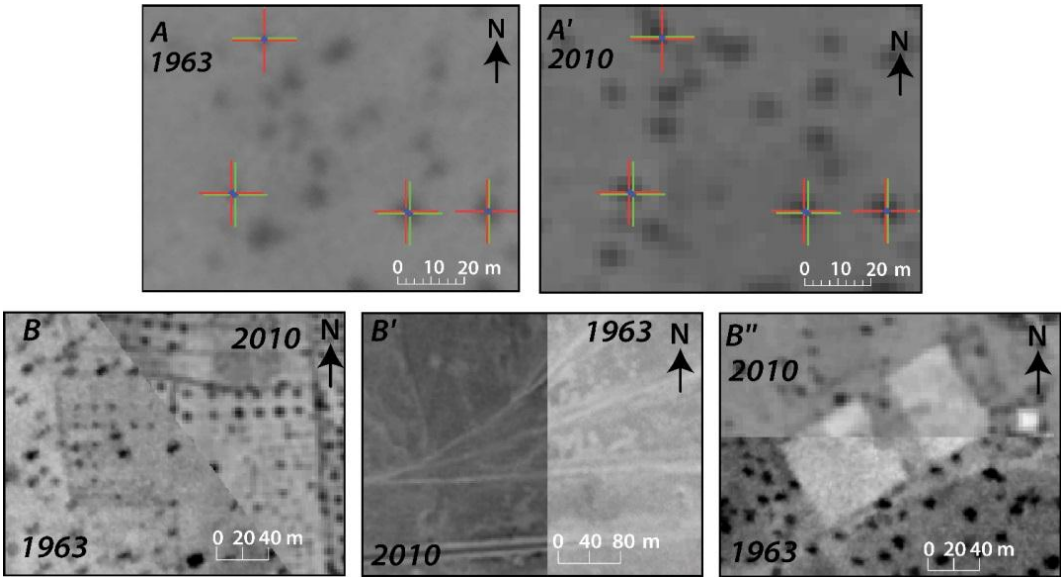



***Figure 55: Calage et vérifications visuelles par comparaison entre l'image SPOT 5 et les photographies aériennes.***

*Exemples de points mous utilisés pour le calage des photographies aériennes de 1963 (A et A') et vérifications visuelles sur trois types d'espaces, les bordures de parcelles agricoles communes aux deux dates (B), les routes (B') et sur le bâtis, ici une citerne (B'')*

La très large majorité de points mous compensés par le nombre important de points de calage utilisés a permis d'obtenir une erreur moyenne quadratique (RSME) de 1,05 mètres (avec un écart type de 0,22 mètres). Les vérifications visuelles des calages sont fondamentales car si l'erreur moyenne quadratique permet d'estimer globalement la qualité du calage, c'est par l'observation des points de calage que les erreurs peuvent être corrigées, des points supprimés ou déplacés. Dans cette étude ces vérifications visuelles ont été systématiques et l'arrêt du processus de calage, stoppé uniquement lorsque la qualité des vérifications visuelles et de la RMSE étaient satisfaisantes (Figure 55 - B, B' et B''). Ce sont donc 26 photographies qui n'ont pas été calées pour deux raisons principales. La première est que le recouvrement des photographies était suffisant pour en exclure certaines. La seconde est que certaines portions de l'archipel, en particulier dans les sebkhas, sont dépourvues de végétation, de routes ou de tout autre point de repère commun aux deux dates. Certaines photographies représentant majoritairement de la sebkha ont dû être exclues faute de points de calages suffisamment nombreux. Les zones de sebkhas ont été gardées lorsque leurs bordures étaient suffisamment bien géoréférencées.

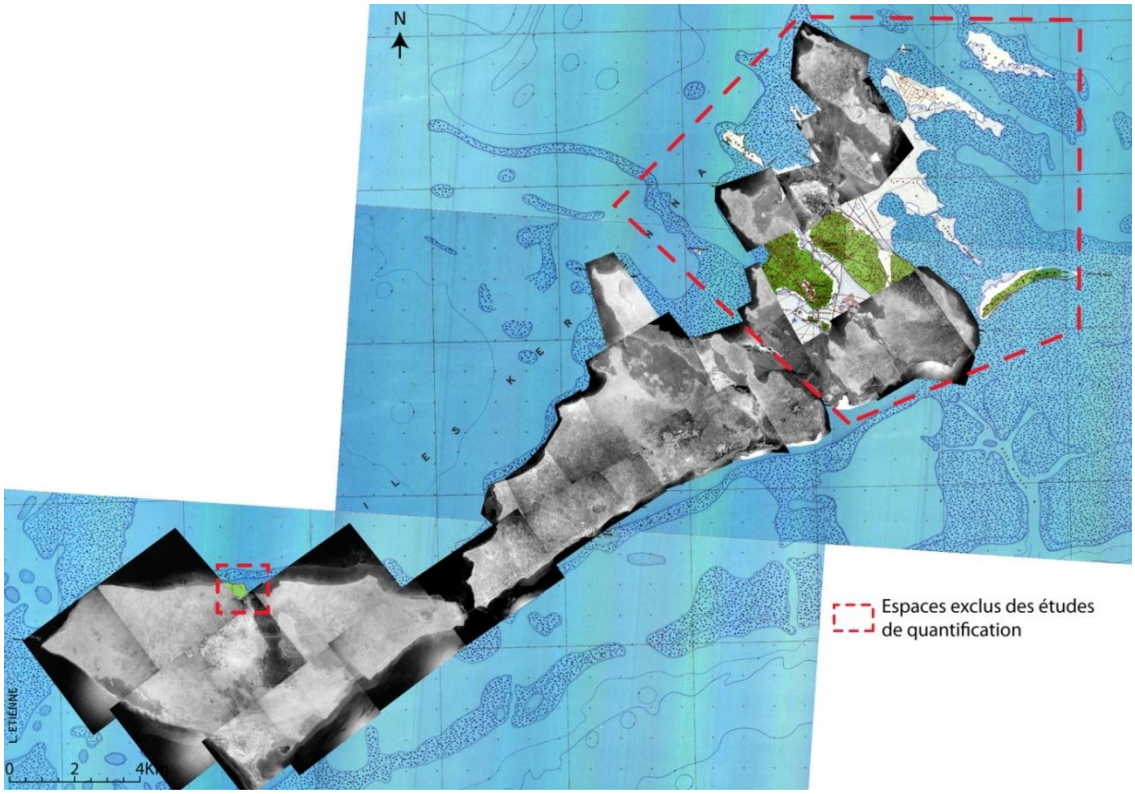



***Figure 56: Mosaïque réalisée à partir des photographies aériennes de 1963***
*Entourés de rouge, les espaces où les points de calages étaient insuffisants pour caler suffisamment de photographies et qui ne seront donc pas pris en compte dans les études quantitatives d'évolution des sebkhas et du trait de côte.*

La mosaïque finale (Figure 56) comporte les parties (plus ou moins vastes) de 33 photographies aériennes dont l'erreur de calage permet une étude précise des évolutions survenues entre 1963 et 2010. Cependant, les photographies d'une très large zone, englobant le nord-est de l'archipel, n'ont pu être calées, faute de points de calage disponibles, et cette zone ne pourra faire partie des études quantitatives menées pour l'étude de l'évolution du trait de côte et de l'extension des sebkhas. Ce vaste espace, pour lequel les photographies aériennes ne sont pas utilisables, a toutefois été étudié qualitativement à partir de la carte topographique de l'archipel de 1973.

## 2. La photo-interprétation : détection des objets géographiques

La photo-interprétation est l'étude et la collecte des informations nécessaires pour identifier différentes caractéristiques culturelles et naturelles d'éléments discernables sur une photographie aérienne ou spatiale (Centre Canadien de Télédétection). Il s'agit donc de regarder une image et d'en déduire les objets qui s'y trouvent. L'extraction des informations de l'image SPOT 5 et des photographies aériennes de 1963 passe par la conversion d'une image plate en une multitude d'objets vectoriels dont les caractéristiques peuvent être stockées individuellement dans les logiciels SIG. L'objectif de ce travail d'interprétation visuelle des images est de réaliser deux cartes d'occupation du sol, l'une en 1963, l'autre en 2010. Elles seront ensuite confrontées l'une à l'autre pour voir les évolutions de l'occupation du sol. Cette évolution sera elle-même mise en regard de la mesure des phénomènes qui sera développée dans la **Partie 3** de cette thèse.

Il existe, pour obtenir des informations à partir d'images, différentes méthodes automatiques d'extraction des données, basées sur la reconnaissance de formes géométriques ou, dans notre discipline, d'objets géographiques. Le logiciel ou l'opérateur repère des points, des contours ou des régions dont les caractéristiques permettent de délimiter les objets géographiques automatiquement (Erus, 2008). Ces méthodes de détection automatique des objets géographiques se sont diversifiées au fil du temps et si initialement les études portaient très largement sur la détection des aménagements humains (par exemple Nagao *et al.*, 1979; Fischler *et al.*, 1981; Gruen *et al.*, 1995; Trinder & Wang, 1998; Mayer, 1999), elles portent également, depuis le début des années 2000, sur la détection d'espaces naturels (végétation, marais etc.) et associent d'autres méthodes de détection comme la télédétection ou intègrent les données dans un SIG pour les comparer à un Modèle Numérique de Terrain (par exemple Laliberte *et al.*, 2004; Barlow *et al.*, 2006; Desclée *et al.*, 2006; Martha *et al.*, 2010; Lee *et al.*,

2012). Cependant, d'après Erus (2008), les études qui utilisent les méthodes « orientées-objets » sont limitées par les variations des objets d'une même classe. Selon lui, elles peuvent varier selon 7 critères. Le premier concerne les variations de points de vue, ce qui n'a pas d'incidence sur notre étude puisque les photographies aériennes comme l'image SPOT 5 sont prises en position verticale. Le deuxième concerne la variation d'illumination des objets entre les différents types d'images, ce qui est tout à fait le cas entre nos 2 types d'image source, où certains objets apparaissent bien plus foncés ou plus clairs en 1963 qu'en 2010. Le troisième concerne les occlusions c'est-à-dire le recouvrement de certains objets par d'autres, qu'ils soient de la même classe ou non. Le quatrième concerne les variations d'échelles, ce qui inclut les variations de taille des objets d'une même classe comme c'est très souvent le cas dans l'archipel, en particulier pour les parcelles agricoles et les différences d'échelles entre les images ce qui n'est pas le cas dans cette étude. Le cinquième critère concerne les déformations que peuvent subir les objets entre deux dates par exemple mais c'est précisément ce point que nous cherchons à évaluer. Le sixième critère concerne la complexité de fond :

> *« En général, dans une image les objets ne sont pas isolés de leur environnement. Sur un fond complexe il est difficile de distinguer les régions appartenant à l'objet et au fond. » (Erus, 2008)*

Ce critère est surtout problématique dans les localités de l'archipel où les routes sont difficilement distinguables du sol nu et où les limites des habitations sont parfois complexes à identifier. Enfin le dernier critère concerne les variations intra classes qui est, d'après cet auteur,

> *« le plus important des problèmes envisagés pour la reconnaissance générique d'objets » (Erus, 2008)*

Dans l'archipel de Kerkennah, le trait de côte ne peut pas être repéré par la même méthode sur l'ensemble du littoral car les types de côtes varient ; les parcelles agricoles sont très différentes les unes des autres. Leur forme varie particulièrement : parfois très petites, parfois plus vastes, certaines sont rectangulaires, d'autres triangulaires mais la majorité ont des formes complexes. Le sol est également de teinte différente : parfois foncée si l'agriculteur à arrosé sa parcelle, parfois très claire. Enfin les arbres sont souvent disposés de manière alignée mais leur nombre, la direction de l'alignement et parfois l'écartement entre chaque arbre varie considérablement. Enfin, certaines parcelles ne sont pas plantées d'arbres.

Il est donc extrêmement complexe d'automatiser l'extraction des objets que nous souhaitons étudier au vu des limites auxquelles nous sommes confrontés. Finalement la méthode ancienne, parfois fastidieuse mais plus sûre de la digitalisation manuelle, par photo-interprétation, reste la meilleure solution.

La photo-interprétation est basée sur les différences et les points communs entre les objets repérables sur l'image. Les objets appartiennent à une même catégorie lorsqu'ils sont semblables aux objets de cette catégorie et différents des objets des autres catégories. Huit éléments d'aide à l'interprétation permettent la détermination des objets (Centre Canadien de Télédétection). Le premier est la **forme** que prend l'objet. Par exemple, à Kerkennah, le bâti (sur l'image SPOT 5 de 2010) est facilement repérable car la forme des maisons est souvent carrée ou rectangulaire, avec une cour intérieure. De la même manière un arbre sera facilement repérable car il apparaît par un point sur l'image. La **texture** représente l'aspect d'une surface qui varie en fonction des objets qui la composent. Ainsi, les surfaces de sebkhas sont lisses (ou homogènes) car la végétation y est inexistante ou très disparate tandis que les surfaces végétalisées (la palmeraie par exemple) présentent un aspect rugueux ou hétérogène. La **structure** correspond à l'agencement des objets d'une même catégorie. Toujours sur l'archipel, les arbres peuvent être organisés de 2 manières. La première ne montre aucune organisation particulière c'est-à-dire que les arbres ne présentent aucun agencement spécifique et la répartition des individus semble aléatoire. D'après les connaissances acquises sur le terrain, les espaces concernés représentent forcément de la palmeraie. La seconde montre une organisation très marquée dans laquelle les arbres sont plantés de manière rectiligne, l'organisation n'est pas aléatoire et les espaces concernés sont des parcelles agricoles composées de vergers et les arbres plantés sont de différentes espèces (majoritairement de l'olivier mais aussi des palmiers, figuiers, grenadiers etc.). La **taille** des objets peut également aider à les définir. Ainsi, concernant le bâti, les citernes communes, utilisées jusque récemment, sont de taille supérieure aux maisons de l'archipel, ce qui permet de les discerner assez facilement (ajoutons également que leur forme est différente des maisons qui ont souvent une cour intérieure caractéristique). Les objets sont discernables les uns des autres par leur **teinte**. Il est ainsi très facile de discerner la terre ferme, l'estran et la mer en certains endroits de l'archipel que ce soit en 1963 ou en 2010. Les **ombres** peuvent apporter des précisions sur les objets, comme leur taille ou leur forme, mais peuvent aussi perturber le photo-interprétateur en ajoutant des variations de teinte sur l'image (sans que ces variations ne représentent de nouveaux objets). Le Centre Canadien de Télédétection ajoute

également le **site** qui aide à interpréter les images. En effet, si, comme dans l'archipel de Kerkennah, l'étude porte sur des espaces littoraux, il sera logique de trouver des éléments naturels ou anthropiques qui y sont associés, par exemple des digues, des ports mais aussi des plages, des falaises etc… Enfin, dernier élément d'aide à l'interprétation : le **temps** ou plutôt l'année de prise de vue qui permet d'éliminer certains objets des paysages. Par exemple, dans l'archipel de Kerkennah, le goudronnage des routes est postérieur aux années 1960, donc aucune route goudronnée ne pourra être interprétée sur l'image de 1963. De la même façon, le port de Sidi Youssef a été aménagé récemment, et les côtes qui le jouxtent ont depuis changé de morphologie.

L'ensemble des 8 éléments d'aide à l'interprétation vont permettre de déterminer les objets à identifier sur l'image. Il est très rare que tous les objets d'une même classe soient strictement identiques c'est-à-dire que leur formes, tailles, teintes etc. soient parfaitement semblables. Dans la plupart des cas les éléments varient. Dans cette étude 5 types d'objets ont été digitalisés sur l'ensemble de l'archipel et ce sur les images e 1963 et de 2010, pour une étude diachronique. Trois de ces objets sont anthropiques : les parcelles agricoles, les bâtiments et les routes, et deux sont des frontières « naturelles » : le trait de côte et les bordures de sebkha. La digitalisation des parcelles agricoles a été rendue très complexe par la diversité des formes, la teinte du sol, la petitesse de certaines parcelles, en particulier dans les zones irriguées et par l'absence ou la difficulté de détection des limites de certaines parcelles. Certaines d'entre elles ne comportent pas d'arbre et de végétation arborées mais lorsqu'il y en a, les arbres sont toujours alignés (texture et structures similaires) quelle que soit l'année de prise de vue. S'ajoute à ces difficultés intrinsèques au terrain d'étude, les différences de luminosité et de teinte des images de 1963 qui ont rendu leur détection plus complexe. Finalement les parcelles agricoles ont été digitalisées sur les deux images disponibles sauf dans la zone nord est où les photographies aériennes n'ont pu être callées. Au total ce sont 2055 parcelles en 1963 et 7921 en 2010 qui ont été identifiées ce qui représente respectivement 642 et 2717ha. Ces chiffres sont toutefois en deçà de la réalité car certaines parcelles n'ont pu être identifiées individuellement faute de limites nettes en particulier à l'est du talus de l'île de Gharbi ou à l'ouest de l'île de Chergui. Le bâti a également été digitalisé aux deux dates grâce à deux méthodes. Sur l'image SPOT 5 de 2010, les habitations sont discernables les unes des autres. Les cours intérieures sont visibles et chaque bâtiment a ainsi pu être digitalisé individuellement. L'habitat a ensuite été digitalisé groupé sous forme de taches urbaines. Sur les photographies aériennes de 1963, les différences entre chaque

habitation sont parfois peu visibles. On a donc préféré considérer les bâtiments de 1963 comme des taches urbaines lorsque l'habitat est groupé. Finalement, en 2010, chaque bâtiment a été digitalisé individuellement (4784 bâtiments) puis les tâches urbaines ont été délimitées comme en 1963. Enfin les routes principales ont été détectées facilement et sont représentées par des lignes. Les deux éléments naturels à digitaliser, le trait de côte et les bordures de sebkhas, sont ceux sur lesquels reposent les études concernant l'évolution de l'environnement de l'archipel et les processus de photo-interprétation mis en œuvre pour les détecter seront détaillés au **Chapitre 6** et **Chapitre 7**.

## Conclusion du chapitre 5

Les approches employées dans la thèse se veulent variées mais complémentaires. Trois approches (technique, géomorphologique et sociale) sont utilisées et mises en regard. Ce procédé permet d'aboutir à une quatrième approche, plus globale et géographique : une approche systémique. Cette étude porte sur la vulnérabilité et l'évolution des paramètres physiques et anthropiques de l'archipel de Kerkennah (qui définit ainsi les limites spatiales de l'étude) depuis les années 1960.

Les données obtenues et récoltées pour réaliser ce travail sont variées et permettent l'obtention d'informations différentes. Ce chapitre a également permis d'expliquer les différentes méthodes mises en œuvre pour préparer les données nécessaires à l'étude du trait de côte ou de l'occupation du sol et en particulier l'évolution des surfaces de sebkhas.

Le calage des photographies aériennes a été réalisé dans le but d'obtenir une mosaïque calée sur l'image SPOT 5 (2010) avec une erreur globale faible (ici la RMSE est de 1,05 m). Grâce à l'image SPOT 5 et à la mosaïque de photographies aériennes, les études de photo-interprétations ont permis d'aboutir à deux cartes d'occupation du sol. Le croisement de ces deux cartes permet d'évaluer l'évolution de l'occupation du sol de manière précise. La carte d'évolution obtenue est également utilisée pour l'étude précise du trait de côte (**Chapitre 6**) et pour l'évaluation de l'évolution des surfaces de sebkhas (**Chapitre 7**) entre 1963 et 2010.

## Conclusion de la partie 2

Les données utilisées dans cette thèse ont été choisies pour répondre à des questions précises concernant la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah.

Les données de cartographie fournissent des informations qualitatives dont les informations de toponymies et d'altitudes qui sont extraites et intégrées à nos études.

Les données d'imageries devront subir des transformations avant que des données et résultats puissent en être tirés. Il s'agit des images satellites Landsat 5 TM qui devront subir des prétraitements et une classification dirigée et l'image SPOT 5 dont les informations sont extraites par photo-interprétation. Enfin, les photographies aériennes doivent être géoréférencées et mosaïquées avant de pouvoir être photo-interprétées.

Les données de terrain ont été récoltées durant 5 séjours dans l'archipel. Il s'agit de levés GPS, de mesures de salinité du sol et de transects réalisés sur la côte et qui permettent de décrire les différents types de côtes présents dans l'archipel. Des questionnaires ont également été soumis à la population afin d'avoir une vision de la perception de la population face aux phénomènes que nous cherchons à décrire.

Toutes ces données sont nécessaires pour répondre à notre problématique et sont intégrées dans notre étude par le biais de différentes approches qui ont été développées pendant la thèse puis réunies en une seule et même approche systémique plus intégratrice. La première approche est technique c'est-à-dire qu'elle aborde la problématique de la thèse par des études techniques de détection de phénomènes sur les images satellites ou par photo-interprétation. La deuxième est une approche géomorphologique qui décrit et explique les phénomènes étudiés par la géomorphologie au sens large grâce à des données de terrain. Enfin la dernière est une approche plus sociologique qui intègre les études par questionnaire et qui tente d'aborder la vulnérabilité par le biais des perceptions justes ou faussées de la population. Les données qui ont été utilisées avec une approche technique sont également celles qui nécessitent des traitements et des méthodes spécifiques avant que des résultats puissent en être tirés. Ces méthodes consistent en 2 points :

- D'abord le géoréférencement des photographies aériennes de 1963 qui a été réalisé grâce au calage de 33 photographies pour lesquelles il a fallu en moyenne 110

points de contrôle par image. La mosaïque ne couvre pas l'ensemble de l'archipel et les espaces non couverts ne pourront donc pas servir aux études de mesure du recul de la côte, de l'extension des sebkhas et également de la vulnérabilité.

- Ensuite le processus de photo-interprétation qui s'applique aux photographies aériennes et à l'image SPOT 5 et qui a permis d'extraire des informations de ces images « plates ».

Les méthodes spécifiques de détection du trait de côte (par photo-interprétation) et de délimitation des sebkhas (par photo-interprétation et par télédétection) seront détaillées dans les chapitres correspondants.

Elles permettront donc d'une part de tenter une quantification les phénomènes dommageables que sont l'érosion de la côte et l'extension des sebkhas mais aussi d'intégrer les résultats de ces approches techniques dans un contexte plus global de la vulnérabilité avec l'aide de données autres principalement issues de travaux de terrain.

# Partie 3

## Caractériser et comprendre la vulnérabilité

La troisième partie de cette thèse rassemble les résultats obtenus au cours de ce travail et qui permettent de répondre à la problématique. Comme précisé précédemment, il s'agit ici de comprendre et de mesurer les phénomènes de recul de la côte et d'extension des sebkhas et de la salinité qui sont des facteurs de vulnérabilité majeurs dans l'archipel de Kerkennah.

Le **Chapitre 6** présente l'évolution des côtes de l'archipel sur 6 zones d'étude et met en lumière les principales causes de cette évolution. Il permet de pointer les lieux où l'érosion est la plus forte. Pour aller plus loin, nous proposons une tentative de typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité.

Le **Chapitre 7** présente l'évolution de l'occupation du sol par deux méthodes : La télédétection qui permet d'avoir une vue d'ensemble de l'archipel et montre l'évolution entre 1984 et 2011 ; La photo-interprétation qui montre les évolutions entre 1963 et 2010. Le chapitre se focalise sur l'intérieur des terres et plus particulièrement sur le bâti, les espaces agricoles et les sebkhas, c'est-à-dire sur les trois types d'occupation du sol qui sont susceptibles d'accroître la pression sur les terres de l'archipel.

Ces deux premiers chapitres de résultats permettent de vérifier par des mesures si l'archipel est bel et bien concerné par l'avancée de la mer et par l'extension des sebkhas et leur salinité et humidité élevées.

Dans le **Chapitre 8,** les résultats obtenus seront confrontés à la perception de la population puis aux différentes actions de gestion et de protection réalisées et prévus dans l'archipel.

# Chapitre 6.

## L'évolution du trait de côte entre 1963 et 2010

---

Comme décrit dans la **Partie 1**, l'archipel est menacé par le recul du trait de côte. Des auteurs et en particulier Oueslati dès 1986 ont prouvé qualitativement l'érosion côtière. Dans le cadre de notre étude sur la vulnérabilité, il est apparu essentiel de tenter de mesurer ce recul côtier, c'est-à-dire d'utiliser une méthode de quantification. En évaluant la gravité du phénomène et en identifiant les paramètres ou les indicateurs qui le dirigent, un degré de vulnérabilité pourra être proposé pour chaque tronçon côtier étudié. Ce recul de la côte est commandé par différents éléments naturels et anthropiques, d'échelle locale ou régionale, qu'il s'agira de définir. Ainsi les objectifs de ce chapitre sont multiples :

- Montrer les dynamiques d'évolution de la position du trait de côte
- Identifier les paramètres qui influencent cette évolution et comprendre leurs interactions aboutissant à une plus ou moins grande vulnérabilité
- Et enfin, proposer une typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité.

Ainsi, le chapitre est organisé en 3 sous chapitres. Le premier est consacré à la description de la méthode employée pour définir le trait de côte dans l'archipel et pour mesurer précisément l'évolution de la côte entre les deux dates d'étude. Le deuxième est consacré à l'exposé des résultats concernant les mesures de l'évolution de la position du trait de côte ainsi qu'à l'identification des facteurs locaux de vulnérabilité, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Enfin le troisième est une discussion qui a pour but de proposer une typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité.

## 1. Méthode de détection du trait de côte

Les zones littorales étant très diverses en termes de types de terrains (plages, falaises, marais maritimes etc…), et certains de ces terrains étant périodiquement recouverts par les eaux, il est parfois difficile de définir avec exactitude où se situe la séparation terre/mer. La détection de la ligne de côte a été très largement débattue et de très nombreuses lignes de séparations ont été définies et utilisées. 45 types de lignes de côte ont été recensées par Boak et Turner (2005) qui sont regroupées en différentes classes. Ainsi, la grande majorité des lignes (35) utilisées sont visibles et repérables sur des images de bonne qualité ou sur le terrain, 4 sont des lignes issues des datum marégraphiques (voire plus bas) et 6 sont extraites par télédétection. Par ailleurs, dans le premier chapitre de la thèse de doctorat, Faye (2010) recense ces différentes lignes et les regroupe en 7 catégories :

- les lignes géomorphologiques, qui correspondent aux ruptures de pentes présentes et repérables en zone supratidale, intertidale ou subtidale (Faye, 2010),

- les lignes botaniques qui sont les lignes formées par la végétation en zone supratidale ou intertidale,

- les lignes instantanées de rivage qui sont le fruit de l'avancée de la mer sur l'estran et qui sont repérables par la limite d'humectation de l'estran,

- les datum marégraphiques, *« Ce sont des courbes de niveau résultant de l'intersection entre le profil de plage et un niveau de marée conventionnel. La ligne de référence est alors une isohypse qui joint tous les points situés sur une même cote d'altitude représentant la limite atteinte par le niveau de la marée de référence. Le plus souvent, c'est un niveau moyen déterminé à partir de statistiques de marée. »* (Faye, 2010)

- les lignes virtuelles qui sont une moyenne des lignes instantanées de rivages sur une période plus ou moins longue. Les valeurs des pixels des photographies sont moyennées pour faire apparaître les lignes d'humectation de l'estran moyennes.

- l'étendue de la plage qui correspond à la largeur qui est comprise entre les deux lignes précédemment citées. Par exemple entre une ligne haute (végétation ou pied de dune) et une ligne basse (ligne instantanée de rivage, rupture de pente sous-marine…)

- et les lignes de tempêtes qui sont les lignes des plus hautes eaux atteintes par la mer lors des tempêtes.

Parmi ces 7 catégories, seules 2 seront utilisées dans ce travail : les lignes géomorphologiques et botaniques (indicateurs de végétation halophile plus précisément). En effet, plusieurs facteurs limitent l'utilisation des 5 autres catégories :

- En premier lieu, la méconnaissance des horaires de prise de vue et de marées pour les photographies aériennes de 1963, empêche de savoir si la marée était basse, haute, de vives eaux ou de mortes eaux. Ainsi, même si elles peuvent techniquement être observées, les lignes instantanées et d'humectation ne sont pas comparables d'une image à l'autre et ne peuvent donc pas être utilisées. D'autre part, les datum marégraphiques n'ont jamais été définis pour l'archipel de Kerkennah, ce type de données est donc lui aussi inutilisable
- En second lieu la nature des données limite les lignes de côtes détectables. La détection de ligne invisible à l'œil nu (Boak & Turner, 2005) nécessite des traitements sur des images comme par exemple des traitements de télédétection ou de vidéo irréalisables sur des photographies aériennes anciennes. Les mesures d'étendue des plages n'ont pas été utilisées. La ligne de tempête a été détectée sur la côte de Sidi Fonkhal par relevé GPS (cf. Figure 51, p. 122) en suivant la ligne laissée par les laisses de marées parfois à plusieurs mètres du rivage.

Les lignes de références tracées par la végétation halophile et surtout géomorphologiques ont donc été utilisées dans cette étude. Les lignes de références géomorphologiques sont basées sur la détection de ruptures de pente qu'elles soient supra, inter ou subtidales (Faye, 2010). Il s'agit des pieds, hauts ou crêtes de dunes, les pieds ou hauts de falaises et des limites pré ou post aménagements anthropiques si la côte est artificialisée, de la crête de berme (position des pleines mers ordinaires) et le pied de plage. Les lignes botaniques sont les limites se rapportant à des indicateurs de la végétation. Le trait de côte est alors matérialisé par l'apparition d'un type de végétation dunaire ou pérenne ou par la disparition de la végétation halophile de schorre ou de marais maritime (Boak & Turner, 2005).

La détection précise du trait de côte est complexe car les côtes de l'archipel sont variées, et plusieurs cas de figure sont apparus lors de l'interprétation des images (illustrés ci-après pour l'image SPOT5 de 2010). Pour l'ensemble des cas, les observations de terrain ont été

absolument indispensables pour confirmer les interprétations sur les images et en particulier l'image SPOT 5 de 2010. Le premier cas (Figure 57, cas n°1), correspond à une situation simple pour laquelle il n'existe qu'une seule ligne séparant la mer (zone foncée) de la terre ferme (zone plus claire), délimitation qui apparaît parfois sous la forme d'une fine bande en raison de la présence d'une ombre ou de laisses de marées. Ce cas de figure est représentatif des falaises assez hautes (supérieures à 1,5 m) et des zones aménagées avec des enrochements ou des digues. Le second cas de figure (Figure 57 - cas n°2) est plus complexe et comporte une 3ème zone (très foncée) entre la mer (foncé) et la terre ferme (claire). Celle-ci correspond à une zone plus ou moins large de végétation halophile de type schorre ou marais maritime (Oueslati, 1992), ou à des platiers rocheux érodés et corrodés de couleur sombre. Ces espaces étant recouverts par la marée, ils sont considérés comme des espaces marins et le trait de côte est tracé entre la zone la plus claire (terre ferme) et la zone la plus foncée (végétation halophile ou platier corrodé). Le troisième cas de figure (Figure 57 - cas n°3) se caractérise par une alternance de plusieurs bandes plus ou moins foncées qui rend l'interprétation très complexe. En partant de la mer qui est de couleur foncée et en se dirigeant vers la terre, une première bande très foncée est visible et correspond à des laisses de marée, du platier rocheux corrodé et donc foncé ou encore de la végétation halophile de type schorre. Suite à cette première bande très foncée, une bande sableuse (claire) s'étend sur plusieurs mètres. Elle est délimitée par une seconde bande très foncée qui peut correspondre sur le terrain à des laisses de marée, du platier rocheux, du schorre ou encore l'ombre d'une falaise plus ou moins haute. Ces trois espaces sont donc tous atteints par la marée, ce qui permet de situer le trait de côte précisément entre la dernière bande très foncée et la terre ferme située en arrière et de couleur plus claire. Le quatrième et dernier cas de figure (Figure 57 - cas n°4), correspond aux espaces où aucun trait de côte n'est détectable sans avoir une marge d'erreur très importante. Il s'agit de zones où les côtes sont très basses et l'estran très large, ce qui ne permet pas de distinguer de ligne marquant la transition entre la mer et la terre. On les observe principalement à l'exutoire des sebkhas et dans la partie nord-est de l'archipel. Ces interprétations, ont été utilisées pour l'image SPOT 5 de 2010 et pour les photographies aériennes de 1963. Ainsi le trait de côte a été interprété en 2010 sur l'ensemble de l'archipel et en 1963 grâce aux photographies aériennes partout où ces dernières ont pu être calées et grâce à la carte topographique de 1973 sur les espaces non couverts. Dans les deux cas (2010 et 1963), seules les zones correspondant aux cas n°1, 2 et 3 de la Figure 57 seront utilisées pour la mesure de l'évolution du trait de côte.

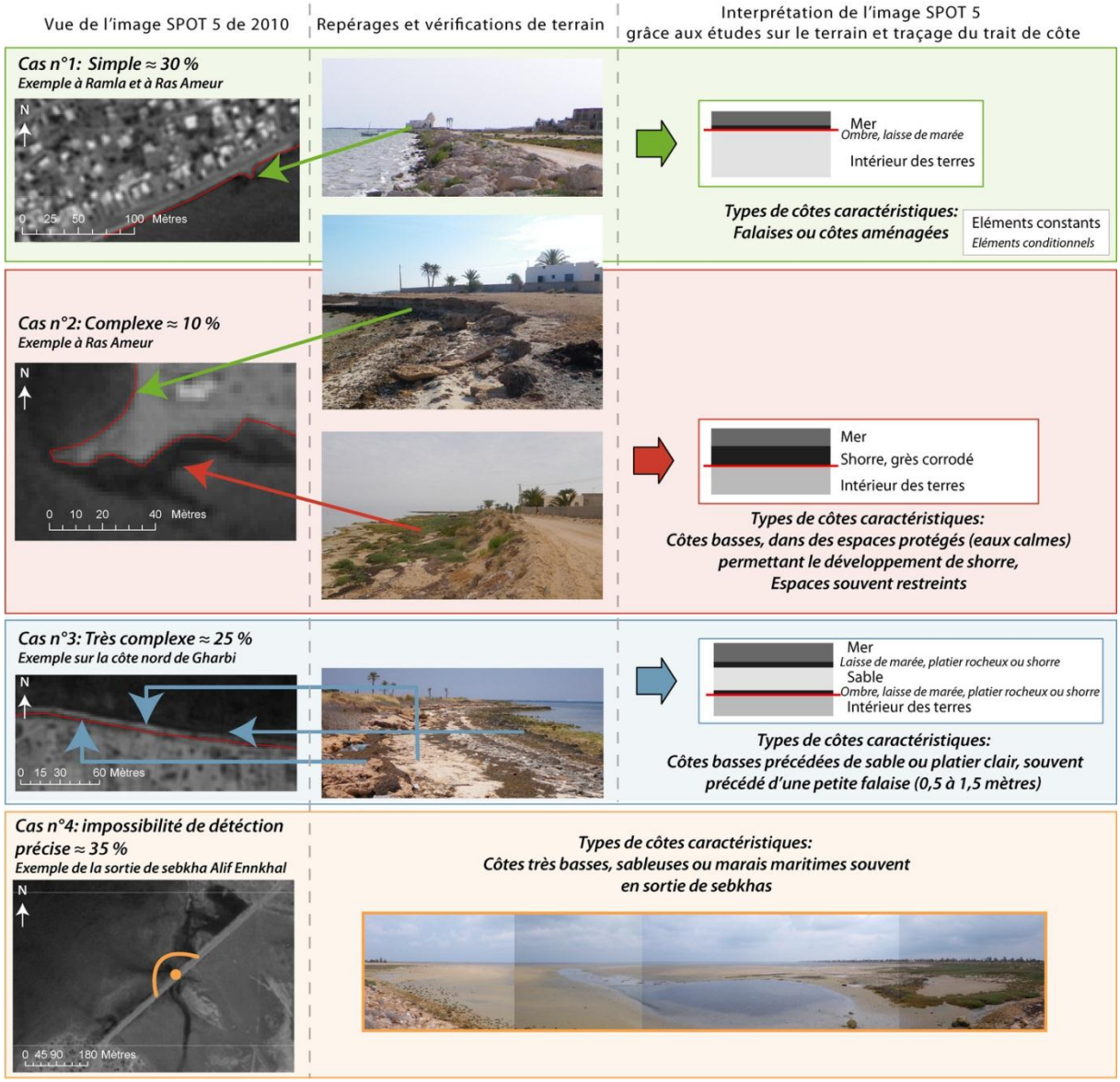



***Figure 57: Détection du trait de côte par interprétation et vérifications de terrain***

Les espaces dont la côte correspond au cas n°4 de la Figure 57, ainsi que ceux ayant été définis grâce à la carte topographique de 1973 seront analysés de manière qualitative uniquement. A ces deux exceptions s'ajoutent des espaces souvent très localisés sur les photographies aériennes de 1963 pour lesquels la ligne de côte reste floue et difficilement discernable. Le choix de ne conserver que certains espaces pour l'étude quantitative s'explique par la marge d'erreur qui est beaucoup plus faible pour les zones où le trait de côte est précisément identifiable par rapport aux autres espaces de l'archipel. La marge d'erreur des espaces retenus pour l'étude quantitative correspond à l'erreur RMS due au calage des images qui est de 1,05m, auquel il faut ajouter une erreur d'interprétation estimée à 1 pixel soit 2,5 m. L'erreur totale est donc de 6 mètres par image soit 12 mètres au total, ce qui

correspond à la marge d'erreur obtenue dans d'autres études utilisant des photographies aériennes (Durand, 1998; Gaillot & Chaverot, 2001; Martinez del Pozo & Anfuso, 2008; Halouani *et al.*, 2012). Dans les zones non concernées par la détection précise du trait de côte, la marge d'erreur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres ce qui est parfois supérieur à l'évolution du trait de côte de l'archipel.

La mesure de l'évolution du trait de côte a été réalisée grâce au module du DSAS 4.3 (Digital Shoreline Analsys System) disponible pour ArcGis 10. Ce module permet de mesurer la distance entre les lignes de côte qui ont été tracées et ainsi de connaître l'évolution du trait de côte entre deux dates selon différentes méthodes (Thieler *et al.*, 2009). Ici les deux méthodes qui seront utilisées sont valables lorsque le trait de côte a une évolution linéaire (Genz *et al.*, 2007; Thieler *et al.*, 2009) ou que seules deux lignes de côte sont disponibles comme c'est le cas dans cette étude. Il s'agit d'abord de la méthode du mouvement net du trait de côte (Net Shoreline Movment) qui mesure la distance entre les deux traits de côte les plus éloignés temporellement, valeur qui peut être positive (avancée de la côte) ou négative (recul de la côte). Ensuite, la méthode des points extrêmes (End Point Rate) qui divise le NSM par le temps séparant le trait de côte le plus récent et le plus ancien ce qui permet de connaître l'évolution du trait de côte par an. Les lignes de côte sont donc tracées pour 1963 et pour 2010 et sont intégrées à une *Geodatabase*. Les lignes de côtes sont accompagnées d'une table attributaire contenant automatiquement leur nom, leur type géométrique (ici polylignes), leur longueur, la date (1963 et 2010) et la marge d'erreur (6 mètres). Une ligne de référence est également dessinée et intégrée à la *Geodatatbase*. Celle-ci permet de tracer automatiquement des transects qui croisent les deux lignes de côte et de mesurer ainsi la distance qui les sépare en considérant la ligne de 1963 comme la plus ancienne et la ligne de 2010 comme la plus récente. Les transects sont dessinés perpendiculairement à cette ligne de référence (Figure 58). Le tracé de cette ligne de référence est donc primordial pour une bonne évaluation de la dynamique côtière (Thieler *et al.*, 2009). En effet, un mauvais positionnement peut entraîner une surestimation de l'évolution de la côte et fausser les résultats de l'analyse. Dans cette étude, les lignes de référence ont été tracées à la main, le plus parallèlement possible à la côte de 2010, d'une part en évitant autant que possible les transects aberrants qui surestiment les distances (un espace situé sur la côte sud-ouest de l'île de Gharbi est concerné et ne sera donc pas pris en compte dans l'étude ; cf : p. 160) et d'autre part de manière à ce que les transects ne se croisent pas (sur les côtes non linéaires). Dans cette étude, ils sont espacés de 10 mètres et mesurent 100 mètres de long. Après avoir créé toutes les lignes et

paramétré les transects (longueurs et distance entre eux), les mesures et calculs de l'évolution de la côte décrits précédemment peuvent être lancés. Le logiciel fournit un tableau contenant l'ensemble des transects en ligne et les différents calculs et mesures en colonnes qui permet de quantifier l'évolution du trait de côte. Dans cette étude la méthode du Net Shoreline Movment (NSM) est utilisée (Figure 58).

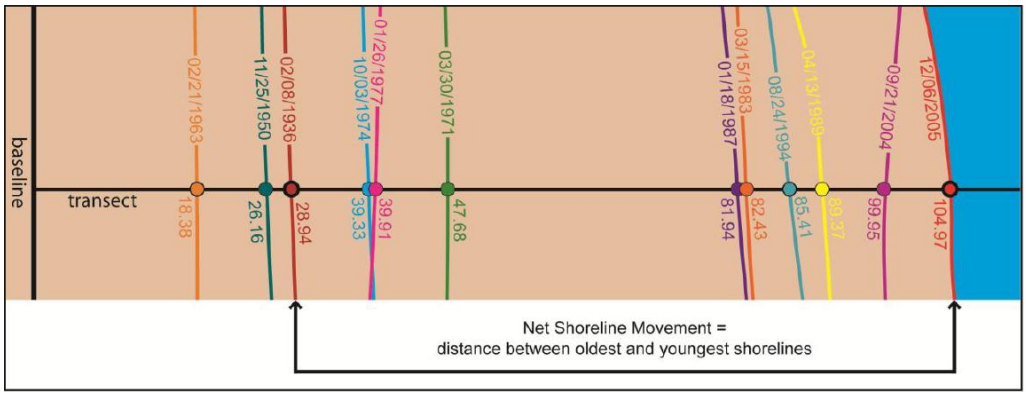



***Figure 58: Le "Net Shoreline Movement" ou NSM est la distance en mètre entre le trait de côte le plus récent et le trait de côte le plus ancien (Tiré de Thieler et al., 2009)***

La méthode de détection du trait de côte est basée sur la combinaison de photo-interprétation et de nombreux repérages de terrain. Les six zones où la marge d'erreur ne dépasse pas ±6m, sont d'une qualité suffisante pour mesurer l'évolution de la position du trait de côte entre 1963 et 2010. Les espaces pour lesquels la marge d'erreur est plus importante ne sont pas pris en compte dans cette étude de quantification.

## 2. Mesure de l'évolution de la côte et facteurs explicatifs d'échelle locale

Les zones côtières où l'erreur de détection du trait de côte n'excède pas ±6 mètres peuvent être séparées en six zones différentes (Figure 59). Ces six zones sont déterminées car la côte est détectée précisément et de manière continue sur au minimum 3 kilomètres. A l'intérieur de ces zones, les espaces où le trait de côte ne peut pas être détecté précisément sont relativement courts et dépassent rarement le kilomètre.

Les résultats de la mesure de l'évolution de la côte dans l'archipel de Kerkennah seront présentés zone par zone en fonction des facteurs principaux qui influencent la position du trait de côte. Ainsi, les côtes sud-ouest de l'île Gharbi (Figure 59 - A), la façade sud-est de la même île (Figure 59 - B), celles de sa côte nord (Figure 59 - C) et enfin celles de la zone de Sidi Fonkhal de l'île de Chergui (Figure 59 - F) sont très peu habitées et les dynamiques sédimentaires qui influencent le plus l'évolution de la position de la côte sont naturels (dérive littorale, litho-stratigraphie, topographie...). Ensuite les côtes sud de l'île de Chergui (Figure 59 - D) et celles de la zone touristique entre le pont d'El Kantara et Borj El H'sar (Figure 59 - E) sont à l'inverse très fortement anthropisés et les dynamiques littorales y sont très fortement perturbées.

Les résultats sont présentés de la même manière pour chaque espace d'étude. Un premier paragraphe situe la zone d'étude, explique ses spécificités et décrit les dynamiques générales d'évolution du trait de côte. Un second paragraphe décrit l'évolution de la côte de manière précise et tente d'apporter des explications d'échelle locale à ces évolutions. Il s'agit de définir des facteurs de vulnérabilité qui, en s'additionnant, ont un impact sur l'évolution de la côte. Pour ce faire plusieurs figures et graphiques seront nécessaires :

- Une première figure présente l'évolution de la côte grâce à :

  - Une petite carte de localisation faisant référence à la Figure 59.

  - Une carte montrant le trait de côte en 2010 et en 1963 avec des éléments de l'occupation du sol en 2010. Des repères numérotés sont présents pour faciliter les repérages entre la carte et le graphique présent sur la figure. La distance entre chaque repère est de 200 mètres. Sur cette carte les zones bleues sont celles qui n'ont pas pu être prises en compte dans l'étude précise de mesure de la côte pour différentes raisons : impossibilité de détection

précise de la côte à l'une des deux dates du fait de la mauvaise qualité des images ou du caractère très plat de certains espaces tels que décrit précédemment (cf : Figure 57, p. 151).

- Un graphique montrant l'évolution de la côte entre l'année 1963 et l'année 2010 sur lequel des bâtons représentent chacun un tronçon de 10 mètres de côte comme décrit précédemment. Les bâtons rouges montrent une évolution négative de la côte c'est-à-dire une érosion côtière, un recul de la côte face à la mer. A l'inverse, les bâtons verts montrent une évolution positive de la côte ; c'est-à-dire une avancée de la terre sur la mer. La marge d'erreur, qui est de ±6 mètres, est également représentée en hachuré gris. L'évolution du trait de côte des tronçons dont les valeurs sont comprises entre +6 et -6 mètres est considérée comme non significative. En effet, le mouvement détecté peut être dû à l'erreur de calage des photographies aériennes comme à une erreur dans le tracé de la côte.

- Un tableau récapitulatif de l'évolution de la côte entre 1963 et 2010.

- Des photographies et des transects peuvent s'ajouter lorsque cela sera jugé utile pour une bonne compréhension de la zone d'étude. Leur localisation est précisée sur la figure d'évolution du trait de côte. Ceci implique des allers retours fréquents entre les différentes figures présentées pour chaque zone d'étude.

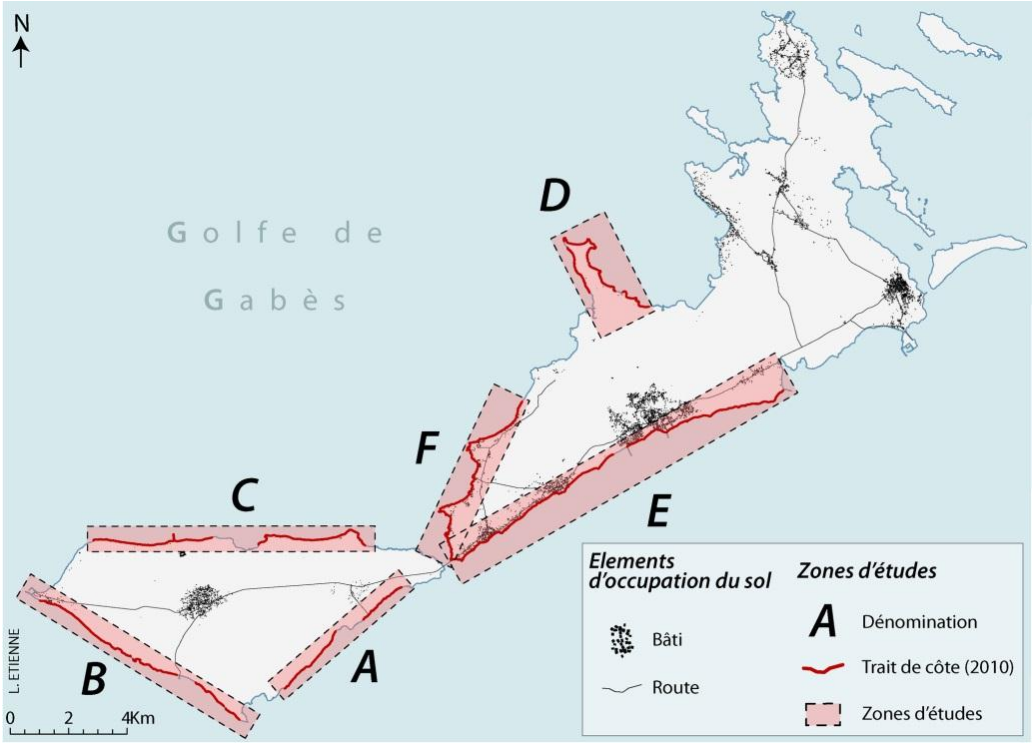



***Figure 59: Présentations des zones où l'erreur de détection du trait de côte est de ±6 mètres et figures correspondantes***

## 2.1. Des côtes naturellement vulnérables

### 2.1.1.Evolution des côtes sud-est et sud-ouest de Gharbi

- **Localisation des zones d'études et description des côtes**

La côte sud-est de l'île de Gharbi est étudiée sur 4120 mètres pour lesquels la détection du trait de côte est suffisamment précise pour obtenir une marge d'erreur de ±6 mètres. Pour l'analyse du DSAS, les transects servant à mesurer l'évolution de la côte ont été placés tous les 10 mètres donc 412 transects seront ici utilisés pour décrire l'évolution de la côte. La zone d'étude est divisée en deux sous zones, l'une appelée partie sud, qui mesure 2590 mètres et l'autre partie nord, qui mesure 1530 mètres. Ces sous zones sont séparées par l'exutoire de la sebkha El Ejlija conformément au cas de figure n° 4 de la Figure 57 p. 151 et, accolée à cet exutoire, un espace relativement court pour lequel le trait de côte n'a pu être correctement détecté (Figure 60 A – zone bleue). Sur l'ensemble du linéaire côtier, aucun aménagement anthropique n'est visible, ni enrochement, ni digue par exemple. La côte est orientée sud-est sur l'ensemble du linéaire côtier et les côtes y sont relativement basses. La partie sud de la zone d'étude est composée de côtes basses entre les repères 1 et 6, puis entre les repères 11 et la fin de la partie sud. Ces côtes sont rocheuses et basses. Entre les repères 6 et 10, s'élèvent de petites falaises, de 0,5 à 2 mètres de hauteur. La partie nord est bordée de petites falaises dont la hauteur est comprise entre 0,5 et 2 mètres.

Les taux d'évolution du trait de côte sont très majoritairement négatifs. Seuls 10 tronçons (sur 411) ont des valeurs positives ce qui ne représente que 2,4% de la côte étudiée (Tableau 8). De plus, ces valeurs positives ne dépassent pas 1,85 mètre donc sont comprises dans la marge d'erreur et ne sont pas significatives. Dans cette zone, ces valeurs positives non significatives sont dues à des erreurs de détection de la côte. La proportion de valeur d'érosion est très largement majoritaire et représente 97,6% de la côte étudiée (Tableau 8). Ces valeurs d'érosion peuvent être significatives ou non. Les valeurs significatives négatives représentent 48,1% de la côte étudiée et 100% des valeurs significatives. Cela signifie que 48,1% des valeurs mesurées par le DSAS sont inférieures à -6 mètres ou que 48,1% de la côte étudiée est en recul significatif. Le recul maximal sur la côte sud-est de l'île de Gharbi est de 14,3 mètres en 47 ans soit 0,3 m/an. Lorsque seules les valeurs significatives sont prises en compte, l'érosion moyenne est de -8,6 mètres ou 0,18 m/an en moyenne ce qui est une valeur assez faible (Tableau 8).

***Tableau 8: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte sud-est de Gharbi entre 1963 et 2010***

| | **Valeurs brutes** | **/an pdt 47 ans** | **Pourcentage** | **% des valeurs significatives** |
|---|---|---|---|---|
| Nombre total de transects | 412 | | 100,00 | |
| Valeur maximale d'avancée de la côte (m) | 1,8 | 0,04 | | |
| Valeur maximale d'érosion (m) | 14,3 | 0,3 | | |
| Evolution moyenne (m) | -5,9 | 0,12 | | |
| Nombre de transects aux valeurs positives | 10 | | 2,4 | |
| Nombre de transects aux valeurs négatives | 402 | | 97,6 | |
| Nombre de transects aux valeurs nulles | 0 | | 0 | |
| **Valeurs significatives** | | | | |
| Nombre total de transects à l'évolution significative | 198 | | 48,1 | 100 |
| Nombre de transects à l'évolution non significative | 214 | | 51,9 | |
| Nombre de transects avec évolution positive significative | 0 | | 0 | 0 |
| Nombre de transects avec évolution négative significative | 198 | | 48,1 | 100 |

La côte sud-ouest de l'île de Gharbi est étudiée sur une longueur totale de 6690 mètres (Tableau 9). L'orientation générale de la côte est sud-ouest et très peu d'aménagements anthropiques y sont répertoriés. Outre quelques habitations entre les repères 1 et 2 de la Figure 60, une digue et quelques *Cherfia*, se trouve, à l'extrémité nord de la zone d'étude, le port de Sidi Youssef, aménagement anthropique majeur qui a deux fonctions, d'une part la pêche, et d'autre part l'arrivée du bac en provenance de Sfax plusieurs fois par jour. La modernisation de ce port a nécessité des apports conséquents de matériaux sur 250 mètres environ sans compter la création des digues. Nous ne présentons pas ici les valeurs de l'avancée de la terre sur la mer car elles sont largement supérieures aux valeurs d'érosion de la côte qui ne seraient plus lisibles sur le graphique. La création de cette infrastructure portuaire a certainement eu des répercussions sur les dynamiques de redistribution des sédiments le long de la côte.

Six zones n'ont pas été étudiées sur la côte sud-ouest de l'île de Gharbi pour les mêmes raisons que précédemment (difficulté d'interprétation des images) sauf pour la petite zone située entre les repères 26 et 27 de la Figure 60 qui n'a donc pas été retenue pour l'étude. Ici, la ligne de base n'a pu être tracée de manière parallèle à la côte ce qui a pour conséquence de surestimer les valeurs d'évolution.

***Tableau 9: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte sud-ouest de Gharbi entre 1963 et 2010***

| | **Valeurs brutes** | **/an pdt 47 ans** | **% du total** | **% des valeurs significatives** |
|---|---|---|---|---|
| Nombre total de transects | 669 | | 100 | |
| Valeur maximale d'avancée de la côte | 2,9 | 0,062 | | |
| Valeur maximale d'érosion | 32,2 | 0,68 | | |
| Evolution moyenne | -8,63 | -0,18 | | |
| Nombre de transects aux valeurs positives | 34 | | 5,1 | |
| Nombre de transects aux valeurs négatives | 635 | | 94,9 | |
| Nombre de transects aux valeurs nulles | 0 | | 0 | |
| **Valeurs significatives** | | | | |
| Nombre total de transects à l'évolution significative | 442 | | 66,1 | 100 |
| Nombre de transects à l'évolution non significative | 227 | | 33,9 | |
| Nombre de transects avec évolution positive significative | 0 | | 0 | 0 |
| Nombre de transects avec évolution négative significative | 442 | | 66,1 | 100 |

Le linéaire côtier connaît une évolution majoritairement significative puisque 66,1% des transects ont des valeurs comprises entre -6 et +6 mètres ce qui signifie que 33,9% de la côte n'a pas évolué entre 1963 et 2010. L'ensemble des valeurs significatives sont négatives c'est-à-dire que la côte est touchée par une érosion importante. Elle est finalement soit érodée sur les 2/3 de la zone d'étude, soit en relative stabilité sur 1/3 de la zone d'étude (Tableau 9). Aucun transect montrant une avancée du trait de côte significative n'a été relevé. Les espaces ayant des valeurs positives sont répartis sur l'ensemble de la côte sur 60 mètres consécutifs et les valeurs sont comprises entre 0 et 2,9 m. La valeur maximale d'érosion est de 32,2 mètres en 47 ans soit 0,68 m/an en moyenne et la moyenne du recul significatif est de -11,8 mètres entre 1963 et 2010 ou -0,25 m/an en moyenne (Tableau 9).

Toute la zone sud-ouest de l'île de Gharbi est caractérisée par des côtes basses et rocheuses composées de la croûte calcaire Pléistocène (Figure 61 - A) qui sont souvent taillées en une microfalaise de quelques centimètres de haut. D'après la carte topographique de 1973 et nos observations, les terrains jouxtant la ligne de côte diffèrent. Entre les repères 1 à 10 et 21 à 25 de la Figure 60, la côte est bordée par des espaces de palmeraie ou des parcelles agricoles. Le reste de la côte est bordé par des espaces dépourvus de végétation. D'après la carte de 1973, la zone comprise entre les repères 10 et 14 de la Figure 60 est bordée par un espace de sebkha

- **Des rythmes d'érosion faibles ou moyens sur des côtes aux matériaux solides**

Ces deux premières zones d'étude sont relativement simples à décrire. En effet, l'évolution de la côte y est plutôt homogène ainsi que les types de côte et la litho-stratigraphie. Les deux zones sont également non aménagées.

Cependant, sur la côte sud-est de Gharbi, plusieurs espaces sont particuliers. D'abord dans la partie sud, la zone située entre les repères 6 et 10 n'a pas connu d'évolution significative, à l'inverse des côtes alentour. Cette caractéristique est due, au moins en partie, à la constitution de la côte qui correspond à des petites falaises entre les repères 6 et 10 de la Figure 60 – A, tandis que les espaces alentour, qui ont connu une érosion significative, sont composés de côtes basses et rocheuses. La correspondance entre les taux d'érosion et le type de côte semble être importante le long de cette côte. Dans la partie nord, la configuration est la même qu'entre les repères 1 et 6 de la partie sud. Cependant, la relation entre les falaises de petite taille et les taux d'érosion n'est pas aussi marquée que précédemment. Le long de cette côte, l'aspect du graphique de la Figure 60 - B est moins linéaire et de petites zones d'érosion et de relative stabilité de la côte alternent. Cette différence de profil peut s'expliquer par la constitution de la côte et plus précisément par la position de la croûte calcaire dure de l'archipel. La relation particulière qui existe entre la position de la croûte calcaire et la variation des taux d'érosion sera détaillée plus particulièrement et plus précisément à la page 161 lors de la description de la côte nord de Gharbi.

La côte sud-ouest de l'île de Gharbi est également relativement simple à décrire car d'une part les types de côte y sont peu variés et d'autre part le graphique d'évolution de la côte montre des valeurs relativement similaires. Seul un espace se démarque, où sur près de 600 mètres les rythmes d'érosion sont plus faibles voire non significatifs. Il s'agit de l'espace compris entre les repères 10 et 14 de la Figure 60 - B. Comme expliqué précédemment, d'après la carte topographique de 1973 et nos observations récentes, cet espace est légèrement plus élevé qu'alentour et non sujet aux inondations telles que dans les sebkhas. Les côtes basses et rocheuses sont sujettes aux submersions marines lors des marées habituelles. L'érosion par corrosion est alors accentuée car les eaux marines sont piégées dans les cavités rocheuses y compris à marée basse. Ce processus donne lieu à des faciès côtiers spécifiques (Oueslati, 1986). Les Figure 61 - B et C montrent ce type d'érosion sur les côtes basses et rocheuses.

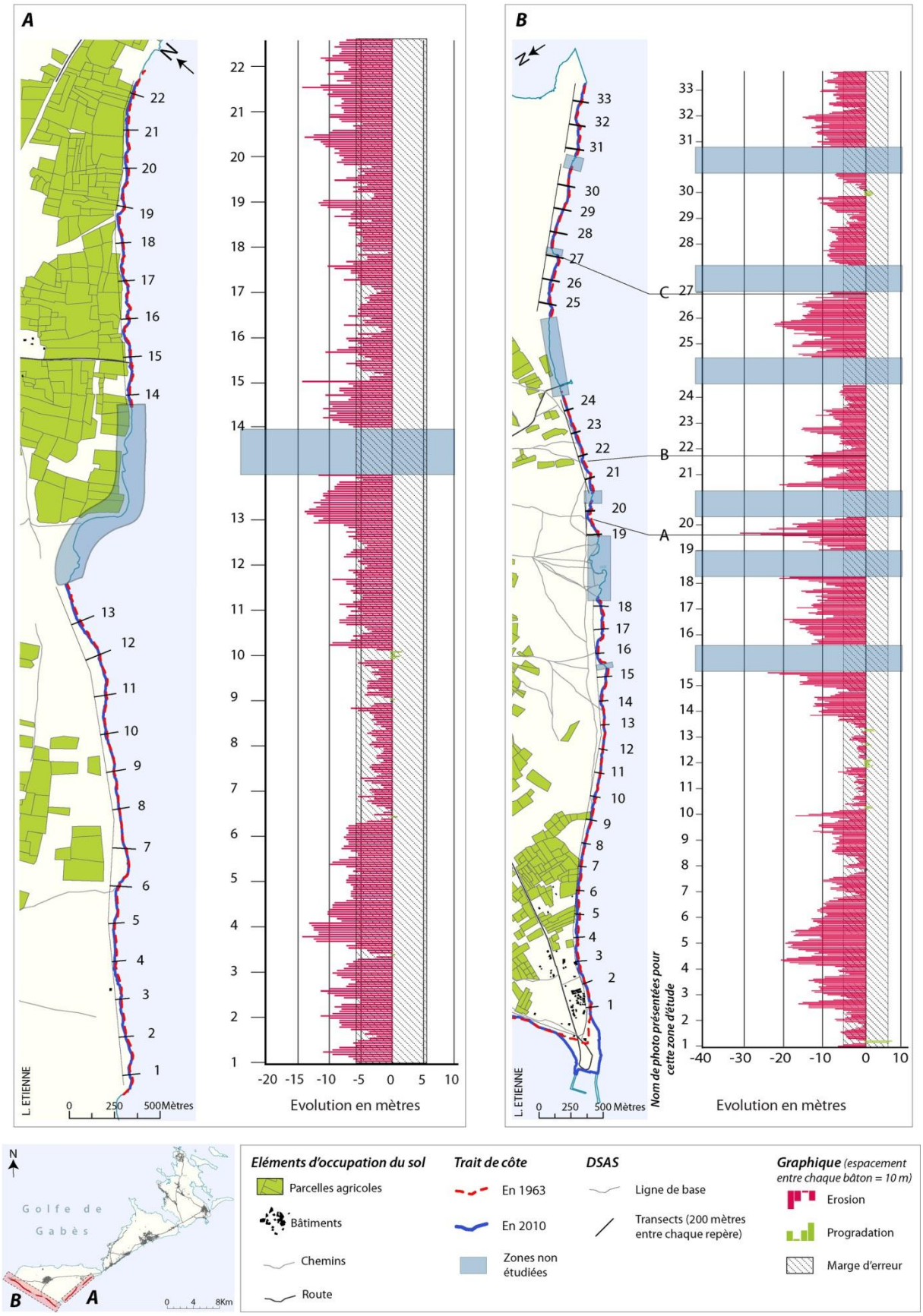



***Figure 60: Evolution de la côte sud-ouest de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies de la Figure 61)***

***Figure 61: Type de côte sur le littoral sud-ouest de l'île de Gharbi (Localisation : voir Figure 60)***
*A, Côte basse et rocheuse. B, Exemple de l'action de corrosion sur une côte basse. C, Exemple des effets de la corrosion.*

### 2.1.2.Evolution de la côte nord de Gharbi

- **Localisation de la zone d'étude et description de la côte**

La côte nord de l'île de Gharbi est étudiée sur une longueur totale de 7860 mètres (Tableau 10) qui sont entrecoupés par l'exutoire de la sebkha Henchir Salem (zone bleue de la Figure 62) pour lequel le trait de côte n'a pu être défini avec précision car la côte est très basse et la transition terre / mer particulièrement complexe à définir. L'espace étudié est donc

découpé en 2 sous zones d'étude qui comportent très peu d'aménagements. La première est située à l'ouest (des repères 1 à 20) ; seules deux digues y sont présentes. La seconde sous zone, à l'est (des repères 23 à 42) de l'exutoire de la sebkha, dont le littoral est peu aménagé et ne comporte que deux aménagements en dur. Il s'agit, d'une part, d'un ouvrage d'écrêtement des crues, construit en travers d'un large ravin débouchant dans la mer. Les marques d'érosion en aval y sont importantes (Figure 63 – C et D). D'autre part l'exutoire de la sebkha Henchir Salem est barré par une route qui modifie son fonctionnement normal.

Sur la partie ouest de la zone étudiée, l'évolution de la côte est mesurée sur 4070 mètres tandis que pour la partie est, elle l'est sur 3790 mètres. Sur la partie ouest de la zone d'étude, les côtes sont composées de petites falaises et de côtes basses (Figure 64 - E). Dans la partie est, appelée Jorf, la situation est plus contrastée et a été précisément décrite par Oueslati (1986). En partant du point 23 jusqu'au point 34, les falaises sont de plus en plus hautes pour atteindre les 10 mètres d'altitude. La plateforme d'abrasion littorale de ces hautes falaises est parfois couverte d'éboulis qui ne sont parfois pas discernables du reste de la falaise sur l'image SPOT 5. Ceci entraîne un biais dans la détection de cette portion de côte en 2010. Pour l'année 1963, l'information reste invérifiable et le pied de l'éboulis est donc utilisé comme trait de côte (Bonnot-Courtois & Levasseur, 2003). Après le point 34 et jusqu'au point 40, la hauteur des falaises décroit et la partie la plus à l'est de la zone d'étude est composée de côtes rocheuses basses (Figure 64 - J). Les taux d'érosion / avancée du trait de côte sont plus hétérogènes que pour les deux zones précédentes. Ils s'échelonnent entre +9,6 et -27,6 mètres entre 1963 et 2010. Ces valeurs témoignent d'une dynamique différente de celle des zones précédentes.

Sur les deux zones d'étude, les espaces connaissant une évolution non significative sont majoritaires et représentent 58,8% de l'ensemble de la zone. De ce fait, 41,2% du linéaire étudié a une évolution significative qu'elle soit positive (minoritairement) ou négative (majoritairement). La côte est donc majoritairement en phase de régression (96,6% des valeurs significatives). Cette érosion significative de la côte atteint en moyenne sur cet espace -11,3 mètres ou 0,24 m/an en moyenne depuis 47 ans. Cependant les taux d'érosion sont plus importants dans la partie est de la zone d'étude et atteignent en moyenne -12,85 mètres ou 0,27 m/an en moyenne depuis 47 ans tandis que ceux de la zone ouest atteignent 9,6 mètres ou 0,2 m/an en moyenne depuis 47 ans. L'évolution significative positive de la côte concerne seulement 11 transects (ou 3,4% des valeurs significatives).

***Tableau 10: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte nord de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010***

| | **Valeurs brutes** | **/an pdt 47 ans** | **% du total** | **% des valeurs significatives** |
|---|---|---|---|---|
| Nombre total de transects | 786,00 | | 100,00 | |
| Valeur maximale d'avancée du trait de côte | 9,61 | 0,20 | | |
| Valeur maximale d'érosion | 27,56 | 0,59 | | |
| Evolution moyenne | -5,41 | -0,12 | | |
| Nombre de transects aux valeurs positives | 119,00 | | 15,14 | |
| Nombre de transects aux valeurs négatives | 665,00 | | 84,61 | |
| Nombre de transects aux valeurs nulles | 2,00 | | 0,25 | |
| **Valeurs significatives** | | | | |
| Nombre total de transects à l'évolution significative | 324,00 | | 41,22 | 100,00 |
| Nombre de transects à l'évolution non significative | 462,00 | | 58,78 | |
| Nombre de transects avec évolution positive significative | 11,00 | | 1,40 | 3,40 |
| Nombre de transects avec évolution négative significative | 313,00 | | 39,82 | 96,60 |

- **Des rythmes d'érosion variés en fonction de la litho-stratigraphie et du type de côte**

Les données obtenues et présentées sur le graphique de la Figure 62 peuvent être décrites en 2 temps : tout d'abord les zones d'avancée du trait de côte, significative ou non et ensuite les données d'érosion, significative ou non.

Les espaces montrant une avancée du trait de côte concernent 119 transects soit 15,1% de l'ensemble des transects, ils se répartissent sur l'ensemble de la côte nord de Gharbi avec une majorité sur la partie ouest. La majorité de ces transects sont compris dans la marge d'erreur, ce qui signifie que les taux d'évolution détectés sont potentiellement dus aux erreurs liées au calage des photographies aériennes et à l'erreur de dessin de la ligne de côte.

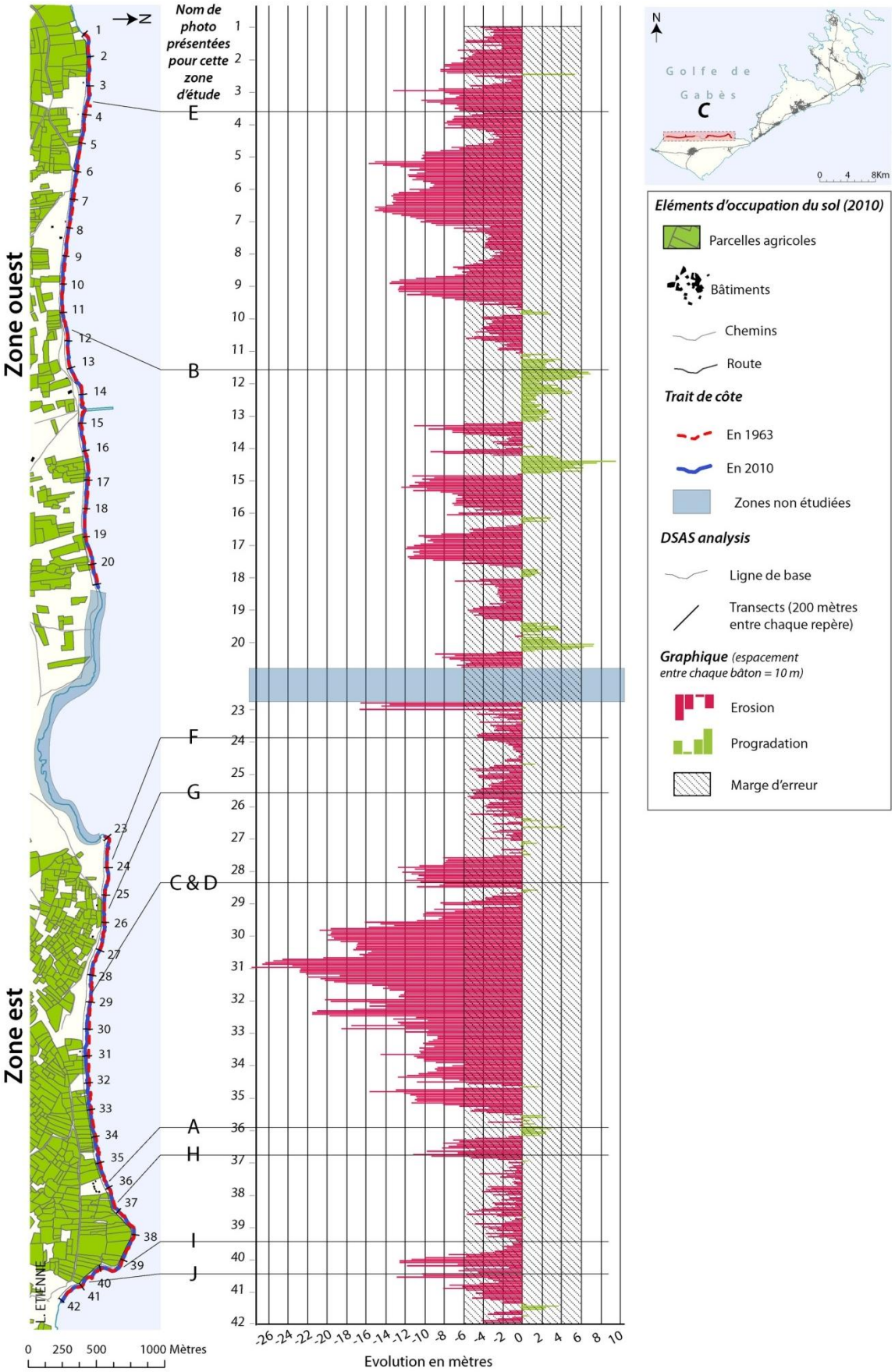



***Figure 62: Evolution de la côte nord de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies sur la Figure 63 et Figure 64)***

Dans la partie est, les zones d'avancée du trait de côte sont toutes comprises dans la marge d'erreur. Cependant l'une d'entre elles est différente des autres car elle concerne un tronçon de côte plus important qui représente environ 100 mètres continus de linéaire côtier. Cet espace est situé entre les repères 35 et 36 de la Figure 62. Sur la carte, entre ces deux repères, sont situées 6 maisons qui ont été construites récemment. Sur le terrain, cette portion de côte est remarquable car un remblai « sauvage » constitué de terre, de débris de construction et de route y a été érigé sans doute dans le but de prévenir l'érosion de la côte qui menace les habitations (Figure 63 - A).

Sur la partie ouest, le linéaire côtier est plus régulièrement concerné par des zones relativement longues d'avancée de la côte. Le plus long d'entre eux atteint près de 200 mètres (majoritairement non significatif). Trois de ces espaces d'avancée du trait de côte ont parfois des valeurs significatives qui peuvent concerner jusqu'à 30 mètres de côte. Deux de ces zones sont concernées, comme précédemment, par une action ou une perturbation anthropique. C'est le cas entre les repères 14 et 15 de la Figure 62 où une digue a été construite. L'impact de cette digue est visible sur le graphique avec, à l'est, un espace où les sédiments se sont accumulés et à l'ouest, un espace en érosion. Cette configuration s'explique car la digue bloque le transport des sédiments par la dérive littorale qui circule d'est en ouest sur les côtes nord de l'archipel de Kerkennah (Oueslati, 1995).

***Figure 63: Aménagements sur la côte nord de l'île de Gharbi (Localisation : Figure 62)***
*A, Remblaiement devant des habitations. B, Remblaiement réalisés pour protéger la piste. C et D, Ouvrage récent d'écrêtement de crue*

A l'ouest de la digue, entre les repères 11 et 13, une longue zone d'avancée du trait de côte est à mettre en relation avec des remblais composés de sable (Figure 63 - B) mis en place pour protéger la piste qui longe le littoral. Le troisième espace concerné est situé entre les repères 19 et 20 de la zone ouest et la progradation est liée à des dépôts de matériel provenant des transects limitrophes.

Les espaces en érosion sont très majoritaires et peuvent être mis en relation avec les types de côte observés sur le terrain. Le cas de la partie ouest de la côte nord de l'île de Gharbi est relativement simple car le littoral est composé de côtes basses à micro falaises taillées dans la croûte calcaire (qui surplombe les argiles mio-pliocènes) qui constitue la couche la plus dure de l'archipel (Figure 64 - E). Dans la partie la plus à l'est de la zone d'étude, la côte est submergée à chaque marée et la croûte calcaire est érodée à la fois par l'action mécanique mais aussi chimique de l'eau de mer lorsque des petites quantités d'eau sont bloquées dans les interstices (Oueslati, 1994).

Dans la zone est, les côtes sont principalement à falaises. Juste à l'est de l'exutoire de la sebkha Henchir Salem, les falaises sont de plus en plus hautes. Lorsqu'elles sont hautes de 1 mètre au maximum, la croûte calcaire est atteinte par la marée (Figure 64 - F) comme entre les repères 23 et 26 de la Figure 62. L'érosion n'est pas significative, le rythme d'érosion est faible car les matériaux atteints par la mer lors des marées hautes sont solides et peu sujets à une érosion rapide.

En avançant vers l'est, les falaises sont hautes (plus de 2mètres) et ce sont les argiles mio-pliocènes (cf : p. 75), constituant une formation litho-stratigraphique particulièrement sensible à l'érosion, qui sont attaquées par les vagues (Figure 64 - G). La présence d'une formation fragile en pied de falaise favorise le processus d'érosion par encoche-éboulement et donc le recul rapide de la côte. Cependant, bien que les falaises soient déjà hautes entre les repères 26 et entre 27 et 28 de la Figure 62, les taux d'érosion mesurés ne sont pas significatifs. Deux hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce phénomène. La première est liée aux limites du processus de photo-interprétation. En 2010 nous avons pu constater que la plateforme d'abrasion littorale était couverte d'éboulements (Figure 64 - G). Ces éboulements sont de la même couleur que la falaise et la photo-interprétation de l'image SPOT 5 de 2010 n'a pu être assez précise pour différencier les éboulements, pourtant présents. Une des limites de la photo-interprétation est clairement exposée ici sans que nous n'ayons pu trouver de solution pour pallier ce problème. La seconde hypothèse est liée à la présence de l'ouvrage d'écrêtement de crue (Figure 63 – C et D). La concentration des eaux

de pluie pour qu'elles soient déversées en un seul point explique la très forte érosion hydrique observée directement en aval de l'ouvrage. Les sédiments arrachés lors des épisodes pluvieux qui érodent la falaise par le haut, sont ensuite pris en charge par les courants et par la dérive littorale. A partir du repère 28 et jusqu'au repère 35 de la Figure 62, l'érosion mesurée est très importante et atteint -27,56 mètres ou 0,58 m/an en moyenne en 47 ans. Comme l'espace précédent, les falaises sont hautes et constituées, en hauteur, de la croûte calcaire en dessous de laquelle des argiles mio-pliocènes sont attaquées par la mer. Cette fois, la plateforme est plutôt dégagée ce qui a permis de bien distinguer le haut de la falaise.

En allant vers l'est, les falaises sont de plus en plus basses et les taux d'érosion, de moins en moins importants. Au niveau du repère 37, la transition entre érosion significative et non significative s'opère. Juste avant cette transition, la côte est toujours constituée de falaises, mais beaucoup moins hautes (moins de 1,5 mètres) qui sont composées à la base par un dépôt argilo-limoneux très fragile surmonté par du matériel grossier consolidé, riche en coquillages fossiles et contenant des fragments de la croûte calcaire remaniée (Figure 64 – H). Le faciès d'encoche éboulement de recul des falaises est alors très marqué. Cependant, après écroulement de la falaise, la formation grossière mais consolidée constitue une bonne protection contre les assauts de la mer. Cette configuration explique, du moins en partie, le recul moins important mais toutefois significatif des côtes.

Toujours plus à l'est, les taux d'érosion deviennent non significatifs et la physionomie des falaises se rapproche de celles qui bordent l'est de l'exutoire de la sebkha Henchir Salem (Figure 64 - F). Il s'agit de falaises plutôt modestes (moins de 2 mètres) pour lesquelles la croûte calcaire dure est battue par la mer, ce qui implique des rythmes d'érosion plus lent que lorsque les argiles fragiles se situent en pied de falaise (Figure 64 – I). Pour finir, après le repère 40, les taux d'érosion sont de nouveau significatifs sur environ 200 mètres qui correspondent à un espace de côtes basses où la croûte calcaire est submergée à chaque marée et en partie taillée en micro falaise de quelques centimètres (Figure 64 - J). Les processus d'érosion y sont les mêmes que ceux décrits le long de la côte sud-ouest de l'île de Gharbi.

***Figure 64: Types de côte présents sur la côte nord de Gharbi (localisation : Figure 62)***

*E, côte basse à micro falaise typique de la côte située à l'ouest de l'exutoire de la sebkha Henchir Salem. F, Située à l'est de l'exutoire de la sebkha Henchir Salem, les falaises sont de plus en plus hautes, ici une falaise d'environ 2 mètres. G, Toujours plus à l'est, les falaises sont de plus en plus hautes, celles-ci atteignent 7 mètres, la plateforme d'abrasion est couverte de blocs de démantèlement. H, Falaise d'environ 1 mètre. I, Falaises d'environ 1 mètre. J, côte basse rocheuse. 1, Croûte calcaire constituant la formation la plus dure de l'archipel. 2, Sables limoneux riches en faune marine contenant quelques fragments de la croûte calcaire démantelée. 3, Argiles mio-pliocènes. 4, Matériel consolidé plutôt grossier contenant des fragments de la croûte calcaire remaniée. 5, Dépôt argilo-limoneux beige.*

### 2.1.3.Evolution de la côte de Sidi Fonkhal

- **Localisation de la zone d'étude et description de la côte**

La presqu'île de Sidi Fonkhal est située sur la côte nord de l'île de Chergui. La côte y est étudiée sur une longueur totale de 6970 mètres dont les orientations face à la mer sont très variées (Tableau 11). La côte de la presqu'île de Sidi Fonkhal ne connaît aucun aménagement anthropique lourd et seules six *Cherfia* (cf : p. 80) sont visibles sur l'image Google Earth datant du 25 octobre 2010. Quelques habitations sont situées non loin de la côte et des protections individuelles y ont été repérées. Ces protections consistent en des murs à l'avant des propriétés ou des remblais composés de débits de chantiers.

Les types de côte sont variés et alternent entre côtes basses sableuses, rocheuses et falaises de très petite taille à maximum 2 mètres. La façade est de la presqu'île de Sidi Fonkhal est une côte découpée. Des petits caps qui s'avancent de quelques dizaines de mètres dans la mer caractérisés par une côte rocheuse parfois taillée en microfalaise alternent avec des petites plages de quelques centaines de mètres de long. Ainsi, les espaces situés au niveau des repères 3, 4 et 5, 7, entre les repères 8 à 9, 13, et 19 à 21 de la Figure 65 peuvent être considérés comme des petits caps. Les plages les plus sableuses sont toutes orientées à l'est y compris la grande plage située entre les repères 22 et 25 de la Figure 65.

***Tableau 11: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte Sidi Fonkhal entre 1963 et 2010***

| | **Valeurs brutes** | **/an pdt 47 ans** | **% du total** | **% des valeurs significatives** |
|---|---|---|---|---|
| Nombre total de transects | 697 | | 100,00 | |
| Valeur maximale d'avancée du trait de côte | 6,8 | 0,14 | | |
| Valeur maximale d'érosion | 40,7 | 0,87 | | |
| Evolution moyenne | -6,7 | -0,14 | | |
| Nombre de transects aux valeurs positives | 94 | | 13,5 | |
| Nombre de transects aux valeurs négatives | 602 | | 86,4 | |
| Nombre de transects aux valeurs nulles | 1 | | 0,1 | |
| **Valeurs significatives** | | | | |
| Nombre total de transects à l'évolution significative | 312 | | 44,8 | 100,00 |
| Nombre de transects à l'évolution non significative | 385 | | 55,2 | |
| Nombre de transects avec évolution positive significative | 1 | | 0,1 | 0,3 |
| Nombre de transects avec évolution négative significative | 311 | | 44,6 | 99,6 |

Sur la façade ouest, la côte est plus régulière. L'orientation des côtes varie d'ouest-nord-ouest entre les repères 27 et 28 de la Figure 65 à ouest-sud-ouest entre les repères 33 et 35 de la même figure. Entre ces deux espaces la côte prend une orientation sud-ouest. Les côtes sont constituées de falaises d'environ 1,5m entre les repères 27 et 30 de la Figure 65, ailleurs elles sont basses et rocheuses, le plus souvent taillées en microfalaises de moins de 0,5 mètre de hauteur. Parfois, les côtes sont composées des deux types de falaises : une microfalaise taillée dans du grès et submergée par les marées habituelles (plateforme d'abrasion) puis une falaise taillée dans du matériel meuble et pouvant atteindre 2 mètres.

Le trait de côte de la presqu'île de Sidi Fonkhal est marqué par une évolution très hétérogène et très largement négative. En effet, 86,4% des valeurs mesurées sont négatives (soit 6020 mètres sur 6970) et seulement 13,5% sont positives (940 mètres sur 6970). Un transect a une évolution nulle (Tableau 11). L'érosion maximale atteint 40,7 mètres en 47 ans soit en moyenne 0,87m/an entre les repères 2 et 3 de la Figure 65. Les valeurs significatives représentent 44,8% du total des valeurs ce qui signifie que 55,2% d'entre elles sont comprises dans la marge d'erreur et que la côte y est considérée comme stagnante. Au sein des valeurs significatives, 99,6% sont négatives et la moyenne de ces valeurs négatives significatives est de -12,7 mètres en 47 ans ou -0,27 m/an. Un seul transect a une évolution positive significative qui atteint 6,8 mètres. Cette valeur est par ailleurs totalement isolée.

- **Des rythmes d'érosion plus importants sur les façades nord et est que sur la façade ouest**

L'évolution de la position du trait de côte entre 1963 et 2010 est hétérogène sur la côte de Sidi Fonkhal. A l'inverse des zones déjà décrites, la relation entre type d'évolution et type de côte est moins évidente. Pour mieux comprendre, procédons par types de côte. La situation des plages de la façade est de la presqu'île, qui sont d'orientation est et sud-est, sera expliquée. Ensuite les petits caps qui les séparent seront décrits et l'évolution de la position du trait de côte expliquée. Enfin, les côtes beaucoup plus rectilignes de la façade ouest seront étudiées.

Les plages sont toutes orientées nord-nord-est sauf entre les repères 11 et 13 puis 15 et 18 de la Figure 65 où l'orientation est respectivement est et sud-est. Deux situations opposées apparaissent : certaines plages connaissent une érosion particulièrement forte pendant que d'autres semblent en équilibre puisque l'évolution de la côte n'est pas significative. Les plus forts taux d'érosion sont localisés le long des plages.

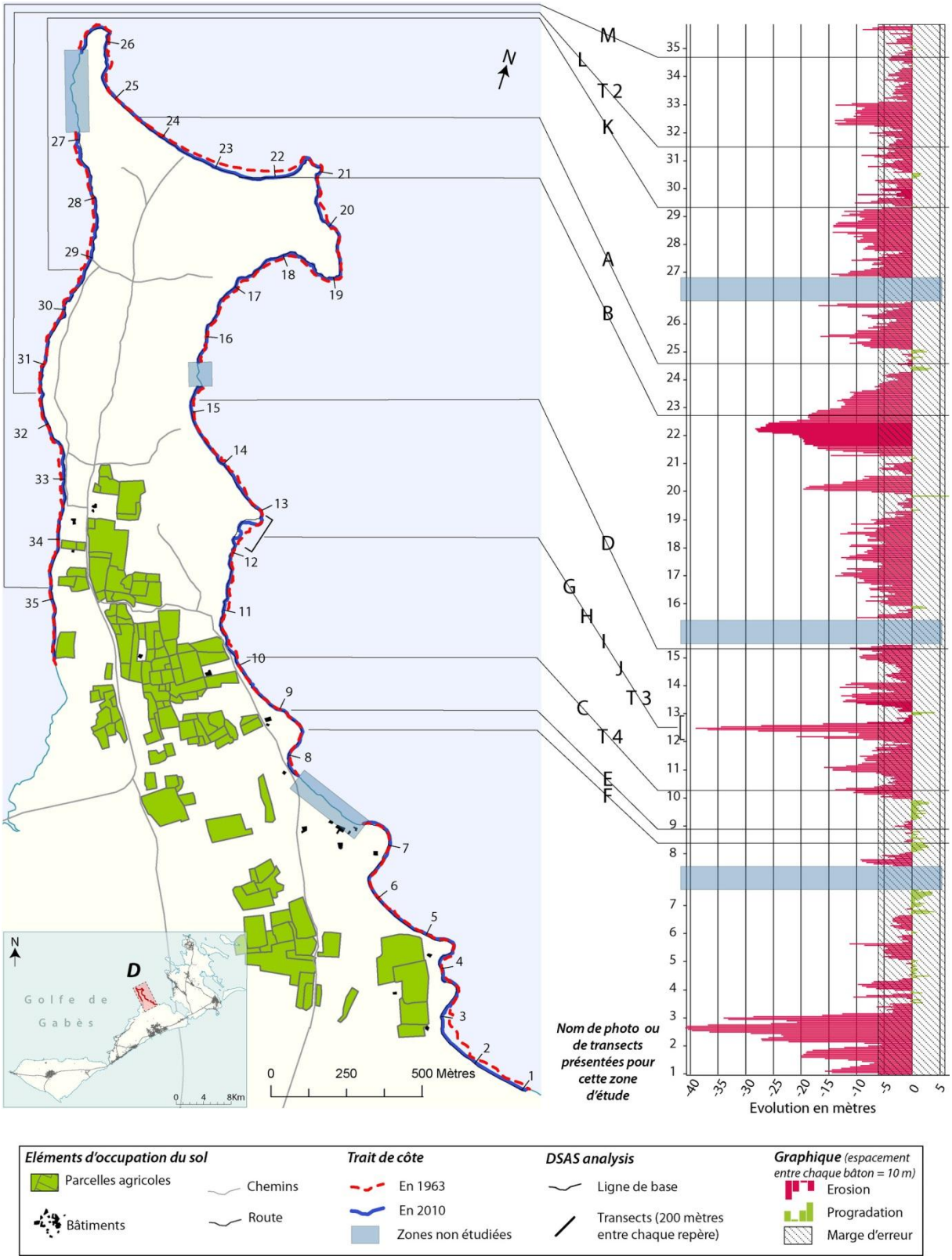



***Figure 65: Evolution de la côte de la presqu'île de Sidi Fonkhal entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies sur de la Figure 66, Figure 67, Figure 68 et Figure 69)***

Les points remarquables sont situés entre les repères 2 et 3, les repères 12 et 13 et les 22 et 23 de la Figure 65. Les taux d'érosion y atteignent plus de 35 mètres en 47 ans. Cependant la situation n'est pas uniforme et les taux d'érosion, sur des plages où l'orientation de la côte est la même, peuvent être très différents. Ainsi, entre les repères 5 et 6 de la Figure 65, l'évolution de la côte n'est pas significative, la position de la côte est donc considérée comme en relative stabilité. Entre les repères 9 et 12, l'érosion de la côte existe mais elle n'excède pas 15 mètres, de la même manière qu'entre les repères 14 à 18 ou 24 à 25.

Sur les plages, le sable est assez rare et les formations sous-jacentes sont souvent découvertes, au moins par endroits. Les plages qui subissent des phénomènes d'érosion intense sont toutes constituées, sous le sable, de matériel peu solide. Il s'agit soit de matériel meuble mais compact pouvant être taillé en microfalaise, soit de blocs de taille hétérogène issus de la désagrégation du grès sous-jacent. Le long de la grande plage du nord de la presqu'île, une couche rougeâtre apparaît sous le sable (Figure 66 - B). Cette couche rougeâtre est fragile et est, entre les repères 24 et 25 de la Figure 65, taillée en microfalaises (Figure 66 - A). Le long de cette plage et malgré les types de côte similaires, les profils d'érosion diffèrent entre une zone est (entre les repères 22 et 23) où les taux d'érosion sont très importants et une zone ouest (entre les repères 24 et 25) où les taux d'érosion sont bien moindre voire non significatifs. L'érosion moindre peut être expliquée par le déplacement des sédiments de la partie est de la plage vers la partie ouest via la dérive littorale. Cette hypothèse permet d'expliquer les différences observées. Cela aurait pour effet de ralentir l'érosion entre les repères 24 et 25.

Sur certaines plages, le sable est déposé sur du grès fragmenté. Le matériel sous-jacent est donc plus solide que dans le cas précédent, il casse l'énergie des vagues et peut également être remanié par la mer. La situation est identique juste après le repère 10 ou au niveau du repère 15 de la Figure 65. Une très faible quantité de sable forme une micro-dune (à peine quelques centimètres) sur laquelle se fixe de la végétation (Figure 66- Transect 4 et photo C). En allant vers la mer, la végétation disparaît et laisse la place à du sable sur lequel se déposent les laisses des marées habituelles qui sont visibles sur les photos C et D de la Figure 66. Parfois, comme c'est le cas sur le Transect 4, des plants de salicornes se développent à l'avant du sable ; les laisses de marées y sont alors présentes. Ce type de côte présente une érosion significative mais assez faible atteignant, près du repère 10, près de 15 mètres et près du repère 15, près de 10 mètres.

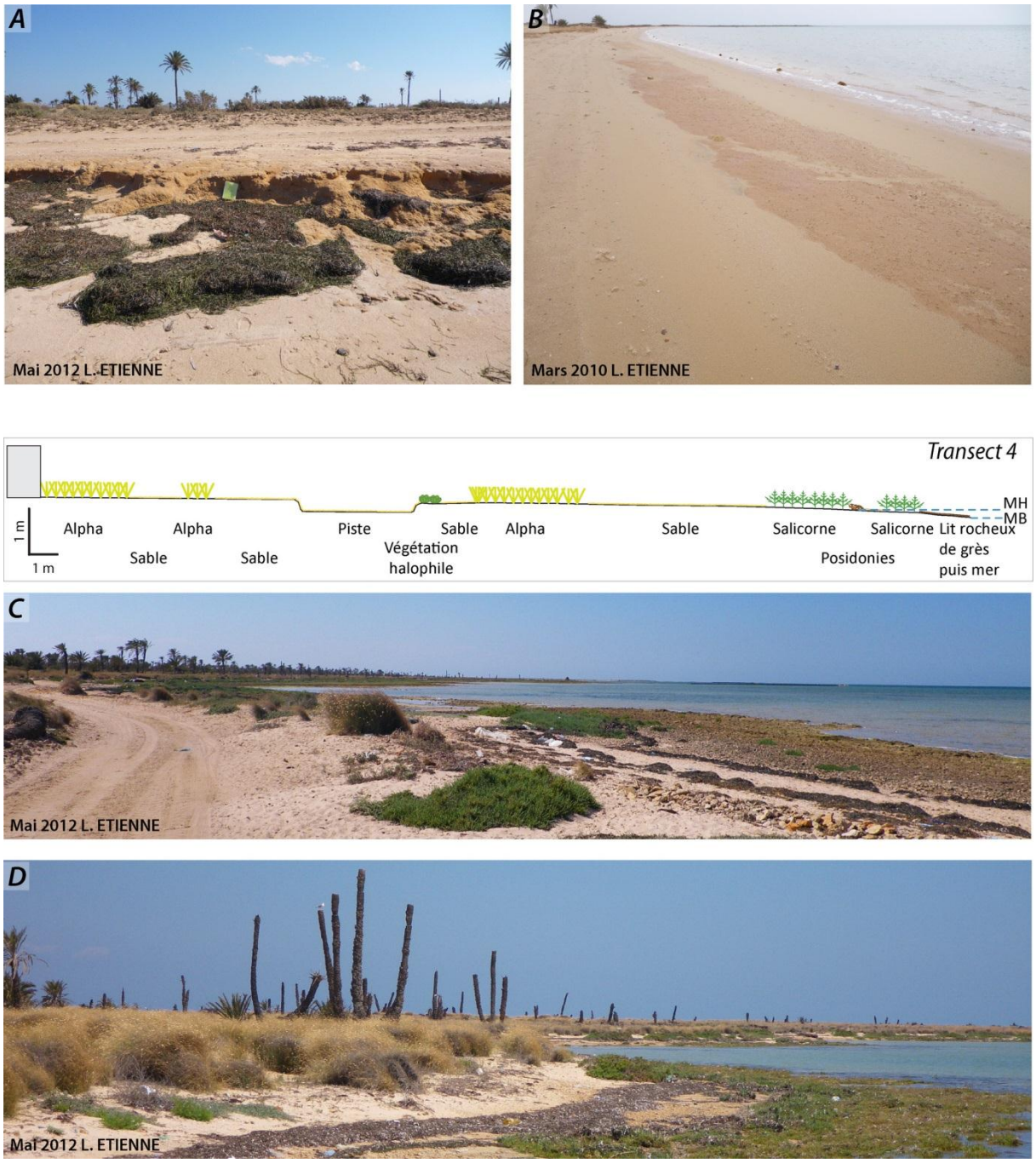



***Figure 66: Présentation des différents types de plages de la presqu'île de Sidi Fonkhal***
*A et B, la grande plage située au nord de Sidi Fonkhal dont les matériaux sous le sable sont meubles et parfois taillés en micro falaise. C, Photographie réalisée au niveau du transect 4. D, Plage dont les matériaux sous-jacents sont composés de grès ; remarquez la morts de nombreux palmiers au premier, second et arrière-plan de l'image. Transect 4 : repère fixe : muret devant une maison représenté par le rectangle gris.*

Toujours sur la façade est et nord de la presqu'île de Sidi Fonkhal, les plages sont séparées les unes des autres par des petits caps dépourvus de matériel sableux. Les côtes y sont le plus souvent taillées en micro falaises. Le petit cap situé entre les repères 8 et 9 est caractéristique et présente en effet une côte rocheuse sur laquelle les marques d'érosion par

corrosion sont très fréquentes (Figure 67 - E et F). Les valeurs d'évolution de ce type de côte sont très faibles et non significatives, donc la côte semble connaître un rythme d'érosion très lent. Les autres petits caps de la façade est de Sidi Fonkhal, situés au niveau des repères 4, 7, 19 et 21 de la Figure 65, sont tous de ce type. Certains sont en partie couverts d'une végétation halophile de type salicorne et tous ont des valeurs d'évolution non significatives.

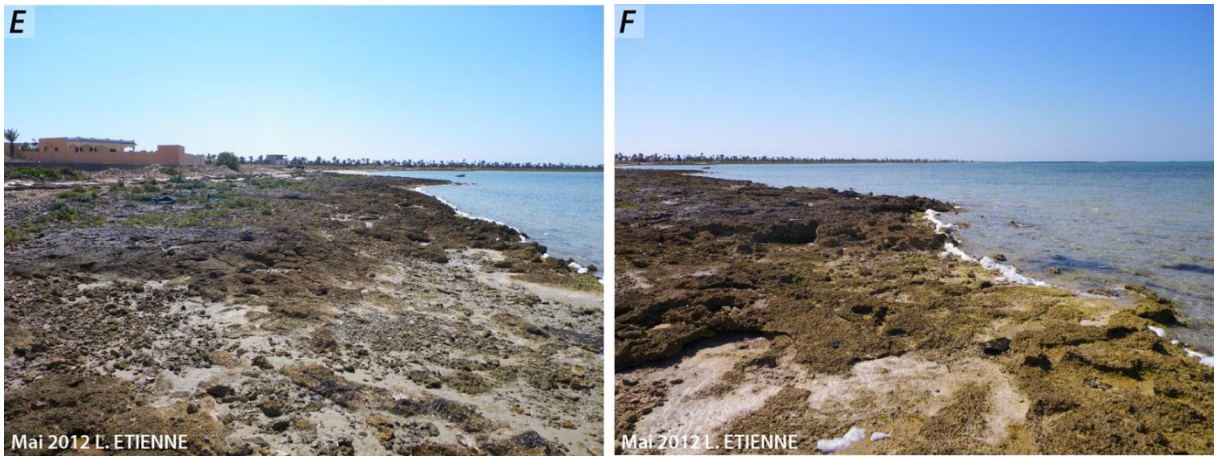



***Figure 67: Type de côte rocheuse sur la façade est de Sidi Fonkhal***
*E et F, Côtes rocheuses basses submergées par les marées et montrant des signes de corrosion.*

Le cas du cap compris entre les repères 12 et 13 de la Figure 65 est un peu particulier car les mesures indiquent une érosion très importante juste au sud du cap. En partant du repère 12 vers le repère 13, la côte change et connaît plusieurs évolutions : On trouve d'abord une microfalaise taillée dans un matériel meuble (Figure 68 – Ga et Ha) pour laquelle l'érosion avoisine les 10 mètres. En longeant la côte vers le nord, l'érosion devient très importante et dépasse les 35 mètres alors que la côte change de physionomie : l'estran est composé de blocs de grès en cours de désagrégation (Figure 68 – Gb et Ib) comme celui observé le long de certaines plages (Figure 66 – C et D). L'érosion y est cependant plus importante ici car les matériaux érodés et taillés en falaises sont meubles (Figure 68 – Gc et Ic). Le grès démantelé, une fois roulé par les vagues lors des tempêtes peut former un matériel efficace pour l'érosion mécanique de la côte qui est taillée en falaise pouvant atteindre 1 mètre et montrant des signes de recul (Figure 68 – Gc et Ic). En situation atmosphérique calme, ils peuvent parfois jouer un rôle d'amortissement des effets des vagues et ainsi ralentir l'érosion de la côte. Au niveau du repère 13, la côte est plus élevée et la falaise s'élève sur environ 2 mètres de hauteur. Des vestiges romains y sont en cours d'érosion et de désagrégation et des blocs issus de ces ruines sont directement battus par les vagues (Figure 68 – Gd, Jd et transect 3).

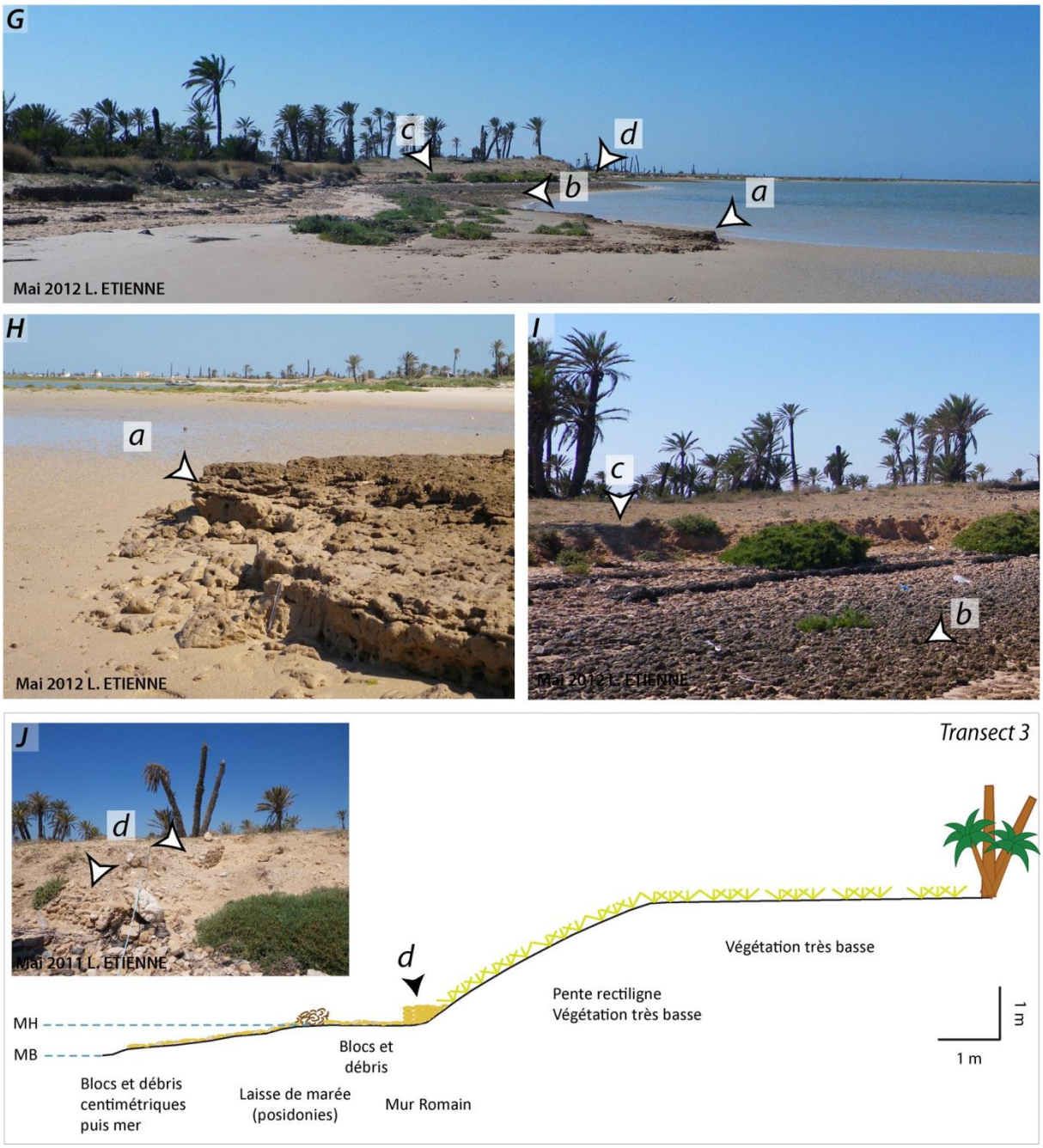



***Figure 68: Erosion et physionomie de la côte entre les repères 12 et 13 de la Figure 65***

*A, Vue d'ensemble de la côte entre les repères 12 et 13. B, microfalaise taillée dans du matériel meuble. C, microfalaise montrant un recul de la côte très important. D, vue en plan du transect 3. a, microfalaise taillée dans du matériel meuble. b, blocs centimétriques de grès favorisant l'érosion de la côte par action mécanique lors des tempête et amortissant les houles en situation atmosphérique calme. c, microfalaise montrant un recul de la côte très important. d, Vestiges romains en cours d'érosion et de désagrégation. Les blocs libérés amortissent les effets des houles habituelles.*

Sur la façade ouest de la presqu'île, la côte est bien plus linéaire et l'évolution de la côte plus simple à décrire car elle est plus homogène. Les côtes sont soit composées de falaises pouvant atteindre 1,5 mètre, soit de côtes basses et rocheuses et l'érosion, bien que majoritairement non significative peut atteindre près de 15 mètres. Deux espaces ont des évolutions significatives : entre les repères 27 et 29 puis entre les repères 32 et 33. Entre les repères 29 et 32 l'érosion est majoritairement non significative et enfin, entre les repères 33 et 35, la côte semble connaître des rythmes d'érosion très lents. Les côtes dont l'évolution est significative sont du même type que certaines plages décrites précédemment et dont l'estran est composé de blocs de grès démantelés et parfois de débris issus des vestiges romains érodés (Figure 69 – Transect 2 et L). L'estran est parfois précédé d'une falaise montrant des signes de recul important (Figure 69 - K). Les côtes dont l'évolution n'est pas significative sont composées de côtes rocheuses basses taillées en microfalaises et montrant des signes de corrosion (Figure 69 - M).

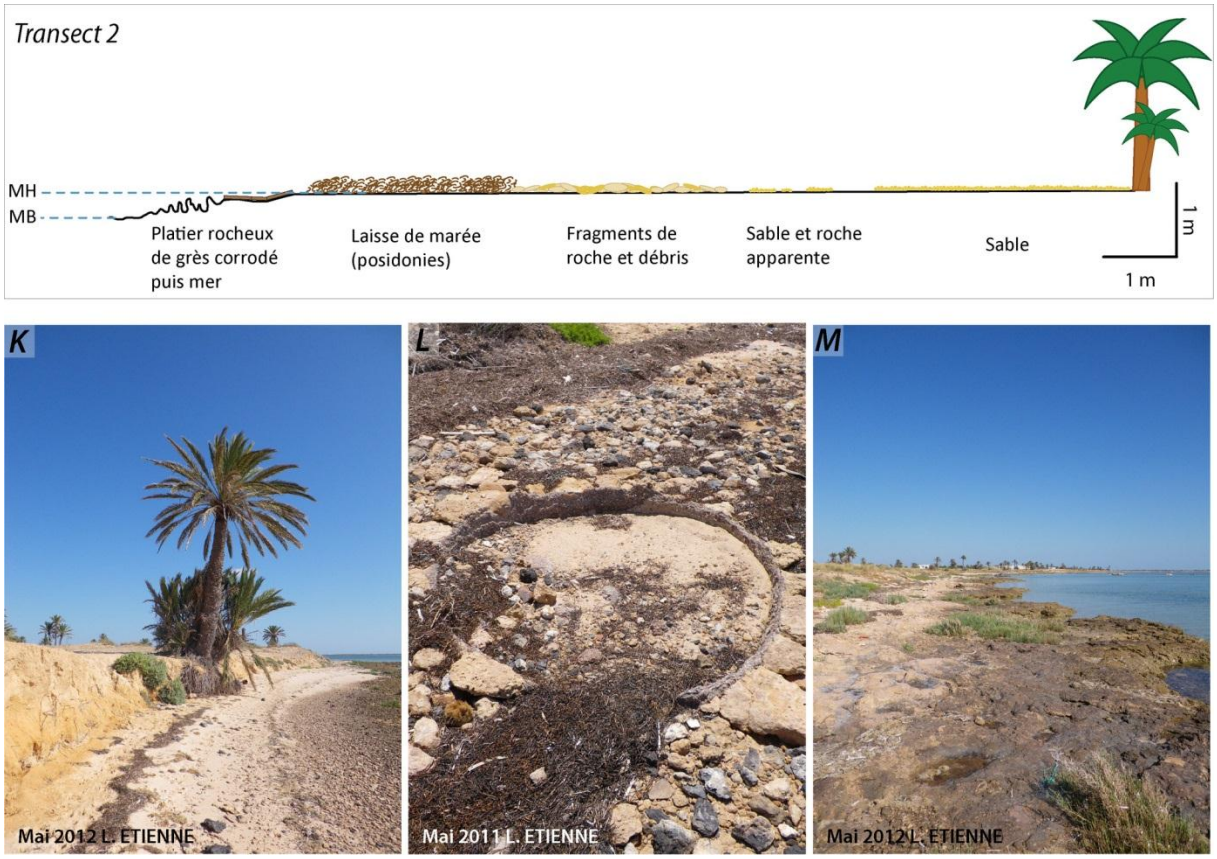



***Figure 69: Côte de la façade ouest de la presqu'île de Sidi Fonkhal***
*K, Palmier dans une falaise dont les racines sont dénudées par l'érosion marine. L, Vestige datant de l'époque romaine sur l'estran. M, Côte rocheuse avec marque de corrosion, en recul très faible et souvent compris dans la marge d'erreur.*

Pour conclure il semble que le **facteur lithologique** soit essentiel pour comprendre la vulnérabilité naturelle des 4 zones étudiées ci-avant. Toutes quatre présentent des dynamiques d'érosion plus ou moins rapide ou une relative stagnation de la côte. La présence d'une **couche dure battue par les vagues** freine les rythmes d'érosion au point que les valeurs ne dépassent pas 6 mètres de recul depuis 1963. A l'inverse, lorsque la côte présente une **couche tendre battue par les vagues**, par exemple les argiles mio-Pliocènes, **l'érosion est importante** voire très importante et peut atteindre 40 mètres. Entre ces deux extrêmes, les rythmes d'érosion sont moyens et le recul du trait de côte est compris entre 15 et 35 mètres. Outre la lithologie, les rythmes d'érosion s'expliquent également par la force et la fréquence des tempêtes, la dérive littorale, la force et la direction des houles habituelles, l'orientation de la côte, la profondeur et la largeur de la plage etc. L'**intervention de l'homme, faible**, ne semble pas avoir joué de manière déterminante sur les processus érosifs sur les zones décrites plus haut. Ici la vulnérabilité des côtes est grande lorsque des matériaux meubles sont battus par la mer et est faible lorsque des matériaux durs le sont.

## 2.2. La vulnérabilité accentuée par les aménagements anthropiques

### 2.2.1.Evolution de la côte sud de Chergui

- **Localisation de la zone d'étude et description de la côte**

La côte sud de l'île de Chergui qui est assez rectiligne est orientée sud-est sur l'ensemble du littoral. L'espace étudié s'étend sur une distance de 12480 mètres et les mesures d'évolution du trait de côte sont réalisées grâce à 1248 transects (Tableau 12). Un espace, situé entre les repères 33 et 34 de la Figure 70 n'est pas pris en compte dans l'étude car la côte n'a pu être précisément définie aux deux dates d'étude. L'ensemble du linéaire est caractérisé par la présence d'aménagements anthropiques qui seront détaillés dans le point suivant. La situation était très différente dans les années 1960. Les principales localités existaient déjà mais elles étaient plus petites. Ce phénomène d'extension urbaine le long du littoral sera décrit plus précisément dans le **Chapitre 7**. Ainsi les localités d'Ouled Yaneg, Ouled Kacem, Ouled Bou Ali, Ramla et Kellabine se sont étendues le long du littoral. De plus, des constructions nouvelles ont été bâties suivant l'axe de la route principale de l'archipel et donc plus ou moins selon celui du littoral. Ainsi juste après le pont d'El Kantara et jusqu'à Ouled Yaneg et entre les localités d'Ouled Yaneg et Ouled Kacem des villas ont été bâties. La

deuxième zone nouvellement bâtie a été nommée Bourous. Après la localité d'Ouled Kacem et jusqu'à celle d'Ouled Bou Ali, les habitations sont beaucoup plus rares. La localité de Ramla, centre administratif de l'archipel, s'est étendue jusqu'à rejoindre les localités d'Ouled Bou Ali à l'ouest et de Kellabine à l'est. Après Ramla, en partant vers l'est, les habitations sont très rares voire inexistantes.

L'évolution de la position du trait de côte est très hétérogène le long de la côte sud de l'île de Chergui. Les espaces en érosion alternent avec des zones d'avancée de la côte (Figure 70). En effet, 309 transects ont des valeurs positives, ce qui représente ¼ du total du linéaire (Tableau 12). 59 d'entre eux ont une évolution significative (soit 8,7% des valeurs significatives) c'est-à-dire que la côte a avancé entre 1963 et 2010. L'avancée maximale est atteinte au niveau du repère 35 avec une valeur de 17 mètres gagnés sur la mer en 47 ans. Malgré ces valeurs d'avancée importante, 75% des valeurs sont négatives (937 transects) et 49,9% de l'ensemble des transects ont une évolution négative significative c'est-à-dire montrant une érosion de la côte. Ce sont finalement 91,3% des valeurs significatives qui ont négatives. La valeur maximale d'érosion atteint 32 mètres en 47 ans (ou 0,68m/an) (Tableau 12) au niveau du repère 51 de la Figure 70.

***Tableau 12: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte sud de l'île de Chergui entre 1963 et 2010***

| | **Valeurs brutes** | **/an pdt 47 ans** | **% du total** | **% des valeurs significatives** |
|---|---|---|---|---|
| Nombre total de transects | 1248 | | 100,00 | |
| Valeur maximale d'avancée de la côte | 17 | 0,36 | | |
| Valeur maximale d'érosion | 32 | 0,68 | | |
| Evolution moyenne | -6,14 | -0,13 | | |
| Nombre de transects aux valeurs positives | 309 | | 24,8 | |
| Nombre de transects aux valeurs négatives | 937 | | 75,1 | |
| Nombre de transects aux valeurs nulles | 2 | | 0,1 | |
| **Valeurs significatives** | | | | |
| Nombre total de transects à l'évolution significative | 678 | | 54,3 | 100,00 |
| Nombre de transects à l'évolution non significative | 570 | | 45,7 | |
| Nombre de transects avec évolution positive significative | 59 | | 4,72 | 8,7 |
| Nombre de transects avec évolution négative significative | 619 | | 49,6 | 91,3 |

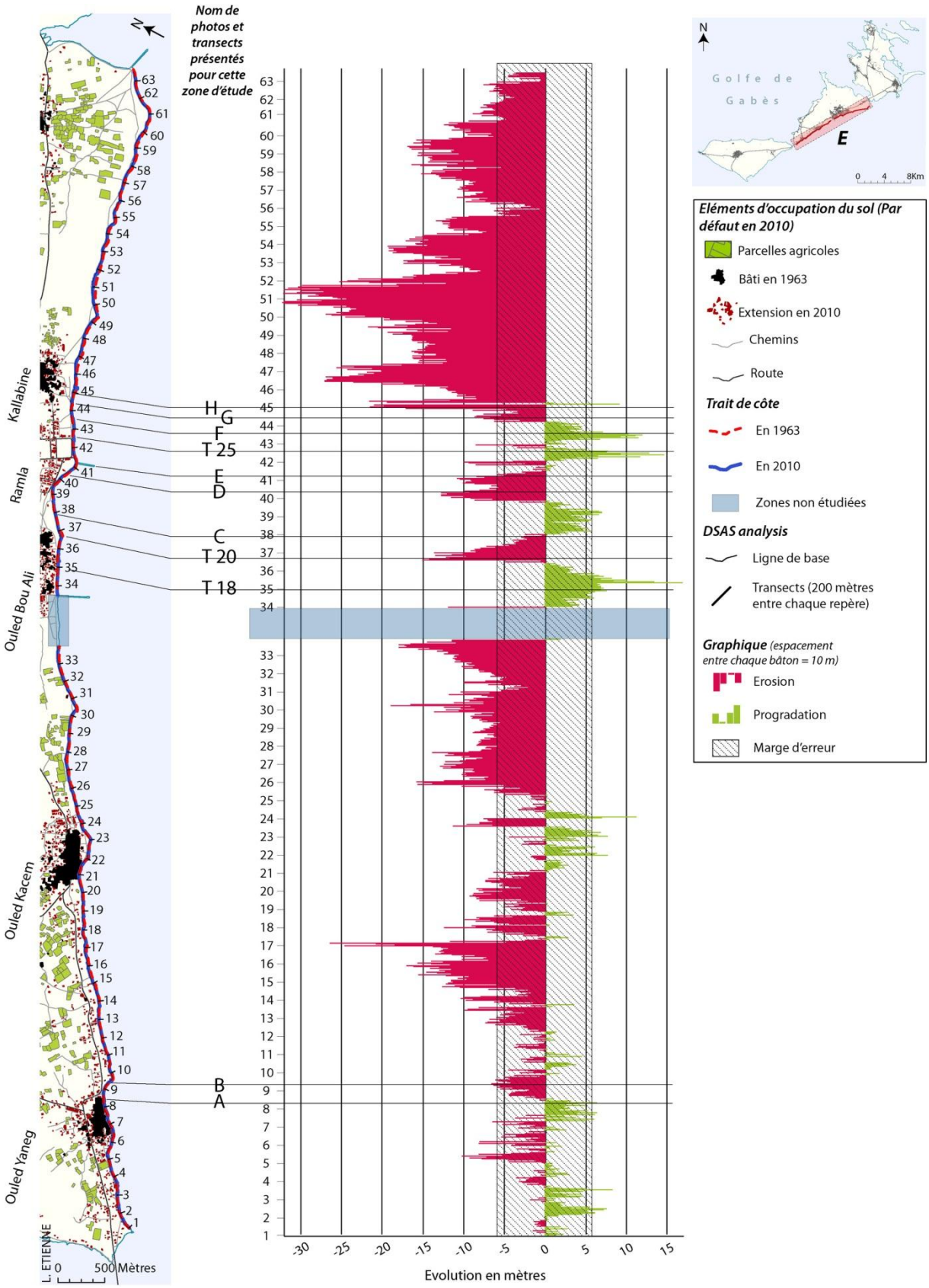



***Figure 70: Evolution de la côte sud de l'île de Chergui entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies et transects de la Figure 71, Figure 72, Figure 73 et Figure 74)***

- **Des rythmes d'érosion perturbés sur l'ensemble du littoral aménagé**

D'après les observations des précédentes zones d'étude, il semble que le type de côte ait une influence non négligeable sur l'évolution de la position du trait de côte. Ces paramètres sont, sur la côte sud de Chergui, modifiés par les actions de l'Homme. La physionomie de la côte et donc son évolution sont influencées par les aménagements anthropiques qui, par ailleurs, sont beaucoup plus présents en 2010 qu'en 1963. Dans la mesure du possible, la description sera réalisée en partant du repère 1 jusqu'au repère 63 de la Figure 70. Différents espaces se distinguent : (i) les localités anciennes pour lesquelles les aménagements sont réalisés par les habitants individuellement et entre lesquelles il n'y a pas d'aménagement (entre les repères 1 et 33) ; (ii) La zone aménagée par l'état de Ouled Bou Ali / Ramla / Kellabine où des enrochements et des remblais ont été installés (entre les repères 34 et 45) ; et enfin (iii) une zone dépourvue d'aménagement après le repère 45.

Des repères 1 à 13 et 21 à 25 de la Figure 70, les côtes montrent une évolution en dents de scie. Les taux d'évolution sont majoritairement non significatifs et alternent entre recul et avancée de la position du trait de côte. Les rythmes d'érosion sont donc très faibles et une relative stabilité caractérise la côte entre 1963 et 2010. Les deux espaces concernés sont situés le long des localités d'Ouled Yaneg et Ouled Kacem. Les côtes présentent une microfalaise puis le terrain s'élève très rapidement (Figure 71). La plupart des habitations sont situées légèrement en hauteur mais certaines d'entre elles sont très proches de la mer, en particulier au niveau des noyaux anciens des localités. En 2010, les protections individuelles réalisées (ou en cours de réalisation) par les habitants pour protéger leurs habitations sont fréquentes (Figure 71 - A et B). Il peut s'agir de murs en béton entourant l'ensemble de la propriété et protégeant également le terrain des assauts de la mer, ou de remblai constitué de débris de chantier, de terre… disposé en avant des propriété comme c'est le cas au second plan de la Figure 71 - A. En arrière-plan de cette même photographie, des maisons neuves sont discernables ; pour celles qui se trouvent en bordure de mer, elles sont pourvues de murs de protection qui ralentissent localement l'action érosive des vagues. Cependant ils perturbent les dynamiques naturelles et provoquent une érosion à côté de la zone protégée.

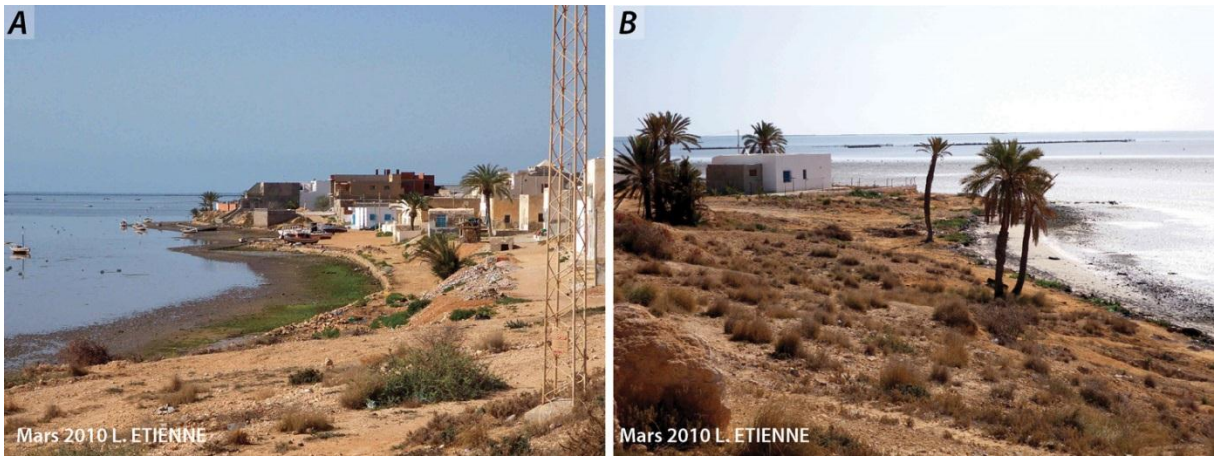



***Figure 71: Côtes aménagées d'ouvrages individuels (Localisation : Figure 70)***
*A, Côte où les constructions, parfois neuves, sont très proches de la mer. Côte taillée en petite falaise, au second plan des remblais composés de débris de chantiers. B, Même point de vue mais après rotation de 180°*

Le long de la côte de Bourous, c'est-à-dire entre les localités d'Ouled Yaneg et Ouled Kacem, le profil d'évolution est beaucoup plus homogène puisque la grande majorité des transects montrent une évolution négative significative. L'érosion est maximale au niveau du repère 17 et atteint 26,25 mètres en 47 ans ou 0,56m/an en moyenne. Les constructions de Bourous sont récentes et aucun bâtiment n'y était présent en 1963. Les habitations sont également situées légèrement plus en retrait du trait de côte c'est-à-dire généralement juste derrière la limite des 25 mètres imposée par les lois concernant le Domaine Public Maritime (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL)).

Le littoral longeant Ouled Bou Ali, Ramla et Kellabine, a subi des aménagements réalisés par l'Etat. Ces aménagements sont de deux types. D'abord des enrochements qui sont situés entre les deux digues présentes en 2010 près des repères 34 et 41 de la Figure 70. Ensuite des remblais qui sont visibles sur l'ensemble du littoral des trois localités. Depuis l'estran vers l'intérieur des terres, les enrochements sont toujours atteints par la mer lors des marées hautes. Ils s'élèvent sur environ 1 mètre ou 1,5 mètre de hauteur. En arrière de ces enrochements, une voie de circulation est présente. Cette voie est composée d'un remblai (Figure 72 - Transect 18 et C) et sert à la circulation automobile et piétonne.

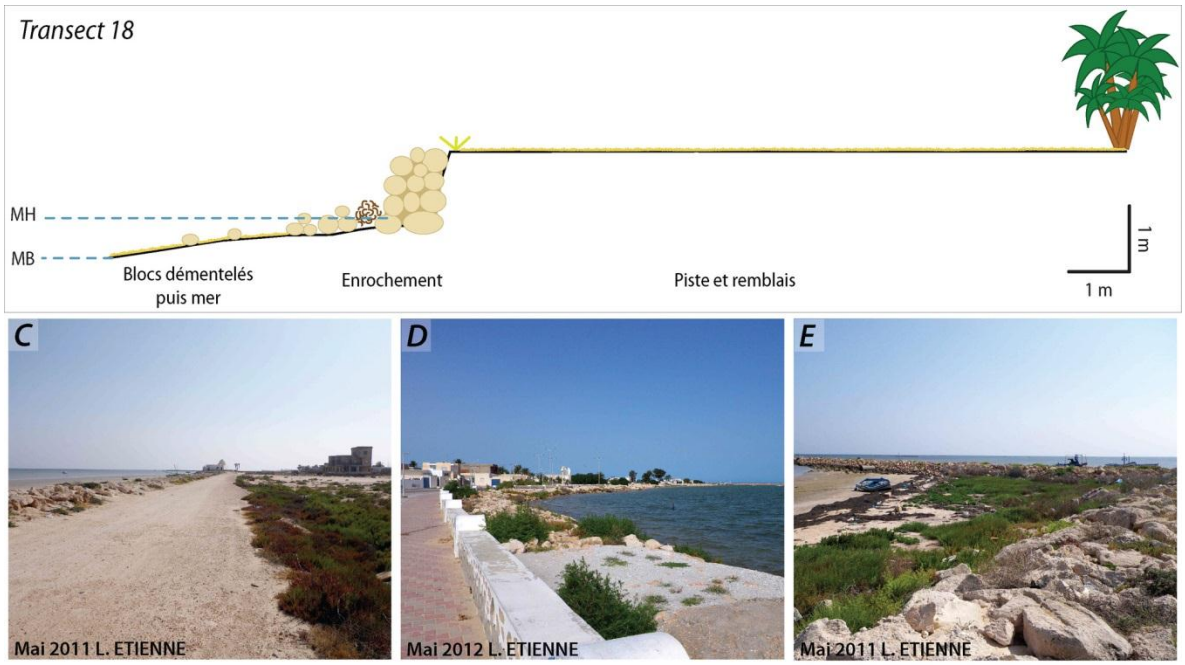



***Figure 72: Côtes aménagées par des enrochements sur le littoral bordant Ramla, entre les deux digues (Localisation : Figure 70)***

*C, Vue de la piste remblayée au centre ; A gauche, les enrochements puis la mer ; A Droite après le dénivelé, la sebkha située entre Ramla et Ouled Bou Ali. D, Vue de la promenade piétonne, A droite, les enrochements qui se poursuivent le long du littoral. E, Vue de l'est de la digue située au niveau du repère 41 de la Figure 70. Accumulation de sédiments le long de cet ouvrage et colonisation par la végétation halophile.*

En arrière de ce remblai, se trouve soit un terrain de type chott et sebkha comme c'est le cas entre les repères 37 et 39 de la Figure 70 ; soit le remblai se poursuit jusqu'à atteindre les zones d'habitation. Entre les repères 39 et 41 de la Figure 70, une promenade piétonne a été aménagée. Elle est accolée directement aux enrochements et se compose d'une voie pavée encadrée par deux murets (Figure 72 - D). Les profils d'érosion de la côte entre les deux digues sont très hétérogènes. Ils alternent entre avancée de la côte et érosion significative. En effet 25 transects, ont une évolution positive significative pour 38 qui ont une évolution négative significative. Deux espaces montrent une avancée de la côte liée à la présence des digues. Le premier est accolé à l'est de la digue située au niveau du repère 34 (Figure 72 - E). La même situation d'accumulation de sédiments existe au niveau de la seconde digue après laquelle les enrochements cessent. Les digues jouent un rôle majeur dans l'accrétion de la côte car elles forment un obstacle au déplacement de sédiments par la dérive littorale. Ces sédiments sont bloqués en arrière des digues (Figure 72 - E). Le second espace concerné par une avancée de la côte est situé au niveau des repères 38 à 40, c'est-à-dire juste devant la sortie de la petite sebkha située en Ouled Bou Ali et Ramla. La côte est ici enrochée et l'avancée du trait de côte ne peut être dû à une accumulation « mécanique » de sable comme

en arrière des digues. L'hypothèse la plus probable est que les enrochements ont été aménagés en avant du trait de côte tel qu'il était en 1963 c'est-à-dire que des remblais ont été apportés pour créer la voie de circulation puis les enrochements.

Toujours au niveau des localités Ouled Bou Ali / Ramla / Kellabine, deux espaces montrent des rythmes d'érosion significatifs de plus de 10 mètres. Le premier concerne l'espace entourant un mausolée situé entre les repères 36 et 37, qui n'a pas été protégé par des enrochements (Figure 73). Il subit actuellement une érosion marine et commence à être dégradé.

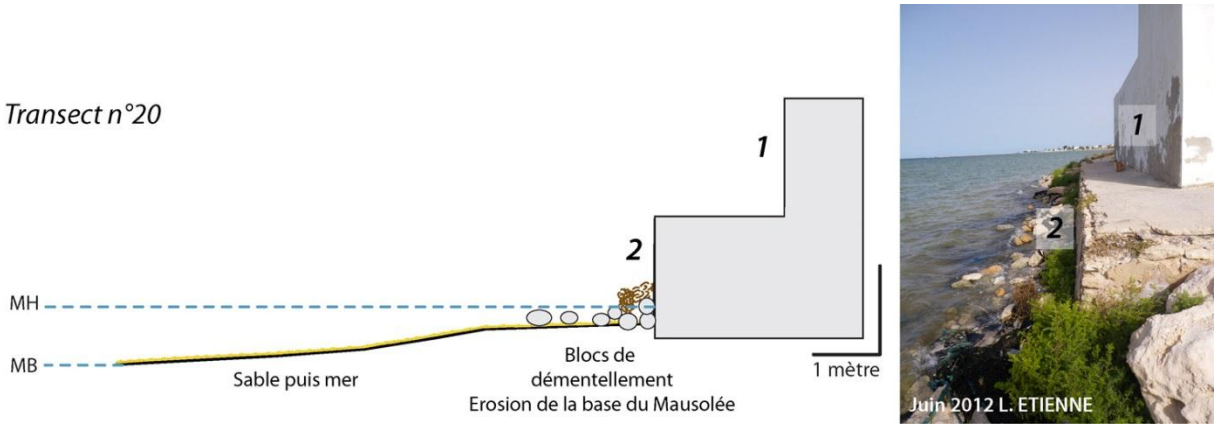



***Figure 73: Mausolée attaqué par l'érosion marine (Localisation : Figure 70)***

Le second espace montrant une érosion, est situé entre les repères 40 et la digue près du repère 41 de la Figure 70. Ici aussi la côte est enrochée et l'hypothèse la plus probable est que l'érosion y a été conséquente jusqu'à la mise en place des enrochements qui ont ralenti le rythme de l'érosion marine. Après la digue située au niveau du repère 41 de la Figure 70, les enrochements hauts cessent et sont remplacés par des remblais. Ils se poursuivent jusqu'au repère 45 de la Figure 70. Les côtes sont basses et les matériaux affleurant sont meubles. Afin d'éviter les submersions marines et l'érosion de la côte, la piste a été surélevée de quelques centimètres par du matériel tout venant (Figure 74 - F). Le transect 25 (Figure 74), montre un exemple de ce type de remblai. La particularité ici, est que la piste, qui est surélevée, est assez loin de la mer ce qui la protège. Ailleurs, la piste, bien que très large, jouxte la ligne de côte et présente des signes d'érosion très marqués. Les entailles dues à l'érosion concernent aussi bien le remblai que le substrat. Les profils d'érosion de cet espace montrent une alternance d'érosion et d'avancée de la côte importante. Quelques marques d'érosion sont également repérées en particulier à partir du repère 44 où les sédiments du remblai sont taillés en microfalaise (Figure 74 – G et H).

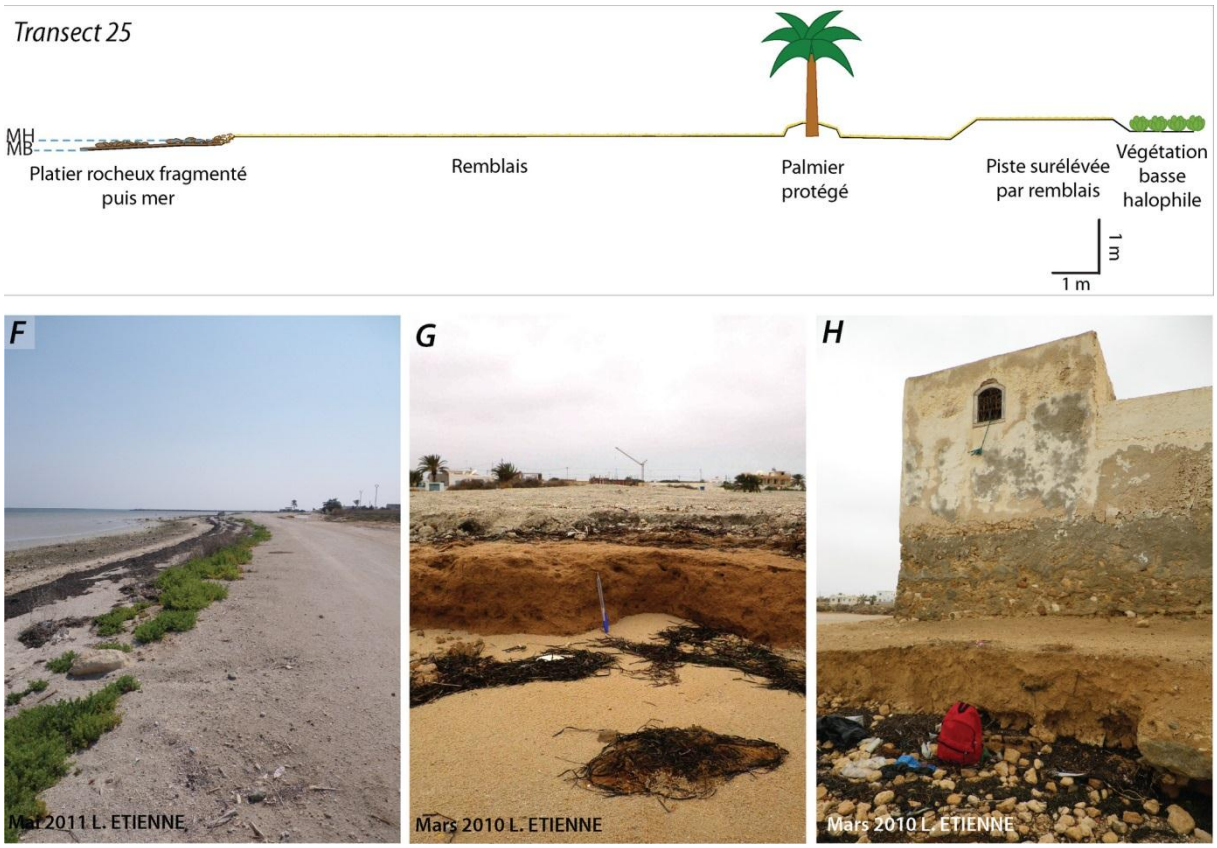



***Figure 74: Côtes basses couvertes d'un remblai de quelques centimètres de haut, parfois protégées par des enrochements et servant de piste (Localisation : Figure 70)***
*F, Vue du remblai de la piste à la sortie de la localité de Ramla. De couleurs blanchâtres et contenant des strombes et autres coquillages, les sédiments apportés sont surement d'origine marine. G, Microfalaise vive taillée dans des argiles, surmontées par les remblais servant de piste. H, Un mausolée dont les fondations sont atteintes par les eaux marines. Les sédiments sont taillés en une petite falaise d'environ 1 mètre.*

Si l'on considère les côtes situées au niveau des différentes localités précitées, il semble que l'évolution du trait de côte soit plus influencée par les interventions humaines que par les dynamiques naturelles, ce qui a conduit à une apparente stabilité de la côte. Ceci pourrait être dû à des protections individuelles anciennes et des remblaiements successifs. A l'inverse, dans les zones récemment construites ou non bâties, d'une part les habitations sont relativement éloignées du trait de côte et d'autre part les taux d'érosions depuis 1963 sont significatifs et parfois importants.

Après la localité d'Ouled Kacem et plus loin, entre les repères 45 et 63, les côtes sont dépourvues d'habitations et d'aménagements. Les côtes sont taillées en petites falaises atteignant rarement 2 mètres et étant plutôt comprises entre quelques décimètres et 1 mètre. Les profils d'évolution de la position du trait de côte sont très nets : aucun transect ne montre d'évolution positive et la très grande majorité d'entre eux ont des valeurs significatives

d'érosion. Par exemple, entre les repères 45 et 63 de la Figure 70, 85,6% des transects montrent une érosion significative et le maximum d'érosion de l'ensemble de la zone y est atteint. De la même manière, il n'existe pas d'aménagement entre les repères 25 et 33 (entre Ouled Kacem et Ouled Bou Ali) et 83,7% des transects montrent une érosion significative qui atteint 18,7 mètres entre 1963 et 2010 (ou 0,4 m/an). Ces valeurs peuvent être comparées avec celles des zones où les aménagements sont très peu importants voire inexistants des 4 premières zones d'étude présentées précédemment (Tableau 13). Les valeurs d'érosion significatives des espaces non aménagés sont largement supérieures sur la côte sud de l'île de Gharbi que sur celles des autres zones d'études. Notre hypothèse est que ces valeurs très élevées sont directement liées aux effets des aménagements qui perturbent de manière importante les dynamiques de redistribution des sédiments le long du littoral.

***Tableau 13: Pourcentage de transects montrant une érosion négative significative en zone non bâtie***

| **Zone d'étude** | **Valeur** |
|---|---|
| Gharbi sud-est (Zone A) | 48% |
| Gharbi sud-ouest (Zone B) | 66% |
| Gharbi nord (Zone C) | 40% |
| Chergui Sidi Fonkhal (Zone D) | 44% |
| Chergui sud (25-33 zone E) | 85,6% |
| Chergui sud (45-63 zone E) | 83,7% |

Il semble donc que, le long de la côte sud de l'île de Chergui, les dynamiques d'évolution de la position du trait de côte soient fortement influencées par les aménagements anthropiques qui peuvent ponctuellement et localement freiner l'érosion marine ou ralentir les rythmes d'érosion. Il semble que les aménagements individuels aient localement entrainés une apparente stabilité de la côte. Ce constat est visible sur le littoral des localités d'Ouled Yaneg et d'Ouled Kacem. Le long de la côte dont les aménagements sont les plus « durs » c'est-à-dire le long du littoral des localités d'Ouled Bou Ali et Ramla, elle montre une évolution en dents de scie avec un impact des digues qui semble important. En effet, elles ont permis l'accumulation de sédiments sur leur façade est. Des remblais ont été aménagés sur la côte et il semble que certains d'entre eux aient permis la conquête (ou la reconquête) de terrains aux dépens des hauts fonds.

### 2.2.2.Evolution de la côte de la zone touristique de Sidi Frej

- **Localisation de la zone d'étude et description de la côte**

La zone touristique de Sidi Frej est située sur la côte nord de l'île de Chergui. Plus précisément la zone étudiée s'étend du Pont d'El Kantara, qui relie les deux îles principales de l'archipel, au sud-ouest, aux vestiges romains de Borj el H'sar au nord-ouest. Elle s'étend sur 7220 mètres auxquels il faut ajouter 200 mètres qui ne sont pas pris en compte dans l'étude de mesure de l'évolution de la position du trait de côte. Ces 200 mètres sont situés à 600 mètres au nord-est du pont d'El Kantara et la côte y est très difficilement discernable sur l'image SPOT 5 de 2010. Pour le reste du linéaire côtier, la côte est assez découpée et trois orientations principales se détachent : des côtes orientées nord-ouest entre les repères 10 et 16 puis 26 et 34 de la Figure 75 ; les côtes orientées ouest ou nord-ouest entre les repères 1 à 7, 16 à 22, 25 à 26 et 34 à 38 de la même figure et enfin les côtes orientées sud-ouest des repères 7 à 10 et 22 à 25. Les côtes sont également de plusieurs types : Elles peuvent être basses et rocheuses, composées de plages, parfois assez riches en sable ou bien composées de falaises qui peuvent parfois dépasser les 6 mètres d'altitude en particulier entre les repères 33 à 36. La côte est également particulièrement anthropisée et le développement de cet espace est récent puisque en 1963, seul l'Hôtel Cercina, entre les repères 19 et 20 de la Figure 75, était déjà bâti. Devant cet hôtel se trouve une digue enrochée. Cette digue fut le point d'accostage des bateaux arrivant de Sfax avant que le port de Sidi Youssef ne soit construit. Les côtes sont aménagées soit par les propriétaires des maisons ou des hôtels bordant la côte soit par l'Etat. Les aménagements individuels sont plus ou moins continus et concernent la côte dès lors que des maisons ou hôtels s'y trouvent. Ils sont donc situés entre les repères 11 et 15, 19 et 28, 31 et 33 et enfin 35 et 36. Des aménagements beaucoup moins importants sont visibles entre les repères 1 et 6. L'état a installé des enrochements entre les repères 16 et 20 c'est-à-dire devant l'hôtel Cercina.

Les valeurs d'évolution du trait de côte sont très variables et plusieurs espaces ont connu des évolutions positives et significatives. Les transects montrant une évolution significative sont majoritaires puisqu'ils représentent 63% des valeurs d'évolution (Tableau 14). Ce sont donc seulement 1/3 des valeurs qui sont comprises dans la marge d'erreur et pour lesquelles la côte est considérée comme en relativement stable.

Les valeurs d'évolution négatives sont très majoritaires sur les valeurs d'évolution positives bien que ces dernières soient assez nombreuses. Les transects montrant une érosion significative sont au nombre de 400 et représentent 87,9% des valeurs significatives. Le maximum d'érosion atteint 41,2 mètres en 47 ans ou un recul moyen de 0,88m/an. Les valeurs d'avancée significatives du trait de côte sont au nombre de 55 ce qui représente 12,1% des valeurs significatives. La valeur maximale d'avancée est de 34,8 mètres en 47 ans ou 0,74m/an en moyenne (Tableau 14).

***Tableau 14: Valeurs d'évolution de la côte de la zone touristique de Sidi Frej entre 1963 et 2010***

| | **Valeurs brutes** | **/an pdt 47 ans** | **% du total** | **% des valeurs significatives** |
|---|---|---|---|---|
| Nombre total de transects | 722 | | 100 | |
| Valeur maximale d'avancée du trait de côte | 34,8 | 0,74 | | |
| Valeur maximale d'érosion | 41,2 | 0,88 | | |
| Evolution moyenne | -6,9 | -0,15 | | |
| Nombre de transects aux valeurs positives | 117 | | 16,2 | |
| Nombre de transects aux valeurs négatives | 605 | | 83,8 | |
| Nombre de transects aux valeurs nulles | 0 | | 0 | |
| **Valeurs significatives** | | | | |
| Nombre total de transects à l'évolution significative | 455 | | 63 | 100 |
| Nombre de transects à l'évolution non significative | 267 | | 37 | |
| Nombre de transects avec évolution positive significative | 55 | | 7,6 | 12,1 |
| Nombre de transects avec évolution négative significative | 400 | | 55,4 | 87,9 |

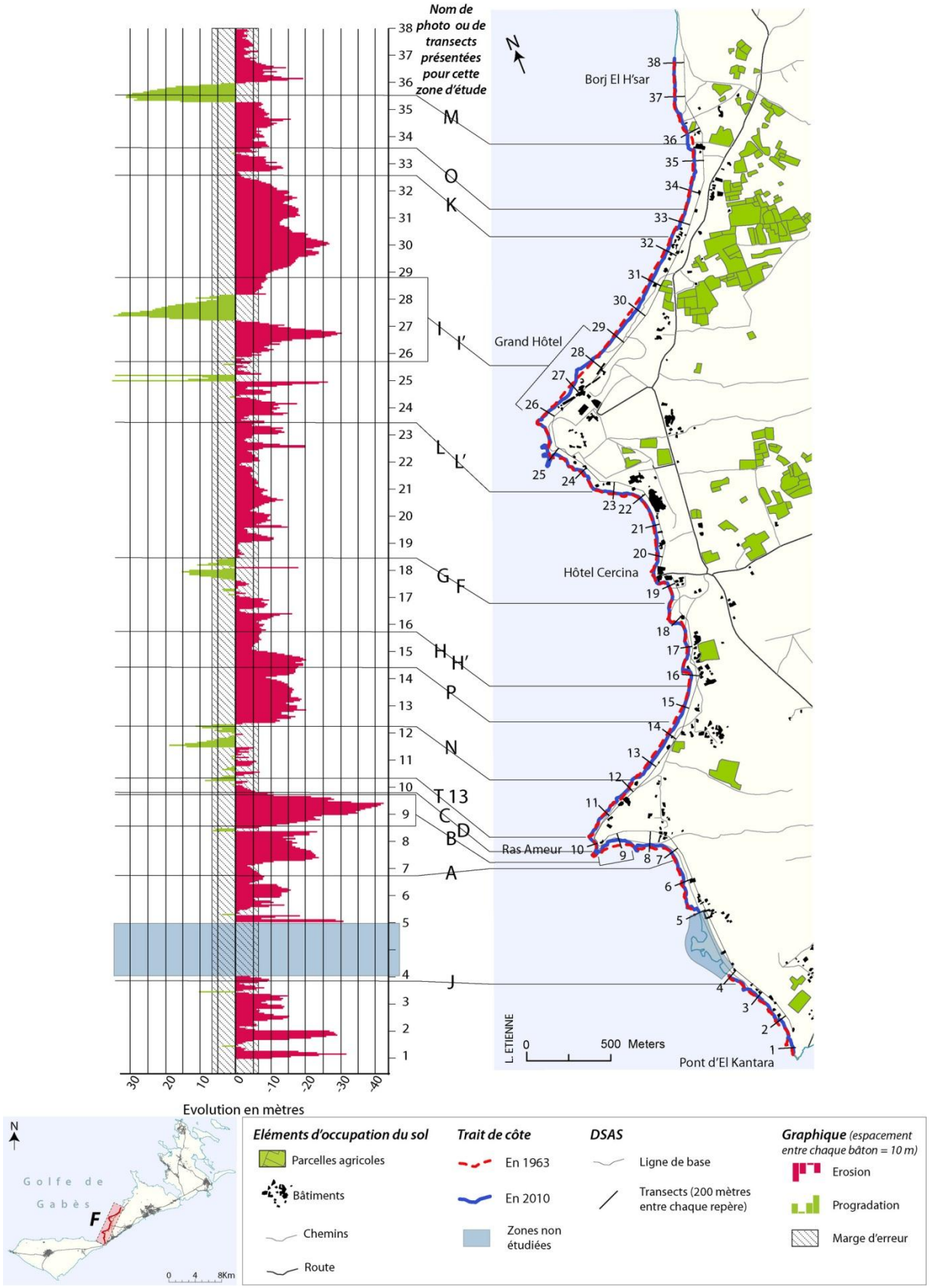



***Figure 75: Evolution de la côte entre le pont d'El Kantara et Borj El H'sar entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies et transects de la Figure 76, Figure 77, Figure 78 et Figure 79)***

- **Erosion et avancée de la côte exacerbées par des aménagements littoraux**

Les aménagements anthropiques installés sur le littoral entre le pont d'El Kantara et Borj El H'sar jouent un rôle majeur dans l'évolution de la position du trait de côte. La dynamique de dérive littorale de la zone a été décrite par Oueslati (2004) qui explique que les déplacements des sédiments sont perturbés par les installations humaines. Les sédiments sont mobilisés au nord-est et déplacés vers le sud-ouest grâce à la dérive littorale. Cependant les sédiments arrachés entre les repères 29 et 38 de la Figure 75 sont bloqués par l'aménagement présent au niveau du Grand Hôtel et forment un engraissement. Ainsi La plage du Grand Hôtel

> *« bénéficie des apports de la dérive littorale qui lui fait parvenir une partie des débris arrachés aux falaises de Borj El H'sar. La contre-partie de cette évolution est une accentuation de la fragilité du segment de côte situé sur l'autre face du même promontoire. L'érosion s'est accélérée au droit de la partie occidentale de l'hôtel ainsi que dans les falaises et petites plages situées dans son prolongement sud-est. » (Oueslati, 2004).*

De ce fait, l'érosion a été accélérée au sud-ouest ce qui a incité les habitants à entreprendre des actions contre l'avancée de la mer et ainsi, à leur tour, à perturber les dynamiques sédimentaires et accélérer l'érosion un peu plus loin. Ainsi, les transferts sédimentaires sont perturbés sur l'ensemble de cette zone d'étude du fait des aménagements humains très nombreux et très variés. Les côtes de la zone située entre le pont d'El Kantara et Borj El H'sar sont aménagées de deux manières : par l'Etat ou par les habitants. La côte sera décrite en fonction de ses modes d'aménagement en commençant par les espaces dépourvus d'aménagement qui concernent une faible proportion du linéaire côtier, puis les espaces aménagés par l'Etat pour finir par les aménagements entrepris par la population.

Deux zones littorales ne sont pas du tout aménagées. La première, située entre les repères 6 et 11 de la Figure 75, est appelé Ras Ameur. Au sud de ce cap, les falaises sont taillées dans du matériel meuble et sont précédées de sable ou de marais maritimes (Figure 76 - A et B). La fragilité des matériaux composant ces côtes explique au moins en partie l'érosion particulièrement importante mesurée qui atteint plus de 40 mètres en 47 ans ou 0,85 m/an en moyenne. Au niveau du repère 9 où les taux d'érosion sont les plus importants, se développe de la végétation halophile protégée par le cap de Ras Ameur. En arrivant au cap (repère 10), la côte change de physionomie : elle est composée de falaises atteignant presque 2 mètres dont les matériaux, battus par la mer, sont solides et proviennent de la croûte du

Pléistocène supérieur (Oueslati, 1986) (Figure 76 - C). Ces falaises ont été décrites avec précision par Oueslati (1986) (Figure 76 - D). Au nord du cap et jusqu'au repère 11, la côte est rocheuse et les blocs issus de la dislocation des matériaux sont érodés et corrodés par l'action de la mer (Figure 76 - Transect 13). Ces matériaux solides sont battus par la mer et sont d'une épaisseur conséquente ce qui les protège des submersions habituelles et semble expliquer l'évolution faible du trait de côte du cap de Ras Ameur. En effet, entre les repères 10 et 11, la côte montre des rythmes d'érosion très lents depuis 1963 (l'évolution est comprise dans la marge d'erreur).

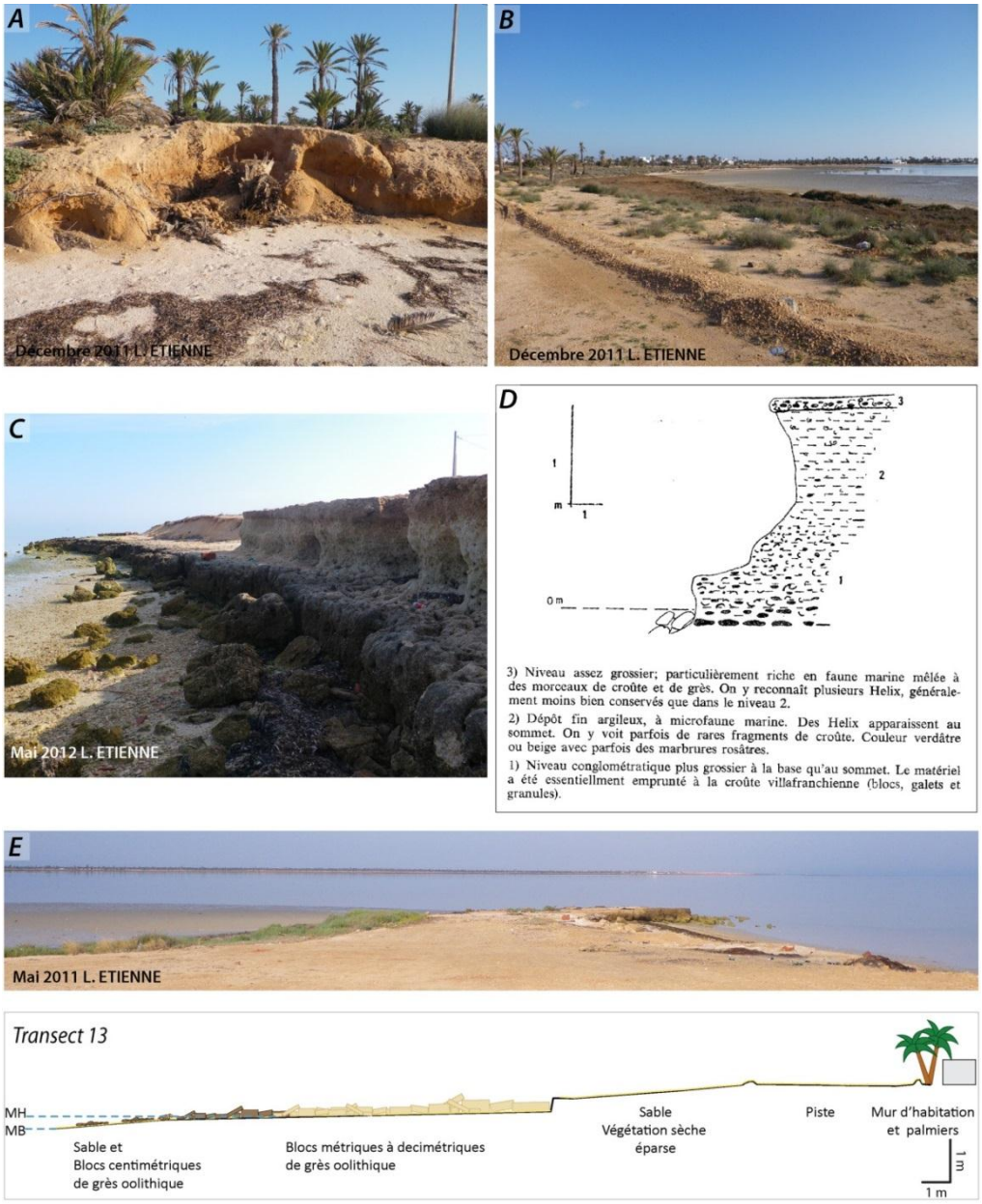



***Figure 76: La côte non aménagée autour de Ras Ameur (Localisation : Figure 75)***
*A, Falaise taillé dans du matériel meuble. B, Côte basse avec développement d'un marais maritime protégé par le cap de Ras Ameur. C et D, Photographie et Coupe à Ras Ameur tiré de Oueslati (1986). E, Vue sur le cap de Ras Ameur.*

Le second espace dépourvu d'aménagement est situé au nord, entre les repères 28 et 31 de la Figure 75. Les côtes y sont basses et rocheuses et l'érosion est assez importante puisqu'elle est comprise entre 12 et 25 mètres.

Les espaces non aménagés sont donc peu nombreux et ne représentent que 1600 mètres sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces espaces subissent une érosion importante voire très importante sur les côtes où les matériaux battus par la mer sont meubles et fragiles. Les côtes basses et rocheuses subissent une érosion moindre et enfin, les rythmes d'érosion sont très faibles lorsque la côte est composée de falaises de matériels durs.

Les espaces aménagés sont très majoritaires et le sont principalement par la population, de manière individuelle. Les protections réalisées par l'Etat sont peu nombreuses et concernent environ 700 mètres de linéaire côtier continus situés au sud de l'hôtel Cercina. Ils sont composés d'enrochements qui peuvent se présenter de trois manières. La méthode de constructions des digues a parfois consisté à utiliser une falaise préexistante et de l'enrocher ce qui signifie que la piste ou les habitations présentes en arrière de la digue sont situées à 1 ou 2 mètres de l'estran en contrebas (Figure 77 - F).Dans d'autres cas, les enrochements ont été montés sur près de 2 mètres de la plateforme d'abrasion et un remblai comble l'espace situé en arrière de la digue. Un troisième cas existe pour lequel une digue a été montée sur 2 mètres de hauteur mais aucun remblai ne comble l'espace bas situé en arrière (Figure 77 - G). Pour cela des buses d'évacuation ont été installées le long des enrochements pour permettre l'évacuation des eaux de pluie ou des eaux de mer lors de submersions. Au niveau de ces enrochements, situés juste après le repère 16 et le repère 19, l'évolution de la côte est contrastée mais cela s'explique par la présence même des enrochements récents le long de la côte. En effet, ils ont pu être placés le long de la côte telle qu'elle existait lors de leur réalisation. Ceci explique que l'évolution de la côte soit négative. Ils ont également pu être placés en avant d'un remblai permettant de gagner du terrain sur la mer ce qui explique des évolutions positives mais artificielles. Les premiers enrochements ont été aménagés dans les années 1990 (Figure 77 - carte). L'extension urbaine, l'installation d'une digue d'accostage au niveau de l'hôtel Cercina en 2004 (Oueslati, 2004) qui a bloqué les sédiments au nord et également engendré l'accentuation de l'érosion sur ce même espace a conduit les autorités à créer de nouveaux enrochements en 2009 (Kebaïli Tarchouna, 2013). Cette situation a conduit logiquement à l'accélération de l'érosion au sud. Les falaises sont ainsi fortement érodées laissant apparaitre des vestiges romains qui ont été très largement dégradés entre 2011 et 2012 (Figure 77 – H et H').

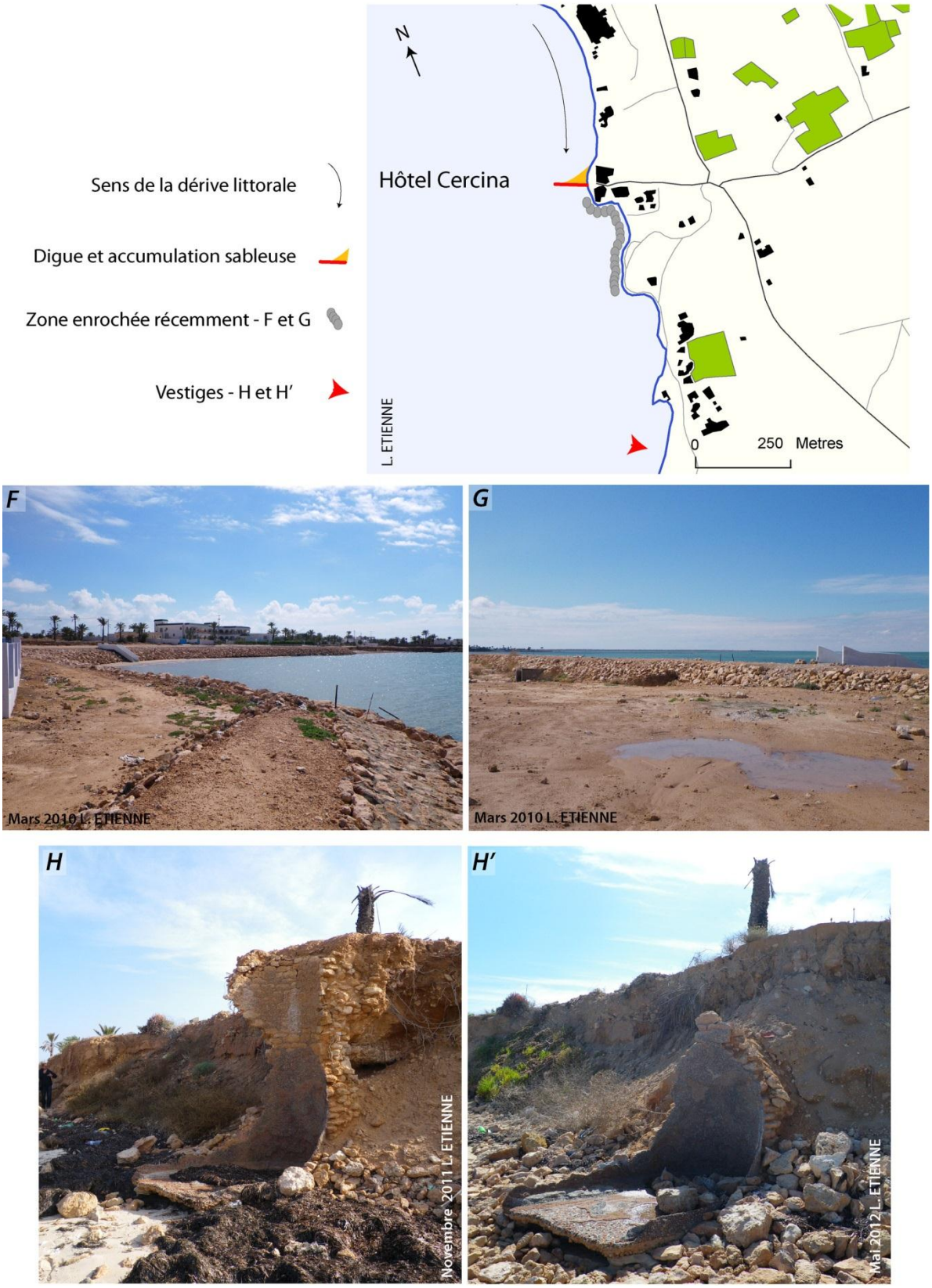



***Figure 77: Enrochements de la zone de Sidi Frej (Localisation : Figure 75)***

*Carte : Zoom amélioré de la Figure 75 (voir cette figure pour la légende). F, Enrochement bâti sur une falaise préexistante. G, Enrochement monté sur 1 mètre, vue d'un escalier descendant vers la mer. A gauche, une buse permettant le transfert des eaux bloquées derrière l'enrochement vers la mer. A droite, un escalier descendant vers la mer. H et H', Vestige d'époque romaine en novembre 2011 (P) et en mai 2012 (P').*

Le reste de la côte est aménagé par les habitants ou les propriétaires des hôtels. Ces aménagements sont très nombreux, très divers et souvent attaqués par l'érosion marine. Leur caractéristique principale est qu'ils sont ponctuels le long de la côte, c'est-à-dire que chaque habitant (ou hôtelier) protège uniquement son bien. Les alternances entre aménagements individuels et zones non aménagées sont très rapides et forment un système particulièrement vulnérable et engendrant des phénomènes d'érosion majeurs. Les côtes basses seront d'abord décrites puis les côtes hautes.

Entre les repères 26 et 28 de la Figure 75 est installé le Grand Hôtel. Les bâtiments sont proches de la mer et les touristes peuvent profiter d'une grande plage générée par l'engraissement signalé plus haut, et aménagée pour la baignade. La position du trait de côte a très fortement évolué entre 1963 (l'hôtel n'était pas construit) et 2010 (Figure 78 - I et I'). Une partie de la côte a été fortement érodée (-30m en 47 ans) tandis qu'une autre a subi une forte accrétion ayant dépassé les 30 mètres. Cette évolution a été rendue possible par la formation d'un tombolo en face de l'hôtel. Un « chemin » de roches a été aménagé autour duquel du sable s'est accumulé pour former la plage assez profonde du Grand Hôtel. Cette situation précise a été décrite par Oueslati (2004). L'évolution de la côte est donc due à des aménagements anthropiques. Entre les repères 1 et 6 de la Figure 75, les côtes sont basses et les aménagements réalisés par la population locale consistent en des remblais de petits volumes ou à la construction de murets. Ces aménagements individuels qui longent le littoral sont tous atteints par les hautes eaux et sont dégradés par l'action des houles (Figure 78 - J). Les taux d'érosion en sont surement légèrement diminués et sont relativement peu importants. Entre les repères 31 et 33, les habitations ont un accès direct à la plage et sont bâties très près de l'estran. Certains propriétaires ont construit des murs pour -pensaient-ils- bloquer l'avancée de la mer. D'autres ont monté des remblais de quelques centimètres de hauteur (Figure 78 - K). Ces aménagements, ont une durée de vie limitée et sont reconstruits fréquemment par les habitants. Ils freinent donc artificiellement l'avancée de la mer et les taux d'érosion sont réduits par rapport à des espaces similaires dépourvus d'aménagement.

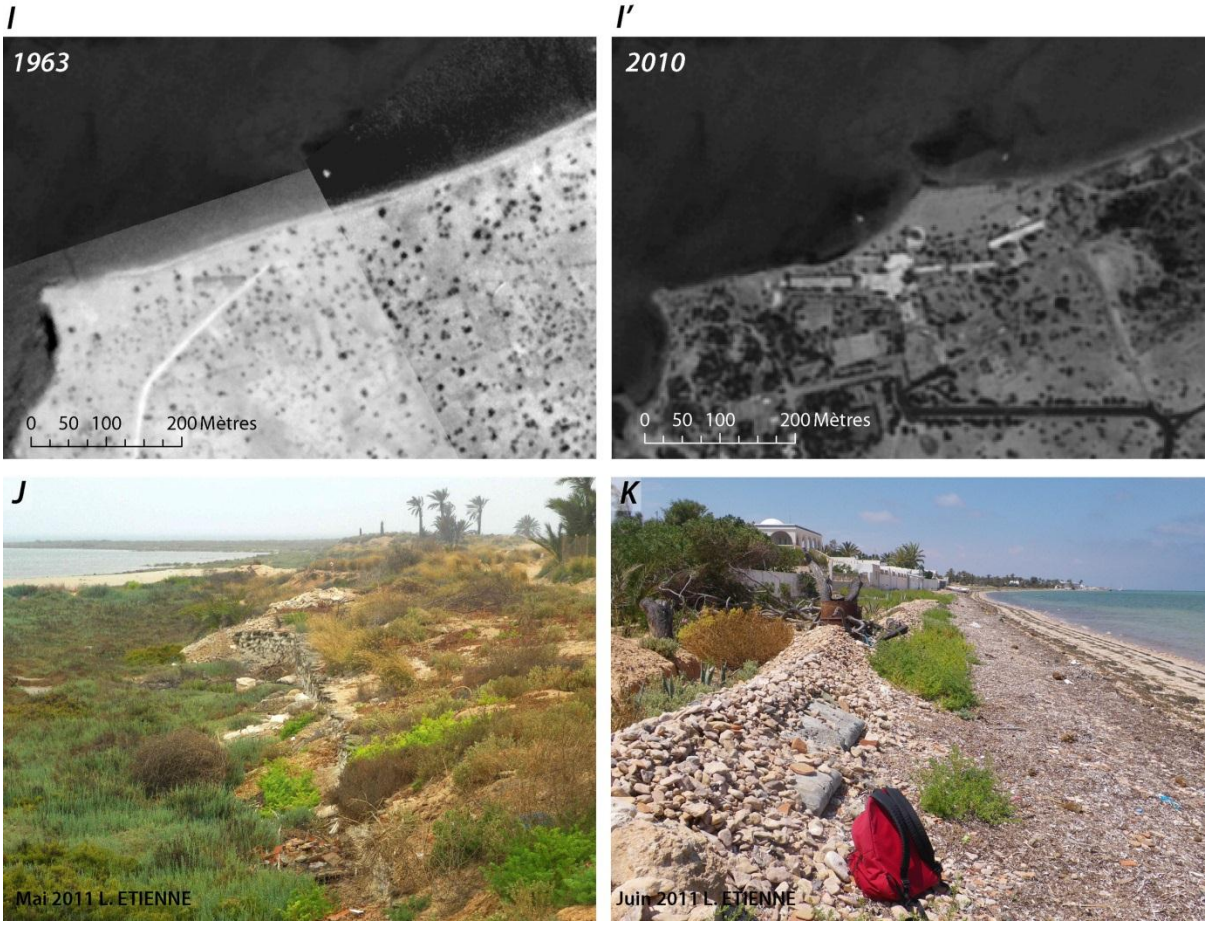



***Figure 78: Aménagement (Localisation : Figure 75)***
*I et I', Zoom sur la zone abritant actuellement le Grand Hôtel, sur la mosaïque de photographies aériennes de 1963 (H) et sur l'image SPOT 5 datant de 2010 (H'). J, Côte basse précédée d'un marais maritime en arrière duquel des murets et des remblais ont été mis en place. Ceux-ci sont tous dégradés. K, Habitations bâties très près de la mer et aménagements individuels de type remblais.*

Les côtes à falaises sont également aménagées dès lors que des habitations sont construites le long de la côte. Entre les repères 23 et 24, l'une des habitations est dotée de plusieurs types d'aménagements individuels (Figure 79 – L et L'). La parcelle est d'abord dotée d'un mur de protection visible en arrière-plan des photographies (Figure 79 – L flèche la plus haute). En avant de ce mur de gros blocs de roche ont été déposés afin de ralentir l'avancée de la mer. Des débris de chantier s'ajoutent à ces blocs formant ainsi une matrice fragile (Figure 79 – L' flèche). Enfin, une dizaine de barils remplis de béton contenant parfois un tronc de palmier ont été placés le long de la côte. Ces barils sont actuellement très dégradés et les blocs de roche corrodés. Cet espace est le seul repéré à cumuler ainsi plus de deux types de protection.

***Figure 79: aménagement côte à falaises (Localisation : Figure 75)***
*L et L', Vues différentes du même endroit présentant différents types d'aménagements individuels. M, Plage bétonnée sur une épaisseur d'environ 1 mètre de hauteur. La largeur de la dalle de béton représente environ 30 mètres. N, Mur de protection d'une propriété privée débordant sur l'estran. Au moment de la prise de vue, le mur était en cours de restauration. O, Mur de protection d'une habitation construit contre la falaise. Les dégradations le long de ce tronçon de côte sont très importantes avec des effondrements multiples et une reprise de la dynamique naturelle des falaises vives situées en arrière des murs. P, Remblais réalisés en avant de plusieurs habitations.*

Les remblais individuels, qui sont aménagés pour gagner de l'espace sur la mer sont de deux types et deux d'entre eux sont particulièrement identifiables sur la côte. Le premier est situé entre les repères 35 et 36 de la Figure 75 et est constitué d'une dalle de béton d'environ 1 mètre de hauteur, une centaine de mètres de long et 30 mètres de large au maximum (Figure 79 - M). Cet aménagement remplace quasiment l'estran et induit ainsi une avancée importante mais totalement artificielle du trait de côte. La perturbation de la dérive littorale est ici importante et les falaises situées juste au sud montrent des signes d'érosion importants. Le second, situé entre les repères 14 et 15 de la Figure 75 est plus conventionnel puisqu'il est composé de terre (Figure 79 - P). Malgré cet aménagement côtier qui mesure tout de même plusieurs dizaines de mètres de large, la côte a beaucoup reculé entre 1963 et 2010 (quasiment 20 mètres). Cependant le remblai est récent et a peut-être été construit en réponse à une très forte érosion avec pour objectif de la ralentir. Juste au sud de ce remblai, l'érosion est

similaire et atteint les 20 mètres entre le repère 13 et le repère 15. Ce tronçon de côte est très largement anthropisé puisque, hormis le remblai, chaque habitation a construit des murs de protection contre l'avancée de la mer. Ces murs sont actuellement tous atteints par la mer et leurs bases sont érodées. Ce mode de protection (construction de mur) est très fréquemment utilisé. Dans tous les cas, ces murs sont atteints par la mer et sont parfois reconstruits à l'identique lorsqu'ils sont détruits (Figure 79 - N).

D'autres murs de protection sont moins bien entretenus et sont très dégradés. C'est le cas des murs observés au nord de la zone d'étude, construits le long des falaises (Figure 79 - O). Comme expliqué précédemment ces aménagements ne sont pas forcément continus le long de la côte et les espaces non concernés par les aménagements montrent des signes d'érosion parfois rapide. C'est le cas entre les repères 15 et 16 c'est-à-dire entre au nord, les enrochements construit par l'Etat et au sud, un remblai récent et des murs de protection individuels. Les taux d'érosion ne sont pas extrêmement importants mais les vestiges romains situés dans les falaises sont rapidement érodés.

Pour conclure il semble que **les aménagements jouent un rôle majeur** dans l'évolution de la position du trait de côte. Les zones aménagées **perturbent les dynamiques sédimentaires côtières** et peuvent entrainer des phénomènes de progradation et d'érosion très importants en particulier lorsque la dérive littorale est bloquée comme dans le cas de la construction de digues. Les cas de **progradation sont rares** et peu de digues ont été installées. Les cas d'avancée de la position du trait de côte sont très majoritairement dus à des reconquêtes de terrain aux dépens des hauts fonds ou de l'estran. Dans la zone touristique de Sidi Frej et le long du littoral sud de Chergui, les aménagements sont très divers. Ceux aménagés par l'Etat sont généralement conçus et réalisés sur des portions de linéaire côtier dépassant 600 mètres. Ils sont donc continus le long du littoral et protègent des espaces stratégiques comme l'hôtel Cercina ou la localité de Ramla. Cependant, bien que le plus souvent massifs (digues, enrochements), très couteux et freinant localement l'érosion, **ces aménagements ne constituent pas une protection à long terme contre l'érosion marine** puisque certains sont déjà abimés voire érodés. Les aménagements réalisés par les habitants sont quant à eux très discontinus le long de la côte et sont également très divers. Ils sont très souvent constitués de murs de protection qui ont pour effets de renforcer l'action des vagues et donc l'érosion un peu plus loin. **Tous ces aménagements entrainent une perturbation de la dérive littorale et de la redistribution des sédiments le long de la côte ce qui a pour**

**conséquence d'accélérer l'érosion là où ils sont absents**. Enfin, les aménagements et les constructions en bord de mer sont beaucoup plus nombreux actuellement que dans les années 1960. **La présence d'enjeux (habitations en particulier) ainsi que ces aménagements a entrainé une augmentation de la vulnérabilité depuis 1963** sur certains tronçons côtiers de l'archipel. Un des objectifs futurs sera de pouvoir cartographier cette vulnérabilité.

## 3. Discussion : Essai d'évaluation et de typologie des côtes selon le degré de vulnérabilité

La vulnérabilité des côtes de l'archipel de Kerkennah est réelle. Les côtes sont très souvent sujettes à l'érosion ou à une stabilité relative et fragile (Figure 80). Sur l'ensemble des zones étudiées sur une île comme sur l'autre, l'érosion est majoritaire et concerne environ 50% des transects étudiés. L'avancée de la côte est très largement minoritaire (Figure 80) et, comme nous l'avons vu, est due à des actions anthropiques. Elles sont plus nombreuses sur l'île de Chergui que sur l'île de Gharbi ce qui explique que les pourcentages d'avancée de la côte y soient plus importants.

Notre objectif ici est de proposer une typologie des côtes selon leur degré de vulnérabilité. Plus précisément, nous étudions la vulnérabilité côtière qui est liée à la mobilité de la position du trait de côte depuis 1963 et qui regroupe la sensibilité à l'érosion et aux submersions.

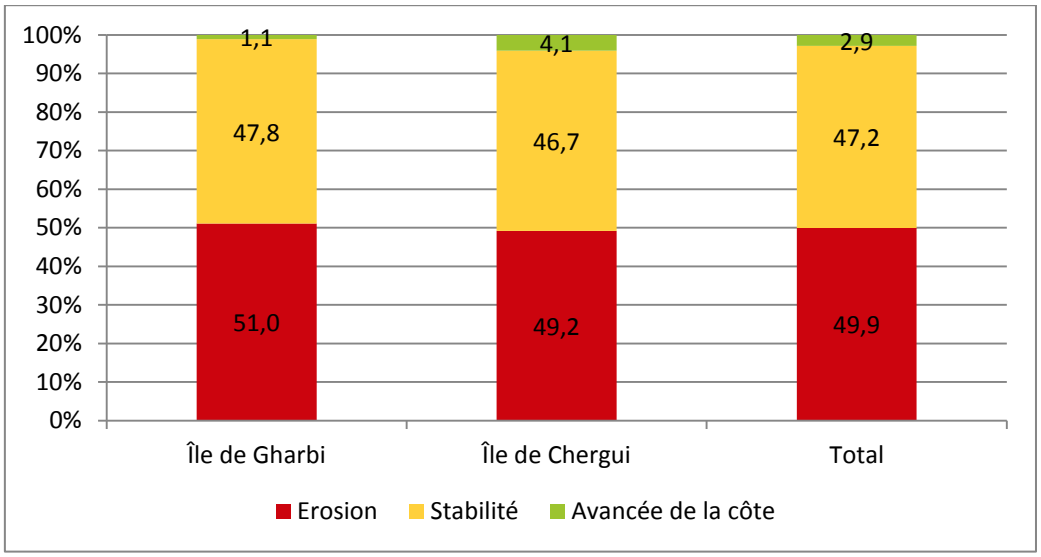



***Figure 80: Pourcentage des transects issus des six zones d'études en fonction de leur évolution entre 1963 et 2010***

Certains tronçons côtiers sont plus vulnérables que d'autres face à l'érosion et aux submersions, notre objectif est de les identifier. Cette vulnérabilité globale est, comme nous l'avons expliqué, liée à différents facteurs qui vont l'accentuer ou la réduire (Figure 81). Ces facteurs de vulnérabilité sont de 3 types principaux : (i) les facteurs physiques naturels et locaux qui caractérisent la nature des côtes étudiées, (ii) les facteurs d'échelle régionale comme l'évolution du climat ou les variations du niveau de la mer qui peuvent avoir une influence sur l'avenir de la position du trait de côte et (iii) les facteurs de vulnérabilité anthropique qui sont liés à la présence d'enjeux sur le littoral mais aussi aux effets des aménagements réalisés dans un but de protection et enfin à la perception de la population (cf : Figure 9 p. 30 et Figure 81).

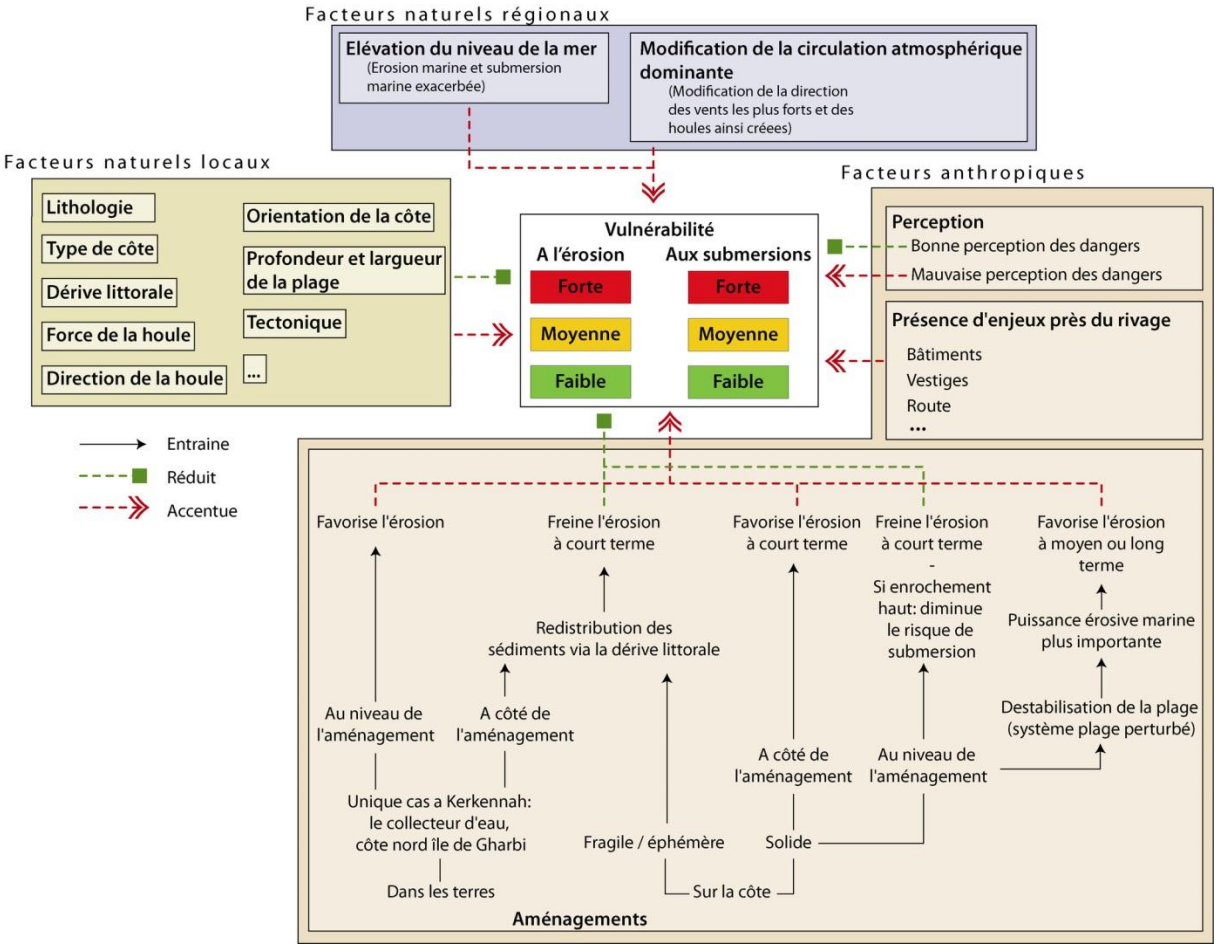



***Figure 81: Système de vulnérabilité littorale liée à l'évolution de la position du trait de côte : vulnérabilité à l'érosion et vulnérabilité aux submersions***

- **Les facteurs physiques naturels et locaux**

Les facteurs naturels sont souvent utilisés pour réaliser des indices de vulnérabilité côtière (Gornitz *et al.*, 1994; Pendleton *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2005; Dwarakish *et al.*, 2009; Vinchon *et al.*, 2011; Arun Kumar & Kunte, 2012). Ces indicateurs sont très nombreux et caractérisent la nature de la côte étudiée. Ainsi il peut s'agir de la lithologie, du type de côte, de la dérive littorale, de la force et de la direction des houles etc. (Figure 81) qui vont tous avoir un impact sur la sensibilité de la côte à l'érosion ou aux submersions. Le terme « indicateur » est ici utilisé au sens décrit par Gallopín (1997) et repris par Hinkel (2011). Pour eux un indicateur est une fonction mathématique qui transforme une variable observable (phénomène physique) appelée variable indicative, en variable théorique. Le type le plus simple est l'indicateur scalaire qui permet de cartographier et traduire la lithologie ou le type de côte (variables observables) en une vulnérabilité à l'érosion ou aux submersions (variable théorique) (Hinkel, 2011). Notre objectif est de tenter une typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité. Nous allons pour cela utiliser d'abord des indicateurs liés à la nature des côtes. Dans notre étude de l'évolution du trait de côte nous avons pu constater une corrélation très forte entre l'érosion mesurée et la lithologie. Ainsi, cet indicateur a été retenu pour servir d'intermédiaire à la cartographie de la vulnérabilité à l'érosion. La vulnérabilité aux submersions, également liée aux mouvements de la position du trait de côte, est logiquement très influencée par le type de côte et la hauteur du commandement des falaises. La vulnérabilité des littoraux de l'archipel de Kerkennah à l'évolution du trait de côte peut donc être ébauchée grâce à ces deux indicateurs.

Ainsi une typologie simple de la vulnérabilité aux mouvements du trait de côte peut être proposée en utilisant les indicateurs lithologie et types de côtes. Pour ce faire nous avons réalisé une gradation qui permet d'identifier des espaces côtiers plus vulnérables que d'autres. Pour la vulnérabilité à l'érosion, une zone où la vulnérabilité est considérée comme forte recevra la note de 3 ; une zone de vulnérabilité moyenne 2 et une zone de vulnérabilité faible 1. Les côtes constituées de matériaux meubles sont très vulnérables à l'érosion, celles constituées de matériaux solides en cours de désagrégation sont moyennement vulnérables et celles constituées de matériaux solides sont faiblement vulnérables. De la même manière, pour la vulnérabilité aux submersions, les côtes basses (moins de 1 mètre) sont très vulnérables : les falaises dont le commandement est compris entre 1 et 1,5 mètres sont moyennement vulnérables car seules les houles de tempête pourront provoquer des

submersions et enfin, les côtes hautes, où les falaises atteignent plus de 2 mètres sont considérées comme peu vulnérables aux submersions.

Ces deux indicateurs peuvent ensuite être croisés pour obtenir une typologie plus fine de la vulnérabilité côtière à la mobilité de la ligne de côte (Tableau 15). Pour réaliser ce croisement nous avons simplement additionné les valeurs attribuées pour les indicateurs ce qui a conduit à la détermination de 5 valeurs de vulnérabilité allant de 2 (vulnérabilité la plus faible) à 6 (vulnérabilité la plus forte).

***Tableau 15: Calcul de la vulnérabilité des côtes aux phénomènes d'érosion et de submersion liés aux mouvements de la position du trait de côte***

*Echelle des valeurs calculées dans la 3ème colonne : 2 = vulnérabilité la plus faible ; 3 = vulnérabilité faible ; 4 = vulnérabilité moyenne ; 5 = vulnérabilité forte ; 6 = vulnérabilité la plus forte.*

| **Variable théorique : Vulnérabilité à l'érosion**<br><br>**Variable observable : Lithologie** | **Variable théorique : Vulnérabilité aux submersions**<br><br>**Variable observable : Type de côte** | **Vulnérabilité à l'évolution de la position du trait de côte** |
|---|---|---|
| Côte composée de matériaux meubles<br><br>**(Vulnérabilité très forte = 3)** | Côte basse<br>**(Vulnérabilité très forte =3)** | **6** |
| | Petites falaises (1 à 1,5 m) **(Vulnérabilité moyenne = 2)** | **5** |
| | Hautes falaises (>2m) **(Vulnérabilité très faible = 1)** | **4** |
| Côte composée de blocs issus de la désagrégation de la croûte calcaire ou des grès<br><br>**(Vulnérabilité moyenne = 2)** | Côte basse<br>**(Vulnérabilité très forte = 3)** | **5** |
| | Petites falaises (1 à 1,2 m) **(Vulnérabilité moyenne = 2)** | **4** |
| | Hautes falaises (>2m) **(Vulnérabilité très faible = 1)** | **3** |
| Côte composée de matériaux solides non désagrégés<br><br>**(Vulnérabilité très faible = 1)** | Côte basse<br>**(Vulnérabilité très forte = 3)** | **4** |
| | Petites falaises (1 à 1,5 m) **(Vulnérabilité moyenne = 2)** | **3** |
| | Hautes falaises (>2m) **(Vulnérabilité très faible = 1)** | **2** |

Ce calcul, même s'il reste très élémentaire, simpliste car cantonné à seulement deux indicateurs de la vulnérabilité aux déplacements du trait de côte et qu'il ne prend pas encore en compte les autres facteurs d'influence de la vulnérabilité globale (facteurs régionaux et anthropiques), permet toutefois de cartographier, même sommairement, et de rendre visible le phénomène de vulnérabilité.

- **Les forçages régionaux**

Les facteurs naturels d'échelle régionale comme l'élévation du niveau de la mer ou encore la modification de la circulation atmosphérique générale ont des effets qui ont été décrits dans le **Chapitre 2** de la **Partie 1** de cette thèse. Pour résumer très rapidement ce qui a été dit précédemment, la modification de la circulation atmosphérique générale a eu pour effet de modifier la direction des vents les plus forts depuis les années 1970 (Dahech, 2007). Ces vents forts sont également plus fréquents et sont à l'origine de tempêtes dont les houles importantes ont accentué la vulnérabilité à l'érosion et aux submersions. Concernant l'avenir, les modèles ne prévoient pas d'augmentation de la fréquence des tempêtes sur la région. Le niveau relatif de la mer est en constante élévation dans le nord du golfe de Gabès par le jeu de la subsidence. Cette élévation du niveau de la mer a accentué la vulnérabilité à l'érosion des côtes de l'archipel et il semble que cela doive se poursuivre à l'avenir. Pour conclure, les forçages régionaux vont avoir tendance à augmenter la vulnérabilité des côtes de l'ensemble de l'archipel. Un point leur correspondant sera donc ajouté à chaque tronçon de côte concerné.

De ces différents facteurs « naturels » découle la vulnérabilité naturelle de la côte. Elle se traduit sur les côtes non aménagées par les rythmes d'érosion que nous avons tenté de mesurer. Cependant, cette vulnérabilité n'est pas suffisante et des facteurs anthropiques doivent être pris en compte.

- **Les facteurs anthropiques**

La présence d'enjeux sur le littoral est une forme de vulnérabilité car ceux-ci sont menacés par les submersions et par l'érosion. Il peut s'agir de vestiges romains comme à Borj El H'sar ou de bâtiments anciens, comme les différents mausolées construits entre le 14$^{ème}$ et le 16$^{ème}$ siècle dans les terres (Kebaïli Tarchouna, 2013) et qui sont actuellement en cours d'érosion. Ces deux types de bâtiments peuvent être considérés comme un patrimoine archéologique et culturel. De nouvelles constructions sont également concernées car elles ont été construites très près du littoral. Généralement les propriétaires ou l'Etat ont mis en place des systèmes de protection (digues, enrochements, murs et murets etc.). Ainsi, la présence d'enjeux sur le littoral et en particulier d'habitations, est responsable d'une élévation de la vulnérabilité. Lorsque des enjeux sont présents sur la côte, la vulnérabilité sera augmentée de 1 point. A Ramla, la situation est particulière puisque cette localité est le centre administratif

de l'archipel et accueille donc des enjeux majeurs. La vulnérabilité y sera augmentée de 2 points.

Les effets les systèmes de protection mentionnés ci-avant sont souvent néfastes. Au niveau des murs de protection et des enrochements (aménagements durs), les effets ne sont positifs que très ponctuellement dans l'espace (au niveau précis de l'aménagement) et dans le temps puisqu'ils sont souvent rapidement dégradés. Cependant ils perturbent également grandement la redistribution des sédiments par la dérive littorale. De plus, lorsque la côte est aménagée par des débris divers (chantiers, graviers etc…), les matériaux solides et déplaçables par les vagues contribueront à l'érosion lors des tempêtes. Pour ces différentes raison, la présence d'aménagements sera considérée comme un facteur augmentant la vulnérabilité à long terme de 1 point. Ainsi, les zones aménagées ainsi que les zones bordières seront considérées comme plus vulnérables sur le long terme car la dérive littorale y est très fortement perturbée. Le cas des digues est particulier. Localement elles ralentissent l'érosion en bloquant les sédiments d'un côté mais l'autre côté sera réciproquement sujet à une plus grande érosion. Même à court terme les conséquences peuvent être très néfastes. La vulnérabilité pourra donc être augmentée ou diminuée d'un point en fonction des aménagements et de leur positionnement.

Les aménagements, surtout ceux réalisés par l'Etat, visent souvent à transformer les côtes. Des côtes basses ont ainsi pu être surélevées, des falaises aux matériaux fragiles ont pu être enrochées… Pour caractériser la sensibilité aux submersions et à l'érosion, nous avons repris les mêmes critères que ceux décrits dans le Tableau 15. Par exemple, les enrochements s'élèvent généralement entre 1 et 1,5 mètre de hauteur et sont donc considérés comme des côtes moyennement hautes (vulnérabilité aux submersions moyennes notée 2). Ils sont également composés de gros blocs résistants donc assez peu vulnérables (vulnérabilité à l'érosion faible notée 1). Leur vulnérabilité à la mobilité du trait de côte est donc relativement faible (2+1=3).

Enfin la perception de la population influe sur la vulnérabilité car lorsque les personnes sont conscientes des risques qu'elles encourent et de leur propre vulnérabilité, elles peuvent réagir en conséquence. Cependant une bonne perception ne signifie pas une bonne gestion du risque. Cette composante sera étudiée dans le **Chapitre 8**. La perception de la population est une variable théorique, c'est-à-dire qu'elle ne peut pas être directement cartographiée. Elle ne sera donc pas prise en compte ici.

- **Calcul de la vulnérabilité et typologie**

Le Tableau 17 donne des exemples représentatifs de notre essai de typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité et indique les valeurs de la vulnérabilité attribuées à chaque exemple. Ces valeurs vont de 3, lorsque les matériaux battus par la mer sont solides, que les falaises sont hautes et qu'il n'existe aucun enjeu ou aménagement à 10 lorsque les côtes sont basses et composées de matériau meuble, situées en avant d'enjeux majeurs (à Ramla) et où les dynamiques littorales sont perturbées pas des aménagements proches.

Ainsi nous obtenons une gradation des espaces plus ou moins vulnérables les uns par rapport aux autres, et une typologie des côtes en fonction de leur degré de vulnérabilité (Tableau 16). Dans un souci de clarté, les valeurs obtenues par calcul ont été réunies deux par deux pour réaliser quatre classes allant des côtes peu vulnérables aux côtes particulièrement vulnérables.

***Tableau 16: Valeur de vulnérabilité obtenue et typologie des côtes***

| Valeurs obtenues par calcul | Typologie |
|---|---|
| **10** | **Côte particulièrement vulnérable** |
| **9** | |
| **8** | **Côte très vulnérable** |
| **7** | |
| **6** | **Côte vulnérable** |
| **5** | |
| **4** | **Côte peu vulnérable** |
| **3** | |

*Tableau 17: Valeur de vulnérabilité calculée pour différents espaces caractéristiques*

| | **Localisation** | **Lithologie / valeur de vulnérabilité à l'érosion** | **Type de côte / valeur de vulnérabilité aux submersions** | **Influence des facteurs régionaux** | **Influence de la présence d'enjeux** | **Influence des aménagements** | | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Les falaises de Jorf** | Zone d'étude C, repère 29 à 33 ; visible sur la Figure 64-G p. 168 | Argiles mio-pliocènes battues par la mer. Couche très facilement érodée. Falaises vives actuellement en recul marquées par le processus d'encoche/éboulement | Commandement des falaises atteint 8-10 mètres. Falaises non sujettes aux submersions. | **+1** | Enjeux très faibles, quelques parcelles agricoles au sommet | Influence très faible des aménagements | | **5** |
| | | **3** | **1** | | **0** | A court terme **0** | A long terme **0** | |
| **Plage de Sidi Fonkhal** | Zone d'étude D ; visible sur la Figure 66-A et B p. 173 | Plage sableuse avec matériel sous-jacent meuble. Plage actuellement en recul avec une couche de sable très peu épaisse et mortalité importante des palmiers. | Plage, côte basse parfois précédée d'une micro falaise d'environ 50 cm. Côte très sujette aux submersions | **+1** | Enjeux très faible actuellement. Projet touristique prévu et d'influence future importante | Aménagements pour l'instant inexistants (projet touristique décrit dans le **Chapitre 8)** | | **8** |
| | | **3** | **3** | | **0** | A court terme **0** | A long terme **0** | |
| **Ras Ameur** | Zone d'étude F ; visible sur la Figure 76 p.190 | Matériel solide issu de la croûte du Pléistocène supérieur battu par la mer. Côte dont les rythmes d'érosion sont très lents (compris dans la marge d'erreur : moins de 0,12m/an en moyenne). | Falaises assez hautes (presque de 2 mètres) pouvant subir des submersions lors des fortes tempêtes. | **+1** | Enjeux : une habitation située près du littoral au niveau du cap | Aménagements inexistants sur la côte | | **5** |
| | | **1** | **2** | | **+1** | A court terme **0** | A long terme **0** | |

<table>
<tr><th></th><th>Localisation</th><th colspan="2">Lithologie / valeur de vulnérabilité à l’érosion</th><th colspan="2">Type de côte / valeur de vulnérabilité aux submersions</th><th>Influence des facteurs régionaux</th><th>Influence de la présence d’enjeux</th><th colspan="3">Influence des aménagements</th><th>Total</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Ramla</td><td rowspan="3">Zone d’étude E ; visible sur la Figure 72 p. 182 ; Figure 73 p. 183 et Figure 74 p. 184190</td><td colspan="4">Côte aménagée</td><td rowspan="3">+1</td><td rowspan="2">Enjeux très nombreux car Ramla est le centre administratif de l’archipel</td><td colspan="3" rowspan="2">A court terme : ralentissement des rythmes d’érosion par les enrochements. A long terme : perturbation des dynamiques littorales.</td><td rowspan="2">A court terme:<br>5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Côte enrochée et remblayée. Enrochements composés de blocs de roches solides : côtes peu sujettes à l’érosion.</td><td colspan="2">Enrochements ne dépassant pas 1,5m de hauteur pouvant être sujets aux submersions lors des fortes tempêtes</td></tr>
<tr><td colspan="2">1</td><td colspan="2">2</td><td>+2</td><td>A court terme<br>-1</td><td>A long terme<br>+1</td><td>A long terme:<br>7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Le grand hôtel</td><td rowspan="3">Zone d’étude F ; visible sur la Figure 78 – I et I’ p.194</td><td colspan="4">Côte aménagée</td><td rowspan="3">+1</td><td rowspan="2">Grand Hôtel construit très près du rivage et vulnérable de par sa position.</td><td colspan="3" rowspan="2">A court terme : évolution positive par accumulation de sable à l’est de la digue. A long terme : perturbation des dynamiques littorales et rythmes d’érosion très importants à l’ouest.</td><td rowspan="2">A court terme : A l’est :7</td></tr>
<tr><td colspan="2">Côte basse aménagée avec une digue. Matériaux fragiles et facilement érodables</td><td colspan="2">Sédiments bloqués et formant une plage à l’est de la digue. Erosion très importante à l’ouest.</td></tr>
<tr><td>A l’est<br>3</td><td>A l’ouest<br>3</td><td>A l’est<br>3</td><td>A l’ouest<br>3</td><td>+1</td><td colspan="2">A court terme</td><td rowspan="2">A long terme<br>+1</td><td rowspan="2">A l’ouest: 9<br>A long terme : 9</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td>A l’est<br>-1</td><td>A l’ouest<br>+1</td></tr>
</table>

- **Tentative de cartographie des côtes selon leur vulnérabilité**

Afin de cartographier et de caractériser les côtes, nous avons choisi d'utiliser le mode de représentation qui est utilisé par les utilisateurs des indices de vulnérabilité côtière (ou CVI en anglais). Ces auteurs sont nombreux et cartographient la vulnérabilité côtière en fonction des variables naturelles et physiques des côtes (Gornitz *et al.*, 1994; Pendleton *et al.*, 2003; Sheik Mujabar & Chandrasekar, 2011). La première étape de la représentation de la vulnérabilité côtière est le découpage du trait de côte étudié en tronçons d'une même longueur. Dans notre étude nous avons déjà partitionné la côte en tronçons de 200 mètres. La seconde étape consiste à représenter la valeur de chaque indicateur pour chaque tronçon de 200 mètres. Dans notre cas, il s'agit de la valeur donnée aux deux indicateurs physiques (lithologie et type de côte) ainsi que les valeurs ajoutées ou soustraites selon les caractéristiques anthropiques de la côte et selon les influences régionales. Pour ce faire, des rectangles seront positionnés en ligne suivant la côte. La dernière étape consiste à représenter la valeur finale attribuée à la côte dans un nouveau rectangle. Ainsi chaque tronçon de côte se verra attribuer une valeur de vulnérabilité. La cartographie des espaces décrits dans le Tableau 17 a été réalisée en élargissant les zones d'études (Figure 82).

Géographiquement, les espaces les plus vulnérables (valeur de vulnérabilité comprise entre 9 et 10) sont : la côte bordant la localité de Ramla, entre les repères 41 et 47 de la Figure 82, la plage bordée d'hôtels située entre les repères 20 et 23 de la Figure 82, juste au nord de l'hôtel Cercina dans la zone touristique de Sidi Frej ainsi que devant le grand hôtel. Dans tous les cas, les côtes sont fragiles et basses et la vulnérabilité est accentuée par l'influence des aménagements proche. La côte de Ramla entre les repères 41 et 47 est très vulnérable car elle est basse et fragile, et car les aménagements construits plus au nord perturbent les dynamiques littorales et enfin parce que des enjeux majeurs tels que l'usine de dessalement des eaux ou le lycée de l'archipel sont situés très près de la côte (Figure 82 – zone d'étude E). La plage au nord de l'hôtel Cercina est également vulnérable par la nature fragile de la côte. Les aménagements sont peu nombreux et les enjeux présents sur la côte sont des hôtels (Figure 82 – zone d'étude F). Devant le grand hôtel, c'est l'influence de la digue qui a accentué la vulnérabilité.

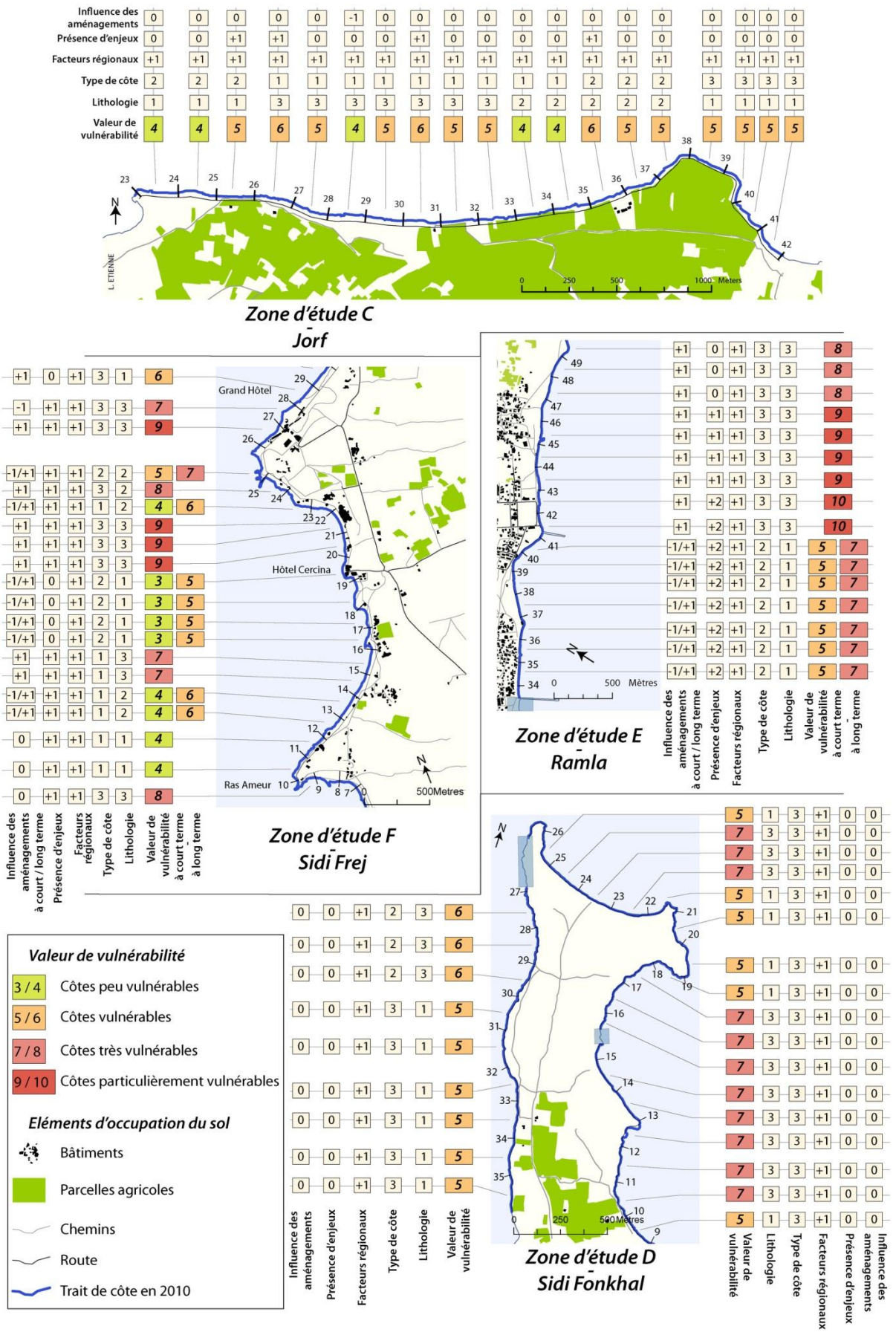



***Figure 82: Typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité***

Les côtes très vulnérables sont nombreuses. Elles peuvent l'être à court terme, c'est-à-dire dès aujourd'hui, comme c'est le cas à Sidi Fonkhal (Figure 82 – zone d'étude D repères 10 à 18 et 22 à 25) ou à Ramla (Figure 82 – zone d'étude E repères 47 à 50). A Sidi Fonkhal, les côtes ne sont pas aménagées mais elles sont basses et de constitution fragile ce qui explique leur grande vulnérabilité. Comme nous le détaillerons dans le **Chapitre 8** à la page 283, la presqu'île de Sidi Fonkhal est vouée à accueillir un complexe touristique majeur de 3000 lits qui constituerait un enjeu accentuant la vulnérabilité. A Ramla, la situation physique est la même (côtes basses et fragiles) mais les aménagements réalisés au nord ont accentué la vulnérabilité côtière en perturbant les transferts sédimentaires.

Les côtes actuellement très vulnérables peuvent également l'être à long terme. C'est le cas à Ramla (Figure 82 – zone d'étude E repères 34 à 41) ou à Sidi Frej (Figure 82 – zone d'étude F repères 25 à 26 puis 27 à 28). Cette situation est engendrée par la présence d'aménagements importants le long de la côte. Actuellement ils ont un rôle limitant l'érosion côtière et les submersions marines. Ils diminuent donc par la même occasion la vulnérabilité à court terme. Cependant, ils ne font que retarder les processus érosifs observés ailleurs et ne sont pas valables à long terme car ils devraient se dégrader. Les débris issus de cette dégradation seront des agents érosifs lors des tempêtes. Ils seront donc un facteur aggravant la vulnérabilité à long terme.

Ainsi l'évaluation de la vulnérabilité des côtes et sa cartographie permet de pointer les espaces qui sont et qui seront les plus vulnérables, ceux ou la population est la plus menacée de par sa présence et de l'influence des aménagements. La question des aménagements côtiers les plus adaptés à la diminution de la vulnérabilité sera étudiée dans le **Chapitre 8.**

Notre évaluation de la vulnérabilité permet également de pointer des espaces particulièrement fragiles où les enjeux humains sont minimes afin de prévenir des installations en zone de grande vulnérabilité. Dans le cas de Sidi Fonkhal, qui sera plus détaillé dans le **Chapitre 8,** les côtes sont naturellement fragiles. Ainsi, le bien-fondé de l'implantation d'un complexe touristique questionne.

Cependant, l'évaluation de la vulnérabilité n'est pas aussi simple et notre typologie mérite d'être affinée et améliorée. L'Indice de Vulnérabilité Côtière mis au point par Gornitz *et al.* (1994) et repris depuis par plusieurs auteurs, se concentre sur la vulnérabilité naturelle des côtes à l'érosion et aux submersions et utilise pour cela 7 variables géomorphologiques. Les auteurs intègrent de plus en plus des indicateurs anthropiques et certains utilisent jusqu'à 100 variables (Hinkel & Klein, 2009) qui sont compilées dans des modèles. La question des

échelles temporelles et spatiales est également importante. A échelle fine, les données doivent être très précises et le travail de terrain est absolument indispensable. Les données ne sont pas toujours facilement accessibles. Notre tentative, et nous le soulignons, ne peut être utilisée telle quelle par les aménageurs et les décideurs qui choisiront les trajectoires d'aménagement et de développement de l'archipel de Kerkennah. D'autres indicateurs de différents types devront être pris en considération : (i) les indicateurs concernant la morphologie côtière (pente de la plage…), les dynamiques littorales (force des courants, directions précise des houles, hauteur des vagues…), les vents (directions et force) et leurs impacts géomorphologiques restent à déterminer ; (ii) les indicateurs sur les politiques de gestion et sur la gouvernance littorale à l'échelle nationale, régionale et locale. Le principal gestionnaire des littoraux en Tunisie est l'APAL (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral). Cet organisme propose des aménagements pour la gestion des littoraux et des crédits lui sont accordés pour construire ces aménagements mais aussi pour les entretenir. La somme d'argent ainsi allouée est déterminante car :

- les aménagements sont progressivement dégradés ce qui accentue la vulnérabilité des enjeux situés en arrière,
- Les aménagements actuels induisent une plus grande vulnérabilité sur les espaces adjacents.

Enfin un ou plusieurs indicateurs sur la perception de la population locale aideraient à mieux cerner la vulnérabilité littorale.

## Conclusion du chapitre 6

Les côtes de l'archipel de Kerkennah sont majoritairement en recul. L'érosion mesurée a pu parfois dépasser les 40 mètres entre 1963 et 2010. Les côtes les plus touchées par cette érosion sont celles qui sont sensibles à la fois à l'érosion (côtes composées de matériaux fragiles) et aux submersions (côtes basses). Ainsi, les plages sont particulièrement touchées par le recul côtier tandis que les côtes à falaises de plus de 2 mètres y sont moins sensibles. Une grande partie des côtes étudiées ont des rythmes d'érosion très lents qui sont situés dans la marge d'erreur que nous avons fixée à 6 mètres (erreur de calage et erreur de dessin). Etant situé dans la marge d'erreur, la côte est considérée comme en relative stabilité. Enfin pour quelques rares espaces (3% des côtes étudiées), la côte a avancé entre 1963 et 2010. Ces petites avancées côtières sont toujours liées à la perturbation des dynamiques sédimentaires par les aménagements anthropiques ou par des remblaiements réalisés aux dépens des hauts fonds. Ainsi, les côtes sont vulnérables et sont parfois en fort recul.

La vulnérabilité des côtes de l'archipel est grande et elle s'est accentuée depuis les années 1960. Les côtes sont majoritairement fragiles et vulnérables à l'érosion et aux submersions marines. L'élévation du niveau de la mer par le jeu de la subsidence conduit à une plus grande sensibilité à l'érosion des côtes. L'extension des zones urbanisées littorales a amené à la concentration plus importante d'enjeux en zone vulnérable. Ainsi, de plus en plus d'habitations et d'activités très importantes pour l'archipel se trouvent très proches de la mer. Associés à ces constructions côtières, les aménagements littoraux sont nombreux sur certaines zones et perturbent les dynamiques littorales et sédimentaires. La perturbation de ces dynamiques entraine actuellement une augmentation de la vulnérabilité à l'érosion en arrière des digues ou sur les espaces proches des aménagements. Elle entraîne également une vulnérabilité à long terme au niveau des espaces aménagés. En effet les aménagements ne peuvent pas stopper l'érosion mais seulement la ralentir.

Le recul de la côte n'est pas le seul danger auquel doit faire face l'archipel et ses habitants. L'extension des sebkhas et la salinisation des sols est également un danger menaçant.

# Chapitre 7.

## L'évolution de l'occupation du sol et des surfaces des sebkhas de l'archipel entre 1963 et 2010

---

Depuis 1963, l'occupation du sol dans l'archipel de Kerkennah a évolué. Le bâti s'est étendu (Kebaïli Tarchouna, 2013) et les systèmes de production ont changé, passant d'une agriculture pluviale à une agriculture irriguée (Rhouma *et al.*, 2005). Certains auteurs ont remarqué une perturbation du fonctionnement naturel des sebkhas de l'archipel de Kerkennah et de leur extension (Slim *et al.*, 2004; Fehri, 2011). La situation a donc changé depuis 1963. L'objectif de ce chapitre est de comprendre comment l'évolution de l'occupation du sol a pu engendrer une évolution de la vulnérabilité à la salinisation. Pour ce faire nous avons choisi de mesurer ces évolutions de l'occupation du sol par des méthodes de télédétection grâce aux images Landsat TM5 de 1984 et 2011 puis de photo-interprétation grâce aux photographies aériennes de 1963 et à l'image SPOT 5 de 2010. Les objectifs du chapitre sont multiples :

- Définir l'évolution de l'occupation du sol entre 1963, 1984, 2010 et 2011,
- Comprendre les dynamiques d'évolution des différents types d'occupation du sol, proposer un système qui explique comment ils ont abouti à une évolution de la vulnérabilité liée à la salinisation des sols et tenter de la cartographier.

Ainsi le chapitre sera découpé en trois sous chapitres. Le premier décrit les méthodes spécifiques employées pour l'étude diachronique de l'occupation du sol dans l'archipel. Le deuxième présente les résultats de cette étude diachronique. Le dernier est une discussion qui propose des hypothèses aux causes d'extension de la salinisation des sols puis tente de cartographier la vulnérabilité qui lui est associée.

# 1. Occupation des sols en 1963, 1984, 2010 et 2011

## 1.1. Détermination de l'occupation du sol par télédétection

Les images Landsat 5 TM sont utilisées dans le cadre de la détermination de l'évolution de l'occupation du sol dans l'archipel de Kerkennah entre 1984 et 2010. Les traitements, réalisés sur le logiciel ENVI 4.3, des images Landsat 5 TM du 18 juin 1984 et 29 juin 2011 sont scindés en trois étapes. D'abord les prétraitements nécessaires pour gommer ou atténuer au maximum les effets de l'atmosphère. Ensuite les traitements permettant d'aboutir à la classification des pixels pour obtenir l'occupation du sol de l'archipel aux deux dates de prises de vues grâce à une classification dirigée. Enfin le croisement des deux cartes aboutissant à une série de cartes montrant l'évolution de l'occupation du sol.

### 1.1.1.Les prétraitements

Comme expliqué précédemment (Chapitre 4, p. 115), les images Landsat TM 5 du 18 juin 1984 et du 29 juin 2011 qui ont été fournies ont subi des corrections de niveau L1T (Standard Terrain Correction) c'est-à-dire à la fois des corrections géométriques (calage et géoréférencement) et des corrections radiométriques (corrections des effets de l'atmosphère).

Afin d'éliminer au mieux les effets atmosphériques et être certain que ces effets auront une influence mineure sur les résultats, elles ont subi des prétraitements qui consistent en l'élimination ou l'atténuation de ces effets. Comme vu précédemment (cf. p. 115), le signal arrivant sur Terre et repartant vers l'atmosphère est perturbé par les interactions avec l'atmosphère mais aussi avec l'objet qu'il rencontre à la surface de la Terre. L'information qui est recherchée pour définir les états de surface de l'archipel concerne uniquement les interactions avec les objets rencontrés sur la surface terrestre. Ces interactions avec les objets rencontrés sont de différents types et l'énergie pourra être soit transmise, soit absorbée ou réfléchie (Caloz & Collet, 2001). L'ensemble de ces interactions doivent être prises en compte pour corriger les effets de l'atmosphère. De même, les effets de diffusion peuvent être importants lors d'épisodes de Sirocco durant lesquels des particules sahariennes sont en suspension dans l'atmosphère. Le choix de la date de prise de vue est donc primordial pour

éviter au maximum ces effets qui ne seront toutefois jamais nuls. Pour corriger ces effets atmosphériques et pouvoir utiliser les informations de rayonnement afin de déterminer l'occupation du sol, le modèle SMAC (Simplified Method for Atmospheric Correction) a été utilisé. Elaboré par Rahman et Dedieu (1994) à partir du modèle 5S développé par Tanré *et al.* (1990), il permet une correction atmosphérique rapide des bandes spectrales. Ce modèle permet d'appliquer à chaque bande spectrale une transformation linéaire de type $Y = Ax + B$ où $Y$ est la valeur finale du pixel et $x$ la valeur originelle du pixel. La détermination des valeurs de A et B varie selon les caractéristiques de la visée (angle zénithal et angle azimutal), les paramètres atmosphériques (la pression, la vapeur d'eau et l'ozone); et la visibilité ou l'épaisseur optique. La quantité de vapeur d'eau et d'ozone n'étant pas disponible pour nos deux dates (ces valeurs sont d'ailleurs très variables au cours de la journée ce qui rend leur estimation très complexe) nous avons utilisé les valeurs déterminées par le modèle « tropical » (région proche de masses océaniques ou maritimes dont les températures dépassent les 30°C). Une application de ce modèle a été mise en place par J.C. Berges (Université Paris Diderot, UMR 8586 PRODIG) et est disponible sur le serveur de l'UMR PRODIG.

Les images ont ensuite été recadrées pour ne concerner que la zone étudiée c'est-à-dire l'archipel de Kerkennah. Enfin, l'étirement des contrastes (amélioration visuelle des images) a été réalisé par recalibrage de l'histogramme de chaque image.

Ces prétraitements sont tous indispensables (Bonn & Rochon, 1992; Robin, 1995; Girard & Girard, 2010) et permettent ainsi aux images d'être prêtes à être traitées pour répondre à la problématique. Dans cette étude elles serviront à avoir une vue générale de l'évolution des états de surface de l'archipel entre 1984 et 2011 et de tenter de mesurer l'évolution des sebkhas durant ces 27 années.

#### 1.1.2. La détermination des états de surface de l'archipel : la classification dirigée

Les traitements numériques réalisés sur les images du 18-06-1984 et du 29-06-2011 consistent en une classification dirigée. Il s'agit de regrouper les pixels de l'image en différentes classes, c'est-à-dire à simplifier la réalité afin de pouvoir définir des zones de pixels homogènes (Girard & Girard, 2010) et ainsi définir l'occupation du sol d'un territoire à une date donnée. La classification dirigée se construit en plusieurs étapes (Figure 83).

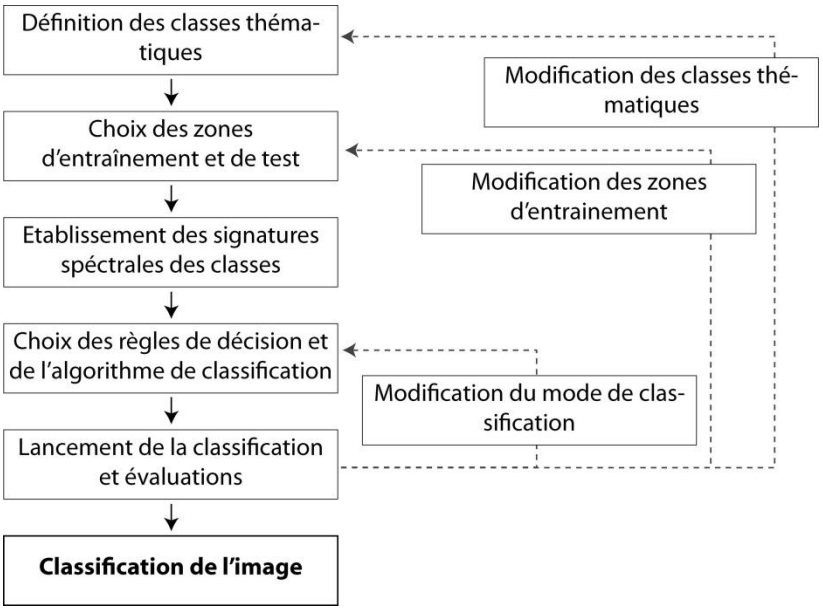



***Figure 83: Processus d'une classification dirigée avec les étapes itératives (Modifié de Caloz & Collet, 2001)***

La première étape est la définition des classes thématiques. Ici, les différentes classes thématiques doivent représenter l'occupation du sol de l'archipel (sol nu, sebkhas, zones irriguées, bâti, palmeraie, vergers, marais maritimes, estran, végétation marine, mer et salines). La seconde est le choix des zones d'entraînement et de test. Ces dernières sont des zones délimitées de pixels dont on sait ce qu'ils représentent et qui vont pouvoir servir de modèle au logiciel pour classer l'ensemble des pixels de l'image (Caloz & Collet, 2001; Girard & Girard, 2010). Ces zones d'entraînement peuvent être définies par création d'un polygone à l'intérieur duquel un type d'occupation du sol est représenté et qui est relevé par GPS sur le terrain. Elles peuvent également l'être par création d'un polygone directement sur l'image satellite c'est-à-dire, par interprétation visuelle mais ceci implique une bonne connaissance du terrain. 8 et 9 zones d'entraînement ont été définies respectivement en 1984 et en 2011, dont les signatures spectrales (Figure 84) sont très spécifiques et bien différenciées, ce qui permet une bonne classification des pixels dans les différentes classes.

Les deux premières zones d'entraînement représentent le milieu marin. La première correspond à la mer « profonde » et inclut les surfaces immergées tout au long de l'année quelle que soit l'amplitude de la marée (Figure 84). La seconde correspond aux espaces marins où l'eau est très peu profonde et qui sont parfois découverts lors des marées basses. Toutes deux ont été définies par interprétation visuelle sur les images. Les autres zones d'entraînement représentent des portions terrestres. La troisième zone d'entraînement correspond aux surfaces de marais maritimes caractérisés par une humidité importante et une

végétation halophile couvrante de type *Saliconia* et a été définie par GPS sur le terrain. La quatrième correspond aux sebkhas dont la végétation est plus dispersée voir absente et dont les sols sont moins humides que celui des schorres et qui a également été définie sur le terrain. La cinquième représente la palmeraie et les sols nus de l'archipel. Ces deux espaces ont été regroupés car, dans la palmeraie, les palmiers sont parfois très espacés et ne sont pas détectés par les capteurs du satellite. Ainsi la classification en deux classes ne donnait aucun résultat lisible mais un enchevêtrement de pixels non conforme à la réalité. La sixième correspond aux espaces irrigués et a été définie pour 2011, par relevé GPS sur le terrain. En 1984, avant la création des zones irriguées, les jardins autour des localités étaient beaucoup plus développés qu'actuellement et étaient irrigués ou plutôt arrosés individuellement. En 2011, ces espaces relativement vastes de jardins ont été réduits de manière importante. Enfin, une septième zone d'entraînement qui concerne les zones bâties a été définie aux deux dates par interprétation visuelle des images satellites. Une zone d'entraînement a été ajoutée pour l'image de 2011 qui représente les salines. Ces dernières sont en eaux en 2011 d'où une réponse spectrale très spécifique car la zone est couverte d'une fine couche d'eau très salée. A l'inverse elles sont sèches en 1984 ; la réponse spectrale s'apparente donc à celle des sebkhas.

Les zones d'entraînement définies, la classification dirigée peut être lancée (Figure 83 étape 4). Dans cette étude, le choix de la méthode de classification s'est porté sur le maximum de vraisemblance. Cette méthode est, selon Caloz et Collet (2001), *« la plus aboutie car elle s'appuie sur des considérations théoriques approfondies »* en particulier des lois mathématiques probabilistes.

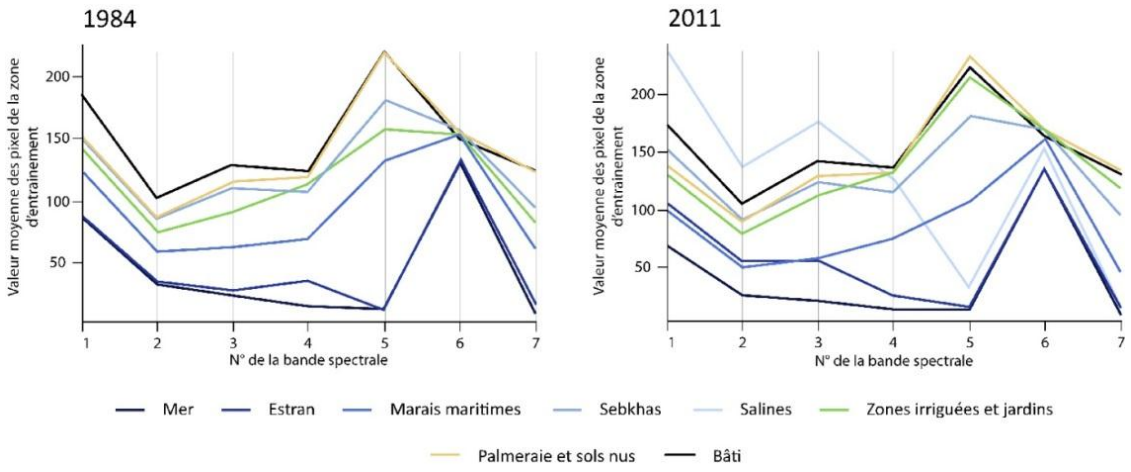



***Figure 84: Caractéristiques spectrales des zones d'entraînement pour les classifications dirigées sur les images du 18 juin 1984 et du 29 juin 2011***

Le logiciel classe les différents pixels de l'image (y compris ceux des zones d'entraînement) en fonction de leur ressemblance avec les caractéristiques des pixels issus de ces même zones d'entraînement, de manière à ce que les pixels soient bien répartis dans les classes définies par le télédétecteur (Girard & Girard, 2010). Après la classification, une évaluation est absolument nécessaire (Figure 83). En effet, la qualité des zones d'entraînement peut se révéler mauvaise et entraîner une classification finale de mauvaise qualité (Girard & Girard, 2010). Plusieurs itérations ou modifications des zones d'entraînement sont parfois nécessaires et l'approche par le terrain est indispensable pour réaliser une bonne classification. Selon Girard et Girard (2010), six types de modification des zones d'entraînement peuvent être entrepris et sont regroupés ici en quatre points:

- Les zones d'entraînement sont de bonne qualité donc il n'existe aucune nécessité de les modifier. Cela fut le cas dans notre étude avec les classes marines en particulier.

- Les zones d'entraînement sont spectralement très proches les unes des autres mais on souhaite les conserver telles quelles. Cette décision est prise selon l'objet de l'étude et si la conservation de différentes classes très proches apporte une plus-value à l'étude. Ainsi nous avons conservé les classes de marais maritimes et sebkhas séparées car nous souhaitions étudier les dynamiques des sebkhas en excluant les marais maritimes.

- Les zones d'entraînement ont des réponses spectrales très proches et les classes sont très morcelées, se mélangent entre elles et ne correspondent pas à la réalité de terrain. La redéfinition des zones d'entraînement est indispensable, soit pour les redéfinir, soit pour les fusionner ou pour supprimer l'une des classes, auquel cas les pixels seront répartis dans d'autres classes les plus proches. Ce fut le cas entre les classes de sol nu et de palmeraie qui ont finalement été fusionnées. Cette limite majeure ne permet pas d'étude très précise à l'échelle de l'archipel et contraint les études par télédétection à un niveau global et finalement assez grossier.

- Enfin, si trop de pixels ne sont pas classés, c'est-à-dire que leurs caractéristiques spectrales sont trop éloignées de celles des classes, alors il convient de créer une nouvelle classe et donc de définir une nouvelle zone d'entraînement.

L'évaluation de la classification passe, en plus d'appréciations visuelles, par la consultation d'une matrice de confusion qui est générée par le logiciel de traitement des images (ENVI 4.3). Cette matrice

*« permet d'apprécier l'homogénéité de chaque groupe thématique et donc des zones d'entraînement choisies avant la classification » (Girard & Girard, 2010)*

Dans cette étude, 2 images ont subi des traitements et donc 2 classifications différentes doivent être validées (Tableau 18 et Tableau 19). En colonne sont représentées les données des zones d'entraînement définies indépendamment de celles utilisées pour réaliser la classification sur les deux images Landsat 5 TM et en ligne sont représentées les données issues de la classification. Les cases en diagonale représentent les pixels correctement classés. Afin de savoir si la classification est globalement bonne, la précision globale (overall accuracy) est calculée en divisant le nombre de pixels correctement classés (somme des valeurs de la diagonale) par le nombre de pixels dans la matrice de confusion (Congalton, 1991). C'est-à-dire $52944/53924 = 98{,}18\%$ pour l'image du 18 juin 1984 et $69684/70065 = 99{,}45\%$ pour l'image du 29 juin 2011. Ces très hautes valeurs signifient que les pixels ont été globalement bien classés et que les classifications sont de bonne qualité (Congalton, 1991; Girard & Girard, 2010).

L'indice de Kappa permet également de juger de la qualité des classifications (Congalton, 1991). Cet estimateur de précision varie de 0 à 1.

*« Il tient compte des erreurs en lignes et en colonnes. Il permet une évaluation globale mais aussi au niveau de chaque classe. » (Girard & Girard, 2010)*

***Tableau 18: Matrice de confusion pour la classification de l'image du 18 juin 1984***

| Classe | Mer | Bâti | Estran | Sebkha | Verger | palmeraie | Végétation marine | Schorre | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Non classés | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mer | **44830** | 0 | 569 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45399 |
| Bâti | 0 | **191** | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 196 |
| Estran | 0 | 0 | **3794** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3794 |
| Sebkha | 0 | 0 | 0 | **878** | 2 | 3 | 0 | 0 | 883 |
| Verger | 0 | 0 | 0 | 0 | **54** | 0 | 0 | 0 | 54 |
| Palmeraie | 0 | 17 | 0 | 8 | 5 | **918** | 0 | 0 | 948 |
| Végétation marine | 0 | 0 | 267 | 0 | 0 | 0 | **1474** | 0 | 1741 |
| Schorres | 0 | 0 | 0 | 104 | 0 | 0 | 0 | **805** | 909 |
| Total | 44830 | 208 | 4630 | 990 | 61 | 926 | 1474 | 805 | **53924** |

***Tableau 19: Matrice de confusion pour la classification de l'image du 29 juin 2011***

| Classe | Bâti | Sebkha | Estran | Mer | Végétation marine | Zones irriguées | Saline | Schorre | Palmeraie et sol nu | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Non classés | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bâti | **452** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 452 |
| Sebkha | 3 | **978** | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 323 | 8 | 1325 |
| Estran | 0 | 0 | **893** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 893 |
| Mer | 0 | 0 | 0 | **63423** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63423 |
| Végétation marine | 0 | 0 | 0 | 0 | **1225** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1225 |
| Zones irriguées | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **93** | 0 | 0 | 9 | 102 |
| Saline | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **190** | 0 | 0 | 190 |
| Schorres | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **937** | 0 | 937 |
| Palmeraie et sol nu | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 23 | **1493** | 1518 |
| Total | 455 | 978 | 893 | 63423 | 1225 | 95 | 203 | 1283 | 1510 | **70065** |

L'apport principal de cet indice par rapport au calcul de la précision globale est qu'il prend en compte les erreurs de chaque ligne et de chaque colonne (erreurs d'omission et de commission qui seront détaillées au paragraphe suivant). Son principal défaut est que la valeur obtenue dépend du nombre de lignes et de colonnes de la matrice de confusion. L'indice de Kappa compare l'erreur de la classification avec une classification au hasard. Plus la valeur de l'indice de Kappa est élevée, meilleure est la classification. Dans cette étude, les valeurs de l'indice de Kappa sont de 0,94% pour l'image de 1984 et de 0,97% pour l'image de 2011. Ces valeurs très élevées montrent que près de 94% en 1984 et 97% en 2011 des classifications de pixels ne sont pas dues au hasard et donc que les classifications sont de bonne qualité. Cependant, ces valeurs signifient également que 6% des pixels des ROI indépendants ont été mal classés pour 1984 et 3% pour ceux de 2011.

Les deux classifications sont donc globalement de bonne qualité à la vue des résultats de la précision globale et de l'indice de Kappa. Cependant, la classification dans les classes doit également être appréhendée et cette appréciation se fait grâce à 2 indices : La précision du producteur puis celle de l'utilisateur, dont les résultantes sont respectivement l'erreur d'omission (ou erreur d'exclusion) et l'erreur de commission (ou erreur d'inclusion). Ces indices de précision et d'erreurs sont répertoriés dans les Tableau 20 et Tableau 21.

La précision du producteur correspond à la division du nombre de pixels correctement classés dans une classe (valeur de la diagonale) par le total de pixels de cette catégorie (valeur du total en colonne).

*« [elle représente] la probabilité pour un pixel de la classe* x *sur le terrain, d'être bien classé en* x *sur l'image » (Girard & Girard, 2010)*

*« Cette mesure de précision indique la probabilité qu'un pixel de référence* (issu d'une zone d'entraînement) *soit correctement classé » (Congalton, 1991 traduit de l'anglais)*

Le résultat sera exprimé en pourcentage et la différence jusqu'à 100 correspond à l'erreur d'omission ou d'inclusion. Plus la précision est grande (et donc logiquement, plus l'erreur d'omission est faible) et plus les pixels de la classe étudiée auront été bien classés. A l'inverse, plus l'erreur d'omission est faible, meilleure est la classification. C'est-à-dire que le pourcentage de pixels de référence (issus des zones d'entraînement) attribué à d'autres classes est faible.

Par exemple, concernant l'image du 18 juin 1984, la classification est parfaite pour les classes « mer », « végétation marine » et « schorre » (Tableau 20). C'est-à-dire que les pixels intégrés dans ces zones d'entraînement ont été classés dans les classes correspondantes. L'erreur d'omission est donc de 0% et la précision du producteur de 100%. A l'inverse, la classe « estran » a les moins bons résultats. En effet, 18,1% des pixels que nous avions déterminés comme de la végétation marine ont été distribués dans d'autres classes. Pour savoir d'où vient la confusion et connaître les classes où ils ont été classés, il faut revenir à la matrice de confusion (Tableau 18) qui montre que les pixels de référence mal classés de la classe estran ont été redirigés vers la classe correspondant à la mer et la végétation marine. Cependant, le résultat de la classification reste bon avec 81,9% de précision de producteur. Concernant l'image du 29 juin 2011, la classification est la moins bonne pour la classe « schorre » ce qui signifie que 27% des pixels de la zone d'entraînement ont été classés dans d'autres classes qui sont la classe palmeraie non entretenue et la classe sebkha. Comme pour l'image du 18 juin 1983, les valeurs de précision du producteur sont élevées.

La précision de l'utilisateur correspond à la division du nombre de pixels correctement classés dans une classe (valeur de la diagonale) par le nombre de pixels qui ont été classés dans cette classe (Congalton, 1991).

*« [elle représente] la probabilité pour un pixel classé en x sur l'image d'appartenir à x sur le terrain » (Girard & Girard, 2010)*

*« cette mesure indique la probabilité qu'un pixel classé dans une classe sur l'image représente effectivement cette classe sur le terrain » (Congalton, 1991 traduit de l'anglais)*

Le résultat sera exprimé en pourcentage et la différence jusqu'à 100 correspond à l'erreur de commission ou d'exclusion. Plus la précision est grande (et donc logiquement, plus l'erreur de commission est faible) et plus les pixels de la classe étudiée auront été bien classés. A l'inverse, plus l'erreur de commission est faible, meilleure est la classification : c'est-à-dire que le pourcentage de pixels d'une classe qui ne correspond pas aux caractéristiques de la zone d'entraînement correspondante est faible.

Concernant l'image du 18 juin 1984, la plus faible valeur de précision de l'utilisateur est de 84,6% pour la classe de végétation marine (Tableau 20). Ceci signifie que sur l'image finale, 84,6% des espaces définis comme étant de la végétation marine le sont effectivement et que 15,35% ne le sont pas. Les pixels ont été confondus avec ceux de la classe estran. Toutes les autres classes ont des précisions de l'utilisateur de plus de 85%, ce qui est bon.

Concernant l'image du 29 juin 2011, seules les sebkhas ont une précision de l'utilisateur relativement faible de 73,81% (Tableau 21). Les pixels ont été confondus avec ceux des classes « schorre », « saline » et « bâti » (Tableau 19).

***Tableau 20: Indicateurs de précision de la classification de l'image du 18 juin 1984***

| | Précision de l'utilisateur (%) | Erreur de commission (%) | Précision du producteur (%) | Erreur d'omission (%) |
|---|---|---|---|---|
| Mer | 98,75 | 1,25 | 100 | 0 |
| Bâti | 97,45 | 2,55 | 91,8 | 8,2 |
| Palmeraie non entretenue | 96,8 | 3,2 | 99,1 | 0,9 |
| Vergers | 100 | 0 | 88,52 | 11,5 |
| Schorres | 88,6 | 11,4 | 100 | 0 |
| Estran | 100 | 0 | 81,9 | 18,1 |
| Sebkha | 99,4 | 0,6 | 88,7 | 11,31 |
| Végétation marine | 84,66 | 15,34 | 100 | 0 |

***Tableau 21: Indicateurs de précision de la classification de l'image du 29 juin 2011***

| | Précision de l'utilisateur (%) | Erreur de commission (%) | Précision du producteur (%) | Erreur d'omission (%) |
|---|---|---|---|---|
| Bâti | 100 | 0 | 99,3 | 0,6 |
| Palmeraie non entretenue | 98,3 | 1,7 | 98,9 | 1,1 |
| Sebkha | 73,81 | 26,2 | 100 | 0 |
| Estran | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Mer | 100 | 0,0 | 100 | 0 |
| Végétation marine | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Zones irriguées | 91,2 | 8,8 | 97,9 | 2,1 |
| Salines | 100 | 0 | 93,6 | 6,4 |
| Schorres | 73 | 27 | 100 | 0 |

Dans cette étude, 9 itérations du processus de modification des zones d'entraînement ou des classes thématiques ont été nécessaires avant d'aboutir à un résultat satisfaisant et conforme aux observations de terrain. Certaines zones d'entraînement ont été regroupées en une seule comme la végétation marine et la mer, d'autres ont été affinées plusieurs fois pour aboutir à la classification finale et à la détermination de l'occupation du sol le 18 juin 1984 (Figure 85 - A) et le 29 juin 2011 (Figure 85 - B).

Les deux cartes ainsi obtenues sont croisées grâce au logiciel ENVI 4.3 et au module *change detection statistic*. Ce module permet d'obtenir d'une part les cartes de l'évolution de chaque classe de pixels (ici 8) tels qu'ils ont évolué vers d'autres classes et d'autre part les tableaux montrant les statistiques de la répartition des pixels dans les nouvelles classes. Ces différentes cartes permettent, après fusion et quelques simplifications, de cartographier l'évolution des différents types d'occupation du sol dans l'archipel de Kerkennah. Elles constituent les résultats de cette étude qui seront détaillés à la page 228.

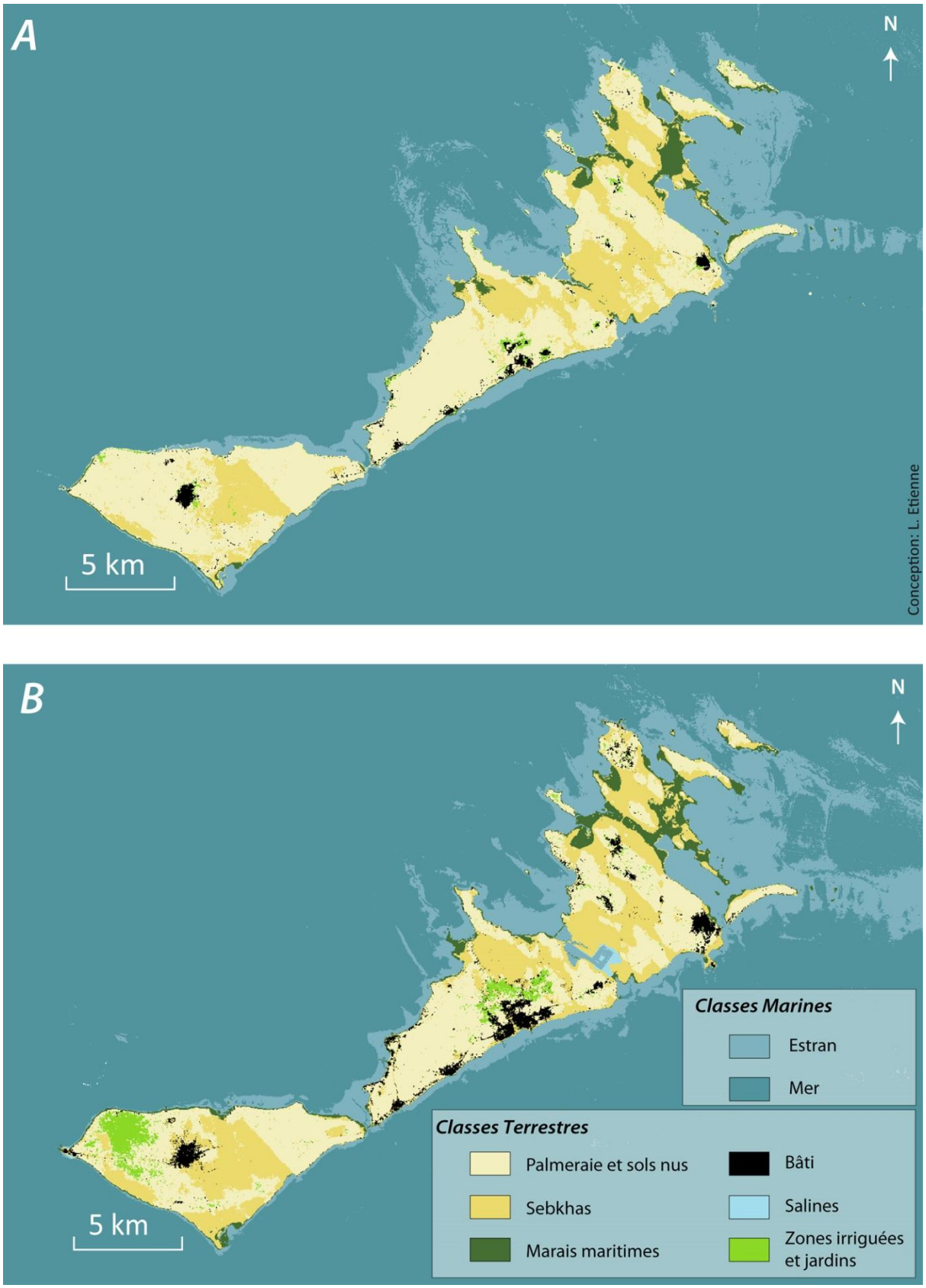



***Figure 85: Occupation du sol le 18 juin 1984 (A) et le 29 juin 2011 (B) (source : images Landsat TM5)***

### 1.2. Méthode de détection de la limite des sebkhas par photo-interprétation

L'étude de l'extension des sebkhas passe par la définition et la localisation de leurs bordures. Ceci est particulièrement complexe puisque le passage de la sebkha à l'extérieur de celle-ci se fait très graduellement. Ces espaces de transition sont particulièrement vulnérables puisqu'ils sont ceux dont les caractéristiques vont le plus rapidement basculer vers des caractéristiques de sebkha. L'augmentation de la salinité ainsi que de l'humidité du sol sont des dangers à la fois pour les activités agricoles et pour les bâtiments. Ainsi, délimiter des sebkhas est une première étape vers la définition de la vulnérabilité qui leur est liée.

Les bordures de sebkhas ont été assez peu étudiées et les chercheurs se concentrent beaucoup plus souvent sur leur cœur, sur le fonctionnement « normal » et non dégradé du « système sebkha » afin de comprendre, soit les mécanismes hydro-éoliens de ces espaces (cf : p. 84), soit d'en comprendre l'origine et l'histoire de leur formation. Lorsque les bordures de sebkhas sont évoquées, il s'agit le plus souvent de descriptions théoriques (Par exemple Yechieli & Wood, 2002) ou d'explications des phénomènes s'y produisant, comme les variations de la salinité ou l'étude des successions végétales (Par exemple Khaznadar *et al.*, 2009; Dhaher, 2011). Ces espaces de transition sont peu étudiés pour eux-mêmes et les tentatives de délimitation des sebkhas sont souvent associées à une étude nécessitant la cartographie de leurs bordures. Plusieurs études portent sur l'évolution des surfaces de sebkhas en utilisant des méthodes de télédétection soit à l'échelle intra-annuelle dans le but d'évaluer les dynamiques d'extension et de régression des surfaces en eau ou sèches au cours de l'année (Castaneda *et al.*, 2005), soit à l'échelle interannuelle afin de quantifier des évolutions sur le long terme (Maman *et al.*, 2011; Etienne *et al.*, 2012; Chouari, 2013). Dans ces cas, les bordures des sebkhas sont définies par les signatures spectrales caractéristiques des sols relativement humides et salés (en saison humide) et secs et couverts d'une pellicule de sel (en saison sèche). Hormis les études de télédétection qui utilisent les caractéristiques spectrométriques des surfaces, très peu d'études précisent les méthodes de délimitation des sebkhas (photo-interprétation, relevés de terrain…) y compris lorsqu'il y a cartographie et parfois évaluation des surfaces. Nous n'avons pas trouvé de méthode de détection des limites de sebkhas par photo-interprétation, c'est pourquoi nous avons recherché une ligne représentative de la bordure des sebkhas qui soit adaptée aux photographies aériennes et à l'image SPOT 5. Les sebkhas de l'archipel de Kerkennah sont toutes littorales et la majorité d'entre elles ont une ouverture vers la mer. Leur bordure est donc constituée, en partie, du

trait de côte dont la détection est parfois assez peu précise (marge d'erreur de plus de 6 mètres). Outre ces bordures côtières, la limite des sebkhas est caractérisée par une baisse de la salinité du sol qu'il est impossible de détecter par photo-interprétation mais qui marque la végétation. A Kerkennah, nous avons vérifié la validité de cette relation sur deux transects sur lesquels nous avons fait des relevés de salinité en fonction du type de couvert végétal. La transition de la palmeraie à la sebkha est marquée par une succession végétale caractéristique observable sur le terrain (Figure 88). Elle se caractérise par le passage d'une surface nue au cœur des sebkhas, à un couvert plus ou moins dense de végétation halophile caractéristique des chotts (qui sont intégrés aux sebkhas dans cette étude), puis à de l'alpha et enfin, apparaissent les palmiers un peu plus loin (Figure 88). Cette transition est très bien corrélée avec l'appauvrissement du sol en sel (Figure 88). En effet, les parcelles agricoles se concentrent dans les espaces les moins touchés (jusqu'à 750 µS/cm). Les dernières parcelles agricoles bordent les zones de moyenne salinité (entre 2000 et 4000 µS/cm) dans lesquelles l'alpha et les palmiers sont les plantes les plus abondantes. Enfin, la disparition des palmiers coïncide avec l'apparition des espaces les plus salés, avec des relevés montrant de très forts taux de sel dans le sol (jusqu'à 6200 µS/cm).

Les photographies aériennes ainsi que l'image SPOT 5 ne permettent pas de distinguer ces différents couverts végétaux. La végétation basse halophile est ainsi très peu discernable d'un sol foncé (humide par exemple) et l'alpha, de couleur claire, n'est pas discernable sur les sols secs. Finalement, les palmiers sont les seuls indices montrant les limites de la sebkha à être détectables sur les photographies aériennes dont nous disposons et sur l'image SPOT 5 de 2010 (Figure 87). Cette limite marque donc un seuil repérable du passage de la sebkha trop salée pour permettre la croissance des palmiers, à la palmeraie au sol moins salé.

Cependant des biais existent dans la définition de cette limite :

-Le premier est que nous utilisons un indicateur de la salinité qui est la limite des palmiers. Cette indicateur peut ne pas être en parfaite corrélation avec la salinité. L'évolution de la ligne des palmiers n'est pas forcément liée à l'augmentation de la salinité,

-Le deuxième est que les palmiers sont relativement éloignés les uns des autres (parfois une dizaine de mètres) et qu'entre deux arbres, la ligne tracée est arbitraire par rapport à la salinité qui est continue,

- Le troisième est lié aux différentes causes de mortalité des palmiers qui peut être naturelle, liée à l'exploitation du *Legmi*[5] et des cœurs de palmiers et enfin à l'arrachage des palmiers. Les conséquences spatiales de ces causes de mortalités sont différentes. Les deux premiers facteurs sont des phénomènes ponctuels et ne sont pas circonscrits à un espace particulier dans l'archipel. Des palmiers meurent donc de mort naturelle ou de maladie n'importe où dans l'archipel et il n'existe pas de zone spécifique dédiée à la récolte du *Legmi* ou des cœurs de palmiers. Ainsi, des palmiers à la cime coupée (pour la récolte des cœurs) sont visibles au cœur même de la palmeraie (Figure 86 - B). L'arrachage des palmiers par l'homme est un phénomène délimité dans l'espace. Les coupes sont effectuées sur des terrains réduits mais concernent souvent plusieurs palmiers. Cette pratique, relativement rare, est uniquement utilisée lorsque les palmiers gênent et nuisent à l'installation d'une autre activité (autre culture et en particulier l'olivier dans les zones irriguées) ou des habitations (en particulier dans les zones nouvellement bâties comme les zones touristiques). Ainsi, l'arrachage des palmiers est souvent cantonné à des espaces éloignés des sebkhas, même si de nouvelles parcelles où les palmiers sont arrachés sont situées en bordure de sebkhas. La mort des palmiers par augmentation de la salinité du sol, et donc par extension des espaces de sebkha, est également un phénomène délimité dans l'espace qui se cantonne aux espaces en bordure des sebkhas (Figure 86 – A). Ainsi, l'attractivité des espaces irrigués et des nouveaux espaces bâtis (zones touristiques) et le caractère répulsif des bordures de sebkhas où l'agriculture n'est pas rentable expliquent la mort localisée et en grand nombre des palmiers. Il peut arriver que des palmiers aient été arrachés sur les zones en bordures de sebkahs pour créer des parcelles agricoles.

Les limites de sebkhas ont été définies en 1963 et en 2010 en suivant la ligne des palmiers pour toutes les sebkhas contenues dans la zone où les images de 1963 ont pu être calées (cf : Figure 56, p. 135). Elles représentent donc 2583ha (soit 28% de la zone d'étude) en 1963 et 3048ha en 2010 (soit 33% de la zone d'étude). Les sebkhas étudiées sont : la sebkha Alif Ennkhal, Khnadfa, Eilija, Henchir Salem, Essendouk et El Khalij ainsi que les petits espaces de sebkhas ne portant pas de dénomination, elles sont situées à l'ouest des salines (cf : Figure 41, p. 90). Les mesures de l'évolution des surfaces de sebkhas seront effectuées en comparant les surfaces des sebkhas en 1963 et en 2010.

[5] Le Legmi est la sève de palmier parfois fermentée. *« Les palmes de la couronne moyenne et du cœur sont coupées jusqu'à apparition du Jommar (cœur du palmier) puis on procède à des coupes régulières très minces deux fois par jour soit d'une façon horizontale ou à l'oblique » (Rhouma et al., 2005)*

***Figure 86: Mort des palmiers dans l'archipel de Kerkennah***

Finalement, même si nous utilisons une ligne délimitant la sebkha (Figure 87) et les terres agricoles, basée sur un indicateur, nous restons pleinement conscients que cet espace est une transition douce marquée par un gradient de salinité. Les terres qui sont dans la zone de transition (Figure 87) sont particulièrement vulnérables car en passe d'acquérir des caractéristiques de sebkhas et donc de devenir incultes et inhospitalières.

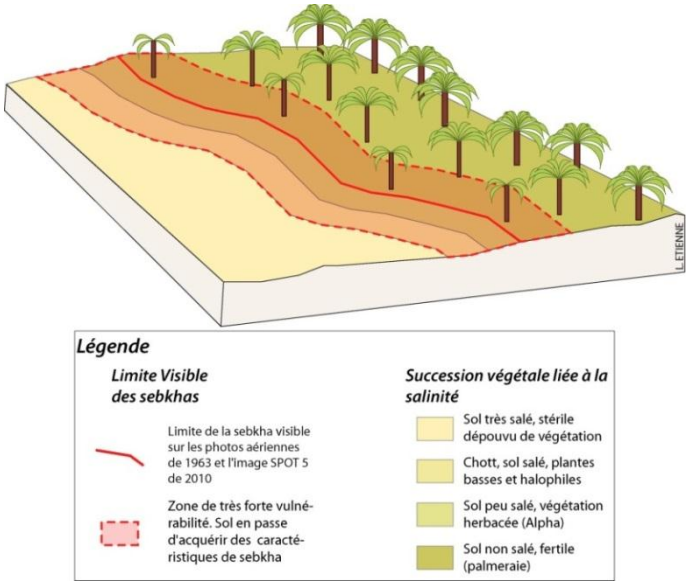



***Figure 87: Position de la limite des sebkhas telle qu'interprétée sur les photographies aérienne de 1963 et sur l'image SPOT 5 de 2010***

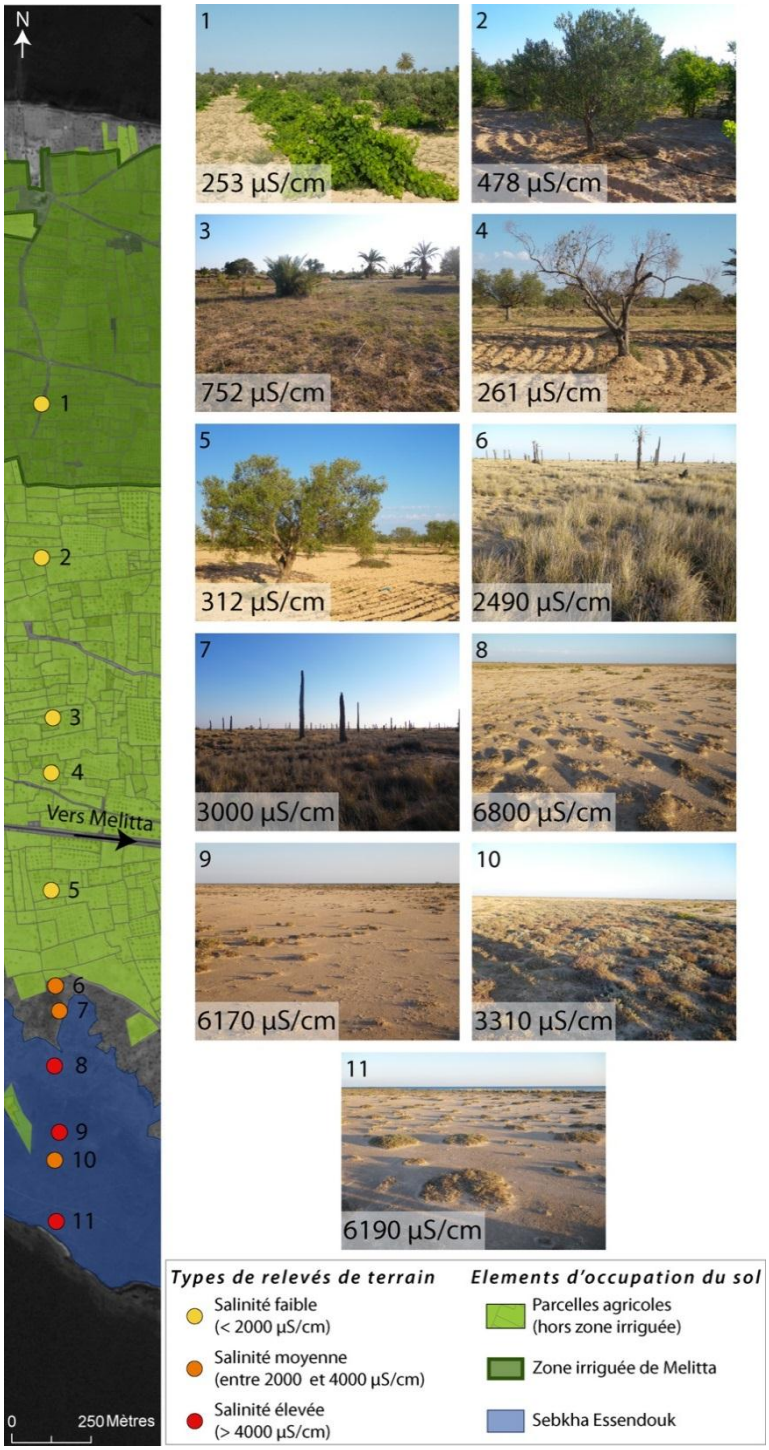



***Figure 88: Succession végétale des sebkhas aux palmeraies et détection de la bordure de sebkha : exemple de la sebkha Essendouk au sud de Gharbi (sources : Image SPOT 5 de 2010 ; photographies et relevés de salinités réalisés en juin 2011)***

1. *Parcelle agricole irriguée dans le périmètre autorisé bénéficiant d'un réseau de drainage (salinité de 253 µS/cm), 2. Parcelle agricole irriguée hors du périmètre autorisé ne bénéficiant pas du réseau de drainage (salinité de 478 µS/cm), 3. Parcelle agricole abandonnée, végétation basse spontanée (salinité de 752 µS/cm), 4. Parcelle agricole non irriguée (salinité de 261 µS/cm). Notez les pratiques culturales différentes entre zones irriguées (création d'un bourrelet de terre à environ 20-30 cm autour du tronc de chaque arbre) et zone d'agriculture en sec (tronc couvert de terre sur 15-20 cm de haut), 5. Parcelle agricole non irriguée (salinité de 312 µS/cm), 6. Zone de palmeraie dominée par la présence d'Alpha, les palmiers sont vivants (salinité de 2490 µS/cm), 7. Zone de palmeraie en déclin, l'Alpha domine et les palmiers sont morts (salinité de 3000 µS/cm), 8. Zone de sebkhas végétalisée, végétation halophile dispersée (non jointe) en petite boules (salinité de 6800 µS/cm), 9. Végétation halophile éparse (salinité de 6170 µS/cm), 10. Végétation halophile jointe et plus haute qu'en 8 et 9 (salinité de 3310 µS/cm), 11. Même cas qu'en 8 (salinité de 6190 µS/cm).*

## 2. Mesure de l'évolution des espaces d'enjeux : zones urbaines, terres agricoles et surfaces de sebkhas

L'évaluation de l'évolution de l'occupation du sol a été rendue possible grâce à une approche de la télédétection et de photo-interprétation. Dans les deux cas, les études se basent sur une évolution entre 2 dates : entre 1984 et 2011 pour la télédétection et entre 1963 et 2010 pour la photo-interprétation. Quatre cartes d'occupation du sol sont donc réalisées grâce aux méthodes expliquées précédemment après quoi elles sont croisées deux à deux pour obtenir 2 cartes d'évolution de l'occupation du sol selon les deux méthodes. L'objectif de ces cartes d'évolution est d'évaluer les surfaces gagnées ou perdues par les différents éléments de l'occupation du sol. En télédétection et en photo-interprétation les éléments d'occupation du sol étudiés diffèrent, c'est pourquoi ils ne seront pas tous comparés pour les deux méthodes. Par exemple les parcelles irriguées ne sont pas détectées en photo-interprétation tandis qu'elles le sont en télédétection. D'autre part, seules les classes représentant des enjeux seront ici étudiées.

Les classifications dirigées réalisées à partir des images satellites de 1984 et de 2011 ont été croisées à l'aide de la fonction CROSSTAB d'ENVI 4.2 qui permet d'appréhender l'évolution des pixels au sein des différentes classes. Ainsi, un même pixel pourra être assigné à deux classes différentes aux deux dates d'étude. 8 classes ont été utilisées pour définir l'occupation du sol en 1984, contre 7 en 2011. De fait, les pixels de 1984 initialement distribués dans 8 classes ont été redistribués dans les 7 classes de 2011et ont ainsi pu avoir $8 * 7 = 56$ évolutions différentes. Il s'agit ensuite de regrouper les pixels selon les classes recherchées. Ici l'objectif est d'obtenir une carte représentant les zones d'extension ou de retrait des différents éléments d'occupation du sol sans se soucier de la provenance des pixels. Nous regrouperons, par exemple, l'ensemble des pixels représentant des terrains ayant évolué vers des paysages de sebkha sous une même dénomination. Les évolutions des classes sont fournies de manière globale et non individuelle pour chaque groupe de pixels concerné.

Les cartes d'occupation du sol réalisées par photo-interprétation ont été croisées sur le logiciel ArcGis 10 en soustrayant les couches des mêmes classes entre elles. Les résultats sont plus précis que ceux obtenus par télédétection car chaque polygone peut être étudié individuellement. Notre approche se concentre sur les classes qui représentent un enjeu dans le devenir de l'archipel : les zones habitées, les zones agricoles et les sebkhas. L'extension de leurs surfaces et leurs points de rencontre sont facteurs de vulnérabilité.

### 2.1. Une extension des surfaces bâties

Que ce soit par télédétection ou par photo-interprétation, les résultats concernant l'évolution des surfaces bâties montrent une extension importante avec un gain de de 600,5ha entre 1963 et 2010 (télédétection), et de 551,3ha entre 1984 et 2011 (photo-interprétation) (Tableau 22). La faible différence entre ces valeurs, malgré l'écart de durée entre les deux périodes, suggère que l'extension des surfaces bâties s'est produite majoritairement après 1984 et que les changements survenus entre 1963 et 1984 sont au contraire minoritaires.

***Tableau 22: Evolution des surfaces bâties par télédétection et par photo-interprétation***

| | **Par télédétection (ha) entre 1984 et 2011** | **Par photo-interprétation (ha) entre 1963 et2010** |
|---|---|---|
| **Bâti** | +551,3 | +600,5 |

Alors que la méthode par télédétection n'offre qu'une valeur globale sur l'ensemble de l'archipel, la photo-interprétation permet d'appréhender individuellement les localités existant depuis 1963, auxquelles se sont ajoutées de nouvelles zones bâties telles que Bou Nouma ou la zone touristique de Sidi Frej. Cette croissance s'explique au moins en partie par les variations démographiques saisonnières, notamment le tourisme estival qui s'est développé essentiellement après 1963 (cf : **Partie 1**, **Chapitre 3,** p. 93). En effet, si la population est d'environ 14400 habitants en hiver et pendant les saisons intermédiaires, elle peut dépasser les 100000 habitants en été. Cette différence correspond avant tout au retour, pendant l'été, des kerkenniens travaillant sur le continent ou en Europe, qui construisent des résidences secondaires dans les localités anciennes de l'archipel ou le long des côtes en général (Figure 89 - 1 et 3) (Kebaïli Tarchouna, 2013). Dans une tentative de cibler ce marché de la diaspora Kerkennienne, des promoteurs immobiliers ont eux aussi fait construire des logements (collectifs) en 2009-2010 à Ramla (Figure 89 - 4). Ceux-ci n'ont pas rencontré le succès escompté et sont aujourd'hui encore inoccupés, du moins en hiver, mais ils apparaissent néanmoins dans notre analyse comme de nouvelles surfaces bâties entre 1963 et 2010.

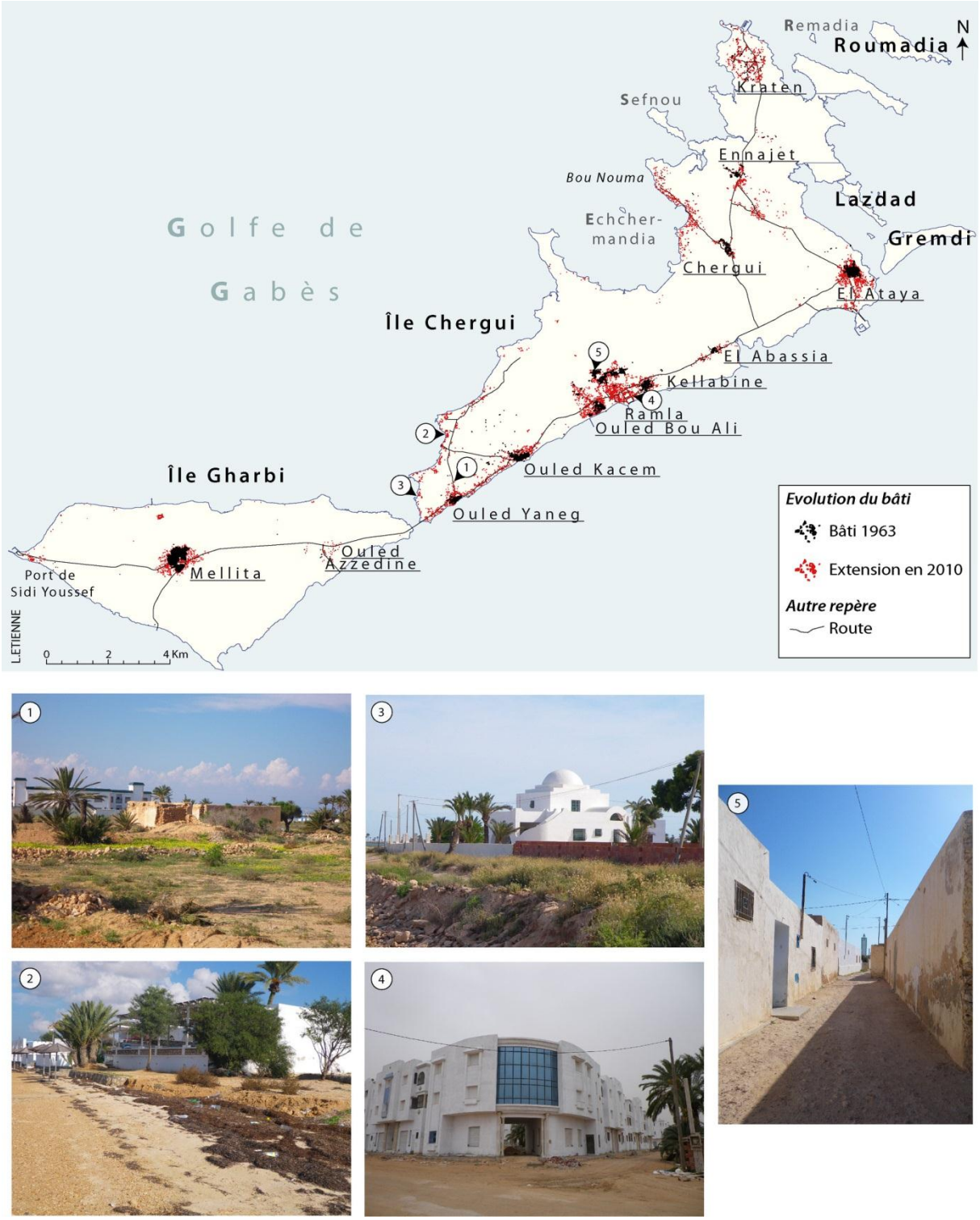



***Figure 89: Etalement du bâti à Kerkennah entre 1963 et 2010 et exemples d'habitats (Source : Image SPOT 5 du 20 juin 2010 ; Carte topographique de 1973 ; photographies aériennes de 1963)***

*1, Au premier plan, une ancienne maison laissée à l'abandon et dont les pierres, constituées de la croûte saumon, sont réutilisées pour de nouvelles constructions ; à l'arrière-plan une maison neuve située en bordure de Ouled Yaneg (Photo prise en Mai 2012). 2, Hôtel de la zone touristique de Kerkennah ; bâtiment blanc entouré d'arbres (photo prise en Mai 2012). 3, Villa neuve sur le littoral de la zone touristique (photo prise en Mai 2012). 4, Nouveau complexe moderne d'habitation groupé à Ramla (Photo prise en Mars 2010). 5, Ruelle traditionnelle et habitations anciennes à Ramla (photo prise en Décembre 2011)*

Sur le littoral de l'île de Chergui, les constructions sont également en pleine extension, en particulier à Bourous, sur la zone touristique (entre le pont d'El Quantara et Borj el H'sar) et à Bou Nouma (Figure 89 - 2 et 3). Ces nouvelles habitations sont souvent situées sur le littoral ou débordent dans les sebkhas ce qui favorise les risques de submersion marine ou de fragilisation des fondations et des murs par l'action du sel.

Les différentes localités se sont étendues différemment en termes de surface gagnée et de direction de l'extension (Tableau 23 et Figure 89). La localité de Mellita a ainsi gagné 56,2ha depuis 1963 (Tableau 23 et Figure 89) en suivant le tracé de la route principale qui permet la liaison avec le port de Sidi Youssef à l'ouest et avec la localité de Ramla, située plus au nord-est, sur l'île de Chergui. Ramla elle-même, centre administratif de l'archipel, s'est beaucoup développée entre 1963 et 2010. En effet, dans les années 1960, trois localités distinctes étaient discernables : Ramla (17,4ha), Kellabine (7,5ha) et Ouled Bou Ali (7,9ha). Celles-ci se sont étendues et rejointes pour ne former qu'un seul bloc urbain dont la surface atteignait 244ha en 2010 (Figure 89). À l'instar de Mellita, les localités d'Ouled Yaneg et d'Ouled Kacem se sont étendues en suivant le tracé de la route principale. Cependant, elles ont également progressé en direction du littoral. Bien différenciées en 1963 et 1984, elles se sont progressivement rejointes grâce à la construction d'habitations le long de la côte, au lieu-dit Bourous. Les deux localités représentaient respectivement 5,7ha et 12ha en 1963, tandis que l'ensemble de la zone regroupant les deux localités et Bourous représente actuellement 92,6ha (Tableau 23 et Figure 89). La localité d'El Abassia s'est très légèrement étendue, n'ayant gagné que 14,2ha depuis 1963, en suivant la route principale qui la relie à Ramla à l'ouest et à El Attaya à l'est. De la même manière, la surface de la localité de Chergui n'a que très peu progressé et n'a gagné que 4,8ha depuis 1963. Les nouvelles zones bâties littorales, c'est à dire la zone touristique de Sidi Frej et la zone de Bou Nouma, concentrent des hôtels et des habitations destinées au tourisme estival. Leur superficie atteint respectivement 22,8ha et 44,4ha en 2010 (Tableau 23 et Figure 89). L'extension de la localité d'El Attaya a été relativement importante avec une progression de 71,6ha selon trois directions : vers le port qui a été aménagé, vers Ramla via la route principale et enfin, de manière moins évidente, en direction de la mer. La localité d'Ennajet s'est légèrement étendue de 40,9ha en suivant le tracé de la route principale et vers El Attaya au sud. Enfin les localités de Kraten et d'Ouled Azzedine étaient composées, en 1963, d'habitat dispersé. Le changement principal vient ici du fait de la multiplication des habitations plus que d'une réelle extension en surface et donc d'une densification du bâti (Figure 89).

Les différentes localités et zones bâties de l'archipel de Kerkennah se sont donc développées selon 3 modes. Le premier concerne les localités préexistantes en 1963 qui se sont plus ou moins développées selon (i) l'axe routier principal de l'archipel qui permet de relier Ramla, l'ensemble des localités et le port de Sidi Youssef, où accoste le bac reliant les îles au continent ; (ii) des zones d'intérêts majeurs comme El Attaya en direction du port du même nom ou Ouled Bou Ali vers le nord en direction de Ramla. Kebaïli Tarchouna (2013) a précisément décrit les processus de croissance urbaine sur l'archipel ainsi que l'ensemble des relations qui existant entre les différentes localités qui forment le réseau villageois. Le second concerne les localités à l'habitat dispersé qui se sont développées en comblant les espaces vides. Le troisième et dernier concerne les nouveaux espaces bâtis qui sont très différents des zones plus anciennement construites puisqu'ils s'étalent le long de la côte, à Bou Nouma et à Sidi Frej par exemple. Ces espaces sont caractérisés par de nombreuses maisons secondaires qui ne sont utilisées que durant la période estivale. Pour avoir accès aux commerces, les zones sont desservies par des routes.

***Tableau 23: Evolution des surfaces des différentes localités par photo-interprétation***

| | Superficie en 1963 (ha) | Superficie en 2010 (ha) | Différence (ha) | Sens de progression |
|---|---|---|---|---|
| Ramla | 17,4 | 244 | 211,2 | Sud-sud-est (vers la mer) |
| Ouled Bou Ali | 7,9 | | | Nord-nord-ouest (dans les terres) |
| Kellabine | 7,5 | | | Ouest (vers Ramla) |
| Ouled Yaneg | 5,7 | 92,6 | 74,9 | Nord-est et sud-ouest (le long du littoral et de la route principale) |
| Ouled Kacem | 12 | | | Nord-est et sud-ouest (le long du littoral et de la route principale) |
| El Attaya | 15,3 | 86,9 | 71,6 | Sud-ouest (route principale) ; sud (vers le port) et sud-est (vers la mer) |
| Mellita | 40,5 | 96,7 | 56,2 | Ouest et est (le long de la route principale) |
| Ennajet | 2,7 | 43,7 | 40,9 | Création d'une zone habitée au sud-est (le long de la route principale) |
| El Abassia | 1,5 | 16,2 | 14,7 | Sud-ouest et nord-est (le long de la route principale) |
| Chergui | 9,8 | 14,6 | 4,8 | Evolution quasi-nulle |
| Ouled Azzedine | Habitat dispersé | | | Comblement d'un habitat dispersé |
| Kraten | Habitat dispersé | 56,7 | | Comblement d'un habitat dispersé |
| Sidi Frej | 0 | 22,8 | 22,8 | Le long du littoral |
| Bounouma | 0 | 44,4 | 44,4 | Le long du littoral |
| Total | 118,9 | 719,4 | 600,5 | |

L'ensemble des zones bâties s'est donc développé selon des critères d'accessibilité aux axes de communication ou aux zones d'intérêts (littoral, ports, attrait d'une localité sur d'autres). Il semble donc que l'extension des zones urbaines n'ait pas tenu compte des espaces vulnérables voire dangereux et qu'elles se sont parfois étendues dans les sebkhas ou près des côtes. Des constructions sont en effet réalisées très près du littoral ce qui oblige les riverains à se protéger de la mer (cf : **Chapitre 6** et **Chapitre 8**) ; d'autres sont bâties dans les sebkhas et sont fragilisées par les remontées d'eau saumâtre par capillarité. Cette situation était beaucoup plus rare, voire inexistante, en 1963. La vulnérabilité des habitations à la salinité et à l'humidité est donc plus importante actuellement. De plus, depuis la révolution de 2011 les constructions sans permis de construire se sont multipliées, ne tenant pas compte des recommandations ou des règles de construction liées en particulier au danger de l'érosion marine (Kebaïli Tarchouna, 2013). Pour le moment, il ne semble pas que ce processus se soit arrêté ou ait ralenti, ce qui favorisera la vulnérabilité aux abords des sebkhas et sur le littoral.

## 2.2. Evolution des surfaces agricoles depuis les années 1950

Deux types de pratique agricole sont observables à Kerkennah. La première est une agriculture traditionnelle, vivrière et pluviale, comprenant la palmeraie entretenue en sec et des jardins situés aux alentours des maisons ou des localités. La culture des arbres fruitiers et le maraîchage dans ces jardins sont destinés à la consommation personnelle des habitants. Le second type d'agriculture présent sur l'archipel est plus « moderne », commercial, et se pratique dans des périmètres irrigués. Les mutations dans les systèmes de production agricole ont provoqué des évolutions importantes dans l'occupation du sol de l'archipel.

### 2.2.1.Recul des superficies de jardins et création des zones irriguées

La télédétection permet de différencier les espaces secs et dépourvus de végétation des espaces plus verts et humides (irrigués). Elle a donc permis d'identifier les surfaces irriguées et de quantifier leur évolution entre 1984 et 2011 (Figure 90). En 1984 les espaces irrigués sont peu étendus (177,6ha) et correspondent à des jardins situés en bordure des différentes localités (Figure 90). L'irrigation qui y est pratiquée est très dépendante du climat et l'eau utilisée est une eau de pluie, conservée dans des puits ou des citernes. La disparition progressive de ces jardins est due, pour 38% de leur surface, à la croissance urbaine et pour 23% à un abandon pur et simple de ces espaces. En 2011 ils sont dégradés et présentent une signature spectrale similaire à de la palmeraie, ils sont devenus des friches urbaines.

À l'inverse de ces jardins vivriers qui ont beaucoup reculé, deux zones irriguées, créées en 1995, sont visibles en vert foncé sur la Figure 90. La première est située au nord-ouest de l'île de Gharbi (zone irriguée de Mellita) et la seconde est en position centrale sur l'île de Chergui (zone irriguée de Ramla). Au total, ce sont ainsi 662,2ha d'espaces irrigués qui sont observables en 2011, soit une augmentation de surface de 485 ha (+272,7%) depuis 1984. Les deux périmètres profitent chacun d'un puits artésien, qui permet d'obtenir de l'eau pour l'irrigation, et d'un système de drainage visant à évacuer les sels, car l'eau extraite des puits est saumâtre et atteint une teneur en sel de 3,9 grammes par litre (Elyakoubi, 2011). Bien que nécessaires, ces réseaux de drainage sont insuffisants car ils ne couvrent pas l'ensemble des périmètres et même si des travaux sont prévus pour pallier ce manque (Elyakoubi, 2011), l'épandage d'eau saumâtre a des effets dommageables sur les terres cultivables. Une dernière zone irriguée, dont les premiers travaux d'aménagement ont débuté en 2009 avec le creusage d'un puits artésien, a été installée dans l'archipel à Ouled Azzedine (Kebaïli Tarchouna, 2013). La vulnérabilité de ces terrains agricoles irrigués est liée à l'épandage d'eau saumâtre qui favorise la salinisation des sols.

La confrontation cartographique des zones irriguées telles qu'elles apparaissent sur l'image Landsat TM 5 de 2011 et des limites des périmètres irrigués montre que l'irrigation est pratiquée bien au-delà des zones autorisées (Figure 90). Cette observation met en lumière un phénomène qui a été décrit sur le terrain par plusieurs acteurs locaux, à savoir la revente illégale de l'eau saumâtre et l'irrigation de parcelles en dehors des réseaux de drainage. Ce phénomène est particulièrement visible à Mellita, tandis que les parcelles du périmètre de Ramla ne semblent pas toutes bénéficier de l'irrigation. Ce constat était cependant prévisible, puisqu'en 2007 plus de la moitié de la surface de la zone irriguée de Ramla était en réalité sèche (Elyakoubi, 2011). Les parcelles irriguées situées en dehors du périmètre, présentent une salinité plus élevée que celles situées dans les limites du périmètre (Figure 88, p. 227). L'utilisation d'eau saumâtre en dehors des espaces drainés semble donc avoir des conséquences sur la qualité des sols et certaines de ces parcelles ont d'ailleurs été abandonnées car leur salinité élevée les rendait impropres à la culture (Figure 88 - 3).

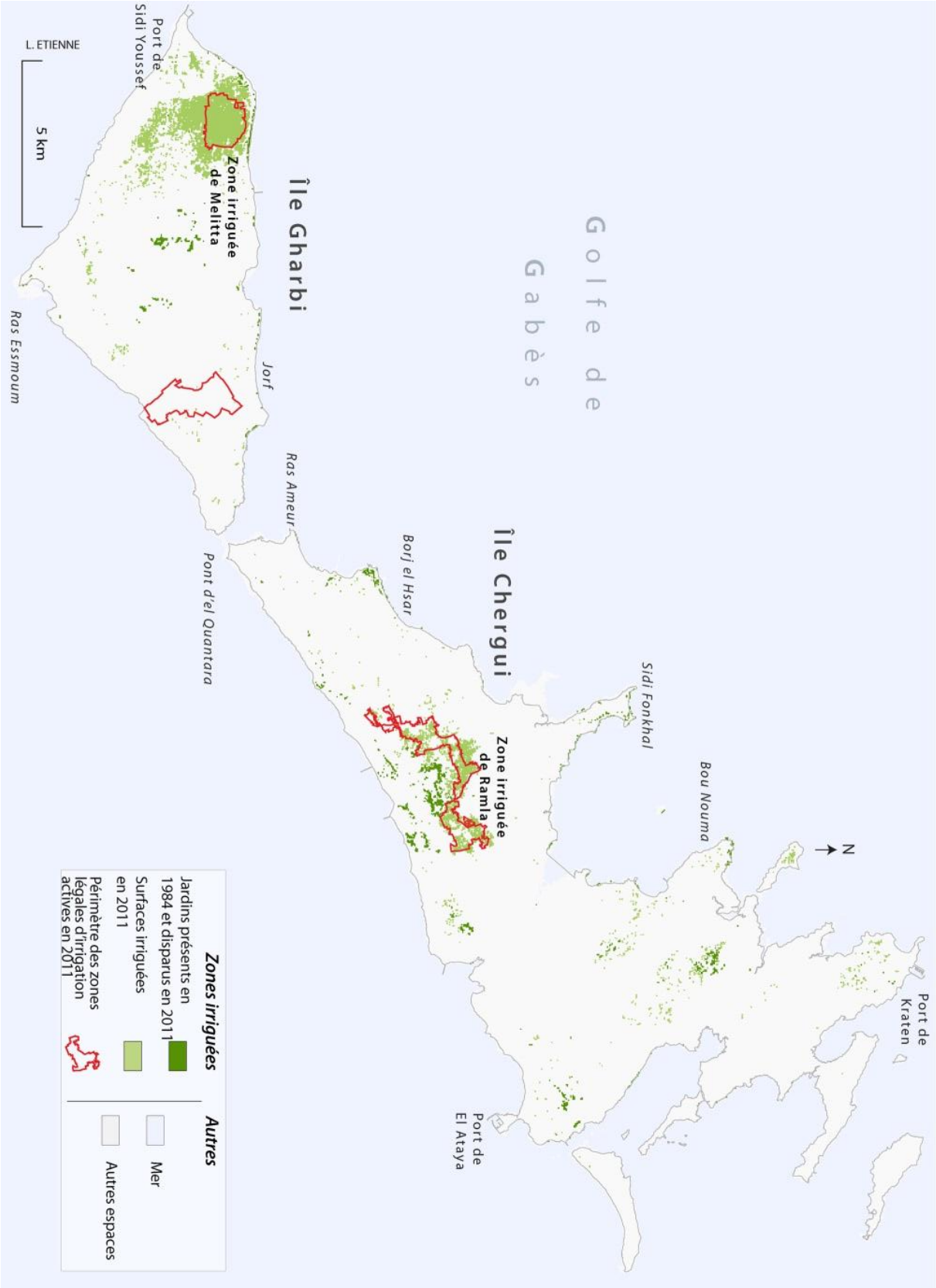



***Figure 90: Evolution des espaces irrigués de l'archipel entre 1984 et 2011***

### 2.2.2.Le recul de la palmeraie traditionnelle

L'étude par télédétection permet également de rendre compte de l'évolution des surfaces de palmeraie entre 1984 et 2011. La Figure 91 montre une situation de recul global, nuancée par quelques zones de reprise. Les surfaces perdues par la palmeraie ont été gagnées principalement par les sebkhas (-1307,4ha), les surfaces irriguées (-643,2ha) et par le bâti (-499,6ha). Les surfaces gagnées par la palmeraie l'ont été grâce à l'abandon des jardins entre 1984 et 2011 (+406ha) et à la reprise de la végétation dans certaines sebkhas situées dans la partie nord-est de l'archipel (+319,5ha) entre El Ataya et El Abassia (Figure 91). Deux vastes zones sont restées sans changement majeur. La première, située à l'est de l'île de Gharbi est actuellement en mutation puisqu'une 3ème zone irriguée (à Ouled Azzedine) y a été mise en place et est déjà fonctionnelle en 2014. Il sera intéressant d'évaluer les conséquences de la création de cette zone irriguée lorsque les arbres y auront poussé et seront bien détectables sur des images satellites. La seconde zone est toute la partie ouest de l'île de Chergui (Figure 91).

## 2.3. Extension hétérogène des surfaces de sebkhas

Les sebkhas de l'archipel de Kerkennah ont toutes vu leur surface augmenter quelle que soit la méthode de détection employée. Entre 1963 et 2010 (photo-interprétation) comme entre 1984 et 2011 (télédétection) la tendance est la même et les sebkhas se sont étendues de plusieurs centaines d'hectares.

L'étude par télédétection, qui prend en compte l'ensemble des sebkhas de l'archipel, y compris sa partie nord-est, indique une augmentation de surfaces de sebkhas de 4164ha à 4900ha entre 1984 et 2011, soit un gain de 736ha (15%) en 27 ans (Figure 92). En 1984, les sebkhas occupaient 26,6% des terres de l'archipel et se sont étendues pour en couvrir 31,4% en 2011. D'après cette étude les sebkhas se sont étendues principalement aux dépens de la palmeraie. L'interprétation visuelle de la carte laisse penser que les sebkhas de l'île de Gharbi se sont plus étendues que celles de l'île de Chergui (Figure 92). Cependant, certains espaces ont été classés « sebkha » en 1984 puis palmeraie en 2011. Deux hypothèses peuvent expliquer ce passage de sebkha à palmeraie :

- Les espaces en bordure de sebkhas ont pu être labourés et mis en culture ponctuellement. Ces cultures ne sont pas viables à long terme et n'empêcheront pas la dégradation et la salinisation des sols à long terme.

- Le processus de classification n'est pas assez précis et n'est pas parfait. Il admet donc des erreurs. Ces pixels peuvent en faire partie.

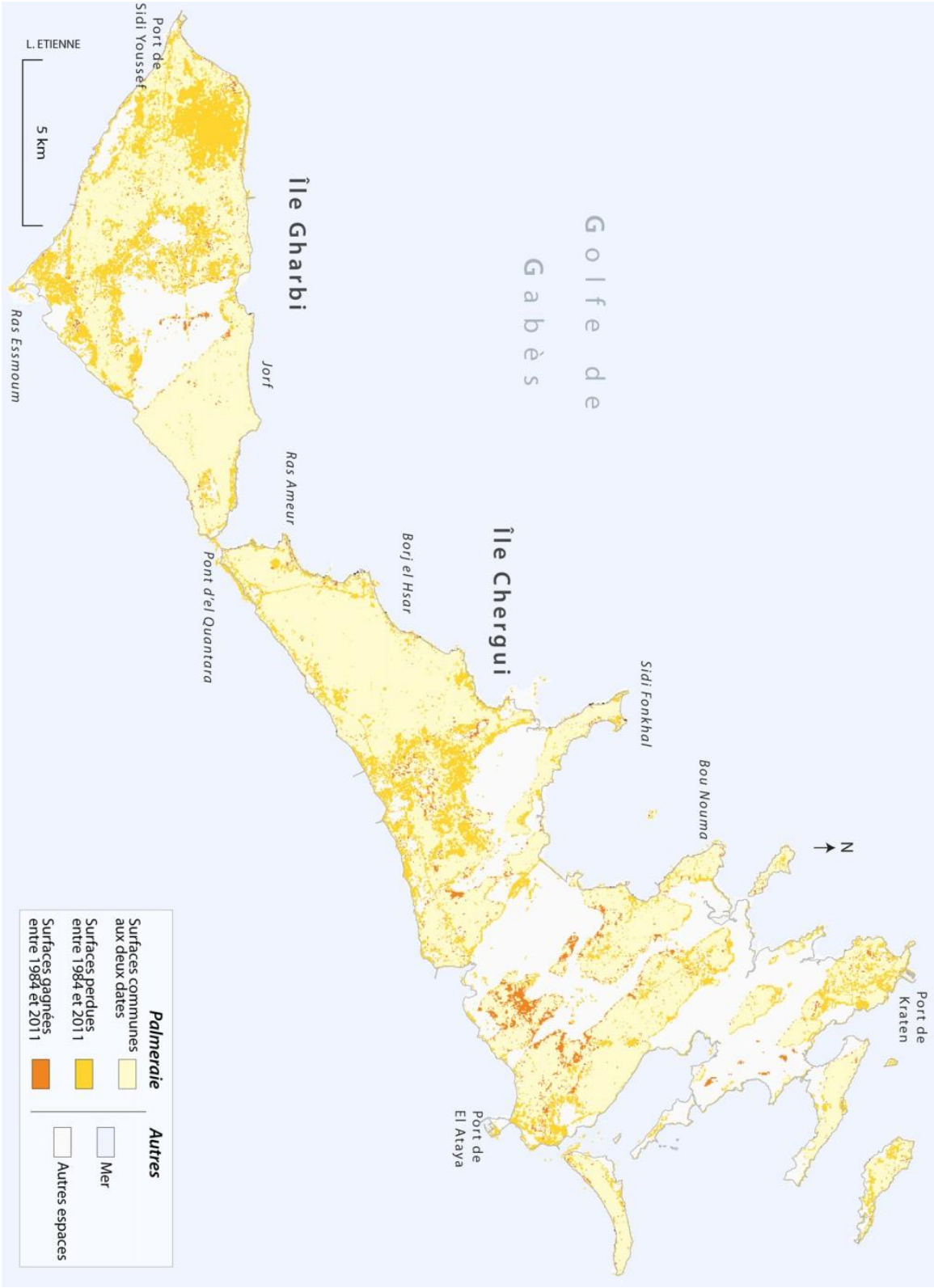



***Figure 91: Evolution de la surface de la palmeraie entre 1984 et 2011 par télédétection***

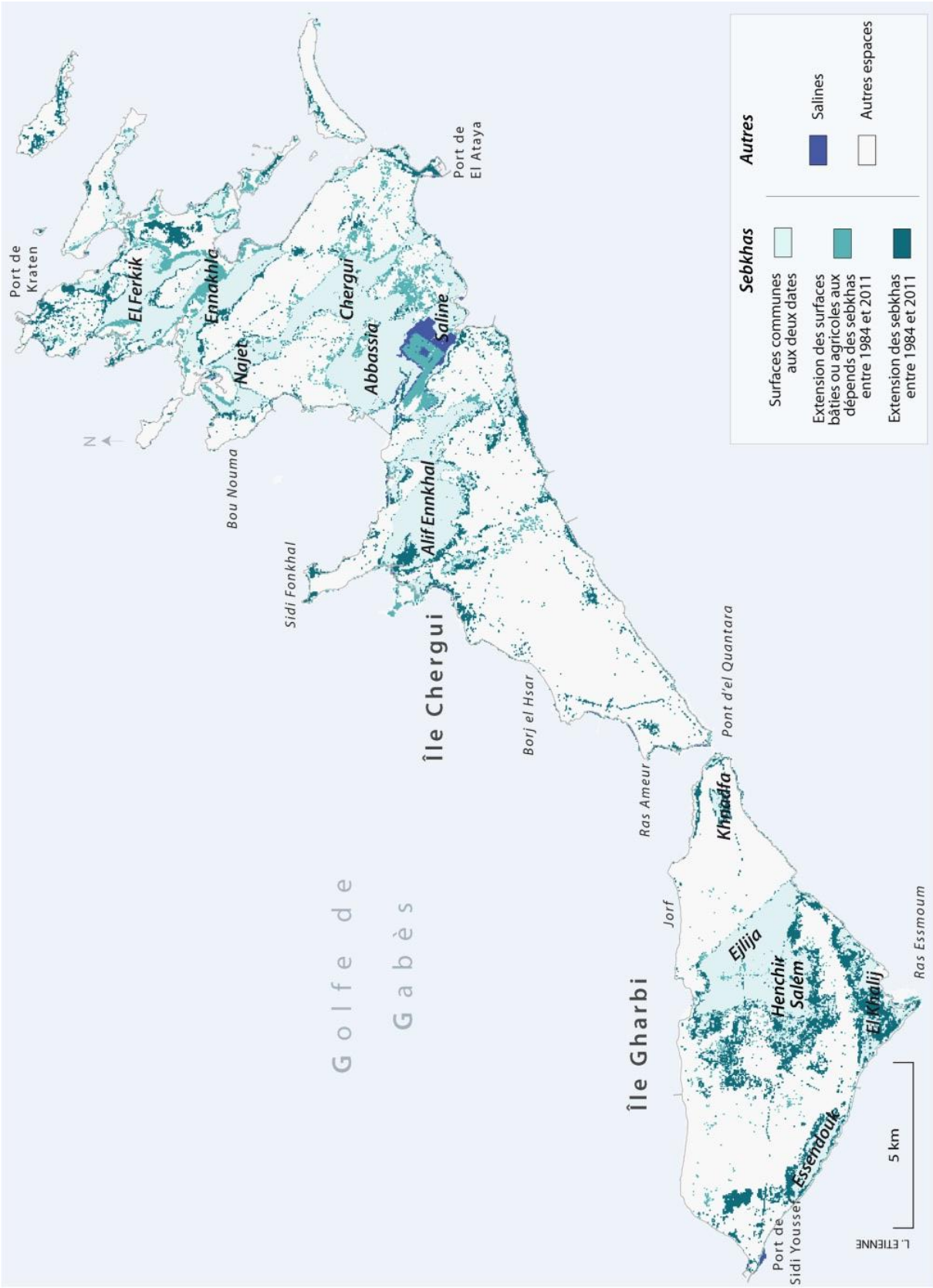



***Figure 92: Evolution des sebkhas de l'archipel par télédétection***

L'étude de photo-interprétation, qui ne prend pas en compte la partie nord-est de l'archipel, indique une extension des sebkhas de 465ha (+18%) entre 1963 et 2010 (Tableau 24). Cependant, certains espaces, rares et très peu étendus montrent que les sebkhas ont reculé entre 1963 et 2010. Cette reprise de la végétation aux dépens des sebkhas ne signifie cependant pas le recul de la salinité. Ce phénomène observé est lié à deux causes qui sont : le recul de la côte[6] qui entraîne la disparition des terres en bordure de sebkhas et l'extension des surfaces agricoles aux dépens des sebkhas. Or la ligne de végétation que nous avons prise en compte est la ligne que forment les palmiers et celle du trait de côte. Généralement, et ceci est valable pour toutes les sebkhas étudiées, les espaces de reconquête végétale sont liés à la pousse d'un ou deux arbres entre 1963 et 2010. Ce « recul » peut être expliqué de deux manières :

- La plantation d'arbres en bordure de sebkhas, ce qui ne signifie pas l'évolution des sols vers la fertilité. Au contraire, les plantations y sont non pérennes et fortement vulnérables et les sols toujours menacés par la salinisation. Les cultures ainsi plantées en marge d'espaces marginaux et stériles sont une marque de vulnérabilité liée d'une part à la salinité des sols (les cultures sont installées sur des espaces fragiles) et d'autre part à la pression qui existe sur les sols (le manque de terres fertiles pousse les agriculteurs à planter toujours plus près des sebkhas, voire sur leurs bordures déjà touchées par la salinité). La pression sur les ressources locales est donc accentuée et le processus de dégradation des sols se poursuit.
- La croissance des jeunes palmiers entre les deux dates étudiées. En effet, certains plants pouvaient être trop jeunes pour être détectés en 1963 et assez vieux pour être détectés en 2010. C'est là une des limites de l'indicateur retenu (les palmiers) pour tracer la ligne de référence afin de définir les bordures de sebkhas.

Ainsi, si quelques espaces de sebkhas ont été interprétés comme étant en recul, les phénomènes en jeu n'entament en rien le processus de dégradation et de salinisation des sols.

***Tableau 24: Evolution globale des sebkhas par photo-interprétation entre 1963 et 2010***

| | Surface en 1963 (ha) | Surface en 2010 (ha) | Evolution (ha) | Evolution (%) |
|---|---|---|---|---|
| Evolution globale de la surface des sebkhas | 2582,7 | 3046,9 | 464,2 | 18 |

[6] A noter qu'il s'agit d'exutoire de sebkhas, espaces où le trait de côte est particulièrement complexe à définir. La marge d'erreur de ce trait est donc supérieure à 6m et doit être étudiée avec précaution.

Les sebkhas représentaient 28,1% de la surface étudiée de l'archipel en 1963 et atteignent 33% en 2010. En effet, il semble qu'entre 1963 et 2010 et entre 1984 et 2011, l'évolution des surfaces ait été similaire. Ceci laisse penser que l'évolution des surfaces de sebkhas a été très faible entre 1963 et 1984, que les changements ont été plus importants entre 1984 et 2010-2011 et donc que l'évolution des surfaces de sebkhas est un phénomène récent ayant débuté dans les années 1980 au plus tôt. Une image de qualité comparable à celle de l'image SPOT 5 ou des photographies aériennes seraient nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

Dans le détail, il existe des différences d'extensions importantes entres les sebkhas. Les profils d'évolution sont différents entre l'île de Gharbi, où l'extension des sebkhas est importante (24% en moyenne), et l'île de Chergui, où l'extension est moindre (moins de 9%). L'étude de photo-interprétation permet d'obtenir les détails précis de l'évolution de chacune des sebkhas de la zone d'étude. Ainsi, pour plus de clarté dix cas d'étude ont été définis dont 3 sont composés de sebkhas isolées et 7 groupes de sebkhas. Sur l'île de Gharbi (Figure 93), le groupe « Essendouk » réunit la sebkha Essendouk et les sebkhas situées juste au nord. Le groupe « Henchir Salem » inclut la très vaste sebkha Henchir Salem et les petites sebkhas situées au nord-ouest. Le cas d'étude « El Khalij » n'inclut que cette sebkha. Enfin le groupe « Khnadfa » inclut les sebkhas situées à l'extrême est de l'île de Gharbi. Sur l'île de Chergui, les sebkhas sont regroupées en 6 groupes (Figure 93). Le cas d'étude « ouest-Chergui » ne compte qu'une seule petite sebkha, à l'ouest de l'île dont le nom n'est pas mentionné sur la carte topographique de 1973. Le groupe « Ramla » réunit deux petites sebkhas dont l'une sépare les localités de Ramla et d'Ouled Bou Ali et l'autre est accolée à cette dernière localité. A l'ouest de Ramla, une sebkha a été nommée « ouest Ramla » et compose à elle seule un des cas d'étude. Le groupe « Sidi Fonkhal » inclut les sebkhas situées sur la presqu'île. Le groupe « Alif Ennkhal » comporte la très grande sebkha du même nom ainsi que d'autres sebkhas proches mais non nommées. Enfin, Le groupe « ouest Alif Ennkhal » est composé de plusieurs sebkhas situées à l'ouest d'Alif Ennkhal.

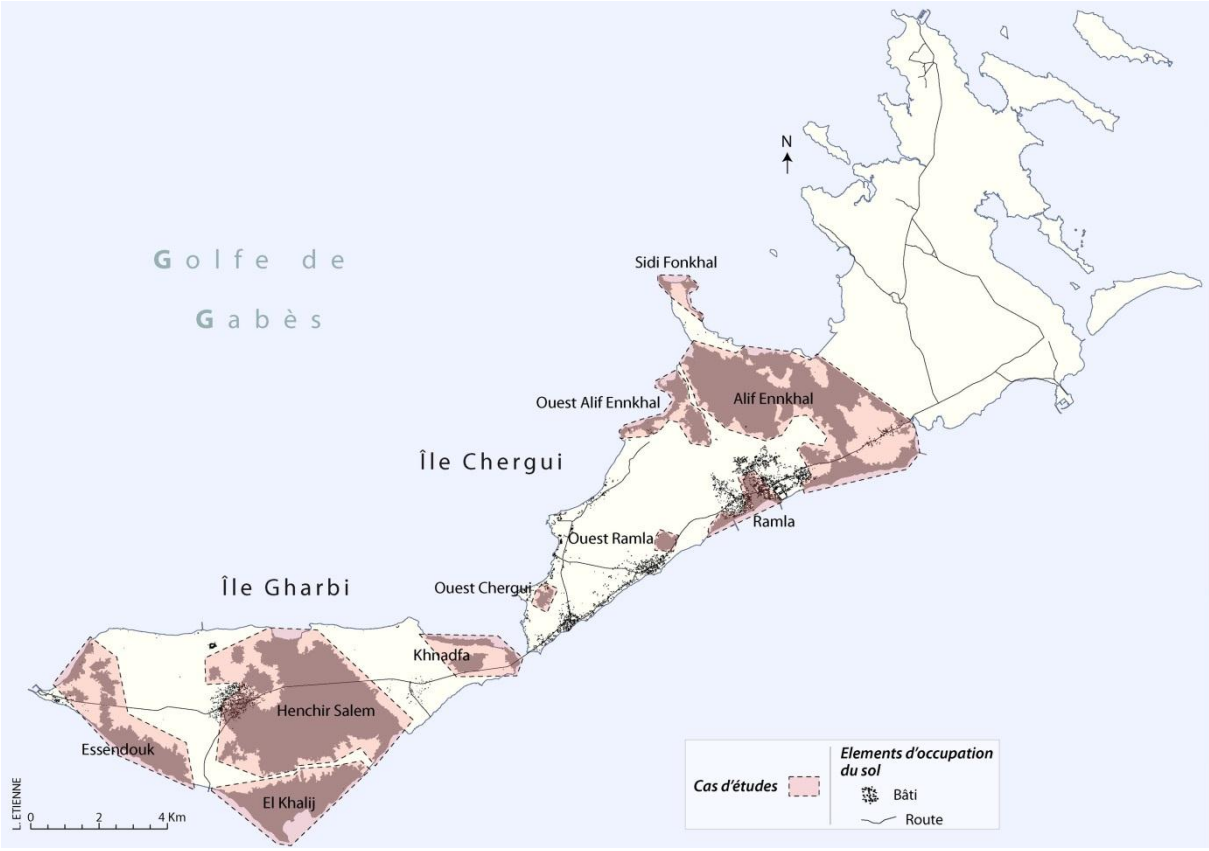



***Figure 93: Sebkhas ou groupements de sebkhas étudiés***

### 2.3.1. Une extension rapide dans l'île de Gharbi

Les sebkhas de l'île de Gharbi ont subi une extension très importante depuis 1963. Chacun des 4 groupes de sebkhas concernés a connu une évolution supérieure à 18%. Celui dont l'évolution en hectares est la plus importante est le groupe Henchir Salem avec une croissance de 198,1ha en 47 ans, ce qui représente une extension de 19,6%.

L'extension de la sebkha Henchir Salem est contrainte à l'est par une rupture de pente marquée dont la limite est visible par la forme très linéaire que prend la sebkha (Figure 94). Au nord, la sebkha est ouverte sur la mer par un des deux exutoires. Cet exutoire est fermé par une digue d'environ 1 - 1,5m de haut. La sebkha Henchir Salem ne s'est que très peu étendue vers le sud (Figure 94) ce qui peut être dû à la présence d'une bande d'altitude plus élevée entre la sebkha El Khalij et Henchir Salem qui freine l'extension de la salinité (laquelle se développe en priorité dans les fonds de cuvettes). L'extension est finalement marquée vers l'ouest. Les petites sebkhas, situées au nord de la localité de Mellita, se sont étendues et l'une d'entre elles est désormais intégrée à la grande sebkha Henchir Salem (Figure 94). Au nord-

ouest de Mellita, un espace dépourvu de végétation est également apparu entre les deux dates. L'extension de ce groupe de sebkha est dirigée vers l'ouest donc également vers la localité de Mellita.

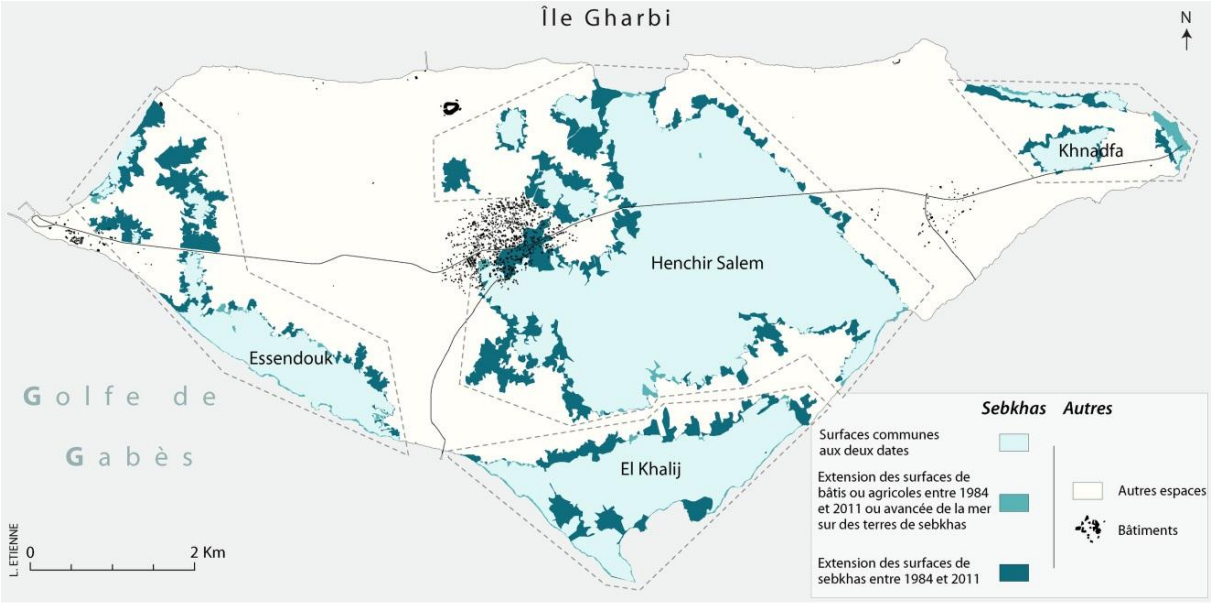
La sebkha El Kalij est située au sud de l'île de Gharbi. En 1963 quelques zones internes conservaient des arbres qui ont disparu en 2010 (Figure 94). L'extension de la sebkha s'est également produite vers le nord c'est-à-dire vers des espaces légèrement plus élevés et qui atteignent 2 mètres d'altitude, permettant aujourd'hui de distinguer cette sebkha de celle d'Henchir Salem. L'extension s'est donc produite aux dépens des derniers espaces arborés internes à la sebkha et vers le nord. Ainsi, la sebkha El Khalij est passée de 280,2ha à 344,5ha c'est-à-dire une extension de 64,3ha en 47 ans ou une croissance de 22,9%. Quelques rares espaces de sebkhas ont été perdus entre 1963 et 2010 au profit de l'avancée de la côte.

Le groupe de sebkha « Khnadfa » a connu une extension de 14,5ha soit de 25,6% par rapport à 1963. Ce groupe est composé de 3 zones dont la plus au nord était composée de deux sebkhas en 1963 qui sont jointes aujourd'hui (Figure 94). Son extension est nettement orientée à l'ouest c'est-à-dire le long de la côte. La sebkha Khadfa s'est étendue surtout vers le nord. La dernière petite zone dépourvue de végétation dans ce groupe est située à l'extrême est de l'île de Gharbi et a connu une évolution particulière. En effet, une partie de cet espace a été transformée en bassins aquacoles dans les années 1980 qui ont très vite été abandonnés. Juste au nord de ces bassins, la côte a été largement érodée et l'avancée de la mer est importante. Ceci explique que la sebkha ait perdu du terrain à l'est.

Le 4ème et dernier groupe, « Essendouk » s'est beaucoup étendu puisque sa surface initiale a augmenté de 50,2% entre 1963 et 2010 soit une évolution de 89,2ha. L'extension est assez peu importante au sud de la route principale tandis qu'elle s'est révélée être très importante au nord (Figure 94). La zone de sebkha située le long de la côte s'est étendue vers le nord. La petite sebkha située en bordure de la route principale s'est très largement étendue vers le nord et l'ouest. La dernière zone de sebkha semble être le prolongement de la sebkha Essendouk au-delà de la route principale. Cette dernière est surélevée d'environ 1,5 mètre par rapport au fond de sebkha. La présence de la route comme obstacle met en lumière le phénomène d'extension des sebkhas par remontée des nappes saumâtres et des remontées de sel par capillarité, phénomènes qui peuvent être liés soit à l'élévation du toit de la nappe d'eau sous-terraine soit à la subsidence soit aux deux, c'est-à-dire des phénomènes souterrains (Yechieli & Wood, 2002). Cependant, l'extension importante, dans le prolongement direct de la sebkha Essendouk ne suit pas la logique des autres sebkhas qui veut que leur extension soit

restreinte aux espaces les plus bas. Ici, d'après la carte topographique de 1973, les altitudes sont comprises entre 2,5 et 5 mètres et la sebkha borde la zone irriguée de Mellita. Plusieurs hypothèses sont envisageables pour expliquer ce phénomène :

- La présence de la zone irriguée de Mellita perturbe les taux de salinité. Cette hypothèse n'est pas valide car les rejets d'eau de drainage sont déversés en mer. Cependant, comme démontré grâce à la télédétection et aux enquêtes de terrain, il semble clair que de l'eau saumâtre est utilisée dans les parcelles non drainées et situées en dehors des limites de la zone irriguée de Mellita. Un drainage naturel pourrait alors se produire et l'eau s'écoulerait dans le sens de la pente c'est-à-dire vers la zone où la sebkha s'est étendue. Cette hypothèse reste à tester grâce à plusieurs types d'approche : technique avec des relevés précis de la salinité, de la quantité d'eau dans le sol… ; cartographiques… ; il serait certain que le facteur anthropique ne serait pas seul en jeu si le phénomène d'extension s'était déclenché avant la création du périmètre irrigué ; enfin par une approche sociologique grâce à des questionnaires ou entretiens permettant de mieux rendre compte du phénomène d'irrigation illégal (nombre de personnes utilisant de l'eau, volume d'eau déversé etc…).
- La nappe est peu profonde sous cet espace et permet des remontées par capillarité au même titre que dans les fonds de sebkhas. Cette hypothèse serait également à tester par des forages permettant de connaître la profondeur de la nappe.
- La carte de 1973 pourrait comporter des erreurs concernant les altitudes et des mesures récentes et plus précises permettraient de tester l'hypothèse d'un biais technique tel que celui-ci.




| | Surface en 1963 (ha) | Surface en 2010 (ha) | Evolution (ha) | Evolution (%) |
|---|---|---|---|---|
| Essendouk | 177,6 | 266,8 | 89,2 | 50,2 |
| Henchir Salem | 1010,2 | 1208,3 | 198,1 | 19,6 |
| El khalij | 280,2 | 344,5 | 64,3 | 22,9 |
| Knadfa | 57,4 | 72,1 | 14,7 | 25,6 |

***Figure 94: Evolution des surfaces de sebkhas de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010 par photo-interprétation***

### 2.3.2. Une extension moins marquée dans l'île de Chergui

Les sebkhas de l'île de Chergui ont connu une extension beaucoup plus faible que celles de l'île de Gharbi. Les taux d'évolution y sont inférieurs à 18% sauf pour les sebkhas de la presqu'île de Sidi Fonkhal qui se sont étendues de 36,4% en 47 ans (Figure 95). Cependant cette valeur est à nuancer par les très faibles surfaces qu'elles représentent (18ha en 2010). Les groupes « Ouest Alif Ennkhal », « Ramla » et « Ouest Chergui » ont des caractéristiques particulières : l'extension y est particulièrement faible et des arbres ont été plantés sur leurs marges.

Les sebkhas du groupe « Ouest Alif Ennkhal » sont passées de 88ha en 1963 à 92ha en 2010. Elles ont donc connu une très faible extension de 4ha (+4,5% en 47 ans). L'extension a permis la jonction de deux des trois petites sebkhas qui composaient le groupe (Figure 95). Les deux sebkhas collées à la côte sont désormais jointes. La troisième, dans les terres, s'est étendue en direction du sud et de l'est. Des zones de sebkhas apparaissent comme ayant reculé mais ce phénomène cartographique doit être interprété avec prudence. L'évolution de la ligne des palmiers n'est pas liée à l'augmentation de la salinité mais à l'avancée de la mer et aux plantations anthropiques ponctuelles et non viables à long terme.

La sebkha la plus occidentale de l'île de Chergui est une petite sebkha dont l'évolution est négative et qui a perdu 1ha entre 1963 et 2010 (Figure 95). Elle est donc passée de 13,1ha en 1963 à 12,1ha en 2010 d'après la méthode de photo-interprétation. Cette tendance au recul de la sebkha est liée à la création d'une parcelle agricole après 1963 dans laquelle les arbres sont alignés. Cet exemple de mise en place d'une parcelle agricole sur des sols salés montre bien la pression sur les ressources qui s'exerce dans l'archipel. La vulnérabilité de cette parcelle est très forte car directement menacée par la salinisation. D'autre part, et en dépit de son recul global, cette sebkha s'est également très légèrement étendue vers le nord.

Les sebkhas du groupe « Ramla » se sont elles aussi globalement rétractées entre 1963 et 2010 en perdant 1,4ha (Figure 95). Ici aussi le recul cartographié de la sebkha est lié soit à l'avancée de la mer ce qui a conduit à la disparition des terres soit à des actions anthropiques ponctuelles de re-végétalisation. A Ramla et Ouled Bou Ali, l'extension urbaine a atteint les bordures de la sebkha et quelques jardins y ont parfois été aménagés. D'autre part, et de manière similaire à ce qui a été décrit précédemment, les deux petites sebkhas se sont également étendues de 8,5ha. Cette évolution est liée à la disparition d'arbres entre 1963 et 2010 par avancée de la salinité mais aussi à l'extension urbaine qui a nécessité la coupe des palmiers.

La sebkha située à l'ouest de Ramla est petite et a connu une extension de 1,4ha en 47 ans avec une extension plus prononcée vers le sud (Figure 95).

Les sebkhas du groupe « Sidi Fonkhal » sont également très petites et leur surface est passée de 13,2ha à 18ha (Figure 95). La principale cause de cette extension est la disparition des palmiers sur la façade est de la presqu'île. Ainsi, les zones de sebkhas se sont étendues de 6,1ha et une nouvelle zone de sebkha est apparue sur la façade est de la presqu'île. Elles ont en revanche perdu 1,3ha (recul brut) qui est uniquement dû à l'avancée de la mer et à la disparition des terres côtières.

Enfin, l'évolution des sebkhas du groupe « Alif Ennkhal » est marquée par une extension de 90,1ha ce qui représente une augmentation de surface de 10,2% par rapport à 1963 (Figure 95). L'extension de ce groupe de sebkha ne semble pas être marquée par une direction préférentielle. Ici aussi quelques zones de sebkhas ont été perdues au profit de la mer (11ha) quand d'autres ont été plantées d'arbres avec parfois la création de parcelles agricoles (25ha).

| | Surface en 1963 (ha) | Surface en 2010 (ha) | Evolution (ha) | Evolution (%) |
|---|---|---|---|---|
| Sidi fonkhal | 13,2 | 18 | 4,8 | 36,4 |
| Ouest Chergui | 13,1 | 12,1 | -1 | -7,6 |
| Ramla | 43,2 | 41,8 | -1,4 | -3,2 |
| Ouest Ramla | 19,6 | 21 | 1,4 | 7,1 |
| Alif Ennkhal | 880,2 | 970,3 | 90,1 | 10,2 |
| Ouest Alif Ennkhal | 88 | 92 | 4 | 4,5 |

***Figure 95: Evolution des surfaces de sebkhas de l'île de Chergui entre 1963 et 2010 par photo-interprétation***

Ainsi, les sebkhas de l'archipel se sont globalement étendues. Des terres fertiles se sont donc progressivement transformées en terres salées et stériles. La vulnérabilité liée à l'extension des sebkhas est grande car les habitations et les cultures se sont rapprochées des sebkhas. De plus, ces phénomènes (extension des sebkhas, extension urbaine et agricole) ne semblent pas en passe de s'arrêter. Plusieurs questions sont apparues au cours du développement de ce chapitre :

- Quels sont les processus de salinisation des sols et quelle vulnérabilité en découle ?
- La vulnérabilité de l'archipel à la salinisation s'est-elle accentuée depuis 1963 ?

## 3. Causes potentielles de la salinisation des sols et extension des sebkhas

Ce troisième sous-chapitre est une discussion qui aboutit à un système présenté à la Figure 97 située à la fin du sous chapitre, page 253. Ce système montre comment les mutations agricoles associées à l'évolution du climat et du niveau de la mer ont conduit à une augmentation de la vulnérabilité liée à la salinisation des sols et à l'extension des sebkhas. Le présent sous-chapitre est composé de trois paragraphes qui détaillent les causes principales de ces phénomènes.

- **Les évolutions agricoles : perspective historique**

Les pratiques agricoles traditionnelles se concentrent autour de deux espaces : la palmeraie et les jardins. Les contraintes climatiques et les sols pauvres ont amené les agriculteurs à s'adapter et à utiliser des techniques culturales spécifiques comme les cultures en sec, le labour régulier et fréquent, le grattage des sols, la taille des pieds de vigne et des oliviers de telle sorte qu'ils retiennent l'humidité, l'amendement des sols etc. (Kebaïli Tarchouna, 2013). L'agriculture était pratiquée sur de petites parcelles. La palmeraie de l'archipel était gérée par des gardiens et bénéficiait d'un suivi précis. En 1881 notamment, un recensement a permis de connaître le nombre de pieds sur l'ensemble de l'archipel soit 28631 palmiers dont 5361 pollinisateurs et 23272 productifs (Rhouma *et al.*, 2005). La valeur du palmier était très élevée et toutes les parties de celui-ci étaient utilisées pour des tâches quotidiennes : les palmes servaient à construire les pêcheries traditionnelles, les dattes étaient mangées ou conservées sous diverses formes, le *Legmi* était extrait de manière raisonnée etc… (Louis, 1963; Rhouma *et al.*, 2005). Aux abords des localités, des jardins servaient aux cultures maraîchères et aux plantations nécessitant plus d'eau (arbres fruitiers par exemple). Ainsi l'agriculture kerkennienne était très diversifiée et répondait en partie aux besoins de l'année que ce soit grâce aux produits directement issus de l'agriculture (olives et huile, raisins, dattes, maraîchage etc…) ou aux produits secondaires (palmes pour la pêche, cordages

etc…). Les femmes étaient alors garantes des savoirs traditionnels concernant l'agriculture et s'occupaient des champs tandis que les hommes pêchaient.

D'après Rhouma *et al.* (2005), les changements importants dans la société de l'archipel se sont produits dès 1956, au moment de l'indépendance. Avec, entre autres, la création des écoles dès les années 1900 qui a permis l'accès aux études aux insulaires et la mise en place du bac reliant l'archipel au continent, il est devenu plus facile pour les insulaires de quitter leur île et de *« chercher d'autres sources de revenus à l'extérieur de Kerkennah »* (Rhouma *et al.*, 2005). Ce lien entre archipel et continent a également facilité les échanges et donc l'importation d'aliments. Petit à petit la situation a changé. Les kerkenniens éduqués, en âge d'aller au lycée et de travailler sur le continent ont quitté les îles. L'agriculture traditionnelle et vivrière est devenue moins attractive, surtout après les années 1960 (Kebaïli Tarchouna, 2013). Une attaque de criquets survenue en 1960 puis des inondations importantes en 1969 ont conduit à un délaissement des activités agricoles et de la palmeraie (avec arrachement de pieds et développement de l'exploitation du *Legmi*) au profit de la pêche ou de l'extraction de matériaux de construction (Rhouma *et al.*, 2005). La palmeraie traditionnelle et les pratiques agricoles traditionnelles ont donc été progressivement abandonnées, de même que les métiers en dépendant (disparition des gardiens de palmeraie, introductions de filets de pêche et de nasses en plastique au détriment des sous-produits du palmier…). Ainsi, la valeur de la palmeraie et des palmiers qui la composent a baissé et les pratiques traditionnelles telles que le *Kabour*[7] se sont estompées ou perdues.

Depuis les années 1980, la diminution de la production agricole dans l'archipel est marquée. Elle est liée à plusieurs phénomènes dont les sècheresses qui ont touché le sud tunisien et les pratiques culturales en évolution. L'aménagement des zones irriguées dans les années 1990 a permis l'augmentation des rendements en olives. Cependant, le morcellement des terres (lié à l'émigration des kerkenniens vers le continent dès les années 1960) et le moins bon entretien des parcelles (abandon des pratiques traditionnelles) ont entraîné une chute de production des autres vergers (Kebaïli Tarchouna, 2013). Le morcellement des terres a engendré des situations complexes et *« parfois quatre ou cinq propriétaires se disputent un olivier ou un petit jardin de vignes et de figuiers. »* (Kebaïli Tarchouna, 2013). Il n'est pas seulement lié aux héritages mais également au foncier dans l'archipel. En effet, les constructions d'habitations étant de plus en plus nombreuses, les sebkhas s'étendant et le trait

[7] Lessivage naturel des sols après de fortes pluies puis amendement des sols préalablement labourés sur 20cm de profondeur (Fehri, 2011)

de côte reculant, une forte pression s'exerce sur le marché foncier et provoque une augmentation de la plus-value foncière. De même, certaines terres, selon leur localisation, pourraient un jour faire partie d'un périmètre irrigué et gagner également en valeur. Le morcellement pourrait donc être lié à la volonté de marquer les propriétés dans un contexte où la pression sur les terres est plus importante que dans les années 1960. Les évolutions dans la gestion des espaces agricoles peuvent aussi expliquer ce morcellement. Dans les années 1960, l'agriculture était régie par une communauté familiale dont le chef de famille prenait l'ensemble des décisions agricoles entre autres (date de semis, récoltes, type de plantation etc…). En 1963, les terres n'étaient donc que très peu morcelées (Rhouma *et al.*, 2005). Depuis cette époque, par le biais du système d'héritage qui veut que les terres soient partagées entre les descendants d'une même famille et en raison de la disparition progressive des communautés familiales très soudées, les terres ont été découpées, chaque descendant en recevant une part. Aujourd'hui, l'activité agricole est ainsi totalement différente et les parcelles sont des propriétés individuelles gérées par 3 types d'agriculteurs : Les personnes qui reviennent sur l'archipel pour y passer leur retraite et qui renouent avec l'agriculture ; des pêcheurs qui, en plus de leur activité de pêche cultivent quelques hectares ; enfin des actifs travaillant dans d'autres domaines que celui de la pêche (enseignants, fonctionnaires etc…) et qui viennent sur l'archipel durant le week-end. Cependant, la majorité des agriculteurs ont aujourd'hui plus de 60 ans ce qui explique en partie que l'agriculture soit devenue une pratique moins productive (Kebaïli Tarchouna, 2013).

Ainsi, les mutations rurales et les sècheresses récentes ont conduit à un délaissement des terres agricoles, à l'abandon de certaines pratiques, à la création des zones irriguées et au morcellement des terres agricoles (Figure 97). Les pratiques agricoles moins bien adaptées qu'auparavant conduisent à une plus grande vulnérabilité. Les pratiques de gestion de l'eau dans les périmètres irrigués ne sont pas encore optimales et un certain gâchis peut être observé. La gestion de l'eau saumâtre des puits artésiens de l'archipel est un véritable enjeu.

- **Les modes de salinisation des sols**

La salinisation des sols a deux causes principales :

- **Les remontées d'eaux salées par capillarité** et la salinisation de la nappe souterraine via des intrusions d'eau de mer. S'ajoute à cela, la subsidence de l'archipel qui implique une remontée relative du niveau de la nappe par rapport à la surface et donc à des apports d'eau saumâtre par capillarité plus importants (également car l'aridité est plus forte).

Ces nappes affleurantes, notamment dans les fonds de sebkhas, constituent un apport important en sels qui seront déplacés et répartis par l'action du vent en été provoquant ainsi l'extension de la salinité du sol, l'extension des sebkhas et la mort des palmiers en bordure de celles-ci (Figure 97).

- **L'épandage d'eau saumâtre** dans les zones irriguées et en dehors comme expliqué dans ce chapitre. Les problèmes inhérents aux zones irriguées provoquent tous la salinisation des sols et sont donc des facteurs de vulnérabilité car ils mettent paradoxalement en péril les activités agricoles par perte de terres fertiles. Les zones irriguées sont installées sur des espaces plutôt hauts et donc peu sujets à la salinisation des sols par remontée d'eau saumâtre par capillarité ou par affleurement de la nappe souterraine (Figure 97). Par contre, les sols sont parfois gypseux et l'épandage d'eau favorise la dissolution des sels qui vont remonter à la surface par capillarité. De fait, la salinisation est accrue. La revente de l'eau d'irrigation, saumâtre, est d'autant plus problématique qu'en 2010 son prix était dérisoire (Figure 96 - A), son accès assez peu « contrôlable » (Figure 96 - B) et il était très facile de sortir de l'eau du périmètre légal. Lors de rencontres avec des responsables des zones agricoles et irriguées de l'archipel, ces personnes ont confirmé qu'une nouvelle politique serait mise en place. Les bornes d'irrigation, déjà existantes ne seront plus libres d'accès mais chaque agriculteur exploitant aura une clé ou plutôt un compteur lui permettant de puiser une certaine quantité d'eau pour un prix plus conséquent qu'en 2010.

***Figure 96: Prix de l'eau (A) et pompage (B) dans la zone irriguée de Mellita (Photo prises en mars 2010)***
*A, 3000 litres pour 1,200 DTN (soit 60cts d'euros) ; 4000 litres pour 1,500DTN (soit 75cts d'euros) et 6000 litres pour 2,000DTN (soit 1 euro).*

Ainsi, la combinaison de l'irrigation et de la salinisation de la nappe aboutit à une accentuation de la salinité des sols. Le risque a une composante horizontale, avec l'extension des surfaces de sebkhas qui provoque une mortalité élevée des palmiers sur leur bordure, ce qui a été montré dans ce chapitre. La vulnérabilité liée à la salinisation est très importante dans l'archipel de Kerkennah sur les terres agricoles drainées et non drainées et sur les bordures de sebkhas, dont les sols prennent progressivement des caractéristiques de sebkhas.

- **Facteurs d'extension des surfaces de sebkhas dans les îles de Chergui et Gharbi**

Les surfaces de sebkhas se sont étendues de manière très différente sur les deux îles de l'archipel. Les sebkhas de l'île de Gharbi se sont bien plus étendues que celles de l'île de Chergui. Cet état de fait peut être étayé par plusieurs phénomènes liés à des facteurs naturels et dépendants de l'environnement de l'archipel (ou plutôt du système) et d'autres intrinsèques à l'archipel qui peuvent être naturels ou anthropiques.

Le fonctionnement « équilibré » des sebkhas qui a été décrit dans le **Chapitre 3** de la **Partie 1**, p. 84 montre qu'il est dépendant du climat et du niveau des nappes souterraines et donc du niveau de la mer dans le cas de sebkhas littorales. Si ces conditions changent, alors le fonctionnement de la sebkha est perturbé et évolue. C'est ce qui se passe dans l'archipel de Kerkennah (Figure 97).

Comme décrit dans la **Partie 1**, **Chapitre 2**, les conditions climatiques évoluent vers l'aride. Il fait donc plus chaud et ce constat est prouvé depuis les années 1950 par Dahech et Beltrando (2012) qui identifient trois périodes distinctes de plus en plus chaudes : 1950-1984 ; 1985-1997 et 1998-2007. Ceci permet d'émettre une première hypothèse quant à la période de déclanchement de l'extension des sebkhas de l'archipel. Comme déjà explicité précédemment, il semble que les résultats de l'étude par télédétection qui concerne la période 1984-2011 soient similaires à ceux obtenus par la méthode de photo-interprétation qui concerne une période plus longue : 1963-2010. L'élévation progressive des températures durant les 50 dernières années, a pu être un des facteurs déclenchant l'extension des sebkhas, en particulier à partir des années 1980 lorsque les températures ont significativement augmenté.

Est également prouvée l'élévation relative du niveau de la mer créée par la subsidence importante dans le nord du golfe de Gabès (Oueslati, 1986; Saidani, 2007). L'élévation, même

relative, du niveau de la mer entraîne la remontée des nappes souterraines et la pénétration d'eau salée dans les nappes d'eau qui le sont moins (Yechieli & Wood, 2002). Les fonds de sebkha de l'archipel sont en situation très basse, certains sont situés au niveau de la mer et sont inondés par les remontées d'eau de la nappe lorsque celle-ci est haute (Fehri, 2011). Les remontées par capillarité peuvent alors concerner des espaces plus vastes que précédemment, permettre ainsi l'augmentation des taux de salinité des sols et provoquer un recul de la végétation arborée (Figure 97).

Ainsi, si ces hypothèses se vérifient elles expliqueraient la dégradation de la végétation sur les bordures des sebkhas. Les palmiers situés en bordure de sebkhas sont en mauvaise santé et meurent progressivement du fait de l'augmentation de la salinité. Cette situation a été observée sur l'ensemble des bordures de sebkhas de l'archipel qui ont été visitées. Il semble donc que les facteurs naturels et anthropiques jouent un rôle majeur dans l'augmentation de la salinité des sols, en particulier dans les zones irriguées hors des périmètres officiels et dans l'extension des sebkhas de l'archipel de Kerkennah. La vulnérabilité à la salinité s'est donc fortement accrue entre 1963 et 2010 (Figure 97).

Les deux hypothèses rapidement présentées ci-dessus restent à prouver et ne sont pas suffisantes pour expliquer les différences qui peuvent exister entre les deux îles. En effet, l'évolution climatique est un phénomène d'échelle régionale (au moins) qui ne pourrait pas impacter différemment les deux îles principales de l'archipel. La subsidence du nord du golfe de Gabès est également un phénomène de plus vaste échelle que l'archipel. Cependant, le réseau de failles et d'accidents tectoniques qui a été décrit par Oueslati (1986) et dans la **Partie 1**, **Chapitre 3**, p. 78 de cette thèse, peut jouer. La grande faille qui coupe l'île de Gharbi en 2 unités, Graben à l'ouest et Horst à l'est, provoque l'accident tectonique majeur de l'archipel. Des études sur la tectonique de l'archipel et de l'activité des failles restant à faire, nous nous réservons à émettre des hypothèses quant au rôle que peut jouer la tectonique et le réseau de failles dans l'extension différenciée des sebkhas dans les îles Gharbi et Chergui.

Les facteurs humains ont également pu jouer sur l'évolution des sebkhas. Comme décrit précédemment dans ce chapitre, les pratiques culturales ont grandement évolué passant d'une agriculture traditionnelle à une agriculture parfois irriguée avec des préoccupations de rendement. Le délaissement des pratiques anciennes, telle que celle du K*abour*, et l'abandon de la palmeraie, dont la disparition du métier de *Sawwana* (gardien de la palmeraie) ont modifié les pratiques dans la palmeraie et autour des sebkhas. Les pratiques anciennes ont pu contenir l'extension des sebkhas et agir comme un frein qui a été lâché lorsque les terres n'ont

plus été amendées, cultivées et la palmeraie entretenue, laissant ainsi les sebkhas s'étendre rapidement. Cette hypothèse reste également à prouver par des enquêtes sociologiques auprès des agriculteurs. Afin de savoir si les pratiques culturales ont pu entraîner la différence d'évolution des sebkhas entre les deux îles, l'étude sociologique devra se baser sur l'étude des différences entre les pratiques de l'île de Chergui et de l'île de Gharbi, s'il y en a. Enfin plusieurs sebkhas de l'archipel ont vu leur exutoire fermé par des digues/routes dont les effets, qui ne semblent pas dominants sur l'extension des surfaces, seront détaillés dans le **Chapitre 8**.

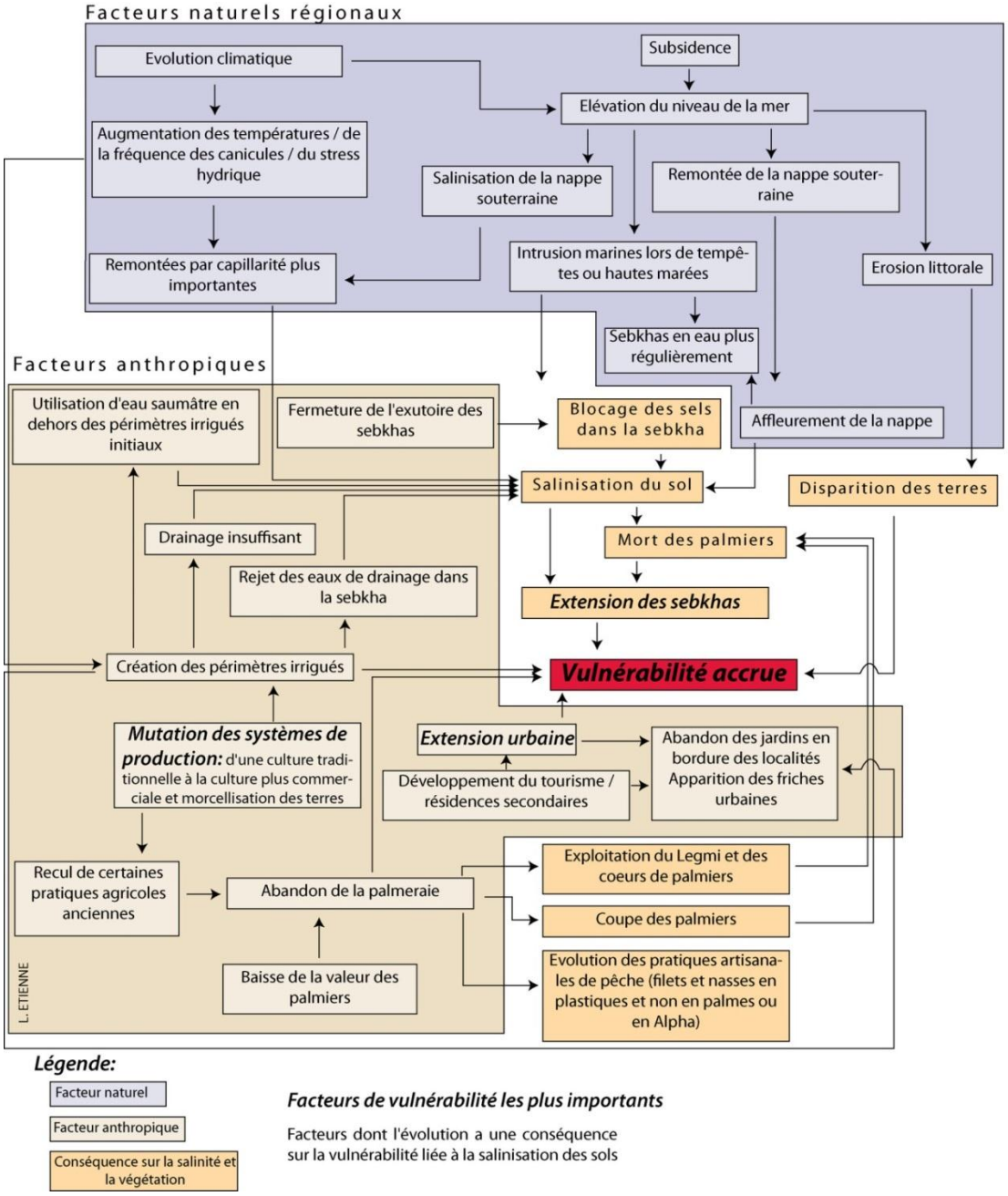



***Figure 97: Système d'évolution de paramètres régionaux et locaux conduisant aux évolutions de l'occupation du sol de l'archipel de Kerkennah***

Ainsi on ne peut, à l'heure actuelle, qu'émettre des hypothèses pour expliquer les différences d'extension des sebkhas entre les îles de Chergui et de Gharbi. Aucune étude ne traite des effets précis du dragage en mer. Il n'existe pas non plus d'études géologiques ou géophysiques permettant d'avoir une idée du jeu du réseau de failles dans l'archipel de Kerkennah. Enfin, les facteurs anthropiques sont très peu étudiés et nécessiteraient des entretiens et questionnaires poussés et précis. Nous pensons toutefois que cette différence d'extension s'explique par plusieurs facteurs qu'ils soient naturels ou liés aux activités humaines.

- **Spatialisation des zones vulnérables**

La cartographie des zones vulnérables à la salinisation n'est pas forcément évidente. Deux types d'espaces sont directement touchés : les bordures des sebkhas et les espaces agricoles irrigués en dehors des périmètres prévus à cet effet.

Les enjeux peuvent être également plus ou moins vulnérables à la salinité. Les habitations et les espaces agricoles (périmètres irrigués ou parcelles agricoles) sont ainsi plus ou moins vulnérables selon qu'ils se trouvent dans, près ou éloignés des sebkhas. Les habitations et les parcelles agricoles situées dans les sebkhas sont situées dans des espaces d'ors et déjà non viables. La salinité des sols est néfaste pour la végétation et les bâtiments sont également menacés par l'humidité et les taux de sel particulièrement importants. Les habitations et zones agricoles qui sont situées près des sebkhas sont très vulnérables car les sols sont en cours de salinisation et la pérennité de ces enjeux est remise en question. La bande de 50 mètres autour des sebkhas est ainsi considérée comme très vulnérable et toute installation anthropique y est remise en question. Enfin les enjeux éloignés de plus de 50 mètres sont considérés comme peu vulnérables (Figure 98 et Figure 99).

Cette cartographie a été réalisée grâce aux données obtenues pour l'année 1963 et pour l'année 2010. Il en ressort que la pression sur les terres était beaucoup moins forte dans les années 1960. L'habitat ainsi que les parcelles agricoles étaient éloignées des sebkhas et de leurs bordures (Figure 98). Quelques espaces sont très vulnérables comme c'est le cas à Mellita où la ville était déjà en bordure de sebkha. En 2010, la situation est complètement différente. Les sebkhas sont plus étendues, les espaces urbains également, les terres ont été morcelées et des périmètres irrigués ont été créés. La pression sur les ressources est donc beaucoup plus importante et la vulnérabilité à la salinité a fortement augmenté depuis les années 1960 (Figure 99).

Certaines habitations autrefois en zone peu vulnérable sont actuellement situées sur les bordures des sebkhas, tandis que d'autres sont bâties dans ces espaces vulnérables voire directement dans les sebkhas (Figure 99). Il en est de même pour les parcelles agricoles. Cependant ce point doit être nuancé car, si en 2010 les terres sont morcelées, elles ne l'étaient pas en 1963, ce qui ne signifie pas que l'agriculture n'y était pas pratiquée. La création des périmètres irrigués a conduit à certaines pratiques illégales d'irrigation en dehors des espaces drainés ce qui les rend particulièrement vulnérables car l'eau utilisée est saumâtre et que les sols sont gypseux.

Bien que cette carte permette de pointer les zones où la vulnérabilité est la plus importante, elle présente des limites :

- Des informations concernant l'agriculture sont manquantes pour les années 1960. Les délimitations des zones cultivées ne sont pas simples surtout quand les parcelles ne sont pas délimitées ou que leurs limites ne sont pas discernables sur les photographies aériennes de 1963. Ainsi, nous savons que les bordures de sebkhas étaient parfois mises ponctuellement en culture (on y plantait de l'orge lors des années pluvieuses).
- Nous avons choisi une distance de 50 mètres pour représenter les bordures des sebkhas. Cependant, comme nous l'avons déjà expliqué, la transition entre sebkha et terres agricoles est douce et il est très complexe d'en définir les frontières. Ainsi, cette distance de 50 mètres est à prendre avec grande précaution. Pour certaines sebkhas bordées par des espaces bas, elle pourrait être plus importante tandis que pour la bordure est de la sebkha Henchir Salem, qui longe une rupture de pente importante, cette distance pourrait être moins importante.

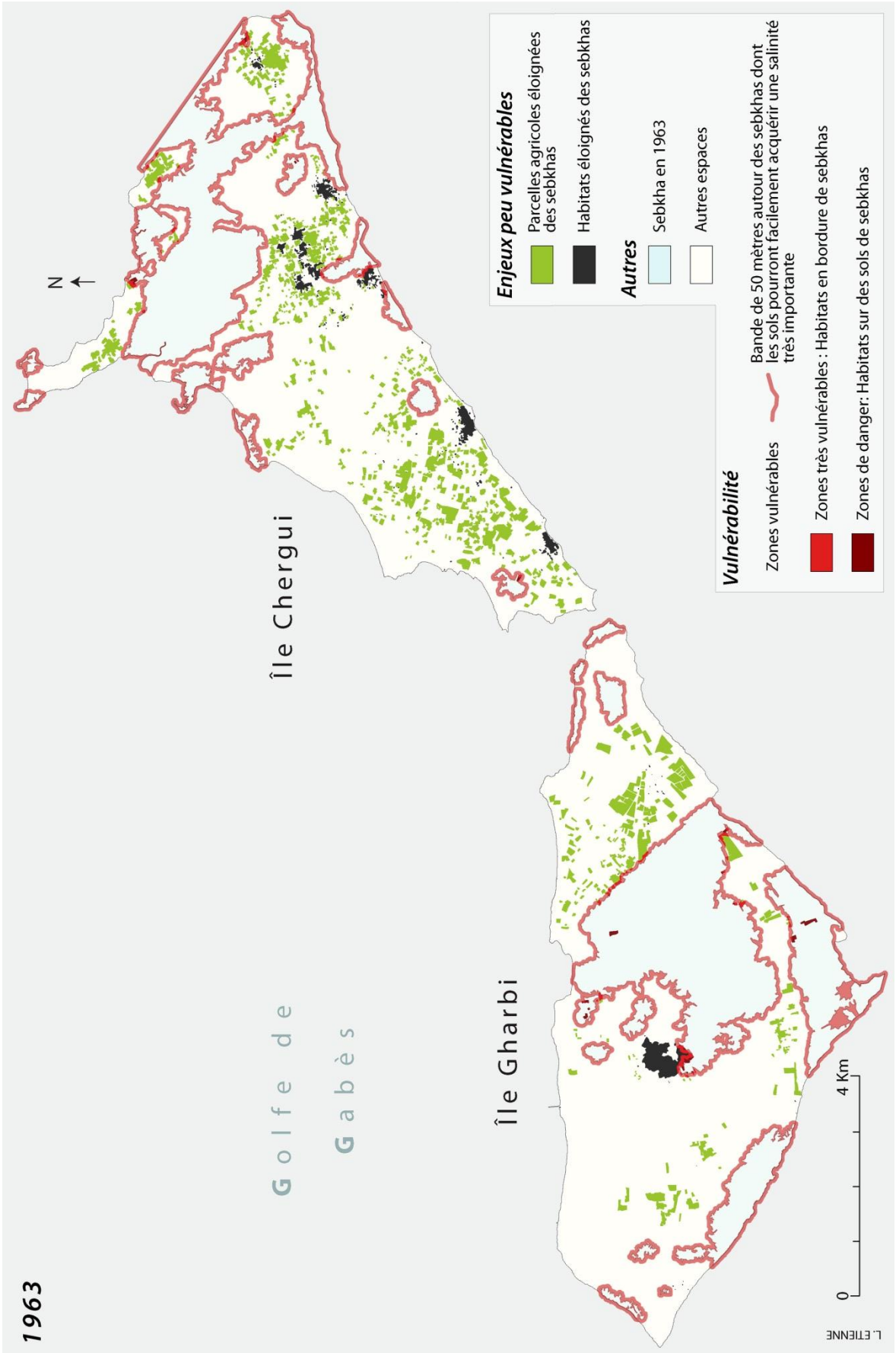



***Figure 98: Localisation des espaces vulnérables à la salinité des sols en 1963***

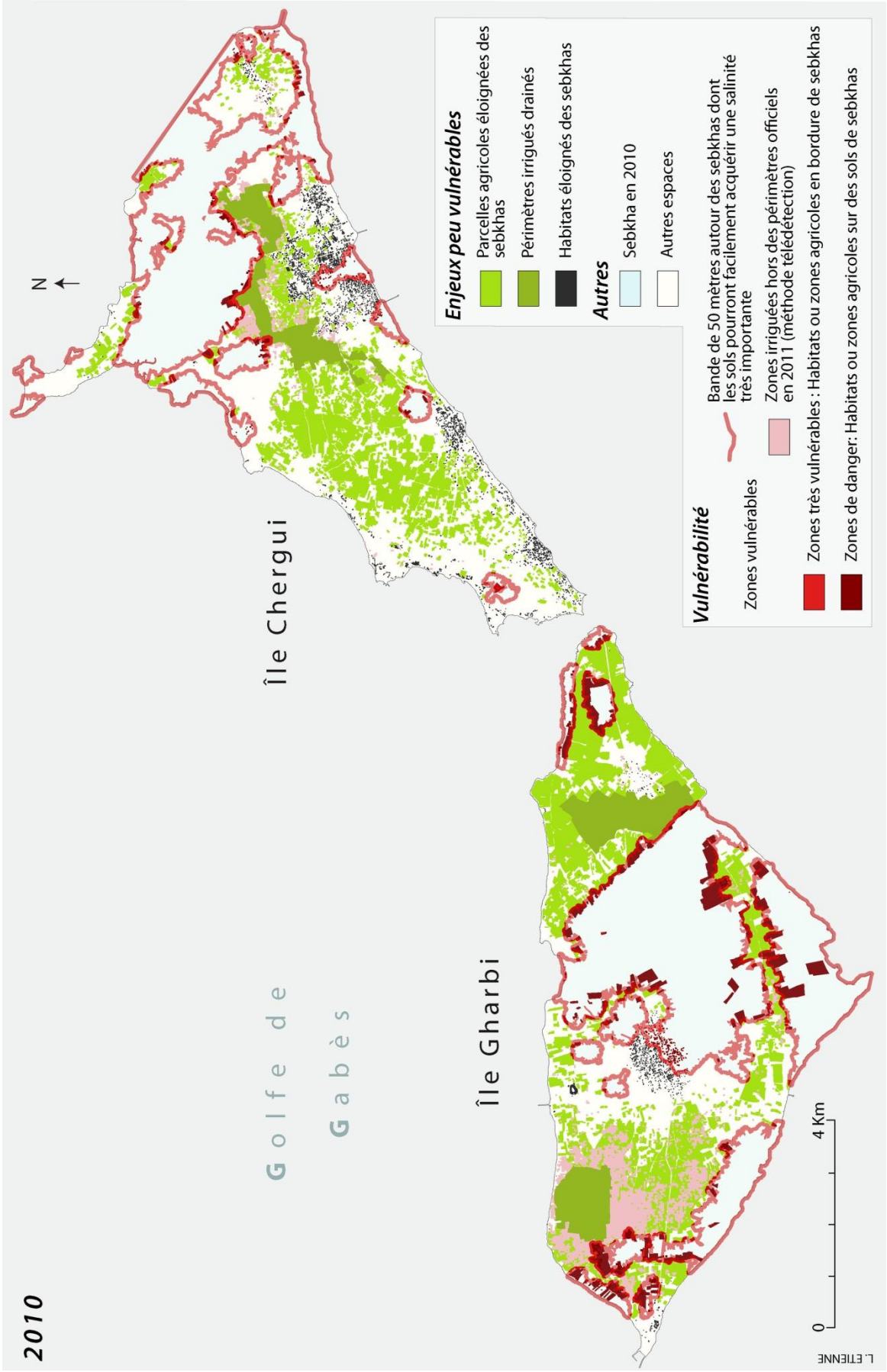



***Figure 99: Localisation des espaces vulnérables à la salinité des sols en 2010***

## Conclusion du chapitre 7

Les évolutions climatiques et sociétales ont entraîné des modifications importantes dans l'occupation du sol de l'archipel de Kerkennah depuis les années 1950-1960. Les éléments décrits dans ce chapitre ont été réunis et mis en relation dans un système ouvert complexe qui aboutit à la salinisation des sols, à la mort des palmiers et à l'extension des surfaces de sebkhas (Figure 97). L'occupation du sol a été grandement modifiée, entraînant une extension urbaine parfois importante, un recul marqué de la palmeraie traditionnelle, un déplacement et une croissance importante des surfaces irriguées et l'extension des surfaces de sebkhas (Figure 97). Ainsi la pression sur les ressources est de plus en plus importante, ce qui indique une plus grande vulnérabilité.

Deux grands types d'éléments du système influent sur la salinité et la végétation, et en particulier sur les palmiers. Il s'agit d'abord d'éléments d'échelle régionale (Figure 97), au moins celle du golfe de Gabès, qui sont climatiques et tectoniques et ensuite d'éléments d'échelle locale (Figure 97) qui peuvent être influencés par les éléments d'échelle régionale. Il semble que l'élévation relative du niveau de la mer et les évolutions du climat aient une influence importante sur l'extension des sebkhas, ce qui a pu être amplifié par les évolutions sociétales. Certaines pratiques culturales, abandonnées depuis, freinaient la salinisation et maintenaient l'agriculture sur les bordures de sebkhas qui sont des espaces de grande vulnérabilité. L'abandon des pratiques anciennes a accentué leur vulnérabilité. Le tournant agricole engagé durant la période d'étude a engendré un abandon de la palmeraie traditionnelle et la création de périmètres irrigués. Ces derniers ont eu plusieurs impacts : d'un côté ils ont permis de créer une agriculture commerciale et donc d'améliorer les revenus des agriculteurs ; d'un autre côté l'agriculture maraîchère a été abandonnée et l'archipel se trouve actuellement plus dépendant du continent pour ce qui concerne les denrées alimentaires. Enfin, l'eau d'irrigation est saumâtre et les réseaux de drainage insuffisants. De plus, l'eau jusqu'à présent très peu chère, est parfois revendue à l'extérieur des périmètres irrigués officiels entraînant une salinisation précoce et parfois importante des terres.

Il semble donc que l'archipel soit actuellement plus vulnérable face à la salinisation des sols et à l'extension des surfaces de sebkhas qu'il ne l'était avant les années 1960.

# Chapitre 8.

## Perception des risques d'extension des sebkhas et de recul de la côte par la population locale et leur gestion

---

Il a été montré dans le **Chapitre 6** que le littoral est soit en recul parfois important, soit en relative stabilité avec des relations qui semblent fortes entre type de côte, lithologie et rythmes d'érosion. Il semble que les aménagements humains aient un impact important puisqu'ils perturbent les dynamiques de redistribution des sédiments et peuvent déclencher des processus érosifs. Les profils montrant une avancée de la côte sont rares et toujours liés à des aménagements (remblais, digues…). L'érosion des côtes telles que nous l'avons mesurée représente un danger réel pour les enjeux situés sur le littoral de l'archipel de Kerkennah.

Le **Chapitre 7** a mis en évidence que les sebkhas s'étendent de manière parfois très importante et que ce phénomène est lié à la fois à des processus physiques d'échelle régionale et à des processus locaux liés à l'évolution de la société de l'archipel de Kerkennah. L'extension horizontale des sebkhas ainsi que leurs inondations plus fréquentes sont des dangers pour l'archipel de Kerkennah car les terres arables reculent.

La vulnérabilité de l'archipel face à ces phénomènes s'est accentuée depuis les années 1960 et semble importante aujourd'hui. Cependant, c'est l'appréhension des connaissances locales qui permettra d'affiner ce constat. En effet, les savoirs locaux des dangers atténuent ou aggravent la vulnérabilité de la population face au danger. De plus, la population peut réagir et contrôler, au moins en partie, les phénomènes dommageables pour s'en prévenir. Ce chapitre a pour objectif d'évaluer le degré de conscience de la population face à ces phénomènes puis de

comprendre les gestions mises en œuvre pour atténuer leurs effets. Il s'agit finalement d'évaluer et de comparer la conscience de la population locale et la gestion des dangers.

Le chapitre sera organisé en trois sous parties. La première expose la méthodologie employée pour réaliser les questionnaires. La deuxième renseigne sur la perception de la population et expose les résultats des questionnaires. La dernière présente les différents projets d'aménagements (réalisés et futurs) pour l'archipel de Kerkennah en adoptant une approche critique. L'objectif est de mettre en perspective les résultats obtenus dans la thèse avec la perception de la population et ce qui est réellement produit au niveau des aménagements de protection.

## 1. La réalisation des questionnaires

Rapide à mettre en œuvre, le questionnaire semble être la méthode la plus adaptée pour évaluer la perception de la population. Les premiers résultats des études menées dans la thèse, les observations de terrain ainsi que les entretiens avec certains responsables dans l'archipel ont été nécessaires à la constitution du questionnaire. Il est composé de 3 parties (Figure 100). La première concerne les informations personnelles de la personne interrogée (âge, sexe, lieu de résidence, profession, niveau d'étude…), la seconde regroupe les 3 grandes questions qui ont été posées à tous les interrogés et enfin, la troisième concerne les questions spécifiques posées soit aux agriculteurs, soit aux pêcheurs ou aux employés du secteur touristique.

Les questionnaires sont axés sur la perception des phénomènes naturels qui touchent l'archipel. 3 hypothèses ont été posées et les questions conçues en conséquence :

- La population est consciente que l'archipel subit les conséquences de certains phénomènes naturels ou anthropiques.

Pour tester cette hypothèse la **première question propose de classer 13 phénomènes dommageables** repérés dans l'archipel (durant les séjours, par témoignages des différents responsables interrogés ou par résultats d'études scientifiques). Les différentes propositions à classer sont : La pénurie d'eau, les intrusions marines, les pluies torrentielles, la sècheresse, la canicule, les accidents de la route, les inondations, la pollution, le recul du trait de côte, l'instabilité politique, l'extension des sebkhas, la remontée de la nappe et la salinisation des sols. Une case *« autre »* laisse la possibilité à l'interrogé de donner plusieurs autres réponses. Le phénomène le plus grave est codé 1, le moins grave, codé 13. Certaines propositions peuvent être considérées comme n'étant pas des problèmes, auquel cas, elles sont codées 0. Cette première question se veut la plus neutre possible et n'est pas ciblée sur les problèmes qui nous intéressent afin d'éviter les biais de subjectivité. En effet, l'objectif est de ne pas influencer les réponses des personnes interrogées afin de savoir, sans à priori, quels problèmes elles considèrent comme graves ou non.

Les deux autres hypothèses sont plus précisément étudiées grâce au questionnaire :

- Les phénomènes étudiés dans cette thèse (le recul du trait de côte et l'extension des sebkhas) sont connus de la population.
- La population connaît les causes du recul du trait de côte et de la mort des palmiers de l'archipel (la mort des palmiers étant le signe principal et très visible de l'extension des sebkhas). Elle en comprend le caractère multifactoriel.

Deux questions divisées en sous questions permettent de les tester :

**La deuxième question concerne le recul du trait de côte**. Il s'agit d'abord de savoir si les personnes sont conscientes du recul du trait de côte, si le phénomène leur paraît nul, faible, moyen ou important et si elles ont vu le rythme de recul s'accélérer, si oui, depuis quand. Il s'agit ensuite de savoir comment sont perçus les efforts de la population et de l'Etat face au phénomène du recul de la côte (effort nul, faible, moyen ou important) et si les actions entreprises sont efficaces ou non.

**La troisième question concerne la mort des palmiers**. Ce phénomène, très visible, est un bon moyen pour parler de l'avancée des sebkhas dans l'archipel. La question n'affirme pas explicitement cette idée, ce qui permet d'avoir des informations sur les palmiers morts observés à bonne distance des sebkhas. Il s'agit d'abord de savoir si les personnes interrogées ont conscience de la mortalité excessive des palmiers puis de savoir si, pour elles, le phénomène est nul, faible, moyen ou important. La formulation de la question (existe-t-il un phénomène de mortalité excessive des palmiers) permet d'inclure tous les modes de mortalité des palmiers et ne pas orienter la question uniquement vers la mortalité sur les bordures de sebkhas. La dernière sous question tente de savoir si les interrogés connaissent les causes de la mort des palmiers. Les choix proposés dans le questionnaire sont : la montée de la mer, l'exploitation du *Legmi* ou la salinisation des sols. Les cases *« ne sait pas »* et *« autre »* laissent aussi la possibilité d'ajouter des causes de mortalité.

Enfin, **des questions spécifiques aux agriculteurs, aux pêcheurs ou aux employés du secteur touristique** ont été soumises aux personnes concernées. Il s'agit de connaître leur avis sur des points qu'ils sont susceptibles de rencontrer dans leur métier. La question supplémentaire pour les agriculteurs concerne l'humidité du sol et le niveau de la nappe souterraine afin de savoir s'ils ont remarqué une élévation ou une baisse de son niveau.

Age: Origine: Kerkennah ☐ Autre: Lieu d'habitation:
Sexe: Profession: Niveau d'étude: Primaire ☐ secondaire ☐ Université

Questions communes

Question 1: Classez les problèmes par gravité sur une échelle de 1 à 13:

☐ Pénurie d'eau
☐ Intrusion marine
☐ Pluie torrentielle
☐ Sècheresse
☐ Canicule
☐ Accidents de la route
☐ Inondations
☐ Pollution
☐ Recul du trait de côte
☐ Instabilité politique
☐ Extension des sebkhas
☐ Remontée de la nappe
☐ Salinisation des sols
☐ Autre:

_____

Question 2 : Recul du trait de côte

A votre avis, le trait de côté recul-t-il ?
Oui ☐ Non ☐ Ne sait pas ☐

Ce phénomène est
Nul ☐ Faible ☐ Moyen ☐ Important ☐

Pensez-vous que le rythme du recul s'est accéléré
Oui ☐ Non ☐ Ne sait pas ☐

Si oui, depuis quand ?

_____

Face à ce phénomène, les efforts de la population sont
Nul ☐ Faible ☐ Moyen ☐ Important ☐

Efficace ☐ Pas efficace ☐
Les aménagements de l'Etat sont
Nul ☐ Faible ☐ Moyen ☐ Important ☐

Efficace ☐ Pas efficace ☐

Question 3 : La mort des palmiers

Avez-vous remarqué la mort des palmiers ?
Oui ☐ Non ☐

Ce phénomène est-il
Nul ☐ Faible ☐ Moyen ☐ Important ☐

La mort des palmiers est elle due à :
☐ La montée de la mer
☐ L'exploitation du Legmi
☐ La salinisation des sols
☐ Ne sait pas
☐ Autre

Question spécifique aux pêcheurs :

La quantité de poisson est
Faible ☐ Moyen ☐ Important ☐

Y a-t-il des espèces que vous ne pêchez plus?
Oui ☐ Non ☐
Si oui, lesquelles:

_____
_____
_____

La diminution du tonnage pêché est due à
☐ Pêche illicite
☐ Chalutage
☐ Arrivée de pêcheur d'autres régions
☐ Pollution marine
☐ Climat ☐ Autre:

Question spécifique aux Agriculteurs :

Remarquez-vous plus d'humidité dans le sol
Oui ☐ Non ☐

Depuis quand:

_____

Le niveau de la nappe est-il :
Plus profond ☐ Moins profond ☐
N'a pas bougé ☐
Ne sait pas ☐

Question spécifique aux acteurs du tourisme :

Remarquez-vous une dégradation de la plage de votre établissement ?
Oui ☐ Non ☐

Ce phénomène est:
Peu important ☐ Important ☐
Très important ☐

Que remarquez-vous?

_____
_____
_____
_____
_____

***Figure 100: Questionnaire proposé à un échantillon de population en mai 2012 dans l'archipel***

Si un changement de niveau est remarqué, les interrogés pouvaient répondre à la question *« Depuis quand ? »*. La question supplémentaire pour les pêcheurs concerne le fruit de leur pêche. La première sous-question porte sur la quantité de poissons (faible, moyenne, importante). La seconde demande si certaines espèces ont disparu et si oui, lesquelles. Enfin les pêcheurs pouvaient donner leur avis sur les causes de la diminution du tonnage de pêche. Nous proposions : la pêche illicite, le chalutage, l'arrivée de pêcheurs d'autres régions, la pollution marine, le climat, puis *« autre »*, laissant ainsi aux interrogés, le choix de donner plus de réponses. Enfin, la question spécifique aux acteurs du tourisme porte sur la dégradation des plages situées devant les hôtels. La première sous-question demande si les employés remarquent une dégradation de la plage de l'établissement. Si la réponse était positive, ils pouvaient tenter de quantifier cette dégradation (le phénomène est-il peu important, important, très important ou ne sait pas).

Les questionnaires ont été conçus pour être rapides et moins de 10 minutes sont généralement suffisantes pour y répondre. Ils ont été soumis à 150 personnes, c'est-à-dire environ 1% de la population de l'archipel. L'évolution du trait de côte et de la surface des sebkhas sont des phénomènes relativement lents et visibles sur le long terme c'est pourquoi les jeunes de moins de 25 ans sont exclus de l'étude. Ne disposant pas de la liste complète de la population de l'archipel qui aurait pu servir de base d'échantillonnage, les questionnaires ont été soumis aléatoirement. Ainsi, ils ne peuvent être utilisés quantitativement mais uniquement qualitativement (Ghiglione & Matalon, 2010). Les résultats des questionnaires sont considérés comme des indices de la perception de la population de l'archipel de Kerkennah. Des hommes nous ont majoritairement répondu. Les femmes que nous avons rencontrées ont très majoritairement refusé de nous répondre et sur une cinquantaine de femmes rencontrées, seules 7 ont accepté de le faire. Les lieux choisis pour la soumission du questionnaire représentent des espaces où les personnes interrogées avaient du temps à nous consacrer. Ainsi, les questionnaires ont été soumis à bord du bac reliant Sfax à Kerkennah à différentes heures de la journée. Le trajet est d'un peu plus d'une heure et toutes les catégories de la population peuvent s'y trouver. Ils ont également été soumis dans les cafés des localités de l'archipel, dans les champs pour trouver les agriculteurs, au port de Sidi Youssef et dans les marchés aux poissons où nous avons pu rencontrer des pêcheurs. Le secteur touristique de l'archipel a été très touché par les effets de la révolution, c'est pourquoi, fin mai 2012, lors de la campagne de terrain durant laquelle le questionnaire a été soumis, la saison touristique n'avait pas débuté et nous n'avons pu obtenir que très peu de réponses du secteur touristique.

Un autre effet de la révolution, beaucoup plus positif pour nous, est la volonté des personnes de répondre à ce questionnaire. Beaucoup ont témoigné de l'importance de la prise en compte de leur parole et étaient très enthousiastes. Enfin, sur les 150 questionnaires récoltés, 11 ont été écartés de l'étude car ils ont été jugés biaisés. En effet, 7 personnes n'ont pas répondu à toutes les questions et nous ont semblé peu intéressées. Deux autres étaient trop jeunes et une femme a répondu mais son mari lui soufflait des réponses... Lors de la campagne, un étudiant en Master de Géographie de l'Université de Sfax nous a aidé lors de la soumission des questionnaires. Ces derniers étaient rédigés en français et étaient énoncés par nous. Si la personne avait des difficultés en français, l'étudiant tunisien traduisait en arabe. Les questionnaires ont tous été complétés en français.

A la suite de la collecte des questionnaires « papiers », les réponses ont été codées et introduites dans une table Excel 2010, ce qui a ensuite permis d'analyser et de résumer les informations qu'ils contenaient grâce aux fonctions basiques du logiciel (somme, différence, tableaux croisés dynamiques etc.). Les statistiques employées sont descriptives (moyenne, mode, médiane, écart-type…).

## 2. Etat de conscience des problèmes de la population de l'archipel

### 2.1. Classification des problèmes

A la première question, les interrogés devaient classer 13 phénomènes problématiques par ordre de gravité, le 1 correspondant au problème le plus grave, le 13, le moins grave. Pour plus de lisibilité, les problèmes ayant été codés 1 à 4 sont considérés comme « graves », 5 à 9 comme des problèmes « modérément graves » et 10 à 13 comme des problèmes « mineurs ». Ils ont ensuite été classés selon qu'ils aient été souvent ou rarement considérés comme « graves » (Figure 101).

Les phénomènes dommageables de recul de la côte et d'extension des sebkhas sont considérés comme graves par respectivement, 69,8% et 66,9% des personnes du groupe interrogé. Pour plus de 50% du groupe, la remontée de la nappe (54%) et la salinisation des sols (50,4%) sont également des problèmes graves. Ces problèmes sont tous plus ou moins liés entre eux et tous sont environnementaux. Cette catégorie (problèmes graves) est particulière car c'est la seule qui rassemble plus de 50% des personnes interrogées. C'est-à-

dire qu'aucun problème n'est jugé modérément grave, peu grave ou n'est pas considéré comme un problème par plus de 50% de la population.

Les problèmes considérés comme modérément graves sont en premier lieu les accidents de la route (pour 45% du groupe) puis les canicules (39,6%) et enfin la salinisation des sols (38,8%). Malgré le caractère très local et brutal des accidents routiers, ils sont toutefois considérés comme moins graves que les problèmes qui sont étudiés dans cette thèse. Les canicules sont des phénomènes fréquents en Tunisie, pourtant certains considèrent ce problème comme modérément grave et non comme étant inexistant ou faible. Certaines des personnes jugeant les canicules comme étant des problèmes modérés ou graves ont ajouté qu'elles sont plus longues et plus chaudes qu'auparavant, ce qui est confirmé par des études scientifiques (Dahech & Beltrando, 2012)

Les problèmes considérés comme mineurs par une part conséquente de la population interrogée sont les pluies torrentielles (33,8% du groupe), les inondations et les canicules (les deux recueillant 32,4%) qui sont des phénomènes soit rares, soit auxquels la population est adaptée comme c'est le cas en particulier pour les canicules. Ces trois phénomènes sont également considérés comme n'étant pas des problèmes par plus de 25% de la population interrogée.

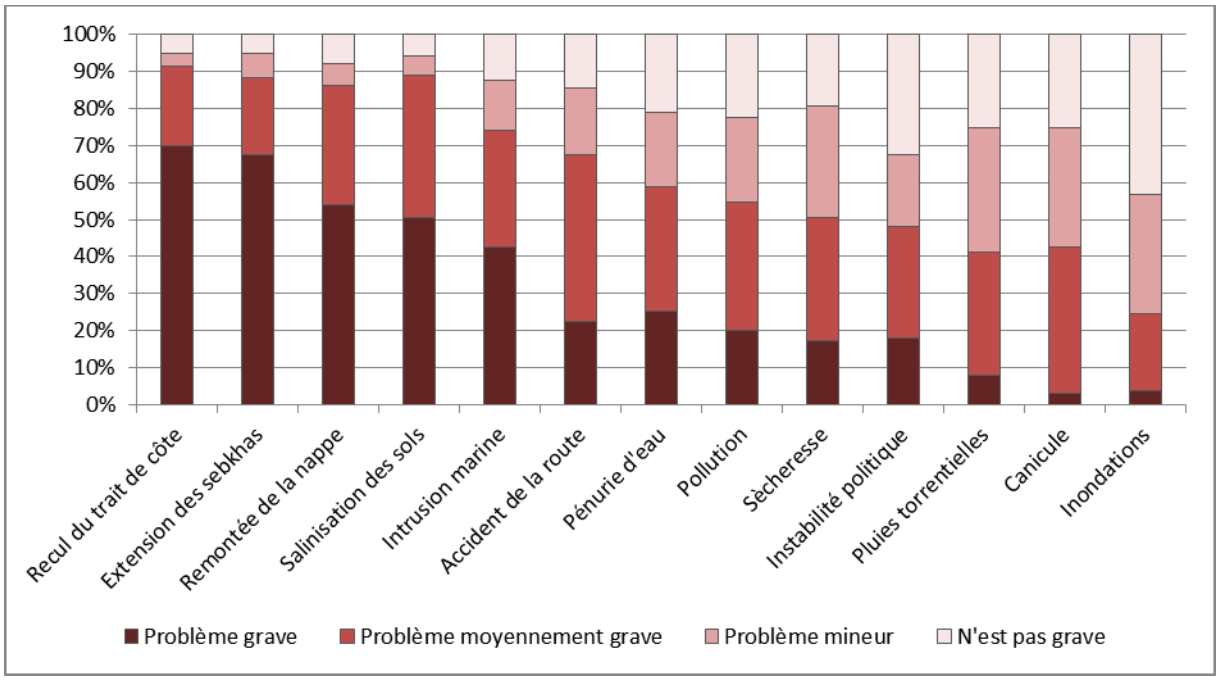



***Figure 101: Classification des problèmes majeurs aux problèmes les moins importants***

Plusieurs personnes (18) ont ajouté des problèmes qu'elles jugent importants (Tableau 25). Ces derniers sont très variés et concernent des domaines divers qui peuvent être purement sociétaux, concerner les activités humaines menaçant l'environnement et plus généralement la nature ou encore être des problèmes ne relevant pas directement d'activités humaines. Ces problèmes n'ont été cités que 1 ou 2 fois maximum (Tableau 25), aucun d'entre eux n'apparaît donc comme particulièrement important pour la population interrogée.

***Tableau 25: Problèmes cités spontanément par la population interrogée***

| Type de problèmes | Problème | Nombre de citation |
|---|---|---|
| Problèmes purement sociétaux | Alcoolisme des jeunes | 1 |
| | Aménagement du territoire | 1 |
| | Egoïsme | 2 |
| | Exode rural | 1 |
| | Transports | 2 |
| | Tourisme inexistant | 1 |
| Activités humaines menaçant l'environnement | Chalutage | 1 |
| | Puits de pétrole et sociétés pétrolières | 3 |
| | Ramassage des œufs de perdrix | 2 |
| | Pêche des jeunes poissons | 1 |
| | Utilisation du sable de la mer pour les constructions | 1 |
| Problèmes « naturels » n'étant pas en lien direct avec les activités humaines | Apparition plus fréquente des moustiques | 1 |
| | Augmentation du nombre de dauphins | 1 |

### 2.2. La perception du recul de la côte et estimation des actions entreprises contre ce danger

La très grande majorité des personnes interrogées ont confirmé qu'elles percevaient un recul de la côte. Sur 139 questionnés, 136 ont répondu positivement (98%) quand seules 3 personnes n'ont pas perçu de recul côtier (2%).

Les personnes interrogées jugent que le recul est moyen à 41%, important à 39%, faible à 16% et nul à 4% (Figure 102 - A), ce qui est cohérent avec les réponses données à la première question.

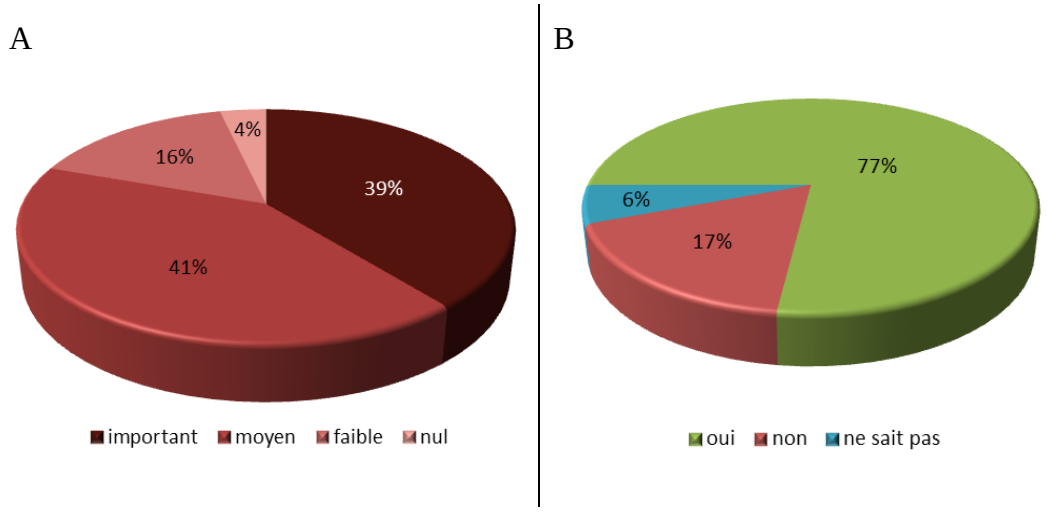



***Figure 102: A : Répartition des réponses à la question : "A votre avis, le phénomène de recul de la côte est-il… ?" B : Répartition des réponses à la question : "Pensez-vous que le rythme du recul du trait de côte s'est accéléré ?" (Échantillon de 139 réponses)***

Les personnes interrogées sont également une large majorité à avoir perçu une accélération du rythme d'érosion de la côte. Ils sont en effet, 77% (107 personnes) à répondre positivement pour seulement 17% (24 personnes) négativement. Huit interrogés ont répondu qu'ils ne savaient pas si une accélération du rythme d'érosion littorale était effective (Figure 102 - B). La question corollaire demande aux personnes qui ont répondu positivement, depuis quand ce phénomène d'accélération existe. Les réponses sont très différentes et varient de 3 ans à 60 ans. Les réponses majoritaires sont 10 et 20 ans qui récoltent chacune 26 suffrages. Il n'existe aucune corrélation avec les informations personnelles des interrogés. Le lieu d'habitation ne semble pas influencer les réponses. Les personnes habitant très près de la côte perçoivent le recul côtier de la même manière que celles habitant plus loin (comme à Mellita par exemple). De la même manière, le seuil d'accélération proposé par les personnes interrogées n'est pas dépendant de leur âge (corrélation de 0,2). Cela signifie que des personnes plutôt âgées ont pu percevoir une accélération récente tandis que des jeunes peuvent avoir perçu une accélération plus ancienne bien qu'aucun interrogé n'ait donné une valeur plus élevée que son âge. Il n'existe également pas de corrélation entre la profession et la perception du recul de la côte. Enfin, le niveau d'étude non plus, n'influe pas sur les réponses. Des personnes d'un niveau d'étude élevé ont pu percevoir une accélération récente ou très ancienne. Ces réponses très différentes et ne trouvant, à priori, pas de facteur explicatif

évident, peuvent s'expliquer par un biais dans le questionnaire, une question trop compliquée ou mal comprise qui aurait pu inciter les personnes interrogées à répondre plus ou moins au hasard.

La Figure 103 représente les résultats à la question concernant les efforts (aménagements) réalisés par la population et par l'Etat pour contrer l'érosion marine. Les aplats de couleur représentent les réponses quant à la quantification des efforts (importants, moyens, faibles ou nuls) et les motifs représentent les réponses à la question de l'efficacité de ces efforts en fonction de leur importance.

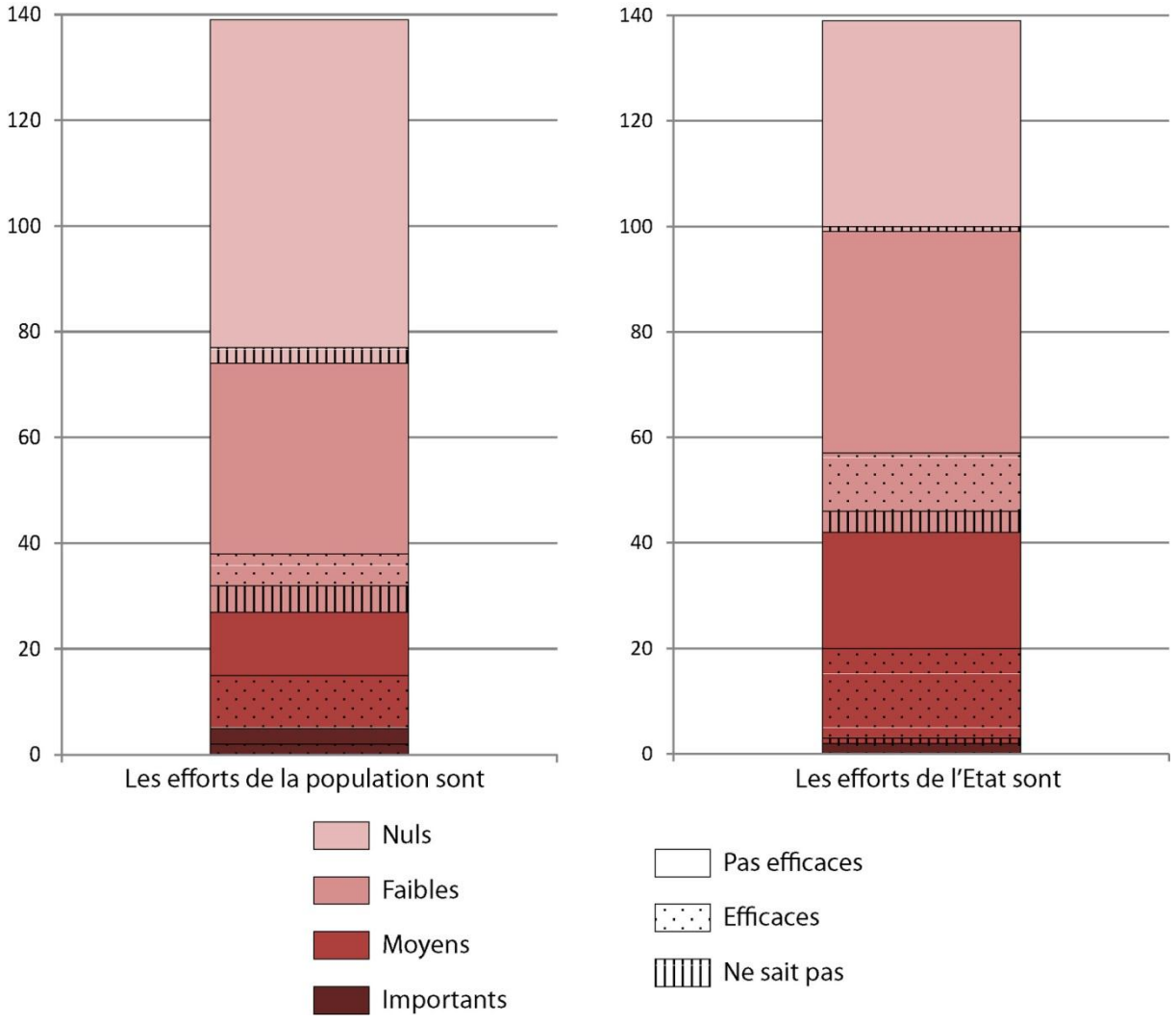



***Figure 103: Répartition des réponses aux questions : "Face à ce phénomène (de recul de la côte) les efforts de la population sont ?, Ceux de l'Etat sont ?" (Échantillon de 139 réponses)***

Les efforts de la population sont très majoritairement considérés comme nuls (65/139) ou faibles (47/139). Les personnes les jugent donc minoritairement faibles (22/139) ou importants (5/139). Parmi les personnes ne considérant pas les efforts comme étant nuls, la majorité (51/74) les juge inefficaces. De plus, moins les personnes jugent les aménagements importants, plus elles les considèrent comme inefficaces (Figure 103).

Les résultats concernant les efforts de l'Etat sont assez similaires. La majorité des personnes interrogées considèrent les efforts de l'Etat comme faibles (57/139). 40 personnes ont jugé ces efforts nuls ou moyens tandis que seuls 2 les jugent importants (Figure 103). Les personnes qui considèrent les efforts de l'Etat non nuls sont une majorité à les trouver inefficaces et comme dans le cas de la question précédente, moins les personnes jugent les aménagements importants, plus elles les considèrent comme inefficaces (Figure 103).

Ceci peut signifier deux choses :

- La population perçoit l'efficacité / inefficacité des efforts mis en œuvre et en déduit s'ils sont assez importants / insuffisants pour contrer l'érosion
- L'inverse est également possible, la population remarque la qualité des efforts et juge de leur efficacité à postériori.

Ainsi, la majorité des personnes interrogées jugent que les efforts engagés pour contrer l'érosion côtière sont nuls ou faibles et que, s'ils existent, ces efforts sont inefficaces. La perception de la gestion du risque d'érosion littorale est donc plutôt négative.

### 2.3. La perception de la mort des palmiers et causes proposées

La mort des palmiers sur les bordures de sebkhas, comme expliqué précédemment dans le **Chapitre 7** et avant, est un des signes les plus flagrants de l'extension des sebkhas. La connaissance des causes de la mortalité des palmiers par la population locale peut aider à mieux comprendre ce phénomène.

Les personnes interrogées ont répondu à 95% (132/139) qu'il existait un phénomène de mort excessive des palmiers (Figure 104). Parmi ces 132 personnes, 60 considèrent que la mort excessive des palmiers est un phénomène important, 46 que c'est un phénomène modéré et 26 qu'il est faible (Figure 104). Il semble donc que la très large majorité des personnes interrogées perçoit et est préoccupée par le recul des palmiers de l'archipel de Kerkennah.

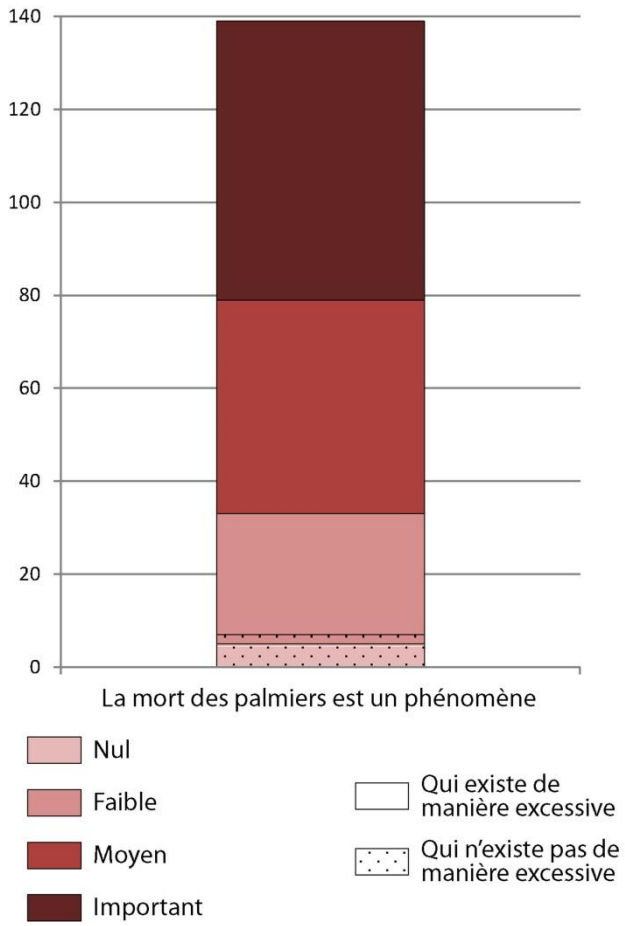



***Figure 104: Répartition des réponses aux questions : "Avez-vous remarqué la mort des palmiers ? Ce phénomène est-il … ?" (Échantillon de 139 réponses)***

La question suivante porte sur les causes de cette mortalité excessive et n'a été posée qu'aux 132 personnes ayant répondu positivement à la question précédente. Les interrogés avait le choix de donner plusieurs réponses, de choisir parmi les trois qui leur étaient proposées et d'en ajouter. Les trois causes proposées dans le questionnaire ont recueilli le plus de suffrages (En italique dans le Tableau 26). Ceci paraît logique car les réponses proposées influencent forcément le questionné. Ainsi, la cause de mortalité des palmiers la plus souvent citée est la salinisation des sols (cité par 82/132 personnes ou 62%). Vient ensuite l'exploitation du *Legmi* (65/132) et enfin la montée de la mer (48/132). Les interrogés ont ajouté 6 autres causes pouvant expliquer la mortalité excessive des palmiers. Deux d'entre elles sont remarquables car elles ont été citées spontanément plus de 25 fois. Il s'agit d'abord des changements de cultures (ou mutations des systèmes de production) et de l'abandon de la palmeraie (Tableau 26). La sècheresse a été citée spontanément 7 fois tandis que la prolifération de l'alpha, asphyxiant les jeunes plants de palmiers ainsi que l'arrachage illégal des palmiers et la consommation de leurs cœurs ont été cités seulement 2 fois chacune. Il

semble donc que les mutations des systèmes de production et l'abandon de la palmeraie, phénomènes décrits dans le **Chapitre 7**, soient des causes connues et évidentes pour une partie du groupe interrogé.

***Tableau 26: Causes de la mortalité excessive des palmiers***

| **Causes de mort des palmiers** | **Nombre de réponses** |
|---|---|
| *Salinisation des sols* | *82* |
| *Exploitation du Legmi* | *65* |
| *Montée de la mer* | *48* |
| Mutation des systèmes de production | 27 |
| Abandon de la palmeraie | 25 |
| Sècheresse | 7 |
| Prolifération de l'alpha qui asphyxie les autres plantes | 2 |
| Arrachage illégal des palmiers | 2 |
| Consommation des cœurs de palmier | 2 |

Par ailleurs, 78% des personnes interrogées ont cité plusieurs causes (Tableau 27). Les personnes qui n'ont cité qu'une seule cause n'ont pas toujours cité les propositions du questionnaire et ont majoritairement proposé l'abandon de la palmeraie, les changements de cultures mais aussi la sècheresse. Près de 50% du groupe a proposé deux causes, 17%, 3 causes et 5%, 4 causes ou plus. Ceci laisse penser que les personnes interrogées sont conscientes que la mortalité des palmiers est due à plusieurs causes différentes et qu'il ne s'agit pas de mortalité naturelle.

***Tableau 27: Nombre de réponses proposées par les personnes interrogées***

| | **Nombre de réponse** | **en %** |
|---|---|---|
| Nombre de personnes ayant cité une cause unique | 29 | 22 |
| Nombre de personnes pour lesquelles il existe 2 causes | 65 | 49 |
| Nombre de personnes pour lesquelles il existe 3 causes | 23 | 17 |
| Nombre de personnes pour lesquelles il existe 4 causes et plus | 6 | 5 |
| Ne connaît pas la cause | 9 | 7 |

Il semble donc y avoir une adéquation entre les problèmes graves perçus par la population et les phénomènes que nous avons jugés comme étant les plus dommageables qui sont le recul de la côte et l'extension des sebkhas impliquant la mort des palmiers sur leurs marges. Ce constat de cohérence entre résultats scientifiques et perception de la population pourrait être mieux évalué, d'une part en améliorant la qualité de l'échantillon afin d'aboutir à une étude quantitative de la perception des dangers dans l'archipel de Kerkennah, et d'autre part en poussant plus les études c'est-à-dire en augmentant le nombre de questions afin de mieux connaître la perception de la population concernant les phénomènes dommageables.

La population interrogée estime que les problèmes de recul de la côte et de la mortalité excessive des palmiers sont graves ou modérés. La perception semble correspondre aux résultats obtenus dans les chapitres précédents et la population locale semble détenir les clefs de la compréhension des phénomènes menaçant l'intégrité de l'archipel de Kerkennah. Cependant, s'ils menacent l'intégrité de l'archipel de Kerkennah et le rendent très vulnérable, la population, qui en est consciente, pourra réagir et, si ce n'est protéger l'ensemble de l'archipel, au moins tenter de protéger les enjeux qu'elle définit et ainsi rendre, au moins en partie, l'archipel moins vulnérable.

## 3. La vulnérabilité parfois accentuée par des gestions non adaptées

### 3.1. Les aménagements réalisés sur le littoral de l'archipel et dans les sebkhas

#### 3.1.1. Les aménagements côtiers de l'archipel

La gestion des risques littoraux peut être classée en trois types d'actions qui ont toutes pour but de préserver les enjeux face à l'érosion de la côte ou aux submersions (Meur-Ferec, 2009). Les actions d'opposition massive sont très utilisées pour contrer l'avancée de la mer et y résister. Il s'agit d'aménager la côte par des moyens durs/solides comme des enrochements, digues, des épis, des brise-lames etc… Les actions « souples » consistent en un :

> *« […] rééquilibrage artificiel du bilan sédimentaire et (ou) l'utilisation de processus dynamiques naturels. On peut regrouper dans cette catégorie toutes les techniques de rechargement, ainsi que les techniques de drainage des plages. » (Meur-Ferec, 2009)*

Enfin le repli stratégique consiste à déplacer des enjeux vers l'intérieur des terres ou à les détruire afin que leur vulnérabilité soit diminuée voire nulle face à la menace (Meur-Ferec, 2009).

Ces trois types d'aménagements se retrouvent à Kerkennah le long de la côte et sont illustrés par la Figure 105. Ainsi, comme décrit dans le **Chapitre 6** des actions menées le long des côtes de l'archipel font majoritairement partie de l'opposition massive avec en particulier des murs de soutènement, des enrochements et des digues. Les enrochements et digues (Figure 105 - A et A') ont été mis en place par l'Etat spécifiquement là où les enjeux économiques (zone touristique) et politiques ou démographiques (Ramla) l'exigeaient. Cela est en accord avec les objectifs affichés dans le programme de protection du littoral de L'APAL : *« il s'agit en premier lieu d'assurer la protection des infrastructures et des constructions en bord de mer »* (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL)). Les murs de soutènement et les murets sont très nombreux et mis en place par la population locale pour protéger ses habitations de la mer et de l'érosion.

Les protections douces sont assez peu nombreuses et consistent, dans l'archipel, en des apports de sédiments mis en place par l'Etat lorsque l'enjeu à protéger est collectif, comme l'élévation des pistes de bord de mer par exemple (Figure 105 - B). Les particuliers protègent parfois leurs habitations à l'aide de monticules faits de matériel terrigène ou de déchets de chantiers. Ces protections seront dégradées voir éliminées lors des prochaines tempêtes et leurs effets restent ponctuels.

Enfin le repli stratégique n'est que très peu utilisé et n'a été observé qu'une fois alors qu'une piste côtière a été submergée (Figure 105 - C). L'avancée de la mer a donc en quelque sorte forcé ce repli.

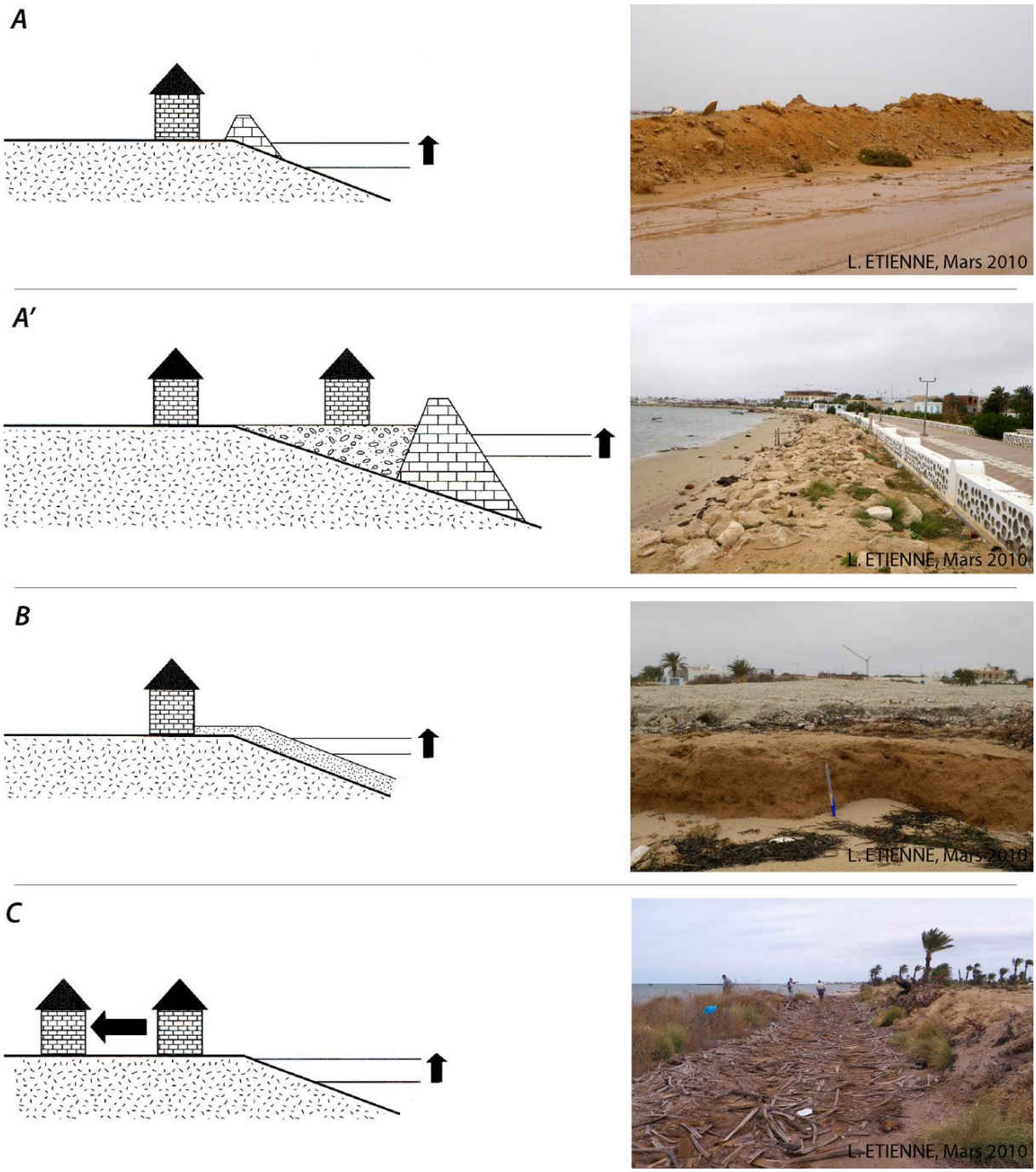



***Figure 105: Exemples de modes de gestion littorale observés à Kerkennah (Source des schémas, Paskoff, 2001, photographies à droite prises sur l'archipel)***
*A, protection de l'enjeu par résistance dure ou opposition massive. A', Cas particulier de A, Avancée ou contre-attaque pour créer de l'enjeu. B, action souple par apport de matériel et surélévation de l'enjeu. C, Repli stratégique, déplacement de l'enjeu dans les terres.*

Actuellement **les plages, et les littoraux de l'archipel de Kerkennah connaissent des aménagements souvent individuels et anarchiques** mis en place après des signes d'érosion littorale et de dégradation des habitations en bord de mer. C**es aménagements, s'ils permettent de protéger au moins à court terme les enjeux situés en arrière, ont des effets**

**à long terme qui peuvent être catastrophiques à la fois là où ils sont installés et sur les côtes alentour** (Oueslati in Scapini, 2002).

### 3.1.2. Impacts des aménagements sur les dynamiques naturelles des sebkhas à Kerkennah

Les sebkhas de l'archipel de Kerkennah s'étendent et cela représente un risque lié à la salinisation des terres arables et constructibles. Cependant rien ne semble être mis en place pour contrer cette extension et l'élévation de la salinité des sols sur leurs bordures. Pourtant quelques aménagements ont un impact sur le fonctionnement des sebkhas. Il s'agit des digues/routes et du drainage de l'eau issue de la zone irriguée de Ramla qui est déversée au cœur de la sebkha Alif Ennkhal (Figure 106).

Les digues/routes ont un impact sur le fonctionnement des sebkhas et peuvent avoir une influence sur leur extension. Plusieurs sebkhas ont ainsi eu leur exutoire barré par une digue d'environ 1,5 mètre de hauteur, dépourvue de buse d'évacuation et sur laquelle passe une route (Figure 106 - B'). Ces digues/routes, mises en place par l'Etat, n'ont pas été conçues dans un but de gestion des risques mais plutôt dans le but de permettre de relier des espaces entre eux tout en évitant de traverser les fonds de sebkhas qui sont inondés une partie de l'année (même si des pistes sont observables dans les sebkhas sur Google Earth). Par exemple, la digue/route coupant l'exutoire de la sebkha Alif Ennkhal permet de rejoindre facilement la presqu'île de Sidi Fonkhal. En empêchant les échanges naturels entre la mer et l'intérieur de la sebkha, ces aménagements ont des effets contradictoires. D'une part les entrées en sel par la marée habituelle ne sont plus possibles, ce qui limite les apports salés dans les sebkhas et favorise la désalinisation des sols ; d'autre part lorsqu'une tempête a lieu et que les vagues débordent la digue, les eaux salées se trouvent bloquées dans la sebkha jusqu'à évaporation ou infiltration ce qui constitue un apport en sel conséquent. Les sebkhas Alif Ennkhal et Henchir Salem, deux des plus grandes sebkhas de Kerkennah, sont toutes les deux fermées et ont un comportement très différent (cf : **Chapitre 7**, p. 236). La première s'est très peu étendue entre 1963 et 2010 quand la surface de la seconde a été multipliée par 2. Il semble donc que ces fermetures n'ont pas un impact majeur sur l'extension des surfaces de sebkhas. Cependant le fonctionnement naturel des sebkhas est alors très fortement perturbé, en particulier près des digues, là où les échanges quotidiens entre terre et mer sont annulés (Figure 106). Au vue des compositions colorées standards, cette fermeture semble avoir provoqué un assèchement de l'espace le plus proche de la mer.

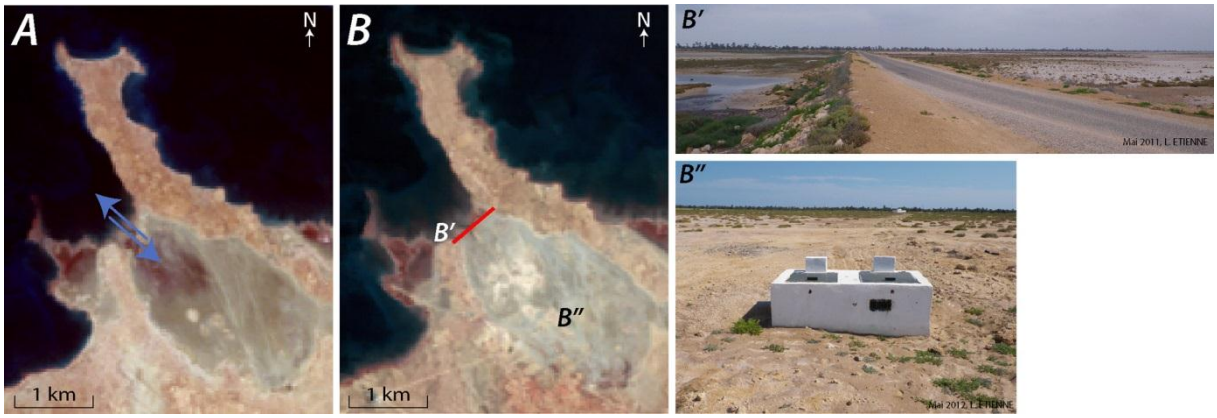



***Figure 106: Aménagements influençant la sebkha Alif Ennkhal.***
*A, Compositions colorées standard de l'image Landsat 5 TM du 18 juin 1984. B,du 29 juin 2011. B', Vue de la digue en mai 2011 ; à droite la sebkha, à gauche, la mer. B'', borne de rejet des eaux de drainage de la zone irriguée de Ramla en mai 2012*

En effet, en 1984 (Figure 106 - A) les surfaces sont humides (foncées) et végétalisées (rouge) laissant penser à un chott voire un marais maritime tandis qu'en 2010 (Figure 106 - B) elles apparaissent en blanc (sec et sans végétation). La salinité y est également renforcée par le déversement des eaux de drainage de la zone irriguée de Ramla située au sud (Figure 106 - B'').

Ainsi les aménagements réalisés sur le littoral de l'archipel ne sont pas adaptés car ils peuvent déclencher des processus érosifs. De plus les enrochements construits par l'Etat ont été réalisés dans un but politique (Kebaïli Tarchouna, 2013). Les aménagements réalisés dans les sebkhas n'ont pas été mis en place dans une optique d'adaptation à l'extension de leur surface. Certains, comme la borne de rejet des eaux de drainage de la zone irriguée de Ramla sont des facteurs aggravant la vulnérabilité car apportant de l'eau salée.

### 3.2. La gestion du trait de côte et de l'érosion marine : l'impossible passage aux approches intégrées

Aucun plan d'aménagement n'étant prévu au sujet des sebkhas, cette sous partie se focalise sur les aménagements côtiers.

En Tunisie l'APAL est chargée de l'exécution de la politique de l'Etat en matière de protection du littoral. Ainsi ses missions sont :

*« La gestion des espaces littoraux et le suivi des opérations d'aménagement en veillant à leur conformité avec les règles et les normes fixées par les lois et règlements en vigueur relatifs à l'aménagement de ces espaces, leur utilisation et leur occupation; La régularisation et l'apurement des situations foncières existantes à la date de création de l'APAL et qui ne sont pas conformes aux lois et règlements relatifs au littoral et au domaine public maritime; l'élaboration des études relatives à la protection du littoral et à la mise en valeur des zones naturelles et le développement des recherches, études et expertises nécessaires ainsi que l'observation de l'évolution des écosystèmes littoraux à travers la mise en place et l'exploitation de systèmes informatiques spécialisés. » (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL))*

Dans cette sous partie, les projets prévus à Kerkennah sont exposés et discutés afin de comprendre le système de gestion favorisé pour l'archipel. Plusieurs types de projets ont été réalisés par l'APAL et s'inscrivent dans le cadre de la protection du littoral et des plages face à l'érosion marine, la création et la conservation de zones sensibles qui peuvent passer par une maîtrise de l'urbanisation, la création d'aires protégées marines et côtières. De plus le projet « golfe de Gabès » prévoit la préservation de la biodiversité et inclut l'archipel de Kerkennah (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL)). L'AFT (Agence Foncière Touristique) prévoit quant à elle la création d'une zone touristique sur la presqu'île de Sidi Fonkhal dont le plan d'aménagement a été approuvé.

#### 3.2.1.La protection des plages : une opposition massive à l'avancée de la mer

L'action de l'APAL prévue dans le cadre de la protection des plages se limite à la poursuite des enrochements qui ont déjà été réalisés sur l'archipel (Figure 107). Il est prévu de renforcer ceux qui existent déjà (Bou Nouma et Ramla/Ouled Bou Ali) et d'en installer de nouveaux dans les zones où les habitations sont près du trait de côte : à El Attaya, Ouled Kacem, Ouled Bou Ali, Bou Nouma et Sidi Frej (le long de la zone touristique). Ces actions se placent dans la continuité de ce qui a déjà été réalisé dans le passé et ne répondent pas aux objectifs prévus par l'APAL, à savoir : reconstituer les plages en les rendant stables et propices aux activités balnéaires, établir une connaissance des caractéristiques de l'écosystème côtier (bilan hydro-sédimentaire), définir des solutions durables pour leur réhabilitation et pour le maintien de leur équilibre par des mesures d'aménagement, de protection et de gestion intégrée de l'écosystème, assurer la rentabilité économique et touristique de la zone concernée par la protection contre l'érosion marine, et enfin réaliser le projet dans un souci de respect de l'environnement (Agence de Protection et d'Aménagement

du Littoral (APAL)). Ainsi Les aménagements réalisés et prévus pour préserver les plages sont des installations dures et massives souvent composées d'enrochements, parfois de digues. **Ces aménagements lourds**, parce qu'il est prouvé que leurs effets à court et à long terme sont négatifs et engendrent des processus érosifs, **ne sont pas une adaptation viable (à long terme)** à l'élévation du niveau de la mer et à l'érosion marine.

***Figure 107: Plan des actions prévues dans le cadre de la protection des plages à Kerkennah (source : APAL, consulté en 2013)***

### 3.2.2.Les zones sensibles : miser sur le développement ou sur la conservation de la biodiversité ?

Deux sites ont été classés comme zones sensibles dans l'archipel de Kerkennah et sont destinés à une gestion intégrée et respectueuse de l'environnement (APAL). Une zone sensible est définie comme étant :

*« une zone qui présente des caractéristiques naturelles spécifiques, qui constituent un écosystème fragile ou un élément ou un ensemble d'éléments dans ce système et qui requiert pour sa protection contre la dégradation la mise en œuvre de normes et de procédés d'aménagement prenant en compte ses spécificités et préservant les sites naturels y existants » (APAL)*

Ainsi, les îlots nord-est de Kerkennah et Borj El H'sar sont considérés comme des espaces fragiles qui nécessitent des mesures de protections particulières (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001; Comete Engineering, 2001). Les îlots nord-est de l'archipel ont été retenus pour devenir « zone sensible » pour trois raisons. D'abord car ils ont une grande valeur écologique, ils sont des sites de reproduction et de passage d'oiseaux migrateurs et ils offrent des conditions idéales de réserve faunistique (avec quelques espèces endémiques). Ensuite, ils sont très fortement touchés par l'érosion marine et ont besoin d'être protégés. Enfin la pression anthropique y est importante avec la fréquentation des îlots non contrôlée ce qui met en péril l'écologie des sites (Comete Engineering, 2001). Dans le cas de Borj El H'sar, les raisons de son classement en zone sensible sont également liées à la pression anthropique importante avec le développement de la zone de Sidi Frej à l'ouest, à la valeur écologique du site et surtout aux nombreux vestiges datant de l'Antiquité qui constituent un patrimoine méritant d'être protégé.

Dans le cadre du développement de la gestion intégrée des zones littorales et côtières, deux études diagnostiques ont été commandées pour évaluer les spécificités des espaces concernés et établir des listes de recommandations. Dans les deux cas, les auteurs préconisent la création d'un parc national pour les îles de Kerkennah.

Concernant la zone sensible des îlots, les auteurs préconisent une gestion très stricte pour la conservation de leur biodiversité et pour garantir la tranquillité de la faune et de la flore. Les mesures proposées consistent en une série d'interdictions et quelques autorisations pour la recherche pour les mesures de protection :

*« • L'interdiction de toute construction ou aménagement, sauf ceux nécessaires au maintien et à la préservation des équilibres écologiques, cette interdiction concerne également les aménagements facilitant l'accès ou la circulation sur les îlots.*
*• La limitation de l'accès des personnes et du dérangement.*
*• La prohibition de tout hébergement et du camping sauvage.*
*• L'interdiction ou la sanction de tous les actes de vandalisme ou portant atteinte à l'écosystème, tels que la cueillette de plantes, de fleurs, le ramassage des œufs etc.*

*• Le contrôle et les actions de police nécessaires au respect des interdictions et qui seront assurés par une brigade de surveillance.*

*Les actions autorisées sur ces îlots et sous certaines conditions, seront :*
*• Les inventaires floristiques et faunistiques scientifiques, ainsi que le suivi du milieu.*
*• L'exploration des vestiges archéologiques.*
*• La reconstitution des écosystèmes du milieu insulaire, par la réimplantation de la flore autochtone et éventuellement la réintroduction d'espèces endémiques. »(Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001)*

Le rapport sur la zone de Borj El H'sar, propose 2 types de gestion : l'un promeut la conservation (approche naturaliste, conservation de la faune et de la flore) l'autre, la protection du site (tenir l'urbanisation loin du site, interdire les mesures de protection individuelles et promouvoir une approche globale et finale contre l'érosion). Il propose pour cela 2 scénarios d'aménagement l'un de mise en valeur archéologique l'autre de dynamisation culturelle (ces termes cachent des actions beaucoup plus générales de protection des sebkhas par évacuation des déchets, des pistes et des véhicules etc… mais aussi la préservation de la palmeraie ou des espaces agricoles). Le second scénario prévoit simplement plus d'activités culturelles sur le site avec l'aménagement d'un musée par exemple (Comete Engineering, 2001).

Dans les deux cas, les études disent s'inscrire dans les recommandations faites par l'APAL, à savoir *« identifier et caractériser les contraintes et les potentialités socio-économiques en vue de la valorisation et l'aménagement intégré des écosystèmes côtiers et définir la meilleure stratégie possible pour le développement durable de ces écosystèmes » (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001).* La Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) est un principe qui a été adopté dans les années 1990 comme étant une nouvelle forme de gestion née des erreurs passées à savoir la non prise en compte (i) de l'environnement des zones concernées par des projets d'aménagement, (ii) des impacts spatio-temporels des aménagements ainsi que (iii) des savoirs des populations locales (Meur-Ferec, 2006; Bounouh, 2010). LA GIZC s'appuie sur trois principes : D'abord l'étude des milieux marin et terrestre et l'ensemble des relations qui les unissent (physiques, écologiques, et anthropiques incluant les activités économiques, politiques, touristiques…) ; Ensuite l'évaluation des impacts des aménagements dans le temps et dans l'espace ; Enfin en intégrant pleinement la population locale grâce à la mise en place de nouvelles formes de gouvernances (Meur-Ferec, 2006). Les objectifs de la GIZC sont de pouvoir à la fois préserver

l'environnement, favoriser le développement économique et promouvoir une équité sociale et ainsi tendre vers un idéal de gestion globale et saine des littoraux (Meur-Ferec, 2006).

Lorsque ces rapports de gestion des zones sensibles sont mis en regard avec la définition de la gestion intégrée à laquelle ils disent se conformer, des différences majeures apparaissent. En effet, même si les caractéristiques des milieux physiques et anthropiques sont étudiés, les études d'impacts spatio-temporels des mesures préconisées ne sont pas présentes dans les rapports ou consistent en un petit paragraphe (de 4 lignes), uniquement présent dans le rapport de Borj El H'sar et qui affirme que :

> *« En comptant avec les actions de protection et de préservation des différents espaces vulnérables de la zone et les mesures juridiques qui devront les accompagner, il pourra être garanti la pérennité du caractère naturel du littoral et des richesses faunistiques et floristiques du site ce qui aura inévitablement un impact positif sur l'environnement. » (Comete Engineering, 2001)*

Par la suite sont présentés en 2 paragraphes, les avantages du projet (sans présenter d'inconvénients d'ailleurs) et l'estimation des coûts.

Dans les deux cas, la population locale ne serait que très peu consultée et intégrée aux projets. Il n'est nulle part fait mention dans le rapport de la zone des îlots nord-est de l'archipel. Le projet de Borj El H'sar prévoit *«la création d'un centre d'activité artisanale impliquant la population locale »* (Comete Engineering, 2001). Il n'est pas fait mention de la volonté de la création de ce centre par la population, ni de la manière dont celle-ci sera impliquée dans le projet. Il semble donc que les décisions soient prises unilatéralement et que la réalité soit bien éloignée de la volonté affichée de réaliser des études pour une gestion intégrée des zones côtières. Par ailleurs, dans les deux rapports, se confrontent l'idée d'une gestion intégrée (qui intègre le développement économique) et la volonté de création d'un parc national sur l'ensemble de l'archipel (qui consiste à préserver ou plutôt conserver la biodiversité tout en limitant les activités économiques et sans forcément tenir compte de la volonté de la population locale). Ces deux axes semblent assez peu compatibles.

Ainsi, **les projets d'aménagement et de protection futurs des zones sensibles de l'archipel de Kerkennah ne reposent pas sur les principes d'une gestion intégrée** mais sur une gestion descendante ou *« top-down »* menée unilatéralement par l'organisme national qu'est l'APAL.

### 3.2.3.La zone touristique de Sidi Fonkhal : une vision à court terme ?

Dans le cadre du développement touristique de la région de Sfax, agglomération côtière située dans le golfe de Gabès en Tunisie, trois zones sont ou seront appelées à être aménagées pour l'accueil de touristes. Parmi ces espaces, la presqu'île de Sidi Fonkhal, située sur la côte nord de l'île de Chergui dans l'archipel de Kerkennah doit accueillir un complexe touristique de 3000 lits destiné à un public international (Observatoire Tunisien de l'Environnement et du Développement Durable (OTEDD), 2010). Les aménagements sont, pour le moment, quasi inexistants sur le littoral de Sidi Fonkhal. Cet espace est, en effet, très peu habité et les quelques habitations que l'on peut y rencontrer sont souvent éloignées de la côte de plusieurs dizaines voire centaines de mètres. Quelques parcelles agricoles sont présentes et abritent des cultures en sec. La mise en œuvre du plan d'aménagement touristique régional a été confirmé récemment par le nouveau gouvernement et un Plan d'Aménagement a été approuvé spécifiquement pour Sidi Fonkhal (Agence Foncière Touristique) (Figure 108). Ce projet prévoit l'aménagement de 90 ha de la zone de Sidi Fonkhal à des fins de tourisme écologique (Agence Foncière Touristique). La capacité d'accueil sur le site sera de 2550 lits en club de vacances et 450 en hôtellerie classique, avec des aménagements pour des activités balnéaires ainsi qu'un arboretum permettant la *« sauvegarde de l'agriculture »* (Agence de Protection et d'Aménagement du littoral, 2001). L'aménagement de la presqu'île de Sidi Fonkhal et les choix qui ont été réalisés dans le cadre du développement touristique régional du gouvernorat de Sfax comportent plusieurs points positifs et négatifs qui aboutissent à une situation assez paradoxale. Seront discutés dans un premier temps, le choix du site d'étude puis, dans un second temps, les choix d'aménagement.

Le choix du site sur l'archipel de Kerkennah est plutôt judicieux. En effet, la presqu'île de Sidi Fonkhal est plutôt élevée et culmine à 8 mètres d'altitude d'après la carte topographique de 1973. Contrairement au reste de l'archipel, la majorité des terres est située à plus de 2,5 mètres d'altitude et seule une bande assez peu large, partant du nord-ouest jusqu'au sud-est de la presqu'île, est constituée de terres basses qui sont sujettes aux submersions marines. De plus, le site est doté d'une longue plage pouvant accueillir les estivants, ce qui est un atout pour un complexe touristique. Ces deux paramètres montrent les atouts majeurs de la presqu'île pour l'accueil de touristes. Les aménagements prévus pour la presqu'île sont de plusieurs types (Figure 108) et ils respectent les lois littorales qui obligent au respect d'une bande d'inconstructibilité de 25 mètres à l'intérieur de la côte (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL)). Les différentes zones prévues pour

accueillir le complexe hôtelier et les zones résidentielles, mais aussi les zones vertes et les zones d'animation, sont toutes situées à au moins 50 mètres de la ligne de côte (Figure 108). Cette décision d'éloignement de la côte constitue une protection et une anticipation face à l'érosion marine.

Cependant plusieurs éléments rendent le choix de la presqu'île de Sidi Fonkhal critiquable. D'un point de vue physique, la presqu'île est étroite (environ 500 mètres de large) ce qui représente, dans un contexte d'érosion marine, un fort facteur de vulnérabilité. Ensuite les côtes est et nord sont basses et subissent une érosion parfois très importante comme nous avons pu le mesurer (cf : **Chapitre 6**, p. 169) et sont des espaces vulnérables à la fois à l'érosion et aux submersions (cf :**Chapitre 6**, p. 197). L'accès à la presqu'île n'est possible que par des zones particulièrement basses de sebkhas littorales dont le fonctionnement naturel est très spécifique et fragile. Ainsi, en ajoutant des enjeux économiques sur cet espace fragile, la vulnérabilité ne sera que renforcée. Les deux digues prévues vont perturber les dynamiques littorales et la grande plage du nord devrait en pâtir. L'atout majeur du projet sera donc très fortement menacé. Enfin, une notion ne semble pas avoir été prise en considération dans le projet : il s'agit de la capacité de charge du milieu. Elle correspond au « nombre maximum de visiteurs qu'un écosystème donné peut accueillir sans subir des dégradations trop importantes » (Ridez, 1992). Cela signifie qu'il existe un seuil au-delà duquel le milieu subit des dommages graves signifiant également la mise en péril du projet touristique. Trois composantes la définissent : celle physique et écologique, celle sociodémographique et celle politico-économique. Cette capacité de charge a été estimée à 1000 lits pour la presqu'île de Sidi Fonkhal (Kebaïli Tarchouna, 2013) ce qui est bien en deçà des 3000 lits prévus dans le projet.

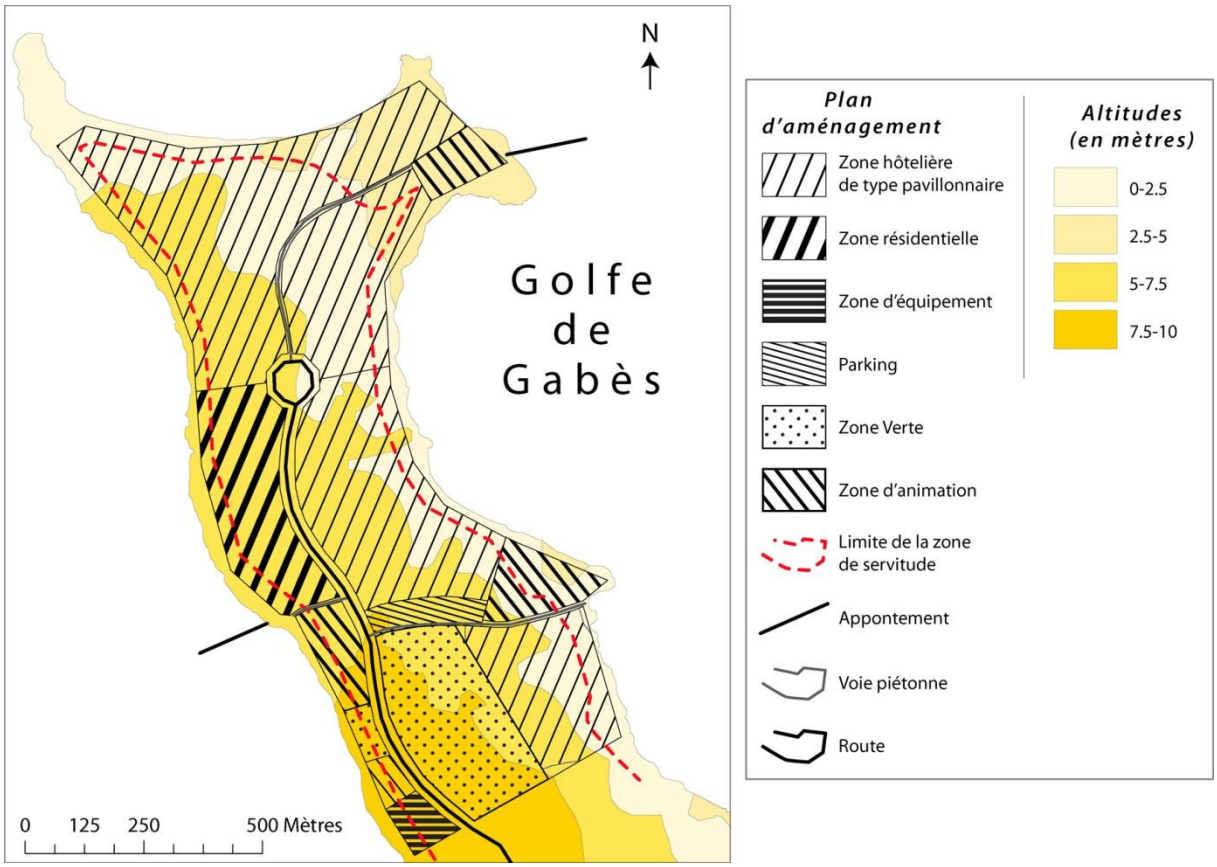



***Figure 108: Plan d'aménagement prévu pour la presqu'île de Sidi Fonkhal (Modifié à partir du Projet SMAP III, 2007)***

A une échelle plus vaste, la route d'accès a été construite en 1998 (Kebaïli Tarchouna, 2013) sur une digue (Figure 106) qui coupe l'exutoire de la sebkha située directement à l'ouest de Sidi Fonkhal provoquant la modification de son fonctionnement naturel (Fehri, 2011). Sur le site même et malgré le respect des lois du Domaine Public Maritime, aucun aménagement n'est prévu pour prévenir de l'érosion côtière. De plus, une étude menée par le cabinet d'Ingénierie de l'Hydraulique de l'Equipement et de l'Environnement (IHE) en Tunisie a montré que d'ici 2100 la presqu'île de Sidi Fonkhal sera devenue une petite île coupée de la grande île de Chergui et que l'archipel aura perdu 1/3 de sa surface. Sidi Fonkhal sera alors isolée, l'archipel morcelé en un grand nombre de petites îles et l'accessibilité touristique devrait en souffrir (Observatoire Tunisien de l'Environnement et du Développement Durable (OTEDD), 2010). Un projet touristique tel que celui-ci nécessite par ailleurs des aménagements préliminaires indispensables comme l'adduction d'eau potable, l'acheminement d'électricité, le traitement des déchets et des équipements routiers et portuaires (Tableau 28). Ces aménagements, très couteux, seront installés alors que le projet est particulièrement vulnérable.

*Tableau 28: Coût des équipements prévus pour le projet de Sidi Fonkhal (Kebaili Tarchouna, 2013)*

| | | |
|---|---|---|
| Électricité STEG | desserte de la presqu'île | 5 760 000 DT |
| | aménagement sur site | 355 000 DT |
| Eau potable (SONEDE) | création d'un forage supplémentaire et d'une station de dessalement à Remla | 5 000 000 DT |
| | acheminement de l'eau jusqu'au site | 541 000 DT |
| | couts sur site | 45 550 DT |
| Assainissement (ONAS) | première phase du projet d'assainissement des îles : réseau et station d'épuration des localités de Remla, Ouled Yaneg, Ouled Kacem et des zones touristiques de Sidi Fraj et Sidi Funchal | 3 510 000 DT |
| | aménagement sur site (dans le cas d'une réutilisation des eaux usées dans l'agriculture. | 561 000 DT |
| Télécommunications | amenée des câbles du réseau sous-terrain de la centrale téléphonique de Remla jusqu'au site | 115 500 DT |
| | coûts sur site | 75 600 DT |
| Équipements portuaires | acquisition d'une nouvelle unité (hydroglisseur) par la SONOTRAK | 8 000 000 DT |
| Infrastructures routières | Construction d'une route contournant la sebkha entre Remla et le sud de la presqu'île | 1 215 000 DT |
| | voies véhiculaires sur site | 1 154 810 DT |

Source : ONTT/AFT, 1999 et 2001.

Ainsi, le **projet touristique majeur de l'archipel de Kerkennah est conçu avec une vision de rentabilité à court terme** (Kebaïli Tarchouna, 2013) et non dans une approche intégrée qui prendrait en compte les avis et les besoins des populations locales. La réalisation de ce projet touristique tel qu'il semble se dessiner paraît être plus **perturbateur du milieu** qu'adapté au site vulnérable à l'érosion et aux submersions marines dans un contexte d'élévation du niveau de la mer.

### 3.2.4. Une gestion littorale morcelée et non intégrée

La gestion des espaces est donc morcelée en 3 visions qui concernent (i) les zones sensibles avec des règles strictes d'aménagement et de protection de la biodiversité, (ii) certaines portions de côtes qui seront protégées de l'érosion grâce à des enrochements et enfin (iii) la zone de Sidi Fonkhal dont les aménagements seront touristiques et peu adaptés à la vulnérabilité naturelle du site. Tous ces aménagements se concentrent sur l'île de Chergui.

Les 3 visions de l'aménagement sont très différentes en termes d'objectifs et d'échelle spatiale. Le développement touristique se préoccupe surtout de l'aménagement de l'intérieur

des terres (sans qu'il ne soit prévu d'aménagement pour protéger la côte de l'érosion) et s'intéresse au développement économique de l'archipel. Les zones sensibles intègrent le milieu marin et le milieu terrestre dans le but de protéger la biodiversité. Enfin les aménagements permettant la protection des plages se cantonnent à la ligne de côtes où des habitations sont installées. Aucune des 3 visions n'intègre la perception et ne prend l'avis de la population (sauf peut-être dans le cas des enrochements qui ne seront bâtis que là où des logements sont près de la côte) ni n'a réalisé de véritables études d'impacts sur les effets de ces aménagements. Aucune ne tient compte non plus de la capacité de charge des espaces concernés ni de leur vulnérabilité naturelle.

Ces projets sont par ailleurs bien distincts dans l'espace et ne se chevauchent pas. Seules les études réalisées pour les zones sensibles traitent du projet touristique de Sidi Fonkhal et mentionnent qu'il sera réalisé sur un milieu très sensible et que sa réalisation va provoquer une pression anthropique accrue sur la zone de Borj El H'sar compliquant ainsi le projet de conservation de la biodiversité (Comete Engineering, 2001). Il semble donc que l'éloignement des projets dans l'espace soit le reflet de leur éloignement méthodologique, de leurs objectifs finaux mais aussi d'un manque d'intégration et de vision globale de la gestion littorale dans l'archipel de Kerkennah. **Les aménagements qui ont été et qui seront réalisés le long de la côte de l'archipel sont donc peu adaptés car ils ne prennent pas en compte la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah ni la capacité de charge des sites**.

De plus une situation paradoxale apparaît nettement entre la perception de la population et les aménagements réalisés par cette dernière ou par l'Etat ou encore par l'APAL. En effet, les personnes que nous avons interrogées sont presque toutes conscientes du problème que représentent l'avancée de la mer et l'érosion littorale mais, dans le même temps l'extension urbaine se produit majoritairement le long de la côte, en particulier dans les zones de croissance des résidences secondaires. C'est-à-dire que la population semble plutôt consciente du danger que représente le fait de s'installer près du littoral mais y bâtit tout de même des maisons puis réalise, ou l'Apal réalise des murs de protection, des remblais, des enrochements… Cette apparente opposition entre perception et gestion du risque mériterait d'être étudiée plus avant

Cette situation est-elle symptomatique de ce qui se produit ailleurs en Tunisie ?

## 3.3. Les pistes existantes en Tunisie pour gérer les sebkhas et les côtes en érosion

### 3.3.1.La gestion des littoraux

Le cas de Kerkennah, avec les hésitations et incertitudes qui entourent les projets de protection n'est pas isolé et plusieurs auteurs ont déjà mis en avant sur d'autres sites ces difficultés. Ainsi, Bounouh (2010) et Oueslati (2011) expliquent que les projets d'aménagement menés dans les années 1980, basés sur des protections en dur pour contrer l'avancée de la mer, ont accentué les problèmes d'érosion et la vulnérabilité littorale. Ils précisent également que les approches novatrices (protection douce, gestions intégrées…) n'arrivent pas à se faire une place car, sous couvert de développement durable et de protection de l'environnement, les préoccupations des aménageurs restent profondément économiques (Oueslati, 2011). Ceci explique que les protections en dur soient favorisées alors que leurs effets négatifs sont connus. Ensuite, ils confirment que les problèmes de gouvernance existent partout en Tunisie et que les décisions sont prises unilatéralement ce qui accentue la vulnérabilité :

> *« Dans l'exemple du littoral tunisien, la gouvernance demeure encore monolithique puisque la plupart des grands projets sont pilotés par des institutions publiques comme l'APAL. Un grand décalage existe donc entre discours officiels et la réalité. » (Bounouh, 2010)*

Enfin, Oueslati (2011) remarque que les rapports réalisés dans le cadre de la mise en place des projets d'aménagement sont de faible qualité ce qui est également le cas pour Kerkennah :

> *« Le malheur est souvent venu des faiblesses des études et des diagnostiques qui ont présidé à l'aménagement ». (Oueslati, 2011)*

Ainsi, Bounouh (2010) déplore que le projet touristique Yasmine Hammamet soit isolé du reste de la ville ce qui engendre une ségrégation socio-spatiale et une déconnection entre les touristes et la population locale. Le même constat peut être fait à Kerkennah où la presqu'île de Sidi Fonkhal est éloignée de plusieurs kilomètres des centres urbains.

Ainsi, le cas de Kerkennah, où des projets aux objectifs différents, élaborés sans réelle concertation et de manière unilatérale, n'est pas isolé mais semble toucher d'autres espaces côtiers en Tunisie. Le développement de cette approche locale, grâce à des questionnaires plus

nombreux mais aussi plus poussés et plus précis, permettrait d'une part d'obtenir une base de données suffisantes pour mener des études quantitatives et d'autre part d'obtenir des informations précises quant au degré de perception des phénomènes et des connaissances locales. La direction à prendre pour une approche intégrée et intégratrice de la population dans le processus de sauvegarde de l'archipel mais aussi de son développement doit être poursuivie et améliorée.

### 3.3.2.La gestion des dangers liés aux sebkhas : une question d'enjeux

Les sebkhas sont situées en milieu semi-aride ou aride, sont stériles et inondées une partie de l'année ce qui en fait bien souvent des espaces répulsifs desquels les sociétés humaines restent éloignées. Cependant, il arrive que les espaces agricoles ou urbains, s'étendent en direction des sebkhas et s'installent sur leurs marges comme c'est le cas dans l'archipel de Kerkennah. Les nouvelles installations ont des conséquences et entraînent parfois des perturbations du fonctionnement des sebkhas. L'enjeu est alors simple : comment s'adapter à l'extension des sebkhas dans un contexte d'extension urbaine et d'extension des surfaces agricoles ?

Certaines bordures de sebkhas sont utilisées pour l'agriculture, et la mise en valeur des terres salées vise à contrer la salinité et ainsi permettre de meilleurs rendements agricoles. Hachicha (2007) dénombre plusieurs exemples qui prouvent que grâce à différents aménagements la salinité des bordures de sebkhas peut être diminuée. Ainsi, les bordures de la Garaât[8] Oued Melah dont les sols étaient salés ont été labourées, semées d'abord de graminées puis d'arbustes ou de plantes fourragères ce qui a permis une mise en valeur agricole des terres. A Helba (près de Tozeur) les bordures de sebkhas ont également été dessalées par irrigation et drainage. Il apparaît dans cette étude que le lessivage des sols, et donc sa désalinisation, est plus efficace lorsque qu'il est précédé d'un labour et que les apports en eaux sont fractionnés dans le temps (Hachicha, 2007). Ces pratiques spécifiques ont ainsi permis de reconquérir des terres pour une mise en valeur agricole. Il apparaît que la méthode du ***Kabour*** ressemble aux recommandations émises pour diminuer la salinité des sols. **Cette pratique, comme déjà expliqué, a été abandonnée dans les années 1970 dans l'archipel de Kerkennah** (Fehri, 2011). Cependant, elle n'était que ponctuelle à Kerkennah du fait de la faible pluviométrie et ne permettait pas de diminuer durablement les taux de sel dans les sols.

[8] Dépressions fermées alimentées par des oueds et remplies d'eau douce lors des crues (Sghaier *et al.*, 2011)

En Tunisie, des études existent, portant sur les sebkhas et les problématiques liées à l'avancée de l'urbanisation. L'extension urbaine a parfois débordé sur les zones de sebkhas et la rencontre des deux espaces a participé à l'émergence de dangers et de différents risques : sanitaires (eaux stagnantes et polluées, prolifération de moustiques…), inondations, nuisances olfactives… (Geoidd *et al.*, 2002; Barthel, 2003; Prudêncio *et al.*, 2007; Bounouh, 2010; Dhaher, 2011; Chouari, 2013). L'aménagement des sebkhas et leur étude sont souvent déclenchés par les problèmes qu'elles posent. Ainsi, deux phases sont souvent nécessaires à leur aménagement : la première est la dépollution des sites qui a toujours des impacts positifs et qui fonctionne plutôt bien. Les sebkhas de l'archipel de Kerkennah ne sont pas excessivement polluées mais des décharges sauvages sont parfois visibles. Ces décharges entraînent des problèmes de pollution olfactive et visuelle lorsqu'elles sont situées près des localités mais aussi de pollution des sols et de la nappe souterraine lorsque les matériaux sont décomposés dans les sebkhas ou que des produits chimiques néfastes y sont déversés. Afin de répondre à ce problème (entre autres) une décharge contrôlée a été aménagée en 2009. Elle est destinée à recueillir l'ensemble des déchets solides de l'archipel pendant 12 ans avant d'être remblayée et aménagée en parc (Kebaïli Tarchouna, 2013).

La seconde étape est la réhabilitation et l'aménagement des sebkhas qui posent plusieurs problèmes. Les organismes chargés de ces aménagements ont pour objectif de faire évoluer le statut des sebkhas d'espaces répulsifs (producteurs de nuisances et dans lesquels les déchets sont abandonnés) à des espaces attractifs (Barthel, 2003). L'Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL) a été chargée de mettre en place des programmes d'intervention pour les sebkhas littorales. Les sebkhas concernées sont au nombre de huit (sebkha Ariana, Soliman, Kébilia, Radès, Moknine, Ben Ghayadha, Séjoumi et Korba), toutes ont des marges urbanisées et des études sont plus ou moins avancées. Pour l'APAL, le danger vient de l'agression due aux activités humaines qui altèrent les sebkhas et entraînent une diminution de leurs surfaces. Barthel (2003) a étudié très précisément les aménagements prévus pour les sebkhas Ariana et Séjoumi, toutes deux proches de Tunis et soumises à une urbanisation importante de leurs marges. Il identifie 3 types d'aménagements différents préconisés au cours du XX$^{ème}$ siècle. D'abord l'assèchement des sebkhas. Un projet, datant des années 1920 propose d'assécher la sebkha Sijoumi, de dessaler les terres afin de produire des terres agricoles, c'est-à-dire de faire disparaitre les sebkhas. Cette option est inenvisageable car les sebkhas sont des espaces naturels rares et bénéfiques à la biodiversité. D'ailleurs, le projet touristique de Sidi Fonkhal espère pouvoir profiter de la venue d'oiseaux

migrateurs attirés par les sebkhas de l'archipel. Autre type d'aménagement : la conservation des sebkhas avec des actions douces telles que préconisées dans une étude concernant la sebkha Sijoumi. Il s'agit de créer des îlots pour les oiseaux nicheurs et de préserver les rives de la sebkha grâce à des talus. Cette option nous paraît la plus raisonnable mais l'avancée de la salinité ne sera pas contrée par des talus et il semble que l'extension des sebkhas soit toujours en cours. Ainsi, cette solution n'est pas envisageable dans l'archipel. Enfin la transformation des sebkhas qui consiste souvent en des aménagements lourds et en une modification importante de leur fonctionnement initial naturel. Ainsi, un projet concernant la sebkha Ariana préconise la destruction du cordon littoral qui l'isole de la mer. Ce cordon détruit, la sebkha serait transformée en une lagune. Une autre étude propose la transformation de la sebkha Sijoumi en un lac permanent, permettant ainsi de créer un espace touristique et récréatif (Barthel, 2003). De la même manière, le plan d'aménagement de la sebkha Ben Ghayadha tel qu'il a été conçu par l'APAL transformerait la sebkha en plusieurs espaces : d'une part les marges seraient remblayées et d'autre part, le cœur de la sebkha serait continuellement en eau. Ceci permettrait de créer des espaces urbains autour d'une lagune et d'un port de plaisance (Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL)). Cette transformation des sebkhas n'est pas non plus envisageable pour l'archipel de Kerkennah pour plusieurs raisons : d'abord le remplissage des sebkhas de l'archipel reviendrait à le morceler et à créer plusieurs îles disjointes ; Ensuite, un remplissage mettrait en danger les habitations construites sur les marges et dans les sebkhas ; enfin, la préservation des sebkhas est importante car elles sont des paysages rares avec leur faune et flore spécifiques.

Ainsi, grâce à ces aménagements de grande ampleur et à des actions diverses aboutissant à la mise en eaux des sebkhas, les aménageurs valorisent des espaces qui étaient mal aimés auparavant. Cependant, même si leur objectif est atteint, le fonctionnement naturel des sebkhas, qui sont des espaces uniques en termes de faune et de flore, est totalement perturbé. Les auteurs identifient plusieurs causes à ces gestions radicales. Barthel (2003) propose que :

> *« Les aménageurs ont horreur du vide ; et c'est bien ce qui semble leur poser problème dans le cas de la sebkha qui, lorsqu'elle est presque totalement asséchée en été, n'offre aux yeux de l'observateur que le spectacle des efflorescences salines, de l'herbu et des déchets solides qui jonchent ses berges. Les usages ont ainsi renforcé la mauvaise image de ce milieu et lui ont donné une mauvaise réputation. Le discours aménagiste semble vouloir gommer ces représentations négatives en niant purement et simplement la spécificité de cet écosystème soumis dans le temps long à une certaine évolution naturelle et dans le temps court à des rythmes saisonniers particuliers. »*

La mise en eau de la sebkha résout la question des variations saisonnières et interannuelles des sebkhas. Cet auteur ajoute que si le choix de la mise en eau est favorisé c'est que la mer est valorisée par rapport aux eaux stagnantes et éphémères comme celles des sebkhas (Barthel, 2003). Bounouh (2010) quant à lui affirme que :

> *« Les modes d'aménagement et de gestion du littoral sont insuffisamment décentralisés et souffrent ainsi d'un déficit de participation citoyenne et de pluralisme des points de vue.*

Ainsi, la gestion des sebkhas est très liée au développement urbain des grandes villes tunisiennes et s'inscrit souvent dans le développement d'un tourisme écologique et environnemental. Les sebkhas, telles que celles de l'archipel de Kerkennah, qui s'étendent de manière significative, ne sont pas au cœur des préoccupations des aménageurs de l'environnement en Tunisie. La jeunesse des plans d'aménagement et de leur réalisation ne permet pas de déterminer leurs qualités et leurs défauts même s'ils semblent répondre à des préoccupations touristiques et immobilières (Barthel, 2003). **Ce n'est donc pas dans les projets d'aménagement actuels ou passés que des solutions à l'extension des sebkhas de l'archipel de Kerkennah pourront être trouvées**.

## Conclusion du chapitre 8

Les phénomènes de recul de la côte et d'extension des sebkhas semblent être bien connus de la population de l'archipel de Kerkennah. Ils sont en effet reconnus comme étant les problèmes les plus graves parmi ceux qui ont été proposés aux personnes interrogées et plus de 95% des interrogés semblent les considérer comme en cours. Le phénomène de mortalité excessive des palmiers est perçu comme un problème aux causes multiples et les interrogés intègrent à la fois des facteurs de mortalité liés au changement de système de production et à l'abandon de la palmeraie, et indirectement influencés par les hommes ou par des phénomènes naturels comme l'élévation de la salinité des sols par exemple. Les actions menées contre l'érosion marine sont majoritairement perçues comme n'étant pas suffisantes ni efficaces lorsqu'elles existent. La population semble donc se préoccuper des problèmes que nous jugeons également dommageables dans l'archipel de Kerkennah.

Les actions menées actuellement ou prévues sur l'archipel de Kerkennah pour contrer l'érosion côtière sont nombreuses. Plusieurs projets de nature et aux objectifs différents et parfois opposés sont en cours de préparation. Aucun d'entre eux ne semble adopter de démarche intégrée bien que cela soit clairement affiché dans les projets. Comme plusieurs auteurs l'ont déploré, les actions de protection de conservation et de développement durable des côtes tunisiennes n'arrivent pas à adopter d'approches nouvelles qui permettent d'intégrer la population dans les processus décisionnels. Ainsi des études poussées prenant en compte les impacts (positifs et négatifs) des aménagements prévus (impacts spatio-temporels) ne sont pas prévues. Le cas de l'archipel de Kerkennah ne paraît pas se démarquer tandis que la population semble consciente des dangers.

## Conclusion de la partie 3

Différents types de vulnérabilité ont été étudiés dans cette troisième partie. Le premier est la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte, c'est à dire à l'érosion et aux submersions marines. Il a été montré que l'érosion côtière est majoritairement significative le long du littoral des six espaces qui ont été étudiés. Ce recul de la côte est très fortement corrélé à la lithologie. La vulnérabilité aux submersions est, quant à elle, liée à la hauteur de la côte. Pour mesurer la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte nous avons utilisé plusieurs types d'indicateurs. Les premiers sont liés à la nature des côtes et sont d'une part la lithologie qui renseigne sur la capacité de la côte à subir une érosion et d'autre part la hauteur de la côte qui renseigne sur la vulnérabilité aux submersions. Le deuxième indicateur concerne les évolutions du climat et du niveau de actuel de la mer. Les troisièmes concernent d'abord la présence d'enjeux qui accentuent la vulnérabilité et ensuite les impacts des aménagements qui peuvent ralentir les taux d'érosion ou les accentuer. Ainsi nous avons pu définir les littoraux les plus vulnérables et réaliser une typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité. Il est également apparu que la vulnérabilité est plus importante du fait du développement des résidences secondaires le long de la côte de l'archipel.

Le second type de vulnérabilité est lié au danger que représente la salinisation des sols. Nous avons ainsi montré que les sebkhas de l'archipel s'étendent parfois de manière très importante. Cette extension est liée à des phénomènes naturels et anthropiques très divers. Il est également apparu que les espaces d'enjeux c'est-à-dire les zones bâties et agricoles se sont étendues et que, de fait, la pression sur les ressources est plus importante depuis les années 1960. La vulnérabilité liée à la salinisation est liée à deux phénomènes : l'extension des sebkhas que nous avons mesurée et qui peut être très importante et l'irrigation qui est parfois réalisée avec de l'eau saumâtre sur des sols non drainés. Les espaces les plus vulnérables à la salinisation sont donc les bordures de sebkhas dont les sols sont en cours de salinisation et les espaces irrigués et non drainés. Cette vulnérabilité est accentuée lorsque des parcelles agricoles et des constructions sont aménagées en zone salée. Ainsi, nous avons pu montrer que la vulnérabilité à la salinité des sols a fortement progressé depuis les années 1960.

Ces dangers semblent par ailleurs perçus par la population locale. Notre questionnaire, bien que non représentatif de l'ensemble de la population met en avant que la

salinisation des sols et le recul de la côte sont des dangers pour les locaux. Cependant, il existe un vrai décalage entre cette perception et les actions menées pour la gestion du littoral et des sebkhas. Ces actions sont inexistantes pour ce qui concerne l'extension de la salinité et très diverses pour ce qui concerne le trait de côte. Les actions menées par les particuliers pour protéger leurs propres habitations sont parfois dures (construction de murs) parfois fragiles (remblais, talus). Les actions menées par l'Etat consistent en des enrochements protégeant les habitations situées en arrière. Cependant, tous ces aménagements ne freinent l'érosion marine qu'à court terme et surtout ils déstabilisent les processus littoraux et entraînent ailleurs le déclanchement de processus érosifs. Ils ne sont donc pas adaptés.

Les adaptations qui nous semblent les plus sages sont : l'éloignement des enjeux des zones vulnérables (des sebkhas et des espaces littoraux les plus menacés), l'arrêt des constructions dans ces zones via le respect des lois littorales et la mise en place d'un système de limitation de l'extension urbaine et des parcelles agricoles dans les sebkhas et sur le littoral.

# Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'évolution de la vulnérabilité de l'archipel de Kerkennah et de la population entre 1963 et 2010. L'étude de l'évolution des phénomènes les plus inquiétants, à savoir l'érosion côtière et l'extension des sebkhas, renseigne sur la vulnérabilité car ceux-ci rendent vulnérables les terres arables et constructibles par leur disparition (avancée de la mer) et par leur salinisation (extension des sebkhas). Les causes de la vulnérabilité ont été cherchées dans les évolutions naturelles de l'environnement et dans les activités et aménagements anthropiques en essayant d'adopter une approche la plus globale possible.

Ainsi nos hypothèses de départ, exposées dans l'introduction générale et relatives à l'érosion marine et à l'extension des sebkhas, à leurs causes, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, et à l'accentuation de la vulnérabilité depuis les années 1960, semblent confirmées dans cette thèse.

Pour cela nous avons utilisé des données variées de terrain (observations, relevés, mesures et questionnaires), d'imagerie (télédétection grâce à deux images Landsat TM 5 de 1984 et 2011 et photo-interprétation grâce aux photographies aériennes de l'archipel en 1963 et à une image SPOT 5 de 2010). Ces données ont été traitées grâce à des méthodes spécifiques et celles qui s'y prêtaient ont été introduites dans un SIG grâce auquel elles ont pu être confrontées. La réunion plusieurs types de données et de méthodes constitue le point d'ancrage de ce travail et permet de répondre aux questionnements proposés au début de la thèse tout en ayant une approche géographique.

Les principales conclusions concernent (i) les mesures de l'évolution du trait de côte (ii) les mesures de l'extension des sebkhas de l'évolution de l'occupation du sol et enfin (iii) la perception de ces phénomènes par la population.

*L'évolution de la côte*

L'évolution du trait de côte a été mise en évidence grâce à une approche de photo-interprétation utilisant les photographies aériennes et l'image SPOT 5. L'ensemble de l'archipel n'a pu être étudié et l'évolution du trait de côte a été mesurée sur 6 portions du littoral. Les résultats montrent que les côtes sont majoritairement en recul sur les six zones d'étude (50% de l'ensemble des espaces étudiés), 47% du linéaire côtier a une évolution

comprise dans la marge d'erreur que nous avons estimée à 6 mètres et seulement 3% montre une progradation. Ces résultats généraux diffèrent en fonction des types de côte, de la lithologie et de l'emprise humaine du littoral. Sur les littoraux très peu ou non anthropisés les côtes sont en recul ou sont stables (évolution comprise dans la marge d'erreur). A l'inverse, plus le littoral est anthropisé plus les dynamiques littorales sont perturbées. Ces perturbations sont toujours liées à la présence d'aménagements tels que des enrochements, digues, murs et murets de soutènement qui modifient les dynamiques naturelles en ralentissant localement l'action érosive des vagues et en accentuant l'érosion à d'autres endroits ce qui, finalement, modifie les rythmes d'érosion sur l'ensemble de la côte. Ainsi l'érosion atteint parfois jusqu'à 40 mètres en 47 ans.

Depuis les années 1960, la pression sur les littoraux s'est accrue : les localités de l'archipel se sont étendues, des zones ont été bâties et des aménagements réalisés. La présence humaine sur les littoraux et les modes de gestion favorisés (enrochements, murs et digues) ont conduit à la perturbation des dynamiques naturelles et ont eu comme impact d'accentuer les rythmes d'érosion. De par la présence plus importante d'enjeux le long de la côte et du rôle perturbateur des aménagements, la vulnérabilité de l'archipel et de la population face au recul de la côte a été accentuée depuis les années 1960.

*L'évolution des surfaces de sebkhas et de l'occupation du sol*

L'occupation du sol a sensiblement évolué entre les années 1960 et aujourd'hui. Cette évolution a été étudiée selon deux méthodes : télédétection et photo-interprétation. Le bâti, les espaces d'agriculture irriguée, les espaces de palmeraie et les sebkhas ont été étudiés. Il apparaît que la surface de la palmeraie a reculé depuis 1963 tandis que le bâti, les sebkhas et les espaces irrigués se sont globalement étendus. Pour comprendre cette évolution il est indispensable de comprendre l'évolution de la société dans l'archipel de Kerkennah. L'ouverture des îles vers le continent grâce aux bacs et l'amélioration de l'éducation ont précédé le départ des jeunes de l'archipel et le délaissement des pratiques anciennes en particulier l'agriculture. La palmeraie a été progressivement abandonnée ainsi que les pratiques traditionnelles (*Kabour*, métiers spécifiques à la palmeraie…) au profit de la pêche et récemment de l'agriculture irriguée plus rentable mais moins durable puisque l'eau utilisée est saumâtre et que les réseaux de drainage sont insuffisants. Le risque de salinisation des sols par le biais de l'irrigation est donc réel. Le bâti s'est également étendu : les localités ont grandi et de nouvelles zones ont été construites. Il s'agit en particulier de résidences secondaires construites le long du littoral qui ne sont occupées qu'une partie de l'année.

L'extension urbaine le long du littoral et la mise en place des aménagements a engendré l'exacerbation des perturbations des dynamiques littorales. Leur présence et leurs effets accentuent donc la vulnérabilité des espaces littoraux. Enfin les sebkhas se sont toutes étendues depuis 1963 d'en moyenne 19%. Cependant les valeurs réelles d'extension sont très différentes et les sebkhas de l'île de Gharbi se sont bien plus étendues que celle de Chergui. Cette extension parfois très importante des sebkhas est également à mettre en relation avec d'une part les évolutions récentes du climat et du niveau de la mer qui ont favorisé des intrusions d'eau marine dans la nappe souterraine ainsi que sa remontée. D'autre part elle est aussi liée aux évolutions de la société et l'abandon des pratiques culturales anciennes qui pouvaient avoir pour effet de freiner cette extension.

L'extension des surfaces de sebkhas et de la salinisation des sols constituent une menace pour l'agriculture et pour les constructions. Celles-ci sont de plus en plus nombreuses et sont exposées d'une part à l'extension des sebkhas (et donc à la salinité) et d'autre part au recul de la côte.

*La perception du recul de la côte et de l'extension des sebkhas par mortalité importante des palmiers et type de gestion favorisé dans l'archipel.*

Les questionnaires nous ont permis d'évaluer la perception par la population des phénomènes de recul de la côte et d'extension des sebkhas ou plutôt de mortalité excessive des palmiers. Nous avons pour cela utilisé les réponses à 139 questionnaires portant sur l'érosion marine et l'extension des sebkhas par la mortalité élevée des palmiers sur leurs marges. La population interrogée semble assez unanime : elle considère que les phénomènes existent et sont préoccupants, c'est-à-dire que pour elle le recul de la côte existe et que les sebkhas s'étendent. Dans le cas du trait de côte, le groupe interrogé juge les mesures prises pour se protéger de l'érosion côtière insuffisantes et inefficaces, que ce soit dans le cas d'aménagements réalisés par l'Etat ou par la population. Dans le cas de la mortalité des palmiers en bordure de sebkhas, les personnes interrogées semblent conscientes que plusieurs causes peuvent l'expliquer, en particulier la salinisation des sols, l'abandon de la palmeraie pour l'agriculture irriguée et l'extraction anarchique du *Legmi*.

Ainsi, le groupe interrogé semble conscient des problèmes qui nous apparaissent également les plus préoccupants pour l'archipel de Kerkennah. En étudiant avec attention les projets d'aménagement de gestion des côtes et des sebkhas qui ont été ou qui seront menés dans l'archipel il apparaît clairement que cette gestion, qui se veut durable et intégrée, ne l'est pas.

Ainsi le bâti s'étend en même temps que les surfaces agricoles irriguées alors que les terres disparaissent du fait de l'érosion marine et sont en cours de salinisation du fait de l'extension des sebkhas. La pression sur les terres arables et constructibles est donc de plus en plus importante et la vulnérabilité également. La population de l'archipel qui a été interrogée semble être consciente des problèmes importants qui touchent l'archipel. Les choix des aménagements réalisés et en projet dans l'archipel ne semblent pas tenir compte de cette prise de conscience des acteurs locaux. Finalement il semble que la vulnérabilité de l'archipel face aux changements environnementaux et aux évolutions de la société se soit accentuée aujourd'hui par rapport aux années 1960. La vulnérabilité touchant la population semble également être plus forte puisque la présence humaine près des espaces problématiques s'est renforcée, que les connaissances locales ne sont pas prises en compte et que la gestion des risques reste fortement aléa-centrée.

Cette thèse donne un exemple de la nécessité d'appréhender les problèmes environnementaux insulaires en prenant en compte à la fois les évolutions naturelles et anthropiques. Les perspectives sont de deux ordres et peuvent concerner (i) l'archipel de Kerkennah et (ii) les domaines de la géographie des risques et de la géographie des littoraux.

Au vu des résultats, plusieurs perspectives de recherche sont envisageables pour l'archipel de Kerkennah.

- La perception et les connaissances de la population locale mériteraient d'être mieux connues pour deux raisons. La première est que les connaissances locales sont précieuses et indispensables pour bien connaître un territoire. La seconde est que ces connaissances devraient être mieux prises en compte dans les études de gestion des risques dans l'archipel de Kerkennah. Il s'agirait donc de fournir aux décideurs ces informations locales afin d'impulser la démarche intégrée et durable pour promouvoir *« une défense douce qui n'arrive pas à prendre le relais de la défense lourde » (Oueslati, 2011).*
- Une autre piste d'étude consisterait à prendre en considération un nombre plus important de dates d'étude pour obtenir une véritable cinématique de l'occupation du sol et du trait de côte. Cela pourrait être rendu possible par l'acquisition d'images satellites dont certaines sont gratuites et rapidement accessibles comme les images Landsat utilisées dans ce travail. La résolution

de ces images (30m) couplée à la petitesse du terrain d'étude constitue toutefois une limite majeure. A notre connaissance, les images de meilleure qualité sont rares voire inexistantes pour la période 1963 – 2010.

- Certains champs d'études qui ont été étudiés n'ont pas été intégrés dans les études de vulnérabilité en particulier les systèmes de préventions des risques au sein de l'archipel (comme par exemple les systèmes d'alerte lorsqu'une tempête se prépare). La vulnérabilité est également grandement accentuée lors d'épisodes tempétueux lorsque les bateaux ne peuvent plus faire la liaison avec le continent. L'archipel dépend en effet de la ville de Sfax pour couvrir les besoins de la population.
- Notre étude porte sur l'évolution passée de la vulnérabilité et nous avons pu voir que celle-ci s'est accentuée depuis les années 1960. Des études précises concernant la prévision de l'élévation du niveau marin permettraient d'estimer les pertes de terres au profit de la mer mais aussi de prévoir les surfaces gagnées par les sebkhas et la salinisation des sols. Cette perspective permettrait d'anticiper les risques et de faciliter la mise en place de projets à long terme.

# Références


1 - Acot, P. **2009**. *Histoire du climat*. Tempus, 428 p.

2 - Adger, W. N. **2006**. Vulnerability. *Global Environmental Change*. 16 (3), pp: 268-281.

3 - Agence de Protection et d'Aménagement du littoral. **2001**. Etude de gestion de la zone sensible littorale des îlots nord-est de Kerkennah (phase 1: caractérisation du milieu naturel). *Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire*, 40 p.

4 - Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL): http://www.apal.nat.tn

5 - Agence Foncière Touristique: http://www.aft.nat.tn

6 - Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S. et Manes, A. **2002**. The paradoxical increase of the Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical research letters*. 10.1029/2001GL013554.

7 - Antonov, J. I., Levitus, S. et Boyer, T. **2002**. Steric sea level variations during 1957–1994: Importance of salinity. *Journal of Geophysical Research*. 10.1029/2001jc000964.

8 - Arabelos, D. N., Papazachariou, D. Z., Contadakis, M. E. et Spatalas, S. D. **2011**. A new tide model for the Mediterranean Sea based on altimetry and tide gauge assimilation. *Ocean Science*. 7 (3), pp: 429-444.

9 - Arenstam Gibbons, S. J. et Nicholls, R. J. **2006**. Island abandonment and sea-level rise: An historical analog from the Chesapeake Bay, USA. *Global Environmental Change*. 16 (1), pp: 40-47.

10 - Arnould, P. et Hotyat, M. **2003**. *Eau et environnement: Tunisie et milieux méditerranéens*. ENS Editions, 212 p.

11 - Arun Kumar, A. et Kunte, P. D. **2012**. Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*. 64 (1), pp: 853-872.

12 - Barlow, J., Franklin, S. et Martin, Y. **2006**. High spatial resolution satellite imagery, DEM derivatives, and image segmentation for the detection of mass wasting processes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 72 (6), pp: 687-692.

13 - Barth, H.-J. **2001**. Comment on "Playa, playa lake, sabkha: proposed definitions for old terms". *Journal of Arid Environments*. 47 (4), pp: 513-514.

14 - Barthel, P.-A. **2003**. *Faire la ville au bord de l'eau. Les lacs de Tunise: des marges urbaines à des sites de très grand projets d'aménagement.* Thèse de l'Université Lumière Lyon 2, Faculté de Géographie, Histoire, Histoire de l'Art, Tourisme, 490 p.

15 - Becerra, S. et Peltier, A. **2009**. *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité*. L'Harmattan, 575 p.

16 - Beltrando, G. **2007**. *Les climats, processus, variabilité et risques*. A. Colin, Collection U, 260 p.

17 - Ben Hamida, A. **2004**. Migrations et modernité dans les îles Kerkennah. *Cahiers de la Méditerranée*. http://cdlm.revues.org/index583.html.

18 - Ben Omrana, R., Triki, H., Ghannem, N. et Yaïch, C. **2004**. Contribution des Systèmes d'Information géographique pour l'étude sédimentologique et morpho-dynamique de la frange

littorale au large de l'île de Gremdi - TUNISIE. *Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer. Actes des Septièmes Journées Tunisiennes des Sciences de la Mer ATSMer 2004 : Zarzis*. 9, pp: 127-130.

19 - Ben Salem, S., Franquesa, R. et El Abed, P. A. **2002**. Indicateurs socioéconomiques pour la pêche au Golfe de Gabès (Tunisie). Etude de cas. *Institution national des sciences et technologies de la mer, FAO-COPEMED*, 34 p.

20 - Benjamin, D. et Godard, H. **1999**. *Les outremers français: des espaces en mutation*. 267 p.

21 - Bernardie, N. et Taglioni, F. **2005**. *Les dynamiques contemporaines des petits espaces insulaires: De l'île-relais aux réseaux insulaires*. KARTHALA Editions, 450 p.

22 - Berry, L. **2006**. « Le Ciel et la Terre nous ont parlé. » : comment les missionnaires du Canada français de l'époque coloniale interprétèrent le tremblement de terre de 1663? *Revue d'histoire de l'Amérique française*. 60 (1-2), pp: 11-35.

23 - Bertrand, F. et Richard, E. **2010**. Adaptation des territoires insulaires: éléments de réflexion à partir de deux îles françaises (Ré et la Réunion). *VertigO-La revue électronique en sciences de l'environnement*. 10.4000/vertigo.10473.

24 - Boak, E. H. et Turner, I. L. **2005**. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*. 214, pp: 688-703.

25 - Bonn, F. et Rochon, G. **1992**. *Précis de télédétection volume 1: Principes et méthodes.* M. Collection Presses Universitaires du Quebec, AUPELF-UREF, 485 p.

26 - Bonnemaison, J. **1991**. Vivre dans l'île, une approche de l'ïléité océanienne. *L'Espace géographique*. 2, pp: 119-125.

27 - Bonnot-Courtois, C. et Levasseur, J. E. **2003**. Recherche d'indicateurs "naturalistes" de la limite supérieure du domaine maritime. *Cahiers Nantais*. 59, pp: 47 - 56.

28 - Bouaziz, R. **2008**. *Les oueds exoréiques de la côte de Sfax: Leur évolution au cours du Quaternaire.* Thèse de la Faculté des sciences Humaines et Sociales de Tunis, 276 p.

29 - Bouchard, C., Marrou, L., Plante, S., Payet, R. et Duchemin, A. **2010**. Les petits états et territoires insulaires face aux changements climatiques: vulnérabilité, adaptation et développement. *VertigO-La revue électronique en sciences de l'environnement*. 10.4000/vertigo.10634.

30 - Bounouh, A. **2010**. Nouvelles approches en matière de protection et de gestion du littoral en Tunisie. *Méditerranée*. 115 (2), pp: 45-53.

31 - Brankart, J. M. et Brasseur, P. **1998**. The general circulation in the Mediterranean Sea: a climatological approach. *Journal of Marine Systems*. 18, pp: 41-70.

32 - Breton, E. **1870**. *Pompeia décrite et dessinée par Ernest Breton suivie d'une notice sur Herculanum*. L. Guérin & cie éditeurs T. Morgand libraire-dépositaire, 536 p.

33 - Briere, P. R. **2000**. Playa, playa lake, sabkha: Proposed definitions for old terms. *Journal of Arid Environments*. 45 (1), pp: 1-7.

34 - Briones Gamboa, F. **2008**. *La construction sociale du risque: L'isthme de Tehuantepec face au phenomène climatique El Nino (Oaxca, Mexique).* Thèse de l'Ecoles des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 277 p.

35 - Brooks, N. **2003**. vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. 20 p.

36 - Brun, A. **1992**. Pollens dans les series marines du Golfe de Gabes et du plateau des Kerkennah (Tunisie): Signaux climatiques et anthropiques. *Quaternaire*. 3 (1), pp: 31-39.

37 - Brunet, R. **1997**. Quelle est la plus grande île du monde? *Mappemonde*. 4, pp: 40-41.

38 - Brunet, R., Ferras, R. et Théry, H. **1996**. *Les mots de la géographie*. Reclus, 520 p.

39 - Calafat, F. M. et Gomis, D. **2009**. Reconstruction of Mediterranean sea level fields for the period 1945-2000. *Global and Planetary Change*. 66 (3-4), pp: 225-234.

40 - Caloz, R. et Collet, C. **2001**. *Précis de télédétection, volume 3: traitement numériques d'image en télédétection*. AUF, Collection Presses Universitaires du Quebec, 386 p.

41 - Camuffo, D., Secco, C., Brimblecombe, P. et Martin-Vide, J. **2000**. Sea storms in the Adriatic Sea and the Western Mediterranean during the last millennium. *Climatic Change*. 46 (1), pp: 209-223.

42 - Carayon, N. **2008**. *Les ports phéniciens et puniques.* Thèse de l'Université de Provence, 1384 p.

43 - Castaneda, C., Herrero, J. et Auxiliadora Casterad, M. **2005**. Landsat monitoring of playa-lakes in the Spanish Monegros desert. *Journal of Arid Environments*. 63 (2), pp: 497-516.

44 - Cazenave, A., Bonnefond, P., Mercier, F., Dominh, K. et Toumazou, V. **2002**. Sea level variations in the Mediterranean Sea and Black Sea from satellite altimetry and tide gauges. *Global and Planetary Change*. 34 (1-2), pp: 59-86.

45 - Centre Canadien de Télédétection: http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/a-propos/organisme/structure-organisationnelle/centre-canadien-teledetection/11741

46 - Chouari, W. **2013**. Problèmes d'environnement liés à l'urbanisation contemporaine dans le système endoreïque d'Essijoumi (Tunisie nord-orientale). *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*. http://physio-geo.revues.org/3493

47 - Comete Engineering. **2001**. Zone sensible Bordj el H'ssar-Kerkennah. 105 p.

48 - Congalton, R. G. **1991**. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 37 (1), pp: 35-46.

49 - Criado-Aldeanueva, F., Del Rio Vera, J. et Garcia-Lafuente, J. **2008**. Steric and mass-induced Mediterranean sea level trends from 14 years of altimetry data. *Global and Planetary Change*. 60 (3-4), pp: 563-575.

50 - Cutter, S. **1996**. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in human Geography*. 20 (4), pp: 529-539.

51 - Cutter, S. L., Boruff, B. J. et Shirley, W. L. **2003**. Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*. 84 (2), pp: 242-261.

52 - Cutter, S. L. et Finch, C. **2008**. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 105 (7), pp: 2301-2301.

53 - D'Ercole, R. et Metzger, P. **2011**. Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion. *EchoGéo*. 10.4000/echogeo.12640.

54 - D'Ercole, R., Thouret, J.-C., Dollfus, O. et Asté, J.-P. **1994**. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de géographie alpine*. 82 (4), pp: 87-96.

55 - D'Ercole, R. et Metzger, P. **2009**. La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*. 10.4000/cybergeo.22022.

56 - Dahech, S. **2007**. *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique.* Thèse de l'Université de Paris 7, 351 p.

57 - Dahech, S. et Beltrando, G. **2012**. Observed temperature evolution in the City of Sfax (Middle Eastern Tunisia) for the period 1950–2007. *Climatic Change*. 114 (3-4), pp: 689-706.

58 - Daoud, A. et Dahech, S. **2012**. Résilience de l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) face au changement climatique: essai d'évaluation. *Climatologie*. n° spécial "Climats et changement climatique dans les villes", pp: 109-126.

59 - Dauphiné, A. **2003**. *Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gerer*. Collection U, 263 p.

60 - David, G. **2010**. Existe-t-il une spécificité insulaire face au changement climatique? *VertigO-La revue électronique en sciences de l'environnement*. 10.4000/vertigo.10530.

61 - De Rosnay, J. **1975**. *Le macroscope, Vers une vision globale*. 314 p.

62 - Del Rio, L., Garcia, F. J. et Benavente, J. **2012**. Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*. In Press, pp: 15.

63 - Desclée, B., Bogaert, P. et Defourny, P. **2006**. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment*. 102 (1–2), pp: 1-11.

64 - Dhaher, N. **2011**. Production du sol urbain et vulnérabilité aux inondations: l'exemple de la cité Sidi Hcine Essijoumi en Tunisie. *Confins*. 10.4000/confins.7129.

65 - Di Méo, G. **1998**. De l'espace aux territoires : éléments pour une archéologie des concepts fondamentaux de la géographie. *L'information géographique*. 62 (3), pp: 99-110.

66 - Djament-Tran, G., Le Blanc, A., Lhomme, S., Rufat, S. et Reghezza-Zitt, M. **2011**. Ce que la résilience n'est pas, ce qu'on veut lui faire dire. http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00679293/.

67 - Domínguez, L., Anfuso, G. et Gracia, F. J. **2005**. Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain. *Environmental Geology*. 47 (8), pp: 1037-1044.

68 - Durand, D. **2010**. *La systémique*. PUF, Que sais-je?, 126 p.

69 - Durand, P. **1998**. Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 4 (2), pp: 155-166.

70 - Dwarakish, G. S., Vinay, S. A., Natesan, U., Asano, T., Kakinuma, T., Venkataramana, K., Pai, B. J. et Babita, M. K. **2009**. Coastal vulnerability assessment of the future sea level rise in Udupi coastal zone of Karnataka state, west coast of India. *Ocean & Coastal Management*. 52 (9), pp: 467-478.

71 - Elyakoubi, O. **2011**. *Cartographie des périmètres publics irrigués de l'ile de Kerkennah.* Mémoire de l'Université de Sfax (Tunisie), 52 p.

72 - Erus, G. **2008**. *Reconnaissance d'objets cartographiques dans les images satellitaires à haute résolution.* Thèse de l'Université Paris Descartes - Centre universitaire des Saints-Pères, 158 p.

73 - Etienne, L., Dahech, S., Beltrando, G. et Daoud, A. **2012**. Dynamiques récentes des sebkhas de l'archipel des Kerkennah (Tunisie centro-méridionale): apport de la télédétection. *Revue Télédétection*. 11 (1), pp: 273-281.

74 - Fabiani, J. L. et Theys, J. **1987**. *La société vulnérable: évaluer et maitriser les risques*. Presses de l'ENS, 676 p.

75 - Fargette, G. **2001**. *Emile et Isaac Pereire: l'esprit d'entreprise au XIXème siècle*. Editions L'Harmattan, 322 p.

76 - Faye, I. B. N. **2010**. *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes: Volume 1*. Thèse de l'Université de Bretagne occidentale, 321 p.

77 - Faye, I. B. N., Hénaff, A., Gourmelon, F. et Diaw, A. T. **2008**. Evolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. *Norois*. 3 (208), pp: 11-27.

78 - Fehri, N. **2011**. La palmeraie des îles Kerkennah (Tunisie), un paysage d'oasis maritime en dégradation: déterminisme naturel ou responsabilité anthropique? *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*. 5, pp: 167-189.

79 - Fenoglio-Marc, L. **2002**. Long-term sea level change in the Mediterranean Sea from multi-satellite altimetry and tide gauges. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 27 (32-34), pp: 1419-1431.

80 - Fischler, M. A., Tenenbaum, J. M. et Wolf, H. C. **1981**. Detection of roads and linear structures in low-resolution aerial imagery using a multisource knowledge integration technique. *Computer Graphics and Image Processing*. 15 (3), pp: 201-223.

81 - Fleury, D., Peytavin, J. F., Alam, T., Godillon, S., Saint Gérand, T., Medjkane, M. et Millot, M. **2010**. Inégalité sociale et risque routier. L'apport d'une approche territorialisée. *Les Cahiers scientifiques du transport*. 57, pp: 45-62.

82 - Folke, C. **2006**. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*. 16 (3), pp: 253-267.

83 - Füssel, H.-M. et Klein, R. J. T. **2006**. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change*. 75 (3), pp: 301-329.

84 - Füssel, H. M. **2007**. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*. 17 (2), pp: 155-167.

85 - Gaillot, S. et Chaverot, S. **2001**. Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas-de-Calais) en France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 7 (1), pp: 47-54.

86 - Gallopin, G. C. **2006**. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*. 16 (3), pp: 293-303.

87 - Gallopín, G. C. **1997**. Indicators and their use: information for decision-making. *SCOPE—Scientific Committee on Problems of the Environment International Council of Scientific Unions 58* 13–27 p.

88 - Gao, X. et Giorgi, F. **2008**. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*. 62 (3-4), pp: 195-209.

89 - Garnier, E. **2007**. La ville face aux caprices du fleuve. *Histoire urbaine*. 18 (1), pp: 41-60.

90 - Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N. et Rooney, J. J. **2007**. The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*. 231, pp: 87-105.

91 - Geoidd, Ceta et Betbel. **2002**. Etude d'assainissement, de valorisation et d'aménagement de la sebkha de Soliman. Rapport Définitif de Phase 1 : Bilan diagnostic et scénarios d'assainissement. *Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL)* 84 p.

92 - Ghiglione, R. et Matalon, B. **2010**. *Les enquêtes sociologiques, théories et pratiques*. A. Colin, Collection U.: Série Sociologie, 297 p.

93 - GIEC. **2007**. *Climate change 2007: The physical science basis-summary for policymakers*. GIEC, 1-18 p.

94 - Gill, T. E. **1996**. Eolian sediments generated by anthropogenic disturbance of playas: human impacts on the geomorphic system and geomorphic impacts on the human system. *Geomorphology*. 17 (1), pp: 207-228.

95 - Giorgi, F. et Lionello, P. **2008**. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*. 63 (2-3), pp: 90-104.

96 - Girard, M. C. et Girard, C. M. **2010**. *Traitement des données de télédétection*. Dunod, 530 p.

97 - Gornitz, V. M., Daniels, R. C., White, T. W. et Birdwell, K. R. **1994**. The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in theU.S. Southeast. *Coastal hazards: perception, susceptibility and mitigation*. Special Issue No. 12, pp: 327-338.

98 - Goubanova, K. et Li, L. **2007**. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*. 57 (1-2), pp: 27-42.

99 - Goudie, A. S. et Wells, G. L. **1995**. The nature, distribution and formation of pans in arid zones. *Earth-Science Reviews*. 38 (1), pp: 1-69.

100 - Gruen, A., Kuebler, O. et Agouris, P. **1995**. *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial Space Images*. Springer, 344 p.

101 - Guérin, O. **2004**. *Tout savoir sur les marées*. Edition-Ouest-France, 166 p.

102 - Gunderson, L. H. et Holling, C. S. **2001**. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, 540 p.

103 - Hachicha, M. **2007**. Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. *Sècheresse*. 18 (1), pp: 45-50.

104 - Halouani, N., Fathallah, S. et Gueddari, M. **2012**. Beach and nearshore morphodynamic changes of the Tabarka coast, Northwest of Tunisia. *Environmental Earth science*. 66 (4), pp: 1059-1069.

105 - Henia, L. et Benzarti, Z. **2006**. Changements climatiques et ressources en eau de la Tunisie. In *Actes du XIXe colloque de l'Association Internationale de Climatologie: Les risques liés au temps et au climat* pp: 15-20.

106 - Hertig, E. et Jacobeit, J. **2008**. Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the Mediterranean area. *Global and Planetary Change*. 63 (2-3), pp: 127-131.

107 - Hewitt, K. **1983**. The idea of calamity in a technocratic age. *Interpretation of calamities*. pp: 3-32.

108 - Hinkel, J. **2011**. "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science–policy interface. *Global Environmental Change*. 21 (1), pp: 198-208.

109 - Hinkel, J. et Klein, R. J. T. **2009**. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*. 19 (3), pp: 384-395.

110 - Holling, C. S. **1973**. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 4, pp: 1-23.

111 - Hufschmidt, G. **2011**. A comparative analysis of several vulnerability concepts. *Natural Hazards*. 58 (2), pp: 621-643.

112 - Hughes, M. L., McDowell, P. F. et Marcus, W. A. **2006**. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*. 74 (1-4), pp: 1-16.

113 - Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G. et Visbeck, M. **2003**. An overview of the North Atlantic oscillation. *Geophysical monograph*. 134, pp: 1-36.

114 - Institut National de la Statistique (INS): http://www.ins.nat.tn/

115 - IPCC. **2007**. Fourth Assessment Report (AR4), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 996 p.

116 - IPCC. **2012**. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 582 p.

117 - IPCC, (Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Dahe, Q., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G. K., Allen, S. K., Tignor, M. et Midgley, P. M. **2012**. Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)* 32 p.

118 - IPCC Working Group III Contribution to AR5: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/

119 - Jeandel, C. et Mosseri, R. **2011**. *Le climat à découvert, Outils et méthodes en recherche climatique*. CNRS, 285 p.

120 - Jedoui, Y., Kallel, N., Fontugne, M., Ismail, H. B., M'Rabet, A. et Montacer, M. **1998**. A high relative sea-level stand in the middle Holocene of southeastern Tunisia. *Marine Geology*. 147 (1-4), pp: 123-130.

121 - Jordà, G., Gomis, D., Álvarez-Fanjul, E. et Somot, S. **2012**. Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios. *Global and Planetary Change*. 80-81, pp: 198-214.

122 - Kebaïli Tarchouna, M. **2013**. *L'archipel de Kerkena: organisation de l'espace et aménagement.* Thèse de l'Université de Tunis. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis. Ecole Doctorale : Structures, Systèmes et Modèles, 301 p.

123 - Kervern, G.-Y. **1995**. *Éléments fondamentaux des Cindyniques*. Economica, 110 p.

124 - Kervern, G.-Y. et Rubise, P. **1991**. *L'archipel du danger: Introduction aux cindyniques*. Economica, 444 p.

125 - Khaznadar, M., Vogiatzakis, I. N. et Griffiths, G. H. **2009**. Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida wetland, Algeria. *Journal of Arid Environments*. 73 (3), pp: 369-377.

126 - Klein, R. J. T. et Nicholls, R. **1999**. Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change. *Ambio*. 28 (2), pp: 182-187.

127 - Laganier, R. **2006**. *Territoires, inondation et figures du risque: la prévention au prisme de l'évaluation*. Editions L'Harmattan, 259 p.

128 - Laliberte, A. S., Rango, A., Havstad, K. M., Paris, J. F., Beck, R. F., McNeely, R. et Gonzalez, A. L. **2004**. Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico. *Remote Sensing of Environment*. 93 (1–2), pp: 198-210.

129 - Lamb, H. H. **1977**. *Climate: Present, Past and Future: Climatic history and the future*. Routledge, 890 p.

130 - Lambeck, K., Anzidei, M., Antonioli, F., Benini, A. et Esposito, A. **2004**. Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for recent change. *Earth and Planetary Science Letters*. 224 (3-4), pp: 563-575.

131 - Lamon, L., Rizzi, J., Bonaduce, A., Dubois, C., Lazzari, P., Ghenim, L., Gana, S., Somot, S., Li, L., Canu, D., Solidoro, C., Pinardi, N. et Marcomini, A. **2013**. An ensemble of models for identifying climate change scenarios in the Gulf of Gabes, Tunisia. *Regional Environmental Change*. 10.1007/s10113-013-0430-x.

132 - Lancel, S. **2005**. Les hommes de l'Antiquité face aux séismes. *Comptes-rendus des séances de l'année... - Académie des inscriptions et belles-lettres*. 149 (4), pp: 1281-1289.

133 - Larnicol, G., Ayoub, N. et Le Traon, P. Y. **2002**. Major changes in Mediterranean Sea level variability from 7 years of TOPEX/Poseidon and ERS-1/2 data. *Journal of Marine Systems*. 33, pp: 63-89.

134 - Le Moigne, J. L. **1994**. *La théorie du système général*. PUF, 320 p.

135 - Lee, S., Song, K.-Y., Oh, H.-J. et Choi, J. **2012**. Detection of landslides using web-based aerial photographs and landslide susceptibility mapping using geospatial analysis. *International Journal of Remote sensing*. 33 (16), pp: 4937-4966.

136 - Leguay, J.-P. **2005**. *Les catastrophes au Moyen Âge*. Editions Jean-paul Gisserot, 228 p.

137 - Leone, F. et Vinet, F. **2006**. La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. In *Analyses géographiques. Coll. "Géorisques"* pp: 72.

138 - Lionello, P., Bhend, J., Buzzi, A., Della-Marta, P. M., Krichak, S. O., Jansa, A., Maheras, P., Sanna, A., Trigo, I. F. et Trigo, R. **2006**. Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment. *Developments in Earth and Environmental Sciences*. 4, pp: 325-372.

139 - Llovel, W. **2010**. *Hausse du niveau de la mer et impact du changement climatique global.* Thèse de l'Université de Toulouse, 234 p.

140 - Lorenz, D. F. **2010**. The diversity of resilience: contributions from a social science perspective. *Natural Hazards*. 10.1007/s11069-010-9654-y.

141 - Louis, A. **1963**. *Les îles Kerkena (Tunisie): Etude d'éthographie tunisienne et de géographie humaine.* Thèse de l'Université de Paris, 447 p.

142 - Maheras, P. et Kutiel, H. **1999**. Spatial and temporal variations in the temperature regime in the mediterranean and their relationship with circulation during the last century. *International Journal of Climatology*. 19, pp: 745–764.

143 - Malone, E. L. et Engle, N. L. **2011**. Evaluating regional vulnerability to climate change: purposes and methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2 (3), pp: 462-474.

144 - Maman, S., Orlovsky, L., Blumberg, D. G., Berliner, P. et Mamedov, B. **2011**. A landcover change study of takyr surfaces in Turkmenistan. *Journal of Arid Environments*. 75 (9), pp: 842-850.

145 - Mangiarotti, S. et Lyard, F. **2008**. Surface Pressure and Wind Stress Effects on Sea Level Change Estimations from TOPEX/Poseidon Satellite Altimetry in the Mediterranean Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 25 (3), pp: 464-474.

146 - Martha, T. R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C. J. et Kumar, K. V. **2010**. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology*. 116 (1–2), pp: 24-36.

147 - Martinez del Pozo, J. A. et Anfuso, G. **2008**. Spatial Approach to Medium-term Coastal Evolution in South Sicily (Italy): Implications for Coastal Erosion Management. *Journal of Coastal Research*. 241, pp: 33-42.

148 - Mayer, H. **1999**. Automatic Object Extraction from Aerial Imagery—A Survey Focusing on Buildings. *Computer Vision and Image Understanding*. 74 (2), pp: 138–149.

149 - Meehl, G. A. et Telaldi, C. **2004**. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century. *Science*. 305, pp: 994-997.

150 - Mermex-Group. **2011**. Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean. *Progress in Oceanography*. 91, pp: 97-166.

151 - Metzger, P. et D'Ercole, R. **2009**. La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*. 10.4000/cybergeo.22022.

152 - Meur-Ferec, C. **2006**. *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral: un itinéraire de géographe.* Habilitation à diriger les recherches de l'Université de Nantes, 247 p.

153 - Meur-Ferec, C. **2009**. Protection contre la mer ou repli stratégique. Quelles stratégies face aux risque d'érosion-Submersion côtière. *Festival de Géographie, St Dié des Vosges*. http://www.cndp.fr/fig-st-die/2009.

154 - Meyssignac, B. **2012**. *La variabilité régionale du niveau de la mer.* Thèse de l'Université Toulouse III Paul Sabatier, 356 p.

155 - Meyssignac, B., Calafat, F. M., Somot, S., Rupolo, V., Stocchi, P., Llovel, W. et Cazenave, A. **2011**. Two-dimensional reconstruction of the Mediterranean sea level over 1970–2006 from tide gage data and regional ocean circulation model outputs. *Global and Planetary Change*. 77, pp: 49-61.

156 - Ministère de l'Ecologie du Developpement durable des Transports et du Logement. **2012**. Assises nationales des risques naturels. 120 p.

157 - Ministère de l'intérieur et du développement local et Municipalité de Sfax. **2008**. *Projet SMAP III - Stratégies de gestion intégrée des zones côtières pour les régions du Kroumirie et Modgods et les municipalités de Sfax - Elaboration*. République Tunisienne, 146 p.

158 - Moine, A. **2006**. Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. *L'Espace géographique*. Tome 35 (2), pp: 115-132.

159 - Morhange, C. et Pirazzoli, P. A. **2005**. Mid-Holocene emergence of southern Tunisian coasts. *Marine Geology*. 220 (1-4), pp: 205-213.

160 - Moriniaux, V. **2003**. *Les risques*. Edition du temps, 255 p.

161 - Morzadec-Kerfourn, M. T. **2002**. L'évolution des Sebkhas du golf de Gabès (Tunisie) à la transition Pléistocène supérieur-Holocène. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*. 13 (2), pp: 111-123.

162 - Mount, N. J., Louis, J., Teeuw, R. M., Zukowskyj, P. M. et Stott, T. **2003**. Estimation of error in bankfull width comparisons from temporally sequenced raw and corrected aerial photographs. *Geomorphology*. 56 (1-2), pp: 65-77.

163 - Muraz, J., Durrieu, S., Labbé, S., Andréassian, V., Tangara, M. et others. **1999**. Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG? *Ingénieries – EAT*. 20, pp: 39-58.

164 - Nagao, M., Matsuyama, T. et Ikeda, Y. **1979**. Region extraction and shape analysis in aerial photographs. *Computer Graphics and Image Processing*. 10 (3), pp: 195-223.

165 - Nicholls, R. J. et Hoozemans, F. M. J. **1996**. The Mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management*. 31 (2), pp: 105-132.

166 - Norrant, C. **2005**. Modification de la circulation atmosphérique en relation avec les précipitations méditerranéennes (1950-2000). In *Journées de Climatologie – Dijon 17-19 mars 2005 : Le changement climatique* pp: 85-93.

167 - Norrant, C. et Douguédroit, A. **2005**. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theor. Appl. Climatol.* 83 (1-4), pp: 89-106.

168 - November, V. **2012**. Comment favoriser l'équité territoriale face aux risques? *Métropolitiques*. http://www.metropolitiques.eu/Comment-favoriser-l-equite.html.

169 - November, V., Penelas, M. et Viot, P. **2011**. *Habiter les territoires à risques*. PPUR Presses polytechniques, 264 p.

170 - O'Keefe, P., Westgate, K. et Wisner, B. **1976**. Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature*. 260 (5552), pp: 566-567.

171 - Observatoire Tunisien de l'Environnement et du Développement Durable (OTEDD). **2010**. Le tourisme durable en Tunisie. *République Tunisienne, Ministère de l'Environnement et du Developpement Durable, Agence Nationale de Protection de l'Environnement* 77 p.

172 - Oueslati, A. **1986**. *Jerba et Kerkna: îles de la côte orientale de la Tunisie. Leur évolution géomorphologique au cours du quaternaire*. Faculté des lettres et sciences humaines de Tunis, Université de Tunis, 210 p.

173 - Oueslati, A. **1992**. Salt marshes in the Gulf of Gabes (Southeastern Tunisia): their morphology and recent dynamics. *Journal of Coastal Research*. 8 (3), pp: 727-733.

174 - Oueslati, A. **1994**. *Les côtes de la Tunisie. Recherches sur leur évolution au Quaternaire*. Publication de la faculté des sciences humaines et sociales de Tunis, 402 p.

175 - Oueslati, A. **1995**. The evolution of low Tunisian coasts in historical times: From progradation to erosion and salinization. *Quaternary International*. 29-30, pp: 41-47.

176 - Oueslati, A. **2004**. *Littoral et aménagement en Tunisie*. Publication de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Tunis, 526 p.

177 - Oueslati, A. **2011**. Plages et urbanisation en Tunisie: des avatars de l'expérience du xxe siècle aux incertitudes de l'avenir. *Méditerranée*. 115 (2), pp: 103-116.

178 - Paepe, R. **1986**. Landscape changes in Greece as a result of changing climate during the Quaternary. In *Desertification in Europe* pp: 49-58.

179 - Paskoff, R. **2001**. *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers*. Institut Océanographique, 190 p.

180 - Paskoff, R. et Sanlaville, P. **1983**. *Les côtes de la Tunisie. Variations du niveau marin depuis le Tyrrhénien,*. Lyon : Maison de l'Orient et de la Méditerranée Collection de la Maison de l'Orient méditerranéen Série géographique et préhistorique, 192 p.

181 - Paskoff, R., Slim, H. et Trousset, P. **1991**. Le littoral de la Tunisie dans l'Antiquité : cinq ans de recherches géo- archéologiques. *Comptes-rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*. 135 (3), pp: 515-546.

182 - Peguy, C. P. **2001**. *Espace, temps, complexité, vers une métagéographie*. Reclus, Belin, 283 p.

183 - Pendleton, E. A., Hammar-Klose, E. S., Thieler, E. R. et Williams, S. J. **2003**. Coastal Vulnerability Assessment of Gulf Islands National Seashore (GUIS) to Sea-Level Rise. 22 p.

184 - Pergent, G. et Kempf, M. **1993**. L'environnement marin côtier en Tunisie - Rapport de synthèse. *Groupement Intérêt Scientifique Posidonie, IFREMER, ANPE Tunisie* 539 p.

185 - Péron, F. **1993**. *Des îles et des hommes: l'insularité aujourd'hui*. Editions de la Cité, 300 p.

186 - Pigeon, P. **2002**. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*. 627-628, pp: 452-470.

187 - Pigeon, P. **2005**. *Géographie critique des risques*. Economica Anthropos, 217 p.

188 - Pinardi, N. et Masetti, E. **2000**. Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 158, pp: 153-173.

189 - Pirazzoli, P. A. **1998**. Sur la vitesse des variations du niveau de la mer. *Annales de Géographie*. 107 (600), pp: 220-232.

190 - Pirazzoli, P. A. **2005**. A review of possible eustatic, isostatic and tectonic contributions in eight late-Holocene relative sea-level histories from the Mediterranean area. *Quaternary Science Reviews*. 24 (18-19), pp: 1989-2001.

191 - Pouvreau, N. **2008**. *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France: outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest.* Thèse de l'Université de La Rochelle, 474 p.

192 - Projet SMAP III. **2007**. Stratégie de gestion intégrée de la zone côtière sud du grand Sfax. Diagnostique de la zone côtière sud du grand Sfax étendu au îles Kerkennah. 155 p.

193 - Prudêncio, M. I., Gonzalez, M. I., Dias, M. I., Galan, E. et Ruiz, F. **2007**. Geochemistry of sediments from El Melah lagoon (NE Tunisia): A contribution for the evaluation of anthropogenic inputs. *Journal of Arid Environments*. 69 (2), pp: 285-298.

194 - Quenet, G. **2010**. Fléaux de Dieu ou catastrophes naturelles? *Terrain*. 10.3917/terr.054.0010.

195 - Radić, V. et Hock, R. **2010**. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 10.1029/2009jf001373.

196 - Rahman, H. et Dedieu, G. **1994**. SMAC: A simplified methode for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote sensing*. 15, pp: 123-143.

197 - Reale, O. et Dirmeyer, P. **2000**. Modeling the effects of vegetation on Mediterranean climate during the Roman Classical Period: part I: climate history and model sensitivity. *Global and Planetary Change*. 25 (3), pp: 163-184.

198 - Rebotier, J. **2008**. *Les territorialités du risque urbain à Caracas.* Thèse de l'Université Sorbonne Nouvelle, Paris 3, 429 p.

199 - Rees, S. **1987**. Agriculture and horticulture. In: The Roman Worldpp: Routledge and Kegan Paul Publishing. Chap. 18.

200 - Rhouma, A. et Labidi, A. **2006**. Diagnostic participatif de l'état de la pêche traditionnelle aux îles Kerkennah. *Programme des Nations Unies pour le Développement, Fond pour l'Environnement Mondial, Lions club Sfac Thyna* 42 p.

201 - Rhouma, A., Nasr, N., Ben Salah, M. et Allala, M. **2005**. Analyse de la diversité génétique du palmier dattier dans les Iles Kerkennah. *Regional Office for Central & West Asia & North Africa (CWANA) & Centre de Recherches Phoenicicoles de l'INRA Tunisie* 55 p.

202 - Ridez, G. **1992**. *Parcs nationaux et tourisme en Europe*. Collection tourismes et sociétés. Edition l'Harmattan, Paris, 421 p.

203 - Robin, M. **1995**. *La télédétection : des satellites aux SIG*. Paris, Nathan, 320 p.

204 - Rocchini, D. et Di Rita, A. **2005**. Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*. 25 (2), pp: 159-168.

205 - Saidani, N. **2007**. Rapport du centre hydrographique et oceanographique de la marine nationale de la Tunisie. 5 p.

206 - Scapini, F. **2002**. *Baseline research for the integrated sustainable management of Mediterranean sensitive coastal ecosystems*. Istituto Agronomico per l'Oltremare, p.

207 - Schubert, M., Perlwitz, J., Blender, R., Fraedrich, K. et Lunkeit, F. **1998**. North Atlantic cyclones in CO2-induced warm climate simulations: frequency, intensity, and tracks. *Climate Dynamics*. 14 (11), pp: 827-838.

208 - Serre, D., Barroca, B. et Laganier, R. **2012**. *Resilience and Urban Risk Management*. CRC Press, 194 p.

209 - Sevin, O. **2010**. *Comme un parfum d'île*. Presse universitaire Paris-Sorbonne (PUPS), 511 p.

210 - Sghaier, M., Ouessar, M., Fetoui, M., Ouled Belgacem, A. et Khartteli, H. **2011**. Etat de référence environnemental 2010 dans l'observatoire de Menzel Habib, gouvernorat de Gabès, sud-est de la Tunisie *Dispositif national de surveillance environnementale DNSE, Tunisie*, 120 p.

211 - Sheik Mujabar, A. et Chandrasekar, N. **2011**. A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system. *Geo-spatial Information Science*. 14 (4), pp: 282-293.

212 - Slim, H., Trousset, P., Paskoff, R. et Oueslati, A. **2004**. *Le littoral de la Tunisie, Etude Géoarchéologique et Historique*. CNRS Edition, 308 p.

213 - Smit, B. et Wandel, J. **2006**. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*. 16 (3), pp: 282-292.

214 - Stanley, D. J. **1988**. Subsidence in the Northeastern Nile Delta: Rapid Rates, Possible Causes, and Consequences. *Science*. 240 (4851), pp: 497-500.

215 - Sušelj, K., Tsimplis, M. N. et Bergant, K. **2008**. Is the Mediterranean Sea surface height variability predictable? *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 33 (3-4), pp: 225-238.

216 - Taglioni, F. **2003**. *Recherches sur les petits espaces insulaires et sur leurs organisations régionales*. Habilitation à diriger des recherches de l'Université Paris-Sorbonne - Paris IV, 109 p.

217 - Taglioni, F. **2006**. Les petits espaces insulaires face à la variabilité de leur insalurité. *Annales de Géographie*. 652, pp: 664-687.

218 - Tanré, D., Deroo, C., Herman, M., Morcrette, J. J., Perbos, J. et Deschamps, P. Y. **1990**. Technical note Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote sensing*. 11 (4), pp: 659-668.

219 - Texier, P. **2009**. *Vulnérabilité et réduction des risques liés à l'eau dans les quartiers informels de Jakarta, Indonésie. Réponses sociales, institutionnelles et non institutionnelles.* Thèse de l'Université Paris Diderot, 466 p.

220 - Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. et Ergul, A. **2009**. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 (updated for version 4.3.): An ArcGIS extension for calculating shoreline change. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008 - 1278* 79 p.

221 - Toker, E., Sivan, D., Stern, E., Shirman, B., Tsimplis, M. et Spada, G. **2012**. Evidence for centennial scale sea level variability during the Medieval Climate Optimum (Crusader Period) in Israel, eastern Mediterranean. *Earth and Planetary Science Letters*. 315, pp: 51-61.

222 - Trinder, J. C. et Wang, Y. **1998**. Automatic Road Extraction from Aerial Images. *Digital Signal Processing*. 8 (4), pp: 215-224.

223 - Tsimplis, M., Marcos, M. et Somot, S. **2008**. 21st century Mediterranean sea level rise: Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change*. 63 (2-3), pp: 105-111.

224 - Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L. et others. **2003**. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 100 (14), pp: 8074-8074.

225 - Ullmann, A. **2008**. *Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques: variabilité contemporaine et future (1900-2100).* Thèse de l'Université Aix-Marseille I, 333 p.

226 - Van Hateren, A. H. **2012**. The hominins of Flores: Insular adaptations of the lower body. *Comptes Rendus Palevol*. 11, pp: 169-179.

227 - Van Overloop, E. **1986**. Comparison of climatic evolution during post-glacial times in Greece, tropical and subtropical regions. In *Desertification in Europe* pp: 59-72.

228 - Verger, F. **1995**. Slikkes et Schorres : milieux et aménagement. *Norois*. 165 (1), pp: 235-245.

229 - Veyret, Y. et Reghezza, M. **2005**. Aléas et risques dans l'analyse géographique. *Annales des Mines*. pp: 61-69.

230 - Veyret, Y. et Reghezza, M. **2006**. Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité. In *Responsabilité et Environnement* pp: 9-13.

231 - Vigo, M. I., Sánchez-Reales, J. M., Trottini, M. et Chao, B. F. **2011**. Mediterranean Sea level variations: Analysis of the satellite altimetric data, 1992–2008. *Journal of Geodynamics*. 52 (3-4), pp: 271-278.

232 - Vinchon, C., Baron-Yelles, N., Berthelier, E., Hérivaux, C., Lecacheux, S., Meur-Ferec, C., Pedreros, R., Rey-Valette, H. et Rulleau, B. **2011**. MISEEVA : Set up of a transdisciplinary approach to assess vulnerability of the coastal zone to marine inundation at regional and local scale, within a global change context. *Littoral*. 10.1051/litt/201111003.

233 - Visbeck, M. H., Hurrell, J. W., Polvani, L. et Cullen, H. M. **2001**. The North Atlantic Oscillation: past, present, and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 98 (23), pp: 12876-12877.

234 - Von Bertalanffy, L. **2012**. *Théorie générale des systèmes*. Nouvelle présentation, Dunod, Paris, 308 p.

235 - Walha, K., Amar, R. B., Quemeneur, F. et Jaouen, P. **2007**. Demineralisation des eaux saumatres du sud tunisien par electrodialyse ou par osmose inverse. *Société chimique de Tunisie*. 9 (2), pp: 133-142.

236 - Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. et Kinzig, A. **2004**. Resilience, Adaptability and Transformability in Social–ecological Systems. *Ecology and society*. http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5.

237 - Xoplaki, E., Gonzalez-Rouco, J. F., Luterbacher, J. et Wanner, H. **2003**. Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Climate Dynamics*. 20 (7), pp: 723-739.

238 - Xoplaki, E., Gonzalez-Rouco, J. F., Luterbacher, J. et Wanner, H. **2004**. Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. *Climate Dynamics*. 23 (1), pp: 63-78.

239 - Xoplaki, E., González-Rouco, J. F., Luterbacher, J. et Wanner, H. **2003**. Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Climate Dynamics*. 20 (7), pp: 723-739.

240 - Yechieli, Y. et Wood, W. W. **2002**. Hydrogeologic processes in saline systems: playas, sabkhas, and saline lakes. *Earth Science Reviews*. 58 (3), pp: 343-365.

# Table des figures

*Figure 1: Topographie et toponymie de l'archipel de Kerkennah* ..... 3
*Figure 2: Gravure du tremblement de terre de Lisbonne, le 1er novembre 1755. Il fut suivi d'un tsunami (Original au Museu da Cidade, Lisbon)* ..... 12
*Figure 3: Accident ferroviaire de Meudon de 1842. (Détail, Collection du musée de l'Ile-de-France, original au Château de Meudon)* ..... 13
*Figure 4: Attention portée à l'aléa et à la vulnérabilité selon l'approche classique de l'étude des risques et ses évolutions* ..... 16
*Figure 5: Facteurs d'influence sur les vulnérabilités* ..... 19
*Figure 6: Types de relations en systémique* ..... 24
*Figure 7: Le référentiel de l'équilibration du Système Général : phases 1, 2 et 3 : morphostase ; phase 4 : morphogenèse : il n'y a plus équilibration, mais évolution structurelle. (Tiré de Le Moigne, 1994)* ..... 25
*Figure 8: Chaîne d'événements depuis l'élévation du niveau de la mer à l'abandon de l'île comme observé sur l'île de Hollande, Chesapeake Bay, Etat Unis (Tiré de Arenstam Gibbons & Nicholls, 2006 traduit de l'anglais)* . 28
*Figure 9: Le "système vulnérabilité" (Meur-Ferec, 2009)* ..... 30
*Figure 10: Notion d'exposition et de vulnérabilité dans le cadre de l'approche spatiale de la vulnérabilité : exemple de diffusion de la vulnérabilité par un réseau routier* ..... 31
*Figure 11: Diagramme ombrothermique de Sfax ; période 1970-2002. Echelle : P=2T (Tiré de Dahech, 2007)* ... 37
*Figure 12: Variations thermiques moyennes quotidiennes des températures de surface le long d'un transect reliant la campagne de Sfax et la partie sud de Kerkennah durant le mois d'août 2000 d'après l'imagerie NOAA-AVHRR (Tiré de Dahech, 2007)* ..... 39
*Figure 13: Bathymétrie méditerranéenne (Adapté de Arabelos et al., 2011)* ..... 40
*Figure 14: Représentation schématique de la circulation thermohaline en Méditerranée (Tiré de Pinardi & Masetti, 2000)* ..... 41
*Figure 15: Phases négative (haut) et positive (bas) de la NAO (Ifremer.fr)* ..... 42
*Figure 16: Circulation des courants marins de surface en Méditerranée (Tiiré de Mermex-Group, 2011)* ..... 43
*Figure 17: Variabilité interannuelle du total pluviométrique (A) enregistré dans l'aérodrome de Sfax entre 1950 et 2007 (Tiré de Daoud & Dahech, 2012, données de l'INM)* ..... 46
*Figure 18: Vitesse annuelle moyenne du vent à Sfax entre 1970 et 2002 (Tiré de Dahech, 2007)* ..... 48
*Figure 19: Bilan de la hausse du niveau marin entre 1993-2009 et 2002-2009 en mm/an (Tiré de Llovel, 2010)* 51
*Figure 20: Moyenne mensuelle du niveau de la mer (SSH = hauteur du niveau de la mer) en Méditerranée calculée en mètres sur 9 ans (Tiré de Sušelj et al., 2008)* ..... 52
*Figure 21: Vestiges antiques : A, fond de citerne dans les falaises de Jorf (photo personnelle prise en mai 2011); B, murs antiques sur l'estran devant le site de Borj El H'sar (photo personnelle prise en mars 2010)* ..... 54
*Figure 22: Niveau marin moyen du bassin méditerranéen (Tiré de Meyssignac et al., 2011)* ..... 55
*Figure 23: Tendance du niveau de la mer Méditerranée (variation linéaire avec le temps) issue de données Topex/Poseidon pour la période 1993 – 1998 (Tiré de Cazenave et al., 2002)* ..... 57
*Figure 24: Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface (Tiré de IPCC, 2007).* ..... 59
*Figure 25: Changement de températures et précipitations en Europe, scénario A1B (Tiré de IPCC, 2007)* ..... 61
*Figure 26: Indice d'aridité de Budyko (Tiré de Gao & Giorgi, 2008)* ..... 63
*Figure 27: Evolution des pressions au niveau de la mer pour les 4 saisons en mb selon le scénario A1B. Différence entre la période 1961 – 1990 et 2070 – 2100 (Tiré de Giorgi & Lionello, 2008)* ..... 64
*Figure 28: Tendances saisonnières du niveau de la mer induit par la pression atmosphérique et le vent selon différents scénarios climatiques (Tiré de Jordà et al., 2012).* ..... 65
*Figure 29: Effet stérique sur l'élévation du niveau de la mer (Tiré de Tsimplis et al., 2008)* ..... 66

*Figure 30 : Localisation, toponymie et surface des îles et îlots de l'archipel* ..... *74*
*Figure 31: Typologie des îles et situation des îles de Kerkennah (Repris et modifié de Germanaz in Bernardie & Taglioni, 2005 p. 35)*..... *75*
*Figure 32: Stratigraphie des dépôts affleurant à Kerkennah. (Adapté de Oueslati, 1986 p. 190)* ..... *76*
*Figure 33: Bourrelets ou crête de cordon littoral, d'âge eutyrrhénien repérables dans l'archipel des différentes transgressions et régressions marines (Adapté de Oueslati, 1986)* ..... *77*
*Figure 34: Failles et flexures de l'archipel (Adapté de Oueslati, 1986).*..... *78*
*Figure 35: Variations du niveau marin à l'échelle du quaternaire supérieur (Adapté de Oueslati, 1986)* ..... *79*
*Figure 36: Topographie sous-marine, courants principaux et marées (source : Carte SHOM 4235)* ..... *81*
*Figure 37: Types de côtes et exemples photographiques (Données : carte topographique de 1973 et terrain. Photos prises en Mars 2010 et Juin 2011)*..... *82*
*Figure 38: Modèle de formation des marais maritimes à Kerkennah (Tiré de Oueslati, 1992)*..... *83*
*Figure 39: Composants du bilan de masse d'une sebkha littorale (Tiré de Yechieli & Wood, 2002)*..... *86*
*Figure 40: Fonctionnement normal (sans perturbation naturelle ou anthropique) d'une sebkha de Kerkennah (Inspiré de Yechieli & Wood, 2002; Fehri, 2011)* ..... *87*
*Figure 41: Occupation du sol en 2010* ..... *90*
*Figure 42: A, Photographie d'une ancienne citerne romaine et B, d'un puits peu profond abandonnés aujourd'hui.*..... *92*
*Figure 43: Pyramide des âges de Kerkennah en % (Institut National de la Statistique (INS))*..... *94*
*Figure 44: Localisation des zones irriguées de Kerkennah (D'après le CRDA de Sfax, in Elyakoubi, 2011)* ..... *96*
*Figure 45: Correspondance entre les images récentes Google Earth (A) et les levés de 1884 (Carte SHOM 4235) (B) dans les environs du littoral d'El Abassia et de l'île de Gremdi*..... *108*
*Figure 46: Exemples d'erreurs de dessin de la carte topographique de 1973 par rapport aux photographies aériennes calées de 1963 ; carte topographique en couleur, photographies aériennes en noir et blanc*..... *110*
*Figure 47: Photographie aérienne scannée de 1963 avant traitements : Exemple de la zone entourant les salines de l'archipel*..... *112*
*Figure 48: Scène complète de l'image SPOT 5 « Tunisie_100620_T_068_280 SPOTView »* ..... *114*
*Figure 49: Répartition des bandes spectrales des images Landsat 5 TM sur le spectre lumineux (unité : µm)* .. *117*
*Figure 50: Compositions colorées standard (Canal 2 en bleu,3 en vert et 4 en rouge) des images Landsat 5 TM du 18 juin 1984 (A) et du 29 juin 2011 (B)*..... *118*
*Figure 51: Exemples types de repérages de terrain effectués entre 2010 et 2012* ..... *122*
*Figure 52: Relevés de terrain : Localisation des relevés de salinité et des transects descriptifs réalisés sur le littoral (A) ; Exemple du transect T 11 relevé sur la côte touristique érodée au sud du Grand Hôtel (B) et valeurs des relevés de salinité sur les deux transects (C)*..... *124*
*Figure 53: Géo-rectification ou ortho-rectification dans le cas de terrain plat, de colline ou de volcan (Tiré de Rocchini & Di Rita, 2005)*..... *131*
*Figure 54: Erreur résiduelle en mètres en fonction du type de polynôme utilisé avec 31 points de calage (Tiré de Hughes et al., 2006)* ..... *133*
*Figure 55: Calage et vérifications visuelles par comparaison entre l'image SPOT 5 et les photographies aériennes.*..... *134*
*Figure 56: Mosaïque réalisée à partir des photographies aériennes de 1963* ..... *135*
*Figure 57: Détection du trait de côte par interprétation et vérifications de terrain* ..... *151*
*Figure 58: Le "Net Shoreline Movement" ou NSM est la distance en mètre entre le trait de côte le plus récent et le trait de côte le plus ancien (Tiré de Thieler et al., 2009)* ..... *153*
*Figure 59: Présentations des zones où l'erreur de détection du trait de côte est de ±6 mètres et figures correspondantes*..... *155*
*Figure 60: Evolution de la côte sud-ouest de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies de la Figure 61)*..... *160*
*Figure 61: Type de côte sur le littoral sud-ouest de l'île de Gharbi (Localisation : voir Figure 60)* ..... *161*

*Figure 62: Evolution de la côte nord de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies sur la Figure 63 et Figure 64)* ..... *164*
*Figure 63: Aménagements sur la côte nord de l'île de Gharbi (Localisation : Figure 62)* ..... *165*
*Figure 64: Types de côte présents sur la côte nord de Gharbi (localisation : Figure 62)* ..... *168*
*Figure 65: Evolution de la côte de la presqu'île de Sidi Fonkhal entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies sur de la Figure 66, Figure 67, Figure 68 et Figure 69)* ..... *171*
*Figure 66: Présentation des différents types de plages de la presqu'île de Sidi Fonkhal* ..... *173*
*Figure 67: Type de côte rocheuse sur la façade est de Sidi Fonkhal* ..... *174*
*Figure 68: Erosion et physionomie de la côte entre les repères 12 et 13 de la Figure 65* ..... *175*
*Figure 69: Côte de la façade ouest de la presqu'île de Sidi Fonkhal* ..... *176*
*Figure 70: Evolution de la côte sud de l'île de Chergui entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies et transects de la Figure 71, Figure 72, Figure 73 et Figure 74)* ..... *179*
*Figure 71: Côtes aménagées d'ouvrages individuels (Localisation : Figure 70)* ..... *181*
*Figure 72: Côtes aménagées par des enrochements sur le littoral bordant Ramla, entre les deux digues (Localisation : Figure 70)* ..... *182*
*Figure 73: Mausolée attaqué par l'érosion marine (Localisation : Figure 70)* ..... *183*
*Figure 74: Côtes basses couvertes d'un remblai de quelques centimètres de haut, parfois protégées par des enrochements et servant de piste (Localisation : Figure 70)* ..... *184*
*Figure 75: Evolution de la côte entre le pont d'El Kantara et Borj El H'sar entre 1963 et 2010 (Localisation des photographies et transects de la Figure 76, Figure 77, Figure 78 et Figure 79)* ..... *188*
*Figure 76: La côte non aménagée autour de Ras Ameur (Localisation : Figure 75)* ..... *190*
*Figure 77: Enrochements de la zone de Sidi Frej (Localisation : Figure 75)* ..... *192*
*Figure 78: Aménagement (Localisation : Figure 75)* ..... *194*
*Figure 79: aménagement côte à falaises (Localisation : Figure 75)* ..... *195*
*Figure 80: Pourcentage des transects issus des six zones d'études en fonction de leur évolution entre 1963 et 2010* ..... *197*
*Figure 81: Système de vulnérabilité littorale liée à l'évolution de la position du trait de côte : vulnérabilité à l'érosion et vulnérabilité aux submersions* ..... *198*
*Figure 82: Typologie des côtes en fonction de leur vulnérabilité* ..... *207*
*Figure 83: Processus d'une classification dirigée avec les étapes itératives (Modifié de Caloz & Collet, 2001)* .. *214*
*Figure 84: Caractéristiques spectrales des zones d'entraînement pour les classifications dirigées sur les images du 18 juin 1984 et du 29 juin 2011* ..... *215*
*Figure 85: Occupation du sol le 18 juin 1984 (A) et le 29 juin 2011 (B) (source : images Landsat TM5)* ..... *222*
*Figure 86: Mort des palmiers dans l'archipel de Kerkennah* ..... *226*
*Figure 87: Position de la limite des sebkhas telle qu'interprétée sur les photographies aérienne de 1963 et sur l'image SPOT 5 de 2010* ..... *226*
*Figure 88: Succession végétale des sebkhas aux palmeraies et détection de la bordure de sebkha : exemple de la sebkha Essendouk au sud de Gharbi (sources : Image SPOT 5 de 2010 ; photographies et relevés de salinités réalisés en juin 2011)* ..... *227*
*Figure 89: Etalement du bâti à Kerkennah entre 1963 et 2010 et exemples d'habitats (Source : Image SPOT 5 du 20 juin 2010 ; Carte topographique de 1973 ; photographies aériennes de 1963)* ..... *230*
*Figure 90: Evolution des espaces irrigués de l'archipel entre 1984 et 2011* ..... *235*
*Figure 91: Evolution de la surface de la palmeraie entre 1984 et 2011 par télédétection* ..... *237*
*Figure 92: Evolution des sebkhas de l'archipel par télédétection* ..... *238*
*Figure 93: Sebkhas ou groupements de sebkhas étudiés* ..... *241*
*Figure 94: Evolution des surfaces de sebkhas de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010 par photo-interprétation* .. *244*
*Figure 95: Evolution des surfaces de sebkhas de l'île de Chergui entre 1963 et 2010 par photo-interprétation* *246*
*Figure 96: Prix de l'eau (A) et pompage (B) dans la zone irriguée de Mellita (Photo prises en mars 2010)* ..... *250*
*Figure 97: Système d'évolution de paramètres régionaux et locaux conduisant aux évolutions de l'occupation du sol de l'archipel de Kerkennah* ..... *253*

*Figure 98: Localisation des espaces vulnérables à la salinité des sols en 1963* ..... *256*
*Figure 99: Localisation des espaces vulnérables à la salinité des sols en 2010* ..... *257*
*Figure 100: Questionnaire proposé à un échantillon de population en mai 2012 dans l'archipel* ..... *263*
*Figure 101: Classification des problèmes majeurs aux problèmes les moins importants* ..... *266*
*Figure 102: A : Répartition des réponses à la question : "A votre avis, le phénomène de recul de la côte est-il… ?" B : Répartition des réponses à la question : "Pensez-vous que le rythme du recul du trait de côte s'est accéléré ?" (Échantillon de 139 réponses)* ..... *268*
*Figure 103: Répartition des réponses aux questions : "Face à ce phénomène (de recul de la côte) les efforts de la population sont ?, Ceux de l'Etat sont ?" (Échantillon de 139 réponses)* ..... *269*
*Figure 104: Répartition des réponses aux questions : "Avez-vous remarqué la mort des palmiers ? Ce phénomène est-il … ?" (Échantillon de 139 réponses)* ..... *271*
*Figure 105: Exemples de modes de gestion littorale observés à Kerkennah (Source des schémas, Paskoff, 2001, photographies à droite prises sur l'archipel)* ..... *275*
*Figure 106: Aménagements influençant la sebkha Alif Ennkhal.* ..... *277*
*Figure 107: Plan des actions prévues dans le cadre de la protection des plages à Kerkennah (source : APAL, consulté en 2013)* ..... *279*
*Figure 108: Plan d'aménagement prévu pour la presqu'île de Sidi Fonkhal (Modifié à partir du Projet SMAP III, 2007)* ..... *285*

# Table des tableaux

*Tableau 1: Exemple des différents types d'aléas, endogènes, exogènes et mixtes, en fonction de leurs échelles spatio-temporelles* ..... 15
*Tableau 2: Facteurs de vulnérabilité selon 4 auteurs francophones entre 1994 et 2009* ..... 20
*Tableau 3: Evolution des températures moyennes maximales et minimales entre 1950 et 2007 à Sfax (Tiré de Dahech & Beltrando, 2012)* ..... 47
*Tableau 4: Signification des résultats du calcul de l'indice de Budyko* ..... 62
*Tableau 5: Population par localités en 2004 (Kebaïli Tarchouna, 2013) source des données : Institut National de la Statistique (INS)* ..... 91
*Tableau 6: Effectif de population dans l'archipel depuis 1890 (Institut National de la Statistique (INS); Louis, 1963)* ..... 94
*Tableau 7: Récapitulatif des caractéristiques des cartes et images utilisées* ..... 119
*Tableau 8: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte sud-est de Gharbi entre 1963 et 2010* ..... 157
*Tableau 9: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte sud-ouest de Gharbi entre 1963 et 2010* ..... 158
*Tableau 10: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte nord de l'île de Gharbi entre 1963 et 2010* ..... 163
*Tableau 11: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte Sidi Fonkhal entre 1963 et 2010* ..... 169
*Tableau 12: Valeurs d'évolution de la côte sur la côte sud de l'île de Chergui entre 1963 et 2010* ..... 178
*Tableau 13: Pourcentage de transects montrant une érosion négative significative en zone non bâtie* ..... 185
*Tableau 14: Valeurs d'évolution de la côte de la zone touristique de Sidi Frej entre 1963 et 2010* ..... 187
*Tableau 15: Calcul de la vulnérabilité des côtes aux phénomènes d'érosion et de submersion liés aux mouvements de la position du trait de côte* ..... 200
*Tableau 16: Valeur de vulnérabilité obtenue et typologie des côtes* ..... 203
*Tableau 17: Valeur de vulnérabilité calculée pour différents espaces caractéristiques* ..... 204
*Tableau 18: Matrice de confusion pour la classification de l'image du 18 juin 1984* ..... 217
*Tableau 19: Matrice de confusion pour la classification de l'image du 29 juin 2011* ..... 218
*Tableau 20: Indicateurs de précision de la classification de l'image du 18 juin 1984* ..... 220
*Tableau 21: Indicateurs de précision de la classification de l'image du 29 juin 2011* ..... 221
*Tableau 22: Evolution des surfaces bâties par télédétection et par photo-interprétation* ..... 229
*Tableau 23: Evolution des surfaces des différentes localités par photo-interprétation* ..... 232
*Tableau 24: Evolution globale des sebkhas par photo-interprétation entre 1963 et 2010* ..... 239
*Tableau 25: Problèmes cités spontanément par la population interrogée* ..... 267
*Tableau 26: Causes de la mortalité excessive des palmiers* ..... 272
*Tableau 27: Nombre de réponses proposées par les personnes interrogées* ..... 272
*Tableau 28: Coût des équipements prévus pour le projet de Sidi Fonkhal (Kebaili Tarchouna, 2013)* ..... 286

# Table des matières


***Introduction générale ..... 1***

***Partie 1 L'archipel de Kerkennah : vulnérabilité croissante et milieu fragile ..... 7***

**Chapitre 1. Vulnérabilité et perception des dangers de l'époque moderne à nos jours ..... 9**

1. L'époque moderne, la transition vers une remise en question du divin ..... 10
2. L'époque contemporaine, émergence du concept de vulnérabilité face à celui de l'aléa ..... 13
   2.1. La révolution industrielle, le paradigme de l'extrême et la notion d'aléa ..... 13
   2.2. Les années 1970, paradigme radical et prise en compte de la vulnérabilité ..... 16
3. Les années 2000, approche systémique et spatiale ..... 21
   3.1. Les systèmes et socio-écosystèmes ..... 21
   3.2. La vulnérabilité territoriale ..... 30

Conclusion du Chapitre 1 ..... 34

**Chapitre 2. Accentuation récente de la vulnérabilité liée au climat et au niveau de la mer à l'échelle de la Méditerranée et du golfe de Gabès ..... 35**

1. Présentation du climat et des caractéristiques marines du bassin méditerranéen ..... 36
   1.1. Les influences climatiques à l'échelle du bassin et de la région de Sfax ..... 36
   1.2. Circulation des eaux dans le bassin et dans le golfe de Gabès ..... 40
2. Evolution climatique et niveau marin depuis 2000 ans et accentuation de vulnérabilité dans le sud de la Méditerranée ..... 44
   2.1. Un climat de plus en plus chaud et sec depuis l'Antiquité ..... 44
   2.2. La hausse globale du niveau marin ..... 49
      2.2.1. Causes de variations du niveau de la mer ..... 49
      2.2.2. Le niveau de la mer depuis 2000 ans dans le golfe de Gabès ..... 52
3. Projection du climat futur ..... 58
   3.1. Climat futur et aridité ..... 58
   3.2. Conditions marine futures ..... 64

Conclusion du Chapitre 2 ..... 67

**Chapitre 3. Kerkennah : un territoire aux vulnérabilités multiples ..... 69**

1. Définition et spécificités des milieux insulaires ..... 70
2. Les formations géologiques de l'archipel, fragilité et vulnérabilité structurale ..... 75
   2.1. Fragilité des formations litho-stratigraphiques ..... 75
   2.2. L'instabilité tectonique ..... 78
   2.3. Variation du niveau de la mer à l'échelle du quaternaire supérieur ..... 79
3. L'occupation du sol contrainte par les formes du relief ..... 80
   3.1. Le littoral de l'archipel ..... 80
   3.2. Topographie à l'intérieur des îles et sebkhas de l'archipel ..... 84
   3.3. Localités et surfaces agricoles ..... 89
4. Le peuplement de l'archipel et l'évolution des ressources en eau depuis l'Antiquité romaine ..... 91
   4.1. Les ressources en eau suffisantes durant l'Antiquité et le Moyen-Âge ..... 91
   4.2. Accroissement de la population depuis 1890 malgré une ressource en eau rare ..... 93
      4.2.1. Dynamique de la population depuis 1890 ..... 93
      4.2.2. Le développement des diverses ressources en eau ..... 95

Conclusion du Chapitre 3 ..... 97

*Partie 2 Données et méthodes nécessaires à la mesure de la vulnérabilité .....101*
- Les différentes approches ..... 101
- Les limites, temporelles des données et spatiales du terrain ..... 102

**Chapitre 4. Présentation des données .....105**
1. Données de cartographie et d'imagerie ..... 107
1.1. Carte SHOM (Service Hydrographique de la Marine) ..... 107
1.2. Carte topographique ..... 109
1.3. Photographies aériennes ..... 111
1.4. Image satellite SPOT 5 ..... 113
1.5. Images satellite Landsat 5 TM ..... 115
2. Données de terrain ..... 119
2.1. Photographies et relevés GPS ..... 121
2.2. Mesures de salinité du sol et transects descriptifs ..... 123
2.3. Questionnaires ..... 125
Conclusion du Chapitre 4 ..... 126

**Chapitre 5. Méthodologies de la thèse .....129**
1. Le calage des photographies aériennes ..... 130
2. La photo-interprétation : détection des objets géographiques ..... 136
Conclusion du chapitre 5 ..... 141

*Partie 3 Caractériser et comprendre la vulnérabilité .....145*

**Chapitre 6. L'évolution du trait de côte entre 1963 et 2010 .....147**
1. Méthode de détection du trait de côte ..... 148
2. Mesure de l'évolution de la côte et facteurs explicatifs d'échelle locale ..... 154
2.1. Des côtes naturellement vulnérables ..... 156
2.1.1. Evolution des côtes sud-est et sud-ouest de Gharbi ..... 156
- Localisation des zones d'études et description des côtes ..... 156
- Des rythmes d'érosion faibles ou moyens sur des côtes aux matériaux solides ..... 159

2.1.2. Evolution de la côte nord de Gharbi ..... 161
- Localisation de la zone d'étude et description de la côte ..... 161
- Des rythmes d'érosion variés en fonction de la litho-stratigraphie et du type de côte ..... 163

2.1.3. Evolution de la côte de Sidi Fonkhal ..... 169
- Localisation de la zone d'étude et description de la côte ..... 169
- Des rythmes d'érosion plus importants sur les façades nord et est que sur la façade ouest 170

2.2. La vulnérabilité accentuée par les aménagements anthropiques ..... 177
2.2.1. Evolution de la côte sud de Chergui ..... 177
- Localisation de la zone d'étude et description de la côte ..... 177
- Des rythmes d'érosion perturbés sur l'ensemble du littoral aménagé ..... 180

2.2.2. Evolution de la côte de la zone touristique de Sidi Frej ..... 186
- Localisation de la zone d'étude et description de la côte ..... 186
- Erosion et avancée de la côte exacerbées par des aménagements littoraux ..... 189

3. Discussion : Essai d'évaluation et de typologie des côtes selon le degré de vulnérabilité ..... 197
- Les facteurs physiques naturels et locaux ..... 199
- Les forçages régionaux ..... 201
- Les facteurs anthropiques ..... 201
- Calcul de la vulnérabilité et typologie ..... 203

- Tentative de cartographie des côtes selon leur vulnérabilité ..... 206

Conclusion du chapitre 6 ..... 210

**Chapitre 7. L'évolution de l'occupation du sol et des surfaces des sebkhas de l'archipel entre 1963 et 2010 211**

1. Occupation des sols en 1963, 1984, 2010 et 2011 ..... 212
   1.1. Détermination de l'occupation du sol par télédétection ..... 212
      1.1.1. Les prétraitements ..... 212
      1.1.2. La détermination des états de surface de l'archipel : la classification dirigée ..... 213
   1.2. Méthode de détection de la limite des sebkhas par photo-interprétation ..... 223
2. Mesure de l'évolution des espaces d'enjeux : zones urbaines, terres agricoles et surfaces de sebkhas 228
   2.1. Une extension des surfaces bâties ..... 229
   2.2. Evolution des surfaces agricoles depuis les années 1950 ..... 233
      2.2.1. Recul des superficies de jardins et création des zones irriguées ..... 233
      2.2.2. Le recul de la palmeraie traditionnelle ..... 236
   2.3. Extension hétérogène des surfaces de sebkhas ..... 236
      2.3.1. Une extension rapide dans l'île de Gharbi ..... 241
      2.3.2. Une extension moins marquée dans l'île de Chergui ..... 244
3. Causes potentielles de la salinisation des sols et extension des sebkhas ..... 247
   - Les évolutions agricoles : perspective historique ..... 247
   - Les modes de salinisation des sols ..... 249
   - Facteurs d'extension des surfaces de sebkhas dans les îles de Chergui et Gharbi ..... 251
   - Spatialisation des zones vulnérables ..... 254

Conclusion du chapitre 7 ..... 258

**Chapitre 8. Perception des risques d'extension des sebkhas et de recul de la côte par la population locale et leur gestion ..... 259**

1. La réalisation des questionnaires ..... 261
2. Etat de conscience des problèmes de la population de l'archipel ..... 265
   2.1. Classification des problèmes ..... 265
   2.2. La perception du recul de la côte et estimation des actions entreprises contre ce danger ..... 267
   2.3. La perception de la mort des palmiers et causes proposées ..... 270
3. La vulnérabilité parfois accentuée par des gestions non adaptées ..... 273
   3.1. Les aménagements réalisés sur le littoral de l'archipel et dans les sebkhas ..... 273
      3.1.1. Les aménagements côtiers de l'archipel ..... 273
      3.1.2. Impacts des aménagements sur les dynamiques naturelles des sebkhas à Kerkennah .. 276
   3.2. La gestion du trait de côte et de l'érosion marine : l'impossible passage aux approches intégrées ..... 277
      3.2.1. La protection des plages : une opposition massive à l'avancée de la mer ..... 278
      3.2.2. Les zones sensibles : miser sur le développement ou sur la conservation de la biodiversité ? ..... 279
      3.2.3. La zone touristique de Sidi Fonkhal : une vision à court terme ? ..... 283
      3.2.4. Une gestion littorale morcelée et non intégrée ..... 286
   3.3. Les pistes existantes en Tunisie pour gérer les sebkhas et les côtes en érosion ..... 288
      3.3.1. La gestion des littoraux ..... 288
      3.3.2. La gestion des dangers liés aux sebkhas : une question d'enjeux ..... 289

Conclusion du chapitre 8 ..... 293

***Conclusion générale ..... 297***

***Références*** ..... ***303***

***Table des figures*** ..... ***317***

***Table des tableaux*** ..... ***321***

***Table des matières*** ..... ***323***

# Résumés

**Accentuation récente de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)**

L'archipel de Kerkennah, situé dans le Golfe de Gabès en Tunisie, est composé d'une dizaine de petites îles dont le relief est très plat et la lithologie meuble et fragile. Les espaces les plus bas sont occupés par des sebkhas, espaces salés et stériles. L'évolution du climat et l'élévation relative du niveau de la mer ainsi que les évolutions importantes des modes de vie et de production locaux ont conduit à des changements majeurs dans l'occupation du sol. Dans ce contexte, cette thèse vise à comprendre l'évolution de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols depuis les années 1960. Des études diachroniques de photo-interprétation et télédétection ont été réalisées afin d'observer et mesurer l'évolution de l'occupation du sol, du trait de côte et de l'extension des surfaces de sebkhas. Grâce à ces études et à des relevés de terrain, il est apparu que les côtes subissent majoritairement une érosion significative (0,12m/an) et que les surfaces de sebkhas s'étendent. Ces phénomènes physiques, associés aux évolutions de l'occupation des sols et aux modes de gestion parfois peu adaptés, ont conduit à une augmentation de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols. Les résultats d'un questionnaire, proposé à 139 personnes, laissent penser que la population locale perçoit le retrait de la côte et la salinisation des sols comme étant des phénomènes préoccupants et dangereux. Ainsi le contexte local est plutôt cohérent avec des phénomènes dommageables réels et une population qui semble les connaître. Cependant, la gestion littorale dans l'archipel ne semble prendre en compte ni la vulnérabilité existante, ni la perception et les connaissances de la population locale. Même si la gestion intégrée des zones côtières est préconisée en Tunisie, elle n'est pas mise en place dans l'archipel de Kerkennah.

**Mots clés** : Vulnérabilité, littoral, sebkha, perception, archipel de Kerkennah, Tunisie

---

**Recent accentuation of the vulnerability linked to coastline mobility and soil salinization in the Kerkennah archipelago (Tunisia)**

The Kerkennah archipelago, located in the Gabes Gulf in Tunisia is composed of 10 little islands with a very low landforms a soft and fragile lithology. The lowest areas are occupied by sabkha, which are sterile and salty. The climate evolution, the relative sea level rise and the important evolution in the local production mode and lifestyle caused changes in the land use. In this context, we tried to understand the evolution of vulnerability linked to the coastline mobility and to the soil salinization since the 60's. Diachronic studies of photointerpretation and remote sensing have been performed to observe and quantify the evolution of land use, of the position of the coastline and of the extension of the sebkhas. From this studies and field data, it was found that the coasts are undergoing significant erosion (0.12m/y) and that the sabkha are extending. Those physical phenomena associated to the evolutions of land use and to management methods sometimes unadapted, conduct to the increase of the vulnerability linked to the coastline mobility and the soil salinization. The results of a survey proposed to 139 people suggest that the local population perceives the coastline retreat and the soil salinization as worrying and dangerous phenomena. So the local context is quite consistent with real damaging phenomena and a population that seems to be aware of it. However the littoral management in the archipelago doesn't seem to take into account neither the vulnerability nor the perception and the knowledge of the local population. So, even if the integrated coastal zone management is recommended in Tunisia, it is not set up in Kerkennah.
**Keywords**: Vulnerability, littoral, sabkha, perception, Kerkennah archipelago, Tunisia