

Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Conservatoire National des Arts et Métiers
Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes
1 Boulevard Pythagore - 72000 LE MANS



Mémoire de travail de fin d'études
En vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT

L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral libanais

Mémoire soutenu par
EL HAGE Mhamad
Le 3 Juillet 2009

Membres du jury
Président : Mme SIMONETTO Elisabeth
Maître de stage : M. FAOUR Ghaleb
Professeur référent : M. POLIDORI Laurent

Remerciements

Je remercie avant tout le CNRS-L qui m'a accueilli comme stagiaire. Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce projet en particulier le Dr. Ghaleb FAOUR, maître de stage, dont l'appui et les conseils ne m'ont jamais fait défaut.

Je remercie de même le professeur référent M. Laurent POLIDORI pour ses conseils et sa disponibilité.

Un grand remerciement à Maroun SADER qui a toujours était prêt à m'aider lorsque je rencontrais des difficultés.

Un merci spécial à Pierre BETHMONT pour la relecture de ce rapport.

Je remercie chaleureusement Mme Sylvie Devigne pour son soutien et ses suggestions toujours pertinentes.

Je souhaite exprimer ici toute ma gratitude à ma famille.

Enfin je m'excuse si j'ai oublié de citer quelqu'un, mais en tout cas je dis merci à tous ceux qui m'ont supporté.

Sommaire

Remerciements	1
Liste des sigles et des abréviations	4
Présentation de l'organisme d'accueil	5
Introduction	6
Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	9
I. Localisation et caractéristiques.....	9
II. Géomorphologie et topographie.....	11
III. Géologie.....	11
IV. Aspects climatiques et océanographiques.....	12
V. Ressources en eau.....	12
VI. Aspects socio-économiques	15
Chapitre II : Réchauffement climatique : Quelle élévation pour le niveau des mers au Liban ?	16
1. Étude globale.....	16
2. Le niveau de l'eau dans la Méditerranée.....	17
3. Les <i>scenarii</i> au Liban.....	19
Chapitre III : Préparation des données	20
Introduction.....	20
1. Les Données	20
2. Système de coordonnées	22
3. La référence altimétrique	22
Conclusion	22
Chapitre IV : Simulation de l'élévation du niveau de la mer sur la côte libanaise et évaluation des impacts	23
Introduction.....	23
Méthodologie à suivre	23
1. Prétraitement des données.....	24
2. Création du Modèle numérique du terrain	25
3. Mise à jour de la carte d'occupation du sol.....	30
4. Méthodes d'évaluation des risques d'inondation	31
5. Simulation des différents <i>scenarii</i>	34

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

6. Évaluation des impacts	34
Conclusion	41
Chapitre V : Modélisation de l'indice de vulnérabilité côtière	42
Introduction.....	42
Méthodologie	42
Modélisation	48
Résultats	49
Conclusion	49
Conclusion.....	51
Références bibliographiques	54
Liste des cartes	55
Liste des figures.....	56
Liste des tableaux	57
Résumé et abstract	58

Liste des sigles

CDR : Conseil du développement et de la reconstruction

CNRS-L : Centre national de la recherche scientifique du Liban

CVI: *Coastal Vulnerability Index*

DAG : Direction des affaires géographiques - Armée libanaise

ESGT-L : École supérieure des géomètres et topographes du Liban

GPS: *Global Positioning System*

IDAL: *Investment Development Authority of Lebanon*

IFPO : Institut Français du Proche-Orient

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

MNT : Modèle numérique de terrain

MOS-L : Mode d'occupation du sol du Liban

SDATL : Schéma d'aménagement du territoire libanais

SIG : Système d'information géographique

Présentation de l'organisme d'accueil

Le Centre national de télédétection libanais a été fondé en 1995 et opérationnel depuis 1997, le Centre national de télédétection fait partie du Conseil national de la recherche scientifique au Liban (CNRS-L), placée sous la responsabilité du Conseil des Ministres. Il est composé d'un personnel pluridisciplinaire regroupant des spécialistes de secteur en géologie, agriculture, hydrologie, environnement et sol et des spécialistes techniques en traitement d'images satellitaires et aériennes, en SIG et en GPS (*Global Positioning System*).

Le Centre participe à l'effort national de développement et de valorisation de la connaissance scientifique et de la technologie avancée. Pour ce faire, il assure la structuration d'informations et l'actualisation de bases de données des images satellitaires qui concernent les questions liées à l'environnement, à la valorisation du territoire (aménagement urbain et tourisme) et à la gestion durable des ressources naturelles du pays. De même, il assure la formation du personnel des institutions publiques concernées par l'utilisation et l'application de la télédétection et des SIG. Le centre participe aussi à l'aide à la décision et à la planification en offrant des synthèses et des produits cartographiques aux décideurs nationaux (ministère de l'Environnement, ministère de l'Agriculture, ministère de l'Energie et de l'Eau, etc.) et locaux ainsi qu'aux acteurs du secteur privé. Dans le cadre de ses activités, le Centre coopère avec les centres de télédétection étrangers, les organismes régionaux et internationaux ainsi qu'avec des acteurs privés internationaux.

Depuis sa création, le Centre a réalisé plusieurs projets de recherche couvrant les domaines des ressources en eau, l'aménagement urbain, l'érosion hydrique des sols, la contamination des sols et des eaux, les mouvements de masse, la désertification, l'observation des côtes et leur gestion, ainsi que l'évaluation des bassins versants. En outre, le Centre a participé à la publication de plusieurs ouvrages et atlas dont notamment l'Atlas du Liban, territoires et sociétés (2007), résultant de la collaboration franco-libanaise de l'Institut Français du Proche-Orient (IFPO) et du CNRS. (cf. Pierre Bethmont de Paris I - La Sorbonne, *Atlas spatial du Liban* à publier).

L'équipe est formée d'un chercheur, de deux assistants de recherche et de six stagiaires dont trois de l'ESGT-L, deux de l'Université Islamique et un de Paris I - La Sorbonne. Mon intégration dans cette équipe était facile et complète vu les conseils et l'orientation que les responsables m'ont fournis. Cette étude a été faite en collaboration avec le ministère de l'Environnement ainsi que le Conseil du développement et de la reconstruction au Liban (CDR) étant intéressés à ce sujet.

Introduction

L’élévation du niveau de la mer est considérée comme l’un des plus importants phénomènes du XXI^{ème} siècle en raison du réchauffement de l’atmosphère. Et selon le récent rapport de l’IPCC¹ (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), ce réchauffement a provoqué une expansion thermique des océans et une fonte des glaciers des montagnes et des calottes polaires, ce qui a abouti à une montée du niveau de la mer. Et selon l’IPCC, cette montée devrait continuer durant les prochaines années.

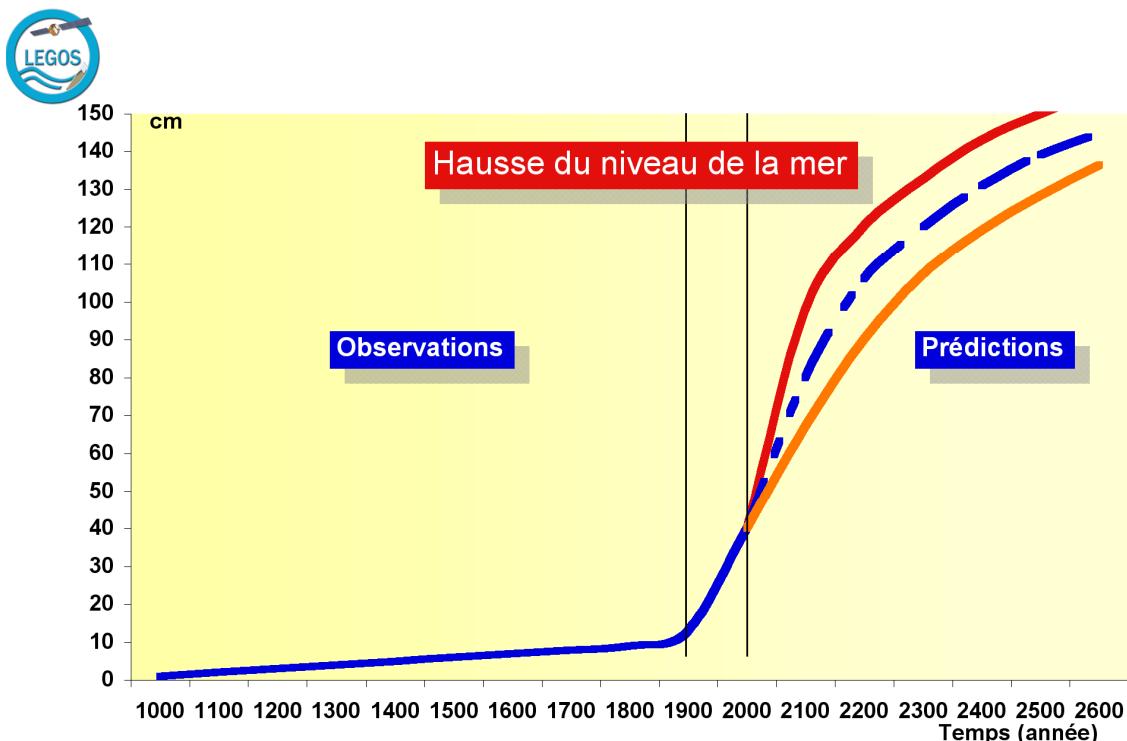


Figure 1 : présentation de la hausse du niveau de la mer².

Une augmentation de quelques millimètres chaque année est capable, au bout d’un siècle, d’inonder plusieurs surfaces et causer des catastrophes naturelles particulièrement dans les régions à basse altitude. Il s’avère donc important de réaliser une étude pour évaluer la vulnérabilité de la côte libanaise.

¹ IPCC ou GIEC en français (Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat), *Rapport de synthèse, Changements Climatiques 2007*, OMM, PNUE. Ce rapport de synthèse est un bilan présentant les dernières informations scientifique, technique et socioéconomique sur les variations du climat, afin de fournir une aide aux décideurs politiques.

² La mer monte à cause du réchauffement climatique : <http://www.legos.obs-mip.fr/fr/produits/grand-public/sealevel.fr.html>

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

Le littoral libanais s'étend sur une longueur de 210 km. Il a une très grande importance dans tous les domaines de vie au Liban. La plupart des structures socio-économiques du pays se localisent sur le littoral et la plaine côtière, notamment les activités agricoles et touristiques. De plus, la population du Liban réside majoritairement dans les agglomérations littorales, soit près de 42,1% de la population totale.

Le risque de catastrophe dû à l'élévation du niveau de la mer est aussi lié à l'altitude des régions concernées. Les régions qui se trouvent à des altitudes inférieures à 10 m, comme la plaine du Akkar, pourraient être entièrement submergées. Selon le CNRS France, une vingtaine des tsunamis répertoriés depuis 2 000 ans se sont produits en Méditerranée. En 551, un violent tsunami a touché les côtes libanaises et syriennes et a causé de nombreuses victimes³. Dans ces régions côtières se concentrent des espaces urbains à très fort taux de densité de population comme les camps de réfugiés palestiniens. Le camp du Rashidieh qui s'étend sur une superficie d'environ 1 km² (superficie mesurée après numérisation de la région) et qui compte 29 361 habitants⁴ est un exemple significatif. Ce camp se trouve à une altitude variant entre 0 m et 15 m. En outre, la plupart des eaux souterraines se trouve dans la région côtière et sont peu profondes.

Ces différents facteurs rendent problématique la montée du niveau de la mer, situation à laquelle il faut remédier afin d'éviter des catastrophes.

L'objectif principal de cette étude est de produire un modèle d'évaluation de la montée du niveau de la mer et de ses impacts sur l'environnement (entre 2000 et 2100). Pour ce faire, plusieurs *scenarii* de la montée des eaux doivent être envisagés. Une fois ces *scenarii* établis, il est possible d'effectuer la carte de risque du littoral en fonction du taux d'élévation. Après la réalisation de ces deux étapes, l'indice de vulnérabilité de la côte libanaise peut être déterminé.

L'évaluation de l'impact de cette montée sur le littoral libanais devient possible. Elle permettrait d'envisager plusieurs applications et mesures de préventions concernant directement la gestion des ressources, l'occupation/utilisation du sol, le déplacement de la population, la vulnérabilité des eaux souterraines et globalement l'aménagement du territoire.

Pour réaliser ce projet nous avons utilisé la technique de télédétection et un Système d'information géographique (SIG). Un système d'information géographique est

³ DH.be - Risque de tsunami en Méditerranée : <http://www.dhnet.be/infos/monde/article/111617/risque-de-tsunami-en-mediterranee.html>

⁴ UNRWA, Lebanon refugee camp profiles : <http://www.un.org/unrwa/refugees/lebanon.html>

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

un ensemble de logiciels permettant le traitement spatial de l'information et la réalisation de cartes numériques. Cette caractéristique permet, après numérisation, de comparer les différentes couches et de calculer les différences entre elles. De plus il est utilisé pour générer le modèle numérique de terrain (MNT). La télédétection est une discipline consistant en l'observation et l'étude à distance des objets géographiques et des phénomènes physiques et naturels, à l'aide de capteurs embarqués à bord de satellites. Les images satellitaires permettent la visualisation du terrain ce qui facilite l'extraction de toutes les informations utiles à l'exploitation de notre étude telle que l'occupation du sol.

Les données utilisées sont les suivantes :

- a) Des cartes topographiques au 1/20000 pour la numérisation de la ligne de côte.
- b) Des points de contrôles pour réaliser le géoréférencement.
- c) Des points de nivellation ayant pour but d'améliorer la précision du MNT.
- d) Des images Ikonos ayant une résolution de 1 m pour la numérisation de la ligne de côte ainsi que la mise à jour de la carte d'occupation/utilisation du sol.
- e) Des cartes représentant la géomorphologie, la géologie, l'occupation/utilisation du sol, et la répartition de la population.

En considérant la montée du niveau de la mer comme un risque pouvant causer de graves dégâts sur le littoral, ce problème doit être sujet d'une politique publique visant à limiter au maximum possible ses conséquences. Cette politique doit d'autant plus prendre en considération l'importance du littoral comme lieu où se localise la plupart des ressources du pays.

Cette étude débute d'abord par trois chapitres respectivement consacrés à une présentation de la zone côtière, du phénomène de la montée des eaux marines et des données qui sont utilisées. Sur la base de ces chapitres introductifs, la simulation de l'élévation du niveau de la mer sur la côte libanaise et l'évaluation des impacts sont présentées, ensuite la modélisation de l'indice de vulnérabilité côtière est présentée avant l'exposé de l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

La zone côtière du Liban revêt une importance particulière en raison de la présence de la plupart des ressources du pays dans cette région. La richesse morphologique, socio-économique et démographique de cette région en fait une zone intéressante pour effectuer une étude scientifique. La majorité des données statistiques citées dans ce chapitre résulte du travail que j'ai effectué.

I. Localisation et caractéristiques

Situé sur le versant oriental de la Méditerranée, le littoral libanais s'étend sur 210 km entre les coordonnées suivantes : 35,118° ; 33,093° Sud et 35,980° ; 34,648° Nord (voir carte du Liban, annexe 2).

La zone d'étude a été déterminée suivant une zone tampon d'1km à partir du trait de côte et de la courbe de niveau de 40 m, ceci afin de déterminer les zones vulnérables aux inondations. Le choix de la courbe de niveau de 40 m est largement supérieur à tous les *scenarii* et les études faites sur la Méditerranée. De plus, le choix d'une distance d'1 km permet de distinguer les pentes fortes pour une présentation pertinente de la topographie côtière.

Cette zone a une superficie de 388 km², ce qui correspond à 3,79 % de la superficie totale du Liban.

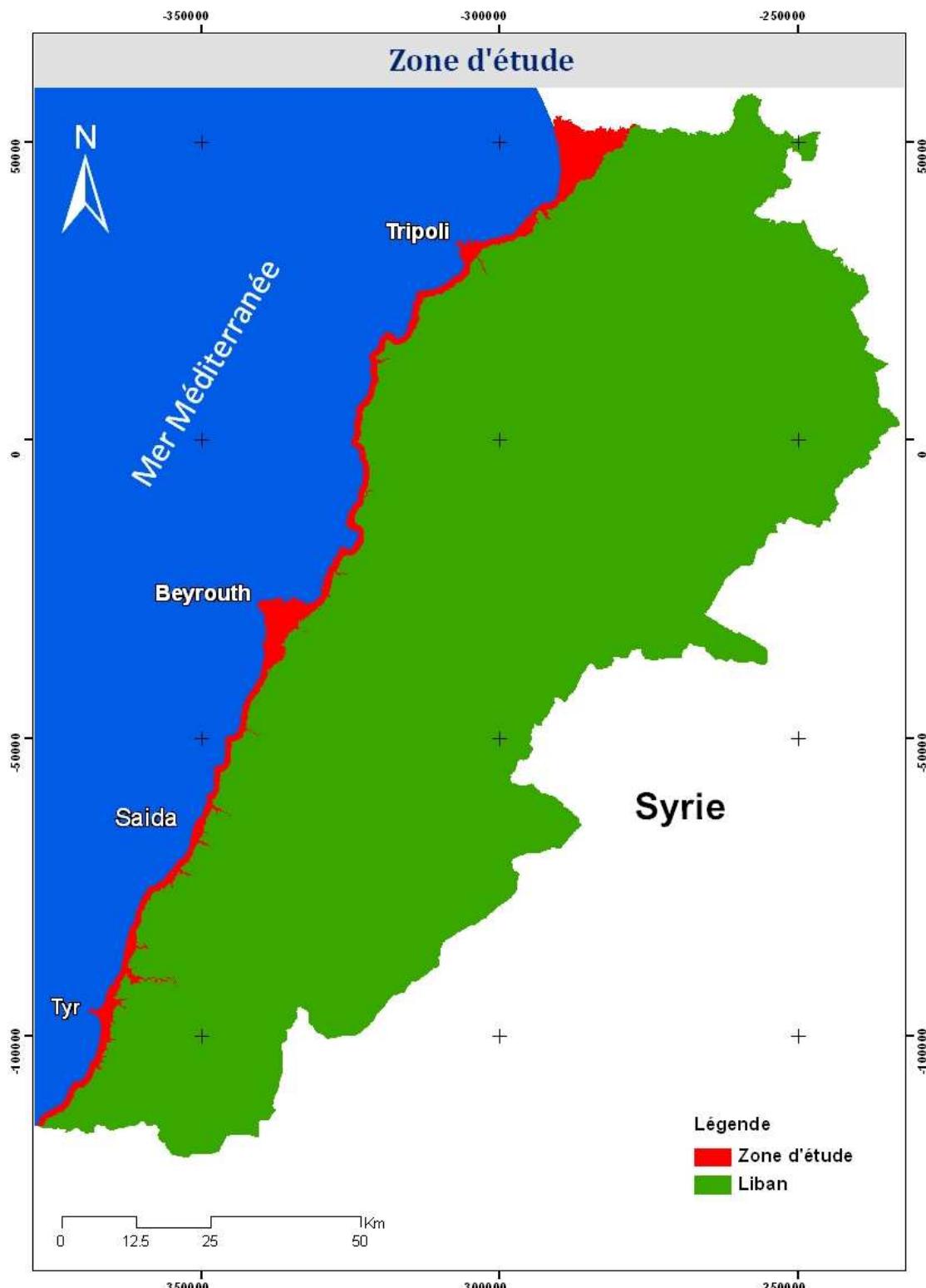
L'occupation du sol de cette zone peut être classée selon la classification du « MOS-L »⁵:

- Les territoires agricoles correspondent à 200 km² (soit 51,6% de la superficie de la zone d'étude).
- Les territoires artificialisés correspondent à 120 km² (soit 31%).
- Les surfaces boisées correspondent à 35 km² (soit 9%).
- Les surfaces à végétation herbacée correspondent à 18 km² (soit 4,6%).
- Les terrains naturels sans ou avec peu de végétation correspondent à 7 km² (soit 1,8%).
- Les réseaux routiers, fleuves et rivières correspondent à 6 km² (soit 1,5%).
- Les marais et surfaces en eau correspondent à 2 km² (soit 0,5%)

Cette zone compte 1 645 000 habitants ce qui est équivaut à 42,1% du total de la population du Liban.

⁵ Mode d'occupation du sol du Liban (cf. annexe 3 [source : atlas du Liban]).

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 1 : carte représentant la zone d'étude.

II. Géomorphologie et topographie

Le littoral libanais est caractérisé par la diversité dans sa géomorphologie qui se manifeste par la présence des plages, des falaises, des microfalaises et des rivages artificiels. Le tableau suivant récapitule les longueurs des différents types géomorphologiques du littoral libanais calculées après réalisation de la mise à jour de la carte géomorphologique (voir page 43).

Nature	Longueur (km)	Longueur (%)
Plage sableuse	38,8	10,4
Plage rocheuse	45	12
Plage de galet	41,5	11
Falaise	23,1	8
Microfalaise	99,4	26,6
Rivage artificiel	119,5	32
Total	374,2	100

Tableau 1 : les différents types géomorphologiques du littoral libanais en 2005.

D'après ce tableau, le littoral présente trois dominantes ayant le même pourcentage : les rivages artificiels, l'ensemble des falaises et les différentes plages.

Il est à noter que les rivages artificiels ont subi une augmentation remarquable entre 1962 et 2005, allant de 12,568 km (4,8%) en 1962 à 119,482 km (32%) en 2005. Cette augmentation est due au développement du tourisme au Liban durant cette période.

La topographie du Liban est caractérisée par sa grande diversité ainsi que la proximité des éléments, tout particulièrement la courte distance entre le littoral et la montagne. En effet, une demi-heure en voiture suffit pour traverser la plaine côtière et accéder à la montagne.

Des vastes régions côtières s'étendent sur une altitude inférieure à 40 m surtout dans le Nord et le Sud du Liban. Leurs largeurs varient entre 50 m à Batroun et 12 km dans la plaine du Akkar.

III. Géologie

La géologie de cette zone du Liban est variée. Le Quaternaire est le plus répandu avec une superficie de 256,7 km² (66,1%), vient ensuite le Cénomanien avec une superficie de 61,6 km² (15,9%), puis le Miocène avec une superficie d'environ 36,8 km² (9,5%). Les autres couches qui correspondent à 33,1 km² (8,5%) se repartissent entre le Néocomien, Aptien supérieure, Albien, Turonien, Sénonien, Lutécien, Jurassique et le Pliocène.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

On retrouve le Quaternaire surtout au Nord, à Beyrouth et dans la région de Tyr alors que le Cénomanien est localisé à Jbeil, à Damour et à Naqoura, le Miocène se trouve à Batroun, Chekka et Jounieh et enfin les autres couches se repartissent sur les zones restantes (source : CNRS-L).

IV. Aspects climatiques et océanographiques

La région côtière est caractérisée par un climat méditerranéen humide. L'hiver est doux et pluvieux tandis que l'été est humide et chaud. La moyenne annuelle de la température est de 20,4 °C⁶. L'amplitude de la température à la surface de la mer varie d'une façon remarquable entre l'hiver et l'été. Elle atteint 16 °C pendant l'hiver et 30 °C pendant l'été pour une moyenne annuelle de 23 °C⁷.

Le taux de la salinité est de 39 g/l⁸. D'après les observations de l'IPCC, ce taux à tendance à augmenter. Une inondation pourra entraîner une augmentation de taux de sel des terres côtières et avoir des conséquences sur les productions agricoles.

Le sens du vent est ouest, sud/ouest pour la plupart des jours de l'année avec une vitesse variant entre 3,9 m/s et 8,3 m/s⁹. Ce vent est à l'origine des pluies et des tempêtes qui touchent la côte. Le vent nord/ouest, nord peut être fort et froid et provoquer des chutes de neige sur des altitudes basses.

En Méditerranée l'amplitude de la marée est très faible, elle est de l'ordre de 30 cm¹⁰. La hauteur des vagues diffère selon la période de l'année. Leur propagation est, le plus souvent, de l'ouest - sud ouest⁹. Selon Dr. Tarek SALHAB du centre d'océanographie du Liban, la hauteur moyenne des vagues au Liban est de 4 m.

V. Ressources en eau

Le pourcentage moyen d'humidité est de 68% sur l'ensemble du territoire libanais. Tandis que la moyenne annuelle des précipitations est de 893 mm¹¹. Durant la période de pluie, qui s'étend entre novembre et mai, les précipitations se concentrent sur la région côtière du fait du relief. Les montagnes du mont Liban constituent un réservoir d'eau par l'accumulation des neiges pendant la période des fortes précipitations. Ces

⁶ IDAL - Lebanon Profile : <http://www.idal.com.lb/WhyLebanon.aspx?ID=62>.

⁷ SDATL – Schéma d'Aménagement du Territoire Libanais.

⁸ *Idem*.

⁹ KABBARA Najad, 2005,"Wind and wave data analysis for the Lebanese coastal area-preliminary results", *Lebanese science journal*, vol. 6, n. 2.

¹⁰ ABOUDD – ABI SAAB Marie, 19 février 1987, *Contribution à l'étude des populations micro planctoniques des eaux côtières libanaises*.

¹¹ IDAL - Lebanon Profile : <http://www.idal.com.lb/WhyLebanon.aspx?ID=62>.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

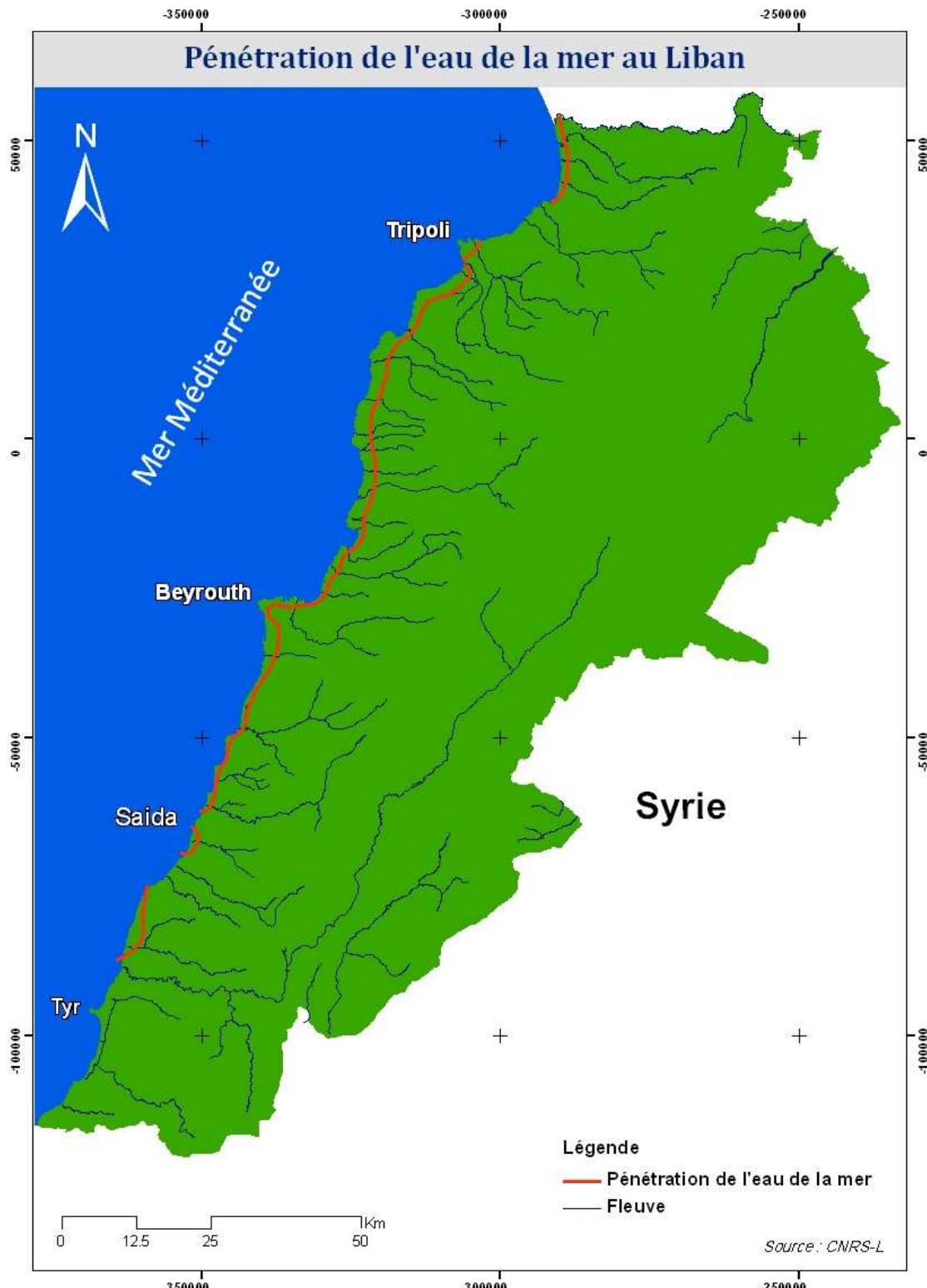
réservoirs peuvent être utilisés pendant la période de sécheresse pour alimenter les nappes souterraines et les fleuves.

Le Liban compte 17 fleuves permanents (Litani, Ibrahim, Abou Ali...)¹². La plupart de ces fleuves se jettent directement dans la mer sans exploitation. En effet, au Liban il n'y a que deux barrages dont un hydroélectrique au bord du lac de Qaraoun.

Plusieurs sources se repartissent tout le long de la côte, dont la plupart est potable. En outre, il existe des sources d'eau sulfureuse qui se trouvent au nord notamment dans la plaine du Akkar. Dans les zones où il n'y a pas de sources, les habitants ont creusé des puits pour l'extraction des eaux souterraines. La profondeur des nappes phréatiques varie selon les régions du fait de la nature géologique du terrain. La surexploitation de ces puits a entraîné une pénétration de l'eau de la mer ce qui a abouti à leur salinisation (voir carte 2). Ce phénomène se concentre dans les régions ayant une densité élevée de population comme à Beyrouth, Tripoli et Saida. D'une manière générale, les réserves d'eau diminuent en raison de l'amoindrissement des précipitations et du fait de l'augmentation de la demande liée à la démographie croissante du Liban.

¹² SDATL.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 2 : carte représentant la pénétration de l'eau de la mer et les fleuves.

VI. Aspects socio-économiques

La plupart des activités socio-économiques sont localisées sur le littoral. Elles se concentrent surtout dans les villes principales : Beyrouth, Tripoli, Saida et Tyr. Le secteur le plus important est celui de l'administration et des services (75%), ensuite l'industrie (15%) et enfin l'agriculture (10%)¹³.

Le domaine de l'administration et des services (touristiques et financiers) est le plus développé au Liban parce qu'il est le plus rentable. Concernant le tourisme un grand nombre d'hôtels et des restaurants sont localisées sur le littoral et la plupart de ces établissements sont construits sur les plages.

L'industrie au Liban est un secteur qui a été longtemps négligé. L'essentiel de la production industrielle concerne le secteur de l'agro-alimentaire. Les secteurs restant sont le textile, l'industrie chimiques, les cimenteries, les aciéries et les productions accumulatives des produits électroménagers.

Bien que le secteur agricole soit peu rentable, la population agricole constitue 40 % de la population active totale¹⁴. La superficie totale des terrains agricoles occupe 247 939 ha (soit 24,2% de la superficie totale du Liban) dont 104 008 ha (soit 41,9% de la superficie totale des terrains agricoles) sont irrigués¹⁵. L'activité agricole se concentre particulièrement dans les plaines côtières (du Akkar, du Damour et celui du Abou al aswad entre Saida et Tyr) et elle est destinée à l'autoconsommation pour 37%¹⁶ des exploitants. En effet, 75% des exploitations agricoles ont une superficie inférieure à 1 ha¹⁷, ce qui diminue les revenus de leur exploitation. L'agriculture sous serre est bien répandue, surtout pour la culture de tomates. Les autres produits agricoles majeurs sont les oliviers, les bananiers et les citronniers.

¹³ Parlement libanais, « La République libanaise dans son histoire - sa politique et sa géographie » : <http://www.lp.gov.lb/lrepublic/default.htm>

¹⁴ Agriculture News.NET, 2004, Nouvelles des affaires agricoles du Proche-Orient : http://agriculturenews.net/index_ar.aspx?Type=Briefnews&ID=7341

¹⁵ Etude réalisée en 1999 par le ministère de l'agriculture : http://www.agriculture.gov.lb/rga/resu_gener.htm

¹⁶ *Idem.*

¹⁷ *Ibidem.*

Chapitre II : Réchauffement climatique : Quelle élévation pour le niveau des mers au Liban ?

1. Étude globale

Plusieurs facteurs sont à l'origine de l'élévation du niveau de la mer. Du fait de l'augmentation de la température, les océans ont subi une expansion thermique. La dilatation thermique de l'eau de la mer est fonction de la température, la pression et la salinité de l'eau¹⁸. De plus, les glaciers des montagnes et des calottes polaires qui subissent une fonte excessive, contribuent à la montée du niveau de la mer. Le tableau 2 présente les pourcentages de contribution des différents facteurs dans la montée de l'eau pour la période 1993-2003.

Facteurs	Pourcentage
Expansion thermique	40-60 %
Fonte des glaciers des montagnes	20-30 %
Calottes polaires	10-20 %
Echanges d'eau (océans - réservoirs continentaux)	< 10 %

Tableau 2 : contribution des différents facteurs dans la montée de l'eau de la mer (1993-2003)¹⁹.

Plusieurs satellites altimétriques ont vocation à observer l'élévation du niveau de la mer. Le satellite Topex/Poseidon a été le premier à collecter les informations sur la surface océanique pendant la période entre 1992 et 2006. Il a été ensuite remplacé par le satellite Jason-1 déjà en orbite depuis 2001. De plus, les outils d'analyse marégraphique enregistrent continuellement le niveau moyen de la mer à sa surface.

Selon l'IPCC, depuis 1961, le niveau moyen de la mer a subi une augmentation de 1,8 [1,3-2,3] mm/an. Durant la période 1993-2003, les observations satellitaires ont enregistré une montée du niveau marin de l'ordre 3,1 mm/an²⁰. Selon ces mêmes observations, la montée n'est pas uniforme suivant les régions. Dans certaines régions, l'eau s'élève plus que le niveau moyen et dans d'autres elle diminue. Le dernier rapport publié par l'IPCC conclut que le niveau de la mer devrait continuer d'augmenter durant le XXI^{ème} siècle pour atteindre entre 18 et 59 cm au tournant de l'année 2100.

¹⁸ Température et densité : <http://isity.univ-tln.fr/~lecalve/oceano/fiches/fiche3C.htm>

¹⁹ LOMBARD Alix, « Les variations actuelles du niveau de la mer : observations et causes climatiques », *La Météorologie*, n°59 – novembre 2007, p. 20.

²⁰ ROOS Maurice, January 2009, "Sea level rise : an increasing risk to California water projects", *Water resources impact* vol.11 n.1.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

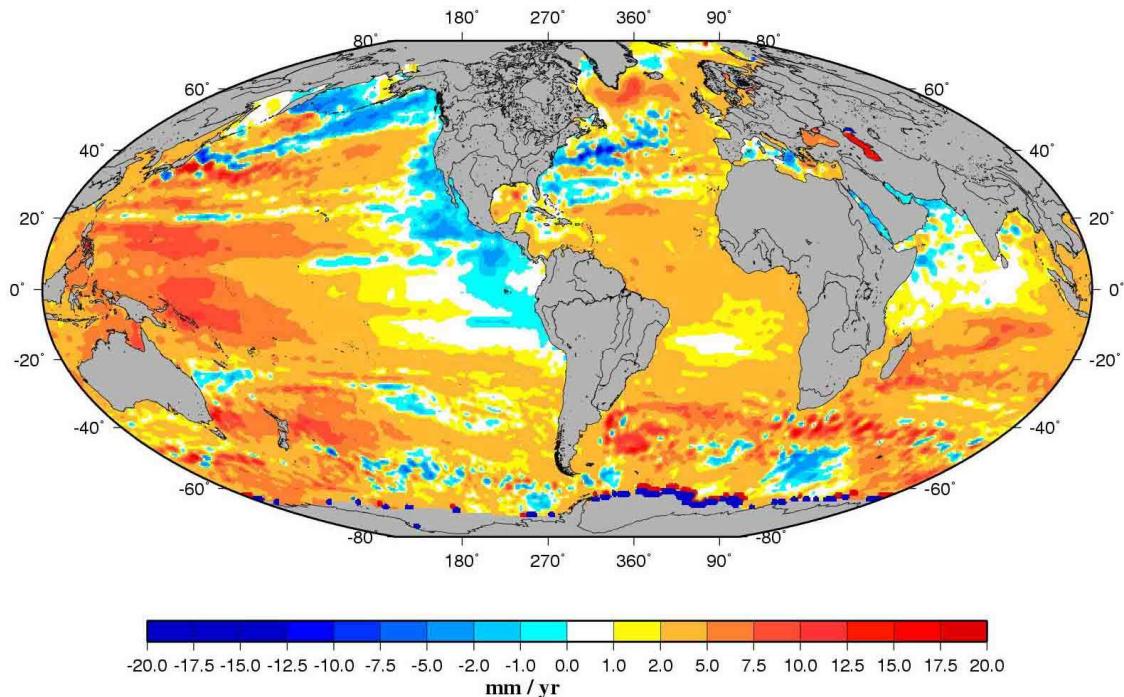


Figure 2 : figure présentant les vitesses de changement du niveau marin mondiale entre 1993 et 2006 mesurée par les satellites altimètres²¹.

2. Le niveau de l'eau dans la Méditerranée

Située entre les trois continents de l'Asie, l'Europe et l'Afrique, la Méditerranée s'étend sur 3000 km d'est en ouest et sur 1500 km du nord au sud. Elle est reliée avec l'Atlantique par le détroit de Gibraltar, avec la mer Noire par les détroits des Dardanelles et du Bosphore, et avec la mer Rouge par le canal de Suez.

Plusieurs modèles présentant la montée de l'eau de la Méditerranée ont été réalisés. Ils présentent bien la différence de cette montée entre les parties de cette mer. La figure 3 présente l'une de ces modèles.

²¹ http://www.legos.obs-mip.fr/fr/equipes/gohs/resultats/images/b1_fig2_new.jpg

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

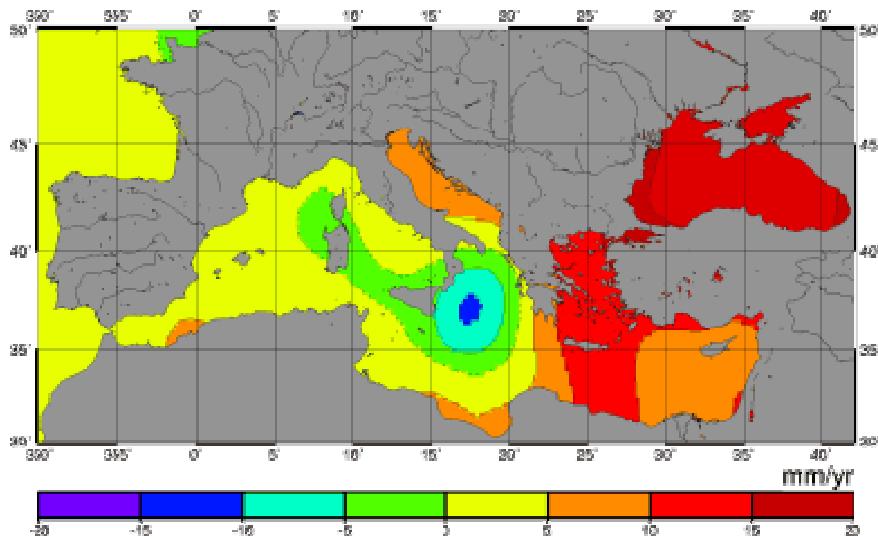


Figure 3 : modèle présentant les tendances du niveau marin de la méditerranée du Janvier 1993 à Juillet 2000²².

Le niveau de la mer à l'est de la Méditerranée augmente déjà de façon remarquable en raison de l'augmentation de la température²³. En 2002, Cazenave et al. ont suivi les changements dans les différents bassins et sous-bassins de la Méditerranée en recueillant les données du satellite Topex/Poséidon pour la période 1993-1998 et les données du satellite ERS-1 pour la période 1992-1996²⁴. Selon Cazenave et al., le niveau marin moyen de la Méditerranée va augmenter de $7 \pm 1,5$ mm/an. Mais cette valeur diffère selon les bassins et les sous-bassins. Le bassin levantin va augmenter de 25 à 30 mm/an tandis que pour la versant ouest la montée sera moins importante.

Une autre étude a été faite par Fenoglio et al. en 2002 en fusionnant les données des satellites Topex/Poséidon, ERS-1 et ERS-2 sur une période de 9 ans²⁵. Selon ce dernier rapport le niveau de la Méditerranée doit augmenter en moyenne de 2,2 mm/an, avec une forte différence entre les versants ouest et est de la Méditerranée (soit 0,4 mm/an et 9,3 mm/an).

²² Mar. 2001: *Mean rise in sea level is only part of the story*: Aviso : <http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/idm/2001/mar-2001-mean-rise-in-sea-level-is-only-part-of-the-story/index.html>

²³ *Idem*.

²⁴ [Cazenave et al., 2002] Cazenave, A., Bonnefond, P., Mercier, F., Dominh, K., Toumazou, V. (2002). Sea level variations in the Mediterranean Sea and Black Sea from satellite altimetry and tide gauges. *Global and Planetary Change* 34, 59–86.

²⁵ [Fenoglio-Marc, 2002] 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* 27, 1419–1431.

3. Les *scenarii* prévus au Liban

Le rapport de l'IPCC¹ constitue une source importante pour avoir une idée sur le changement climatique. Pour cela, ce rapport avec les études réalisées par Cazenave et Fenoglio ont été choisis pour prévoir les *scenarii* en 2100. Les prévisions de l'IPCC sont résumées dans le tableau 3:

Année	Elévation	Moyenne
1995	15 - 95 cm	55 cm
2001	9 - 88 cm	48,5 cm
2007	18 - 59 cm	38,5 cm

Tableau 3 : les trois prévisions de l'IPCC sur la montée du niveau marin.

D'après les études réalisées par Cazenave et Fenoglio deux *scenarii* sont possibles en supposant que la progression de l'élévation du niveau de la mer suit une courbe linéaire entre 2000 et 2100 : le premier prévoit une montée de 70 cm du niveau marin moyen sur l'ensemble de la Méditerranée, tandis que l'autre prévoit une montée de 93 cm dans l'est de la Méditerranée. La moyenne de toutes ces valeurs est de :

$$\frac{55+48,5+38,5+70+93}{5} = 61 \text{ cm.}$$

L'étude faite par Eric J. Fitch stipule que l'élévation de la température de l'océan va entraîner une augmentation du nombre des ouragans et l'accroissement de leur intensité. Mais cette hypothèse reste polémique²⁶.

En prenant en considération le calcul fait ci-dessus les *scenarii* projetés sont résumés dans le tableau 4 :

	Variation (2000-2100)	Raison
<i>Scenario 1</i>	60 cm	Moyenne
<i>Scenario 2</i>	90 cm	Moyenne + marée
<i>Scenario 3</i>	500 cm	Moyenne + marée + vagues
<i>Scenario 4</i>	750 cm	Conditions extrêmes

Tableau 4 : présentation des différents *scenarii* proposés.

Pour le *scenario 1*, la variation correspond à la moyenne des valeurs des montées obtenues par l'IPCC et par les études de Cazenave et Fenoglio, tandis que pour le *scenario 2* la variation correspond au résultat obtenu par l'addition de cette moyenne à la valeur du coefficient de marée. La variation du *scenario 3* correspond à la variation précédente plus la hauteur des vagues et enfin celle du *scenario 4* correspond aux conditions extrêmes d'élévation du niveau moyen de la mer.

²⁶ Eric J. Fitch, "Sea level rise: concerns for management of land and freshwater resources ... an overview", *Water resources impact*, Janvier 2009, vol. 11, n.1, p. 4.

Chapitre III : Préparation des données

Introduction

Ce chapitre est une présentation des données utilisées dans l'étude. Ces données sont en mode raster et vecteur et proviennent toutes de la DAG et du CNRS-L. Les différents points de ce chapitre abordent l'apport de la télédétection et des SIG pour l'étude, la présentation des données, le système de coordonnées et la référence altimétrique.

L'apport de la télédétection et des SIG

Dans cette étude, les outils de la télédétection ont été mis en œuvre pour :

- i. La numérisation de la ligne de côte. La télédétection permet de visualiser le terrain et la mer ce qui facilite leur différenciation et ainsi la numérisation de la ligne côtière.
- ii. La différenciation entre les différents types géomorphologiques ; la distinction entre les plages sableuses, les plages rocheuses et les plages de galets est assurée. En outre, les rivages sont nettement discernables.
- iii. La mise à jour de la carte d'occupation/utilisation du sol. Le travail de photo-interprétation est facilité grâce à la qualité et à la haute résolution des images satellites.

Le système d'information géographique utilisé *ArcGIS 9.2*, fournit plusieurs outils grâce à sa suite logicielle qui facilite notre travail (exemple : les outils de numérisation, de calcul, de l'analyse et de statistique). Il a été utilisé dans l'élaboration des différentes cartes et pour le calcul des données vectorielles. De plus, ce logiciel permet de réaliser des MNT par la technique de triangulation.

1. Les Données

1.1. Données raster

Les données raster sont des données géographiques numériques composées de pixels comportant des informations. Dans cette étude, les données raster utilisées sont des cartes topographiques et des images satellitaires à haute résolution.

a) Cartes topographiques

Les cartes topographiques ont été délivrées par la DAG (Direction des affaires géographiques) et datent de 1962. Parmi les informations utiles elles présentent les courbes de niveau de 10 m à une échelle de 1/20000 et couvrant tout le littoral. De plus

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

elles contiennent des points de nivellation ayant une précision métrique. Chaque carte a un quadrillage permettant leur localisation spatiale.

b) Images Ikonos

Les images Ikonos utilisées pour la réalisation du rapport ont été acquises en 2005. Images à haute résolution (1 m), ont pour dimension 11 km × 11km couvrant ainsi la totalité du littoral. Il existe deux types de ces images :

1. Une multi-spectrale formée de 4 bandes : le rouge, le vert, le bleu et le proche infrarouge avec une résolution de 4 m.
2. Une panchromatique noir et blanc ayant une résolution de 1 m.

Par fusionnement de ces deux types d'image, il résulte une image multi-spectrale à résolution de 1 m. Dans ce rapport, les images utilisées sont composées des trois bandes (dont le rouge, le vert et le bleu).

1.2. Données vectorielles

Les données vectorielles correspondent à des objets graphiques élaborés par un SIG qui associe à ces données un référentiel géographique. Les vecteurs existent sous trois formes géométriques : le point, la ligne et la surface.

a) Points de nivellation

Ces points ont été calculés par la DAG en 2002 à l'aide d'un niveau. Ils comptent 670 points répartis tout le long de la côte. L'origine altimétrique de ces points est située dans le quartier de Saint Georges à Beyrouth. Leur précision est de l'ordre du centimètre. Ils sont utilisés pour la création du MNT dans le but d'améliorer sa précision.

b) Courbes de niveau

Ces courbes de niveau de 10 m ont été extraites des cartes topographiques de 1962. Ces courbes de niveau ont été numérisées par le CNRS-L. Elles sont utilisées pour la création du MNT.

c) Carte d'occupation du sol

Cette carte a été faite par le CNRS-L en 2003. Elle adopte la nomenclature du MOS-L. Elle a été faite par photo-interprétation à partir d'images Ikonos couvrant toute la région côtière.

d) Ligne présentant la pénétration de l'eau de mer

C'est une ligne présentant la pénétration de l'eau de la mer dans la zone côtière. Elle a été faite par le CNRS-L en 2003 (voir carte 2).

e) Carte géologique

Cette carte réalisée par le CNRS-L en 2002, contient les différentes couches géologiques présentent dans la zone côtière libanaise. Elle est utilisée pour évaluer l'impact de la montée de l'eau sur les nappes phréatiques.

f) Carte de la répartition de la population – Atlas du Liban

Cette carte a été faite par le CNRS-L. Elle présente la distribution de la population sur les cazas²⁷ du Liban. Cette répartition a été basée sur les statistiques faite par l'ACS (Administration centrale de la statistique) en 2002. Elle est utilisée pour évaluer l'impact de la montée de l'eau sur la population.

g) Carte géomorphologique

Cette carte a été réalisée par Paul Sanlaville en 1977 et numérisée par le CNRS-L en 2003. Elle présente les différentes couches géomorphologiques côtières. Elle est utilisée après mise à jour dans le calcul de l'indice de vulnérabilité côtière.

2. Système de coordonnées

Le choix d'un système de coordonnées s'avère important afin de pouvoir se localiser spatialement. Le système de coordonnées adopté est le Levant, et la projection est la pseudo-stéréographique ayant l'origine située à Palmyre en Syrie. L'ellipsoïde de ce système est le Clarke IGN 1880. La longitude du méridien central est 39,15° alors que la latitude d'origine est de 34,65°. L'excentrement en X et Y est nul.

3. La référence altimétrique

L'objectif de cette étude étant de réaliser un MNT, il est nécessaire d'adopter une référence altimétrique. Au Liban, l'origine des altitudes des points de nivellation est celle adoptée par la DAG, située dans le quartier de Saint Georges à Beyrouth. La DAG a posé sur ce point un marégraphe pour suivre la variation du niveau moyen de la mer. Ce marégraphe précise le niveau zéro de l'altitude correspondant au niveau moyen de la mer. Pour cela, ce point a été adopté comme référence dans cette étude. Concernant l'altitude de ligne de côte, nous partons de l'hypothèse qu'au moment de la prise des images Ikonos, l'altitude de cette ligne était nulle.

Conclusion

Ce chapitre a présenté la collecte et la préparation préalable des données raster et vecteur afin de procéder à la simulation et l'étude des impacts de l'élévation du niveau de la mer en fonction des quatre *scenarii* prédéfinis.

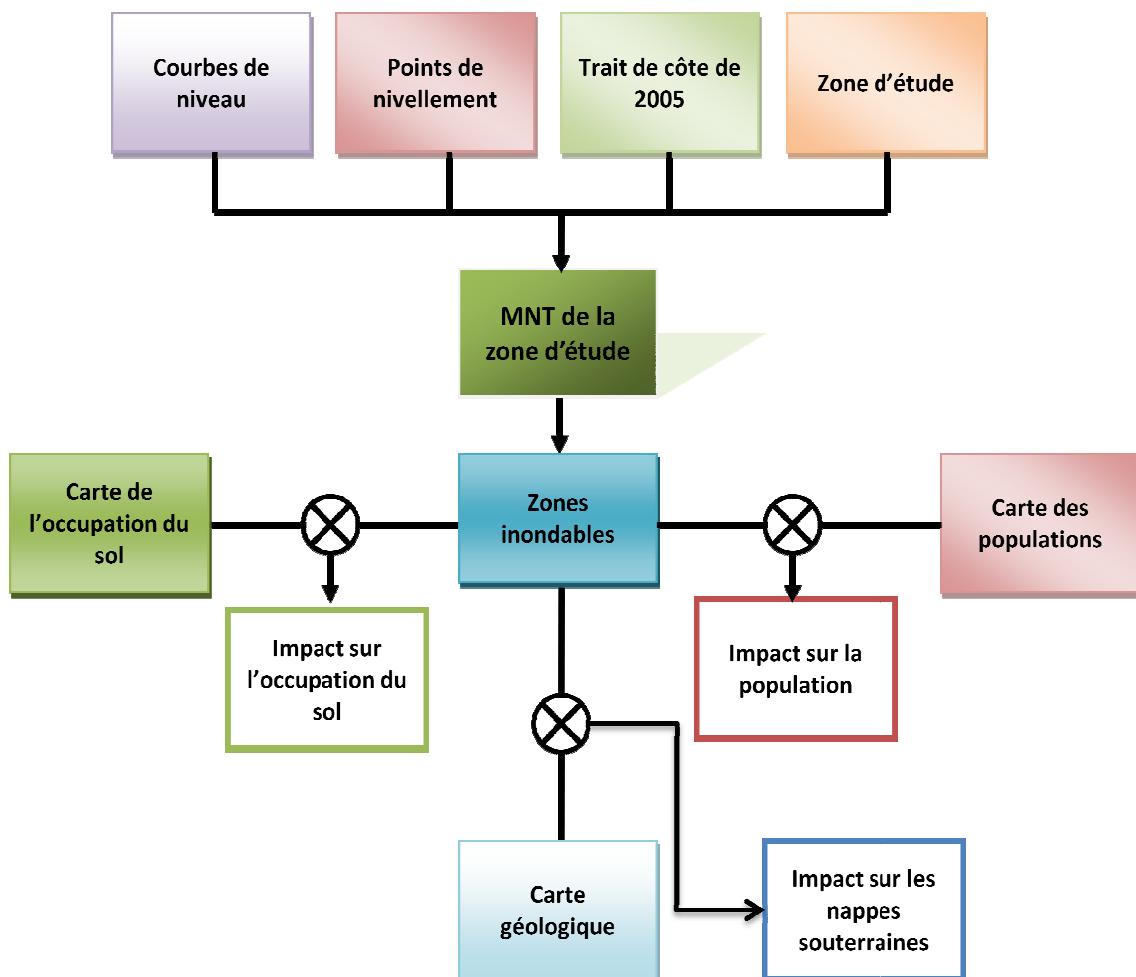
²⁷ Unité du découpage administratif du Liban. Le Liban est composé de 26 cazas regroupés en 6 Mohafazats.

Chapitre IV : Simulation de l'élévation du niveau de la mer sur la côte libanaise et évaluation des impacts

Introduction

Cette partie de l'étude est destinée à évaluer les zones inondables de la côte libanaise afin de pouvoir estimer l'impact de la montée du niveau marin sur le littoral libanais. Pour cela un MNT doit être créé dans le but d'extraire les zones inondables correspondantes aux différents *scenarii*. Une fois les zones inondables déterminées, elles sont croisées avec la cartes d'occupation de sol, la carte géologique et celle de la population afin d'évaluer l'impact de la montée marine.

Méthodologie à suivre



1. Prétraitement des données

1.1 Le géoréférencement

Le géoréférencement est un traitement d'image consistant à lier une image à un référentiel. Il a fallu procéder au géoréférencement des cartes topographiques délivrées afin de l'exploiter dans le SIG. Le géoréférencement a été effectué à partir du quadrillage des cartes dont la projection est pseudo-stéréographique.

Dans le logiciel l'*ArcMap* 9.2 le géoréférencement est facilité par l'outil « ajustement spatial ». Grâce à ces outils, l'intégration des coordonnées du point choisi se fait en cliquant sur chaque intersection du quadrillage. L'outil « ajustement spatial » calcule de même l'erreur moyenne quadratique totale RMS (*Root Mean Square*). Cette erreur donne une idée de la précision du géoréférencement. Pour les cartes couvrant la zone d'étude, la valeur de cette erreur est de 0,7 m (1/4 du pixel) et 2 m (3/4 du pixel). Pour chaque carte, 5 points répartis sur les côtés et au centre de la carte ont été sélectionnés pour le géoréférencement, soit 130 points au total.

L'erreur produite pendant le géoréférencement est due à l'échelle avec laquelle les points de contrôle ont été saisis ainsi qu'à la précision de la prise de ces points. L'*ArcMap* fait le calcul de l'erreur moyenne quadratique (RMS), puis il la compense en utilisant la technique des moindres carrés grâce à des polynômes du premier ordre (selon le choix de l'opérateur).

Des écarts apparaissent après assemblage des cartes topographiques. Ces écarts sont dus soit à une erreur pendant le géoréférencement, soit à ce que ces cartes n'ont pas la même date. La figure 4 représente ces écarts.



Figure 4 : écarts de 10 m et 6 m respectivement.

2. Création du Modèle numérique du terrain

Le Modèle numérique du terrain (MNT) est un modèle informatique représentant la topographie de terrain. Dans cette étude, le MNT a été créé dans le but de modéliser la topographie de la côte libanaise, afin d'évaluer l'impact de la montée marine sur cette côte. Du fait de leur disponibilité, les données utilisées sont, en mode raster les cartes topographiques et en mode vecteur les courbes de niveau, la ligne de côte de 2005 et les points de nivellation. Enfin pour pouvoir élaborer ce MNT, il faut que la ligne de côte soit numérisée.

2.1. Préparation des données supplémentaires

2.1.1 - Récupération des points de nivellation

Sur les cartes topographiques il existe des points de nivellation datant de 1962. Ces points ont été faits par la DAG. Ils sont distribués sur toute la zone côtière et ont une précision métrique.

Pour les récupérer, un fichier de forme ponctuel a été créé avec un champ attributaire pour intégrer l'altitude. Chaque point est spatialement localisé en planimétrie et on lui attribue une altitude. Ce fichier de forme sera utilisé ultérieurement dans la création du MNT comme point de contrôle pour améliorer la précision de ce modèle.

Des difficultés ont été rencontrées lorsque des points ne sont pas discernables dans certaines zones. Ces points ont été négligés.



Figure 5 : difficulté à saisir l'altitude.

2.1.2 - Affectation de l'altitude sur la ligne de côte

La ligne de côte utilisée est celle du 2005²⁸. Comme cette ligne n'a pas une altitude nulle tout au long du littoral, ce qui est dû à la présence des rivages artificiels, il

²⁸ Voir chapitre V, paragraphe 2.1 p. 45 pour le plus d'information sur la numérisation de la ligne de côte.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

s'avère important d'affecter à chaque zone une altitude correspondante. Après plusieurs observations, une altitude moyenne de 3 m a été adoptée pour les digues, les ports et les zones de remblai. Pour l'aéroport de Beyrouth et la zone de Raouché (Beyrouth ouest) l'altitude a été affectée en se référant aux points de nivellation proches. La ligne de côte a été segmentée afin d'attribuer à chaque segment une altitude.

2.2. Élaboration du MNT

L'élaboration du MNT bénéficie des courbes de niveau, des points de nivellation et de la ligne côtière. Il se limite à la zone d'étude. Le MNT est créé à partir de la barre d'outils *3D analyst* disponible sur *ArcMap*. Le logiciel crée un réseau irrégulier de triangles puis il calcule les différentes altitudes des points par l'interpolation de couches.

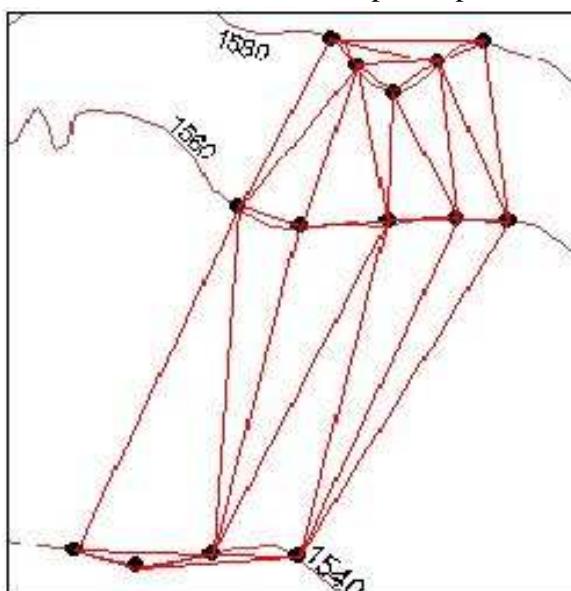


Figure 6 : réseau irrégulier de triangles²⁹.

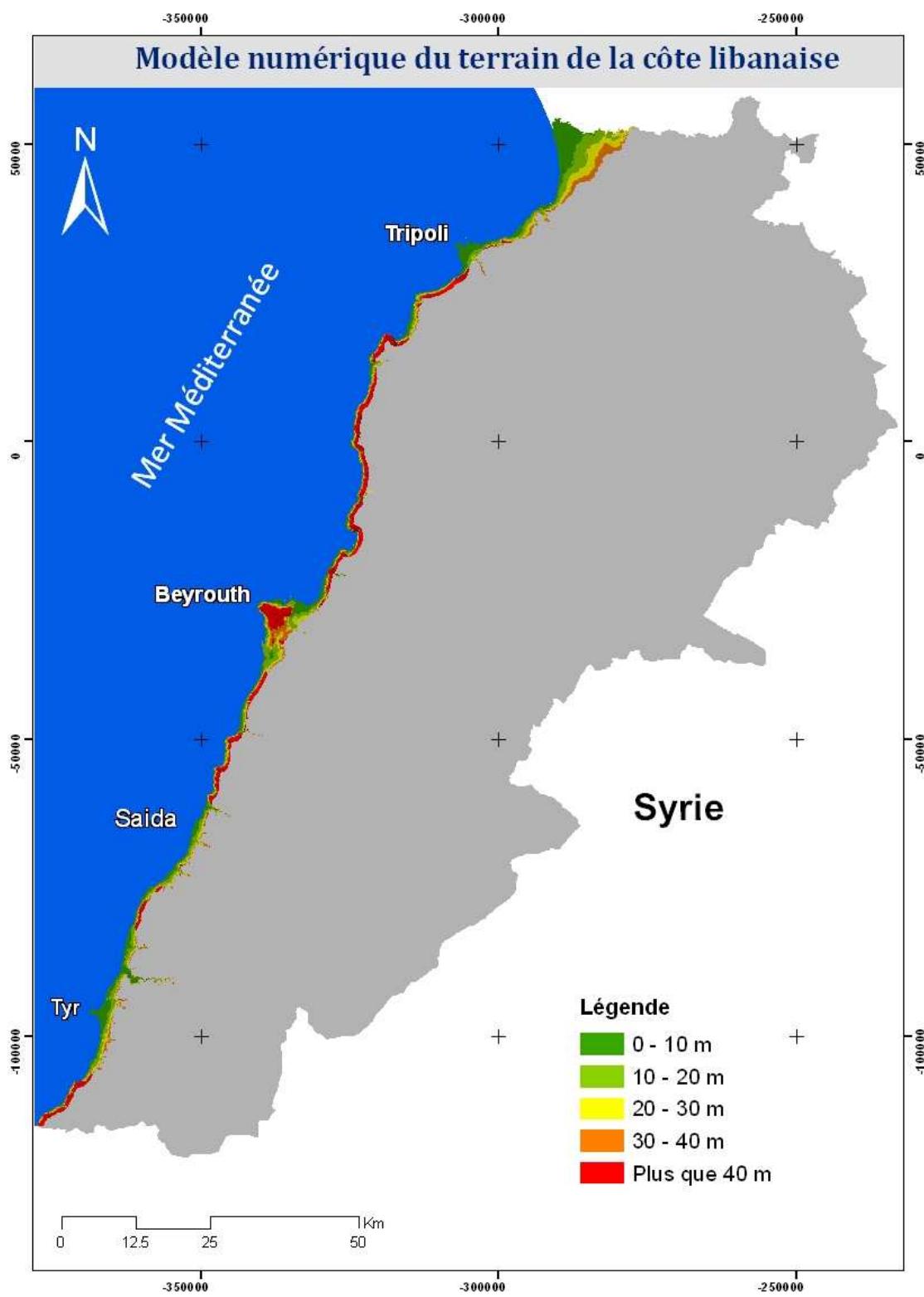
Pour affiner la précision du MNT, les points d'intersection entre les courbes de niveau et les fleuves ont été récupérés dans le fichier des points de nivellation. Dans ce cas, le MNT est obligé de passer par ces points ce qui assure une présentation correcte de la morphologie des versants des fleuves.

2.2.1 – Cartographie des *scenarii*

Une fois le MNT élaboré, les différents *scenarii* peuvent être cartographiés. Suivant ces *scenarii*, une génération de courbes a été produite en fonction du MNT. Ensuite toutes les courbes non concernées par les *scenarii* ont été supprimées. Enfin pour obtenir un fichier de forme exploitable de type polygone, les polylignes (la ligne de côte et les courbes de niveau) ont été converties en polygone pour chaque *scenario*.

²⁹ TINNotes : http://www.ian-ko.com/ET_Surface/UserGuide/tinnotes.htm

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 3 : Modèle numérique du terrain de la côte libanaise.

2.3. Erreur du MNT

L'origine des points de nivellation adoptée par la DAG est le niveau moyen de la mer, l'altitude de chaque point correspond à la différence entre l'altitude d'un point et le niveau moyen de la mer au Liban, ce qui convient à notre étude. D'après l'IPCC, le niveau de la mer a augmenté de 1,8 mm/an depuis 1961, donc de 1962 à 2002 une différence de 7,2 cm entre les origines des points de nivellation s'est produite. Comme le niveau moyen de la mer est susceptible d'évoluer, l'origine adoptée dans la suite de l'étude est celle de l'année 2002.

Le calcul altimétrique du MNT sur *ArcMap* se fait par la technique de triangulation. Ce logiciel engendre des triangles entre chaque courbe de niveau, entre chaque point de nivellation et entre les courbes de niveau et les points de nivellation, pour faire l'interpolation et enfin élaborer l'altitude convenant. La figure suivante explique cette technique.

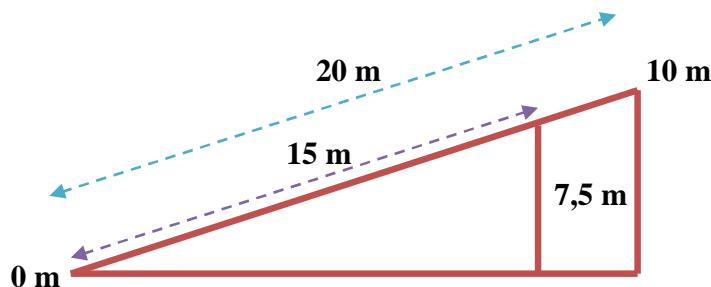


Figure 7 : le processus d'interpolation

Du fait que les *scenarii* adoptés dans cette étude n'excèdent pas 10 m d'altitude, l'essentiel est que la partie située entre 0 et 10 m soit la plus précise possible afin d'obtenir les meilleurs résultats. Si les courbes de niveau de 10 m sont uniquement utilisées pour le calcul de MNT, toute la partie entre 0 et 10 m est présentée par une ligne droite, ce qui peut ne pas être le cas sur le terrain. Pour cela, l'utilisation des points de nivellation a servi à améliorer la présentation du terrain.

Pour estimer la qualité du MNT réalisé, la méthode suivie consiste à faire une comparaison entre le modèle et des points de nivellation non utilisés dans son calcul. Parce que l'erreur n'est pas linéaire, un calcul de l'erreur moyenne quadratique (RMS) est réalisée afin d'obtenir une valeur cohérente. Pour cela 16 points répartis sur tout le MNT ont été utilisés. La valeur de cette erreur est d'environ ± 48 cm.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

Altitude sur le MNT	Altitude du point de contrôle	Déférence	Déférence au carré
5,9	6,2	0,2	0,03
7,2	7,8	0,6	0,4
6,4	6,6	0,2	0,04
18	18,1	0,1	0,01
15,4	15	-0,4	0,15
7,04	5,8	-1,2	1,5
6,4	7	0,6	0,32
10,5	10	-0,5	0,24
6,6	7,1	0,4	0,17
4,7	4,5	-0,3	0,07
6,8	6,7	-0,1	0,02
7,3	7,5	0,2	0,04
6,2	5,9	-0,3	0,06
4,7	5,3	0,6	0,3
4,6	4,4	-0,2	0,06
6,7	6,1	-0,6	0,35
RMS		0,48	

Tableau 5 : présentation de la différence entre le MNT et les points de nivellation (m).

Cette erreur de ± 48 cm sur le MNT influe sur la précision du travail. Son effet est surtout localisé dans les régions ayant une pente faible (entre 1 et 8%). Pour ces pentes, une erreur de ± 48 cm en altitude induit des erreurs en planimétrie variant entre ± 6 m et ± 48 m. Ces dernières correspondent à une erreur sur la largeur des zones inondables. Cette erreur ne sera pas prise en considération dans la suite de l'étude.

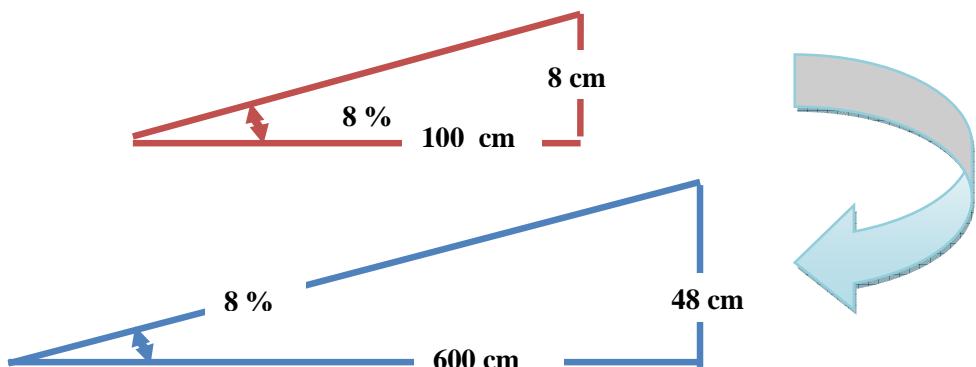


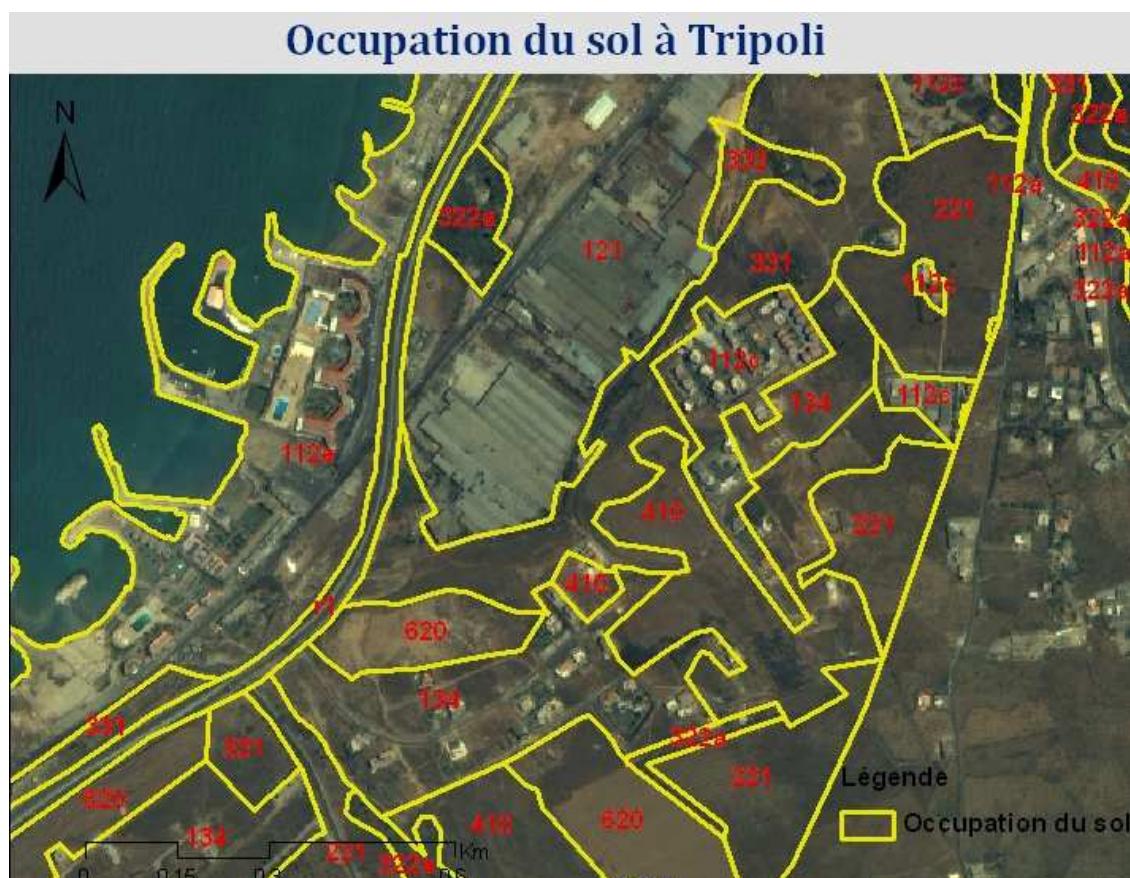
Figure 8 : calcul de l'erreur en planimétrie.

Conclusion

La méthode présentée dans ce chapitre pour l'élaboration du MNT est la seule possible. Ce MNT constitue la base de notre étude, donc plus le modèle est précis, plus notre étude est fiable.

3. Mise à jour de la carte d'occupation du sol

La carte d'occupation du sol de la zone côtière a été faite par le CNRS-L en 2003 suivant la nomenclature utilisée dans le MOS-L. La mise à jour de cette carte a été réalisée par photo-interprétation en utilisant les images Ikonos acquise en 2005. Le travail de mise à jour consiste à changer le découpage et les attributs du fichier de forme de la carte d'occupation du sol. La barre d'outils *Editor* contient tous les outils pour accomplir cette tâche. L'échelle sur laquelle la mise à jour a été faite varie afin de pouvoir distinguer les différents éléments de l'image (entre 1/10000 et 1/5000).



Carte 4 : carte d'occupation du sol avec une image Ikonos (voir annexe 3).

Le niveau 1 est composé des catégories suivantes : les territoires artificialisés, les territoires agricoles, les surfaces boisées, les surfaces à végétation herbacée (naturelles), Les terrains naturels sans ou avec peu de végétation (non productif), les réseaux routiers, fleuves et rivières et enfin les marais et les surfaces en eau. Chacune de ces catégories est composée de plusieurs sous catégories plus détaillées³⁰.

³⁰ Le MOS-L est composé de 4 niveaux.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

Les images Ikonos utilisées sont composées de trois bandes (dont le rouge, le vert et le bleu). Les difficultés dans cette phase de travail se manifestent par l'absence de la bande proche infrarouge (IR) dans les images Ikonos délivrées ainsi, la plupart des éléments sur le terrain peuvent être distingués à l'exception de types d'arbres dans les forêts. En effet, la bande proche IR permet de différencier les différents types d'arbres de forêts or cela n'est pas possible avec les couleurs dans le spectre visible.

4. Méthodes d'évaluation des risques d'inondation

4.1. Population vulnérables aux inondations

La carte des populations vulnérables aux inondations a été réalisée afin d'étudier l'impact de la montée marine sur les populations vivant près des côtes. Les populations sont réparties suivant le découpage administratif des cazas. La méthode suivie consiste à évaluer les populations vulnérables en utilisant le calcul de la superficie des zones urbanisées résidentielles. Il s'agit de créer un fichier de ces zones urbanisées résidentielles comprenant les informations du nombre d'habitant et du nom du caza dans lequel ces zones se trouvent.

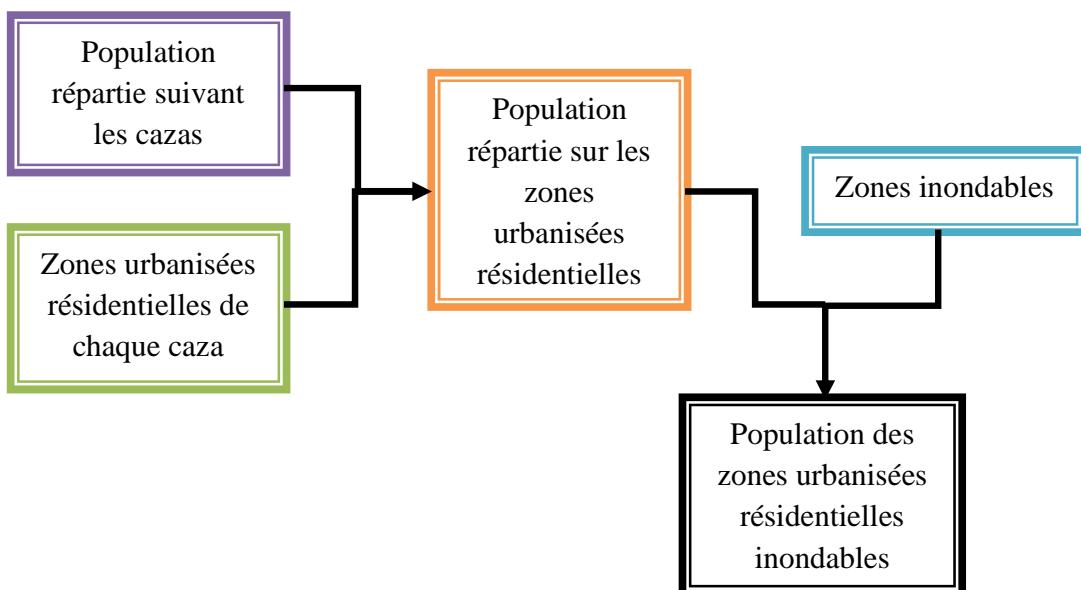


Figure 9 : schéma présentant la logique suivie pour calculer la population vulnérable aux inondations.

Ensuite, pour obtenir l'estimation des populations vulnérables aux inondations, il faut faire un *clip* du fichier obtenu avec celui des *scenarii*, puis calculer la superficie des zones obtenues. Enfin, pour chaque caza, il est possible de déterminer les populations vulnérables aux inondations en multipliant la superficie de la zone urbanisée résidentielle inondable par le nombre total de population, l'ensemble est ensuite divisé par la

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

superficie totale des zones urbanisées résidentielles. La formule ci-dessous présente la méthode pour estimer les populations vulnérables aux inondations.

$$\text{Population vulnérable} =$$

$$\frac{\text{superficie des zones urbanisées innondées résidentielles} \times \text{nombre d'habitants}}{\text{superficie totale des zones urbanisées résidentielles}}$$

Vu l'absence de données sur la répartition de la population dans les zones urbanisées résidentielles, la méthode utilisée présume que cette population est uniformément distribuée sur ces zones pour chaque caza. Or cela peut ne pas être le cas dans tous les cazas du Liban. En effet, l'erreur de cette méthode peut être élevée.

4.2. Vulnérabilité à l'infiltration de l'eau salée

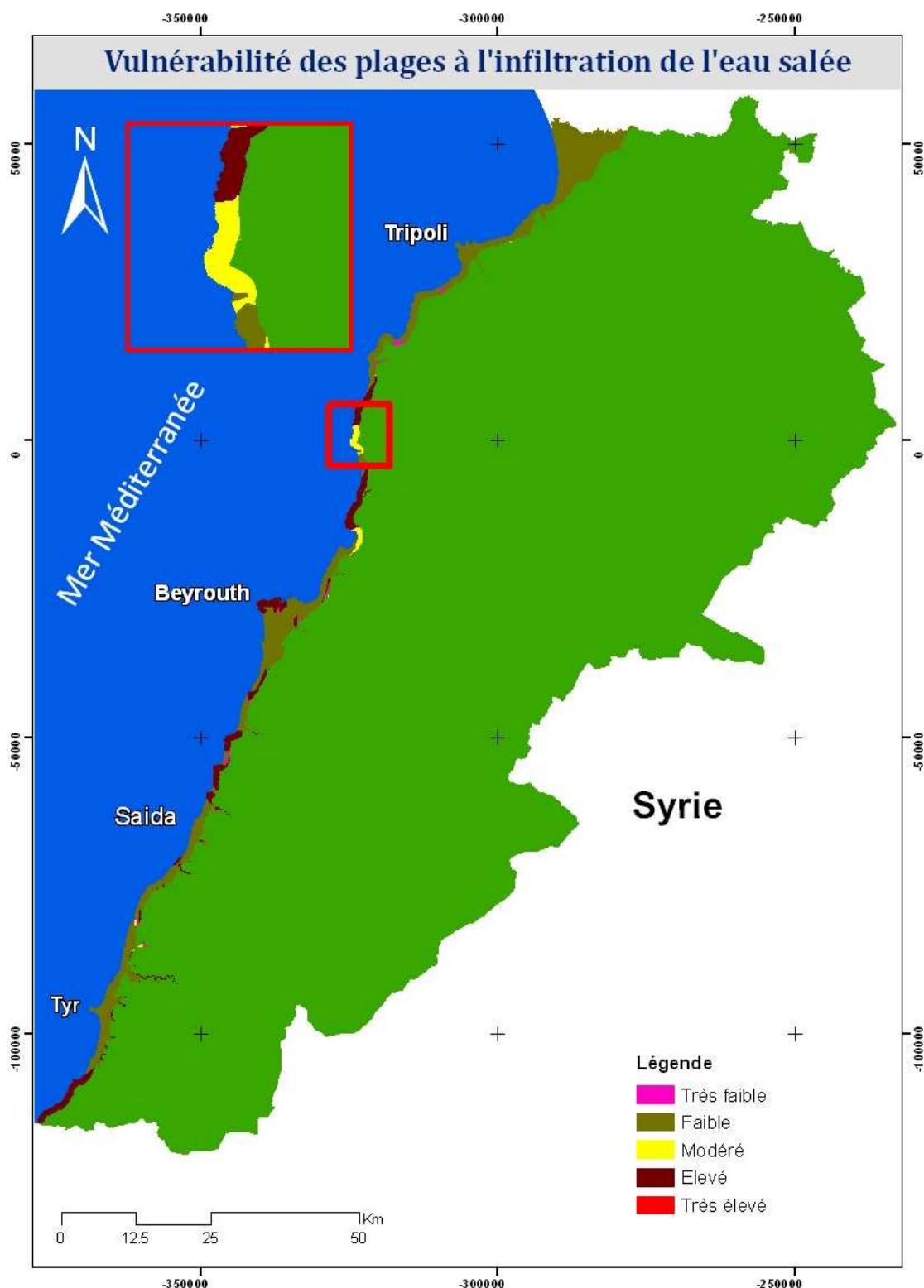
La carte géologique fournie contient les différentes couches géologiques. La vulnérabilité aux infiltrations de chacune de ces derniers est représentée dans le tableau ci-après³¹ :

Couche	vulnérabilité
Aptien supérieur (C_{2b}) Cambrien (J4)	Très élevée
Lutécien (e1) Cénomanien (C4)	Élevée
Turonien (C5) Néocomien (C1)	Modérée
Quaternaire (Q) Pliocène (P) Miocène (m₂) Basalte (B)	Faible
Sénonien (C6) Albien (C3)	Très faible

Tableau 6 : vulnérabilité des couches géologiques aux infiltrations.

³¹ Chadi Abdallah, Rania Bou Kheir, Mohamad Khawlie, 2006, “Building up an infiltration capacity model using GIS and remote sensing in occidental Lebanon”, *Lebanese science journal*.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 5 : carte de la vulnérabilité des plages aux infiltrations de l'eau salée.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

Cette carte indique que la plupart des plages présentent une faible vulnérabilité à l'infiltration de l'eau salée. Cependant, plusieurs zones présentent un niveau élevé de vulnérabilité particulièrement au sud du Liban dans la région de Naqoura, mais aussi à Beyrouth.

5. Simulation des différents scenarii

Pour évaluer l'impact de la hausse du niveau marin sur les zones côtières, il est indispensable d'avoir les propriétés des zones inondables. L'outil *clip* disponible sur *ArcMap* permet d'atteindre ce but. Par cet outil il est facile de réaliser le découpage des différentes cartes obtenues suivant les fichiers de forme des *scenarii* en conservant leurs propriétés.

6. Évaluation des impacts

Le but de ce chapitre est d'exposer les résultats obtenus puis les analyser pour enfin évaluer l'impact de la montée marine sur le littoral libanais.

6.1. Les zones inondables

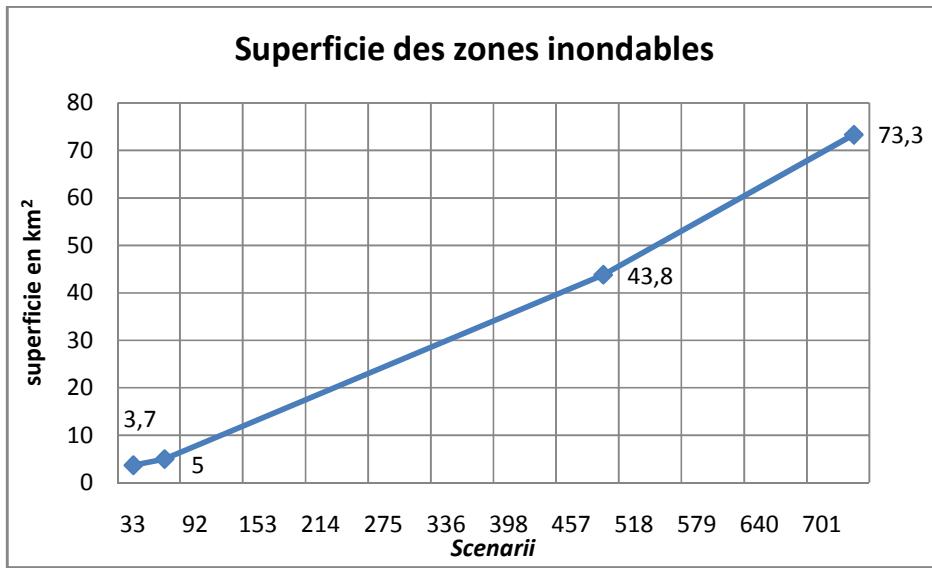
Suivant les différents *scenarii*, la répartition de la superficie des zones inondables est la suivante :

	Variation	Superficie en km ²
<i>Scenario 1</i>	60 cm	3,7
<i>Scenario 2</i>	90 cm	5
<i>Scenario 3</i>	500 cm	43,8
<i>Scenario 4</i>	750 cm	73,3

Tableau 7 : distribution de la superficie des zones inondables suivant les *scenarii*.

Le graphe ci-dessous reprend les valeurs du tableau 7 pour présenter de superficies inondables suivant les quatre *scenarii* envisagés. On remarque des seuils suivant l'importance de l'élévation du niveau de la mer.

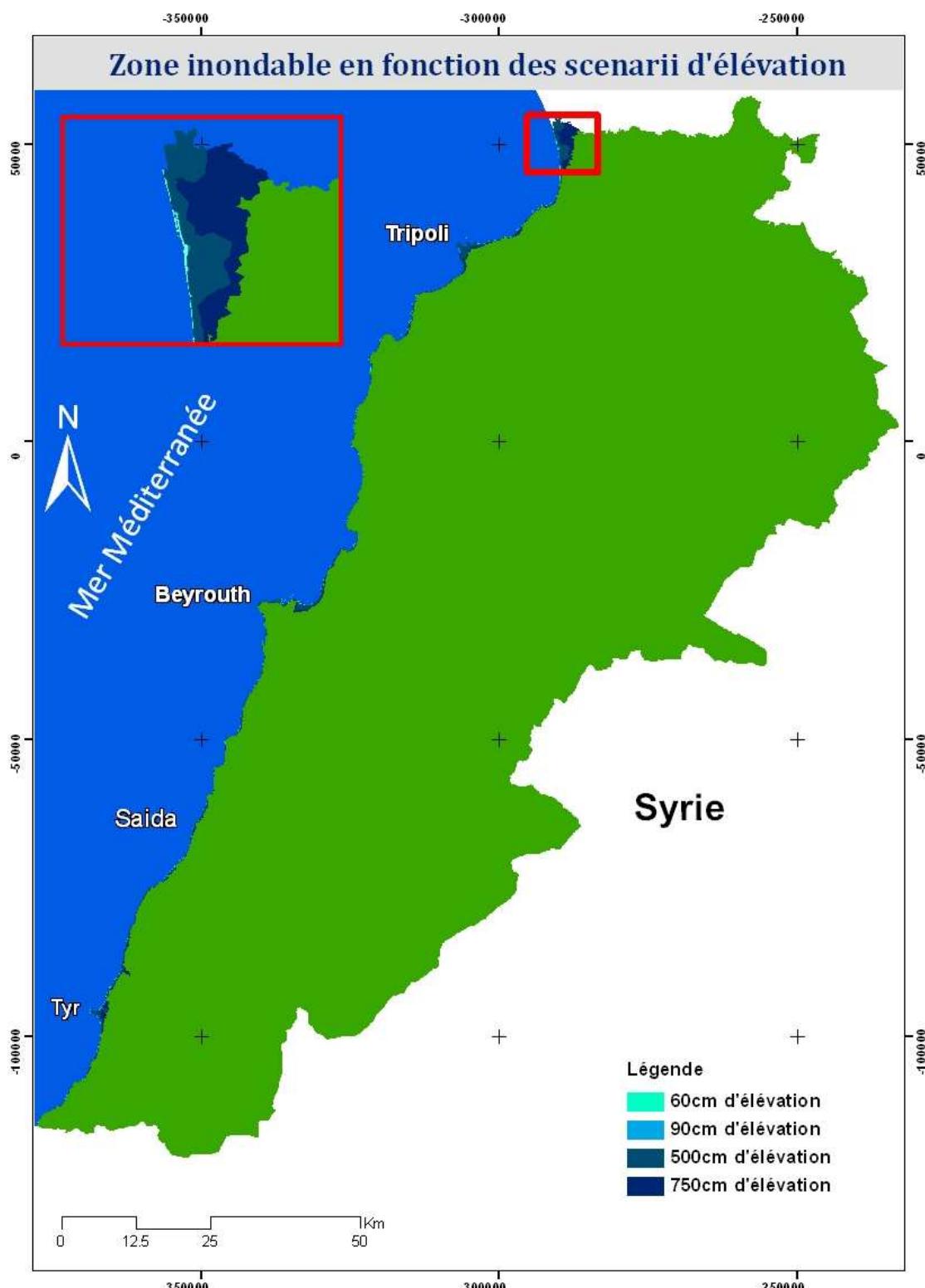
Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Graphe 1 : variation de la superficie des zones inondables suivant les *scenarii*.

Ce graphe montre que lorsque la hauteur de la montée est entre 60 et 90 cm, la superficie des zones inondables est petite, tandis que lorsque cette même hauteur est entre 500 et 750 cm la superficie a augmenté brusquement. Ce fait revient à ce que la hauteur adaptée aux rivages artificiels est de 300 cm, en conséquence la montée dépasse ces rivages lorsqu'elle s'élève plus de 500 cm. Les zones les plus inondables sont au Akkar, Borj el Hammoud, El Mina et Tyr.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 6 : les zones inondables en fonction des *scenarii* d'élévation du niveau de la mer.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

6.2. L'impact sur l'occupation/utilisation du sol

L'estimation de cet impact a été faite en se référant sur la carte d'occupation d'utilisation du sol déjà mise à jour. Selon les différents *scenarii*, le tableau suivant présente les résultats.

	Variation	Occupation/utilisation du sol	
		Nature	Superficie (km ²)
<i>Scenario 1</i>	60 cm	Plage	1,9
		Zone naturelle	0,6
		Zone urbaine	0,5
		Zone agricole	0,4
		Zone d'activité	0,2
		Total	3,6
<i>Scenario 2</i>	90 cm	Plage	2,3
		Zone naturelle	0,8
		Zone urbaine	0,7
		Zone agricole	0,7
		Zone d'activité	0,4
		Total	4,9
<i>Scenario 3</i>	500 cm	Zone agricole	14,5
		Zone urbaine	9,9
		Zone d'activité	9
		Zone naturelle	5
		Plage	4,5
		Total	43,4
<i>Scenario 4</i>	750 cm	Zone agricole	33,1
		Zone urbaine	14,9
		Zone d'activité	12,9
		Zone naturelle	6,7
		Plage	4,7
		Total	72,3

Tableau 8 : tableau représentant la superficie des différentes zones.

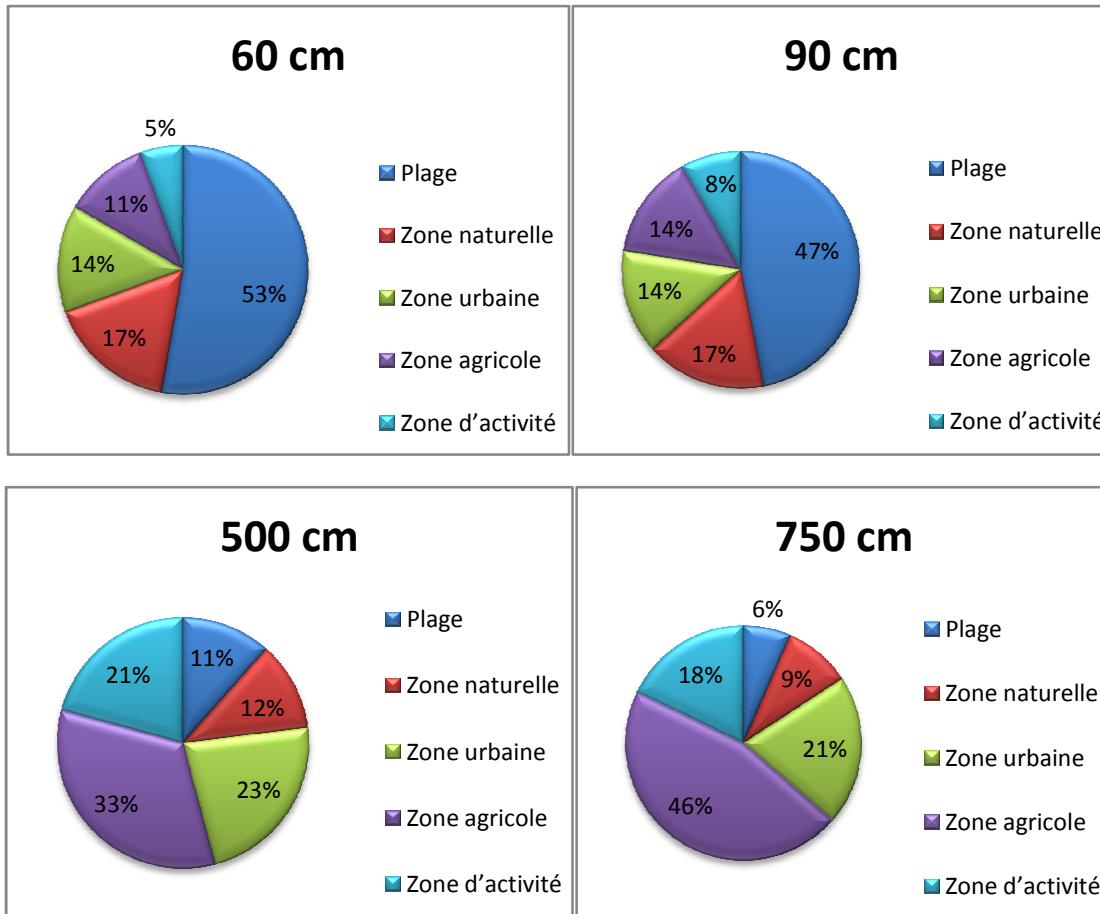
Les zones présentées dans ce tableau sont définies comme suit³² :

- A. Plage : plages sableuses.
- B. Zone naturelle : zones boisées, surfaces à végétation herbacée, marais et surfaces en eau.
- C. Zone urbaine : zones bâties comportant des infrastructures.
- D. Zone agricole : territoires agricoles.

³² La définition de ces zones provient du MOS-L. Certaines classes du niveau 2 ont été regroupées pour faciliter leur exploitation.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

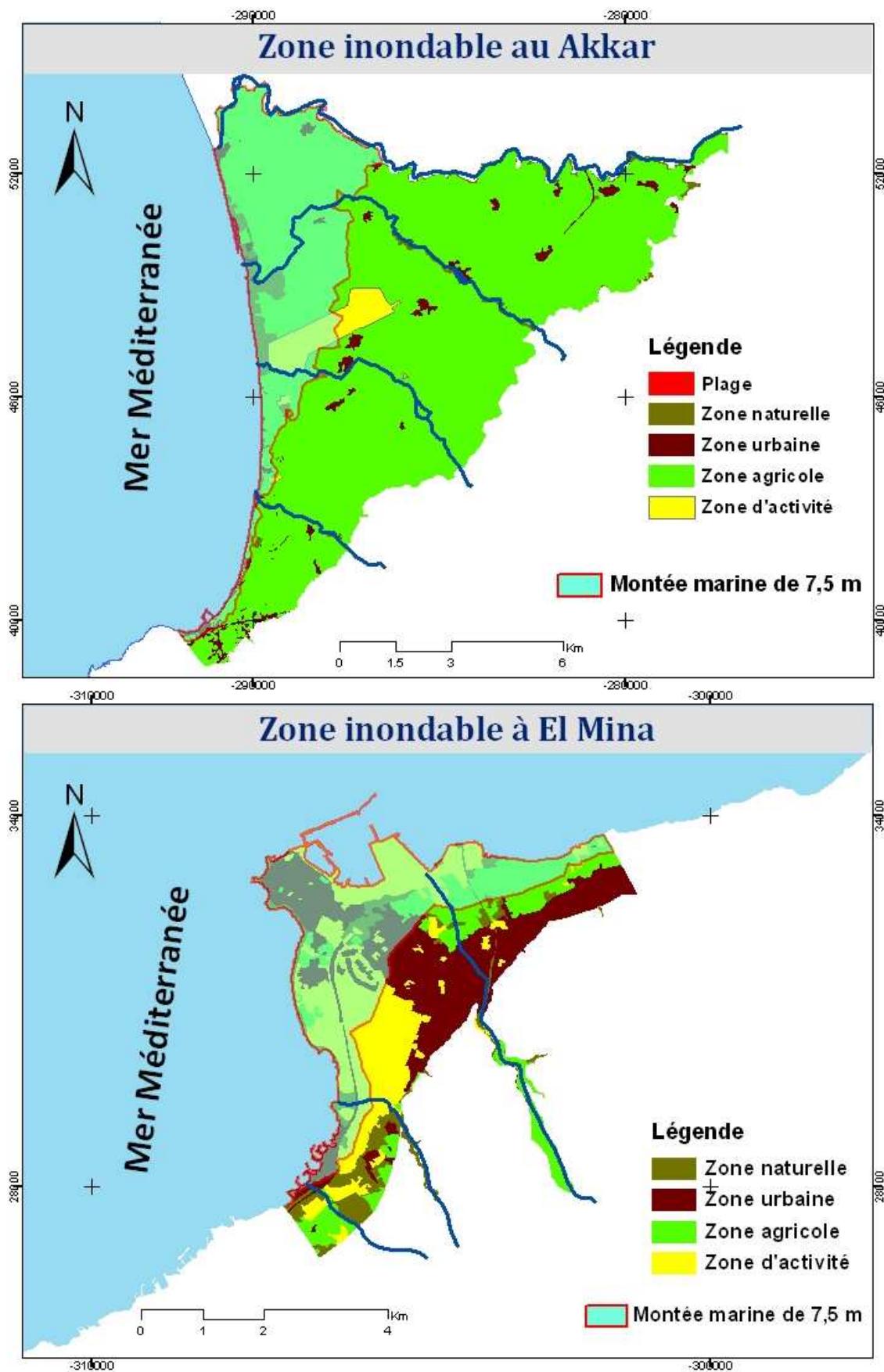
E. Zone d'activité : zones comprenant une activité industrielle, commerciale, portuaire, aéroportuaire etc.



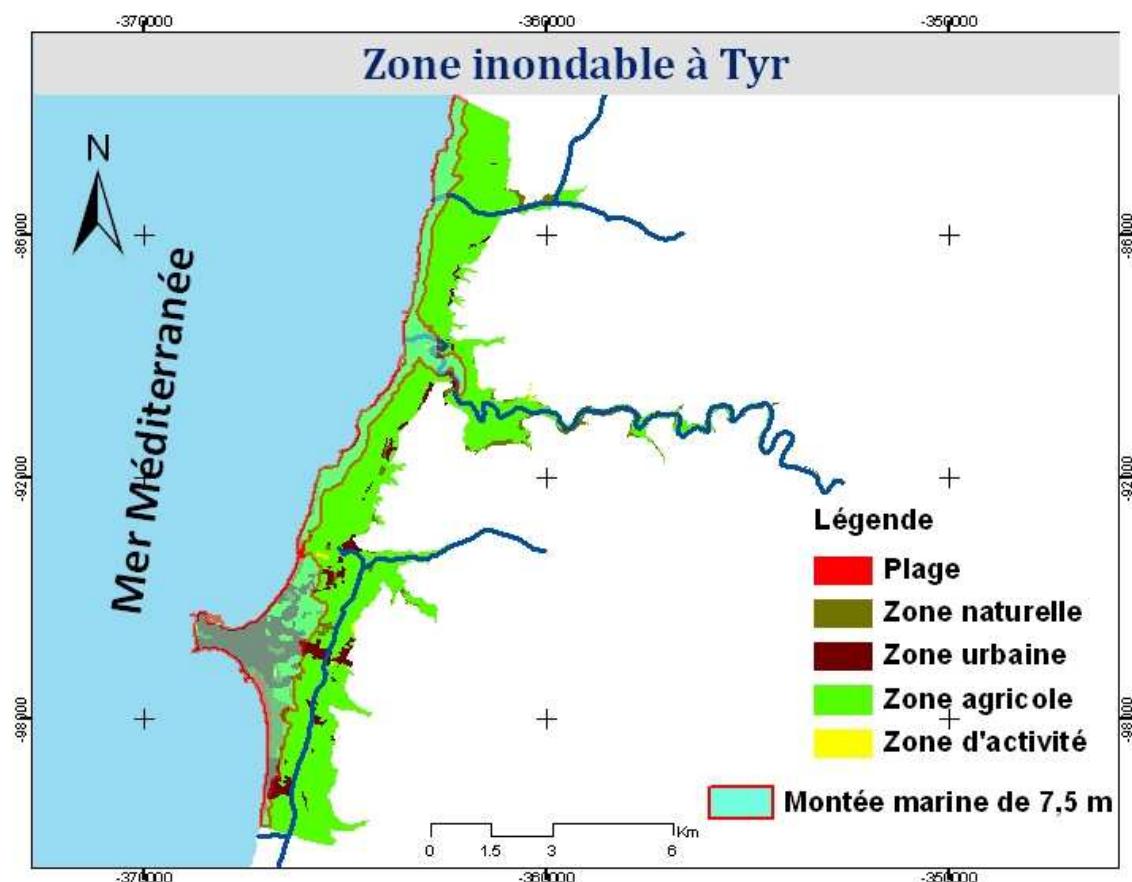
Graphe 2 : graphe représentant les portions des différentes compositions du MOS-L.

Avec une élévation entre 60 et 90 cm, environ la moitié des zones inondables sont des plages. Cela vient du fait que ces zones, en contact direct avec la mer, n'ont aucune infrastructure les protégeant. Lorsque cette même élévation atteint entre 500 et 750 cm les zones les plus inondables sont les zones agricoles (soit 46%).

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 7 : présentation de l'occupation du sol des zones inondables au Akkar, El Mina et Tyr.

6.3. L'impact sur la population

Le tableau suivant présente le nombre approximatif de population vulnérable aux inondations.

	Variation	Nombre total de population
Scenario 1	60 cm	4 700
Scenario 2	90 cm	7 000
Scenario 3	500 cm	136 100
Scenario 4	750 cm	216 600

Tableau 9 : population vulnérable aux inondations.

En se référant sur ce tableau, entre 4 700 (soit 0,29 % de la population résidante dans la zone côtière) au minimum et 216 600 (soit 13,16%) au maximum de la population totale du littoral sont exposés au danger d'inondation. Selon les cazas et suivant le 4^{ème} scenario, c'est le Borj el Hammoud situé près du Beyrouth qui vient en premier (48 300 résidants), ensuite c'est Tyr (38 100) et El Mina (29 100).

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

6.4. L'impact sur les nappes souterraines

La carte géologique a été faite de façon à différencier les couches selon leur vulnérabilité à l'infiltration. Ce tableau résume la superficie des zones inondables selon leur vulnérabilité et suivant les différents *scenarii*.

Variation	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
Scenario 1	60 cm	0	3,1	0,1	0,5
Scenario 2	90 cm	0	4,3	0,1	0,6
Scenario 3	500 cm	0	39,6	0,4	3,7
Scenario 4	750 cm	0,1	67,6	0,6	5,1

Tableau 10 : superficie en km² des couches géologiques inondables suivant les différents *scenarii*.

D'après ce tableau la plupart des couches ayant subi l'inondation ont une vulnérabilité faible. En conséquent, si on considère que l'infiltration dépend seulement de l'inondation de la zone, l'influence de la montée de l'eau de mer sur les nappes souterraines n'est pas très importante. En outre, les zones ayant une vulnérabilité élevée à l'infiltration sont celles situées à Jbeil, Beyrouth, Damour, Jounieh et au sud du pays.

La carte 2 présente la pénétration de l'eau de la mer. Du fait que de nos jours, cette pénétration arrive à une distance de 2,5 km du littoral, il est possible que, lors de l'inondation, elle atteigne des surfaces en plus de celles inondables. Vu que la plupart des populations résidantes à Beyrouth utilisent les puits comme source d'eau, il est nécessaire d'agir afin de limiter les effets de cette pénétration.

Conclusion

Ce chapitre a abordé la simulation de l'élévation du niveau marin et ses impacts. Pour cela un MNT a été créé et selon ce modèle, plusieurs surfaces risquent d'être inondées surtout au Akkar, à Tripoli et à Tyr. Ensuite, une évaluation de l'impact sur l'occupation du sol, la population et les nappes phréatiques a été réalisée. Le chapitre suivant traite de la modélisation de l'indice de vulnérabilité.

Chapitre V : Modélisation de l'indice de vulnérabilité côtière

Introduction

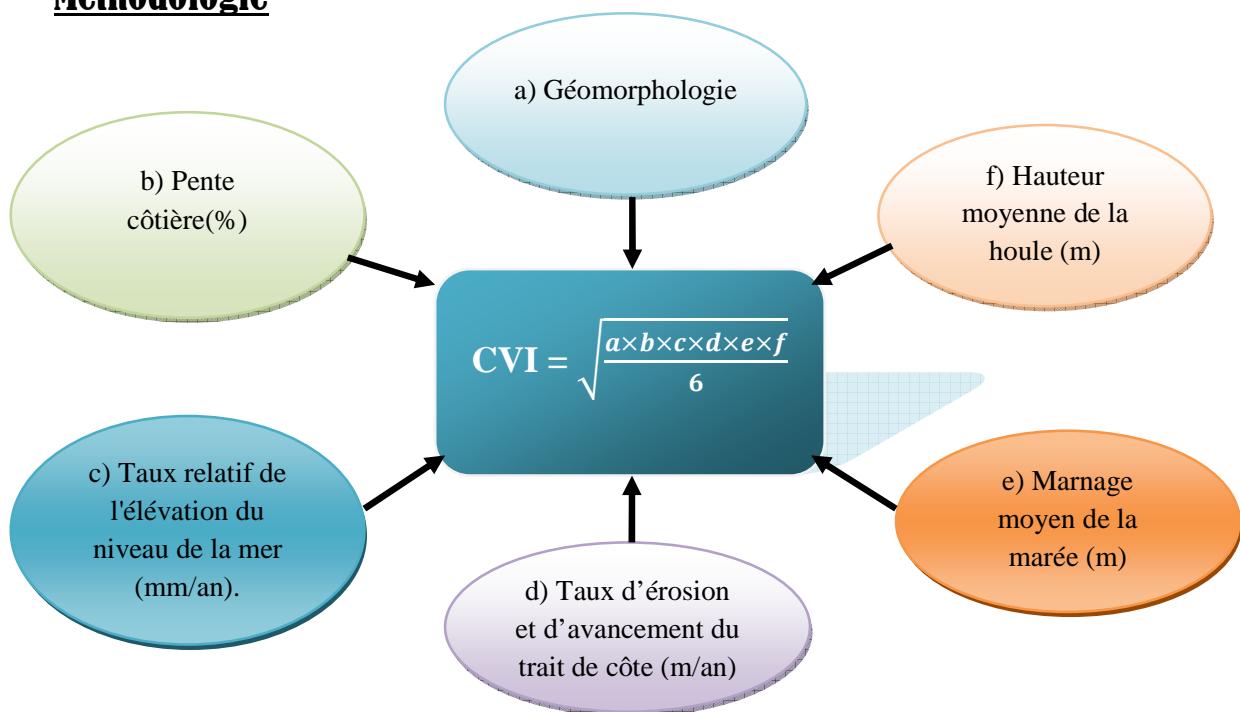
L'indice de vulnérabilité côtière (*Coastal Vulnerability Index (CVI)*) a pour but d'estimer le degré de la vulnérabilité de la côte afin de pouvoir définir les stratégies d'intervention. Cet indice a été développé par Gornitz et White en 1992. Il rassemble six variables dans le but d'améliorer sa précision³³ :

- a) Géomorphologie.
- b) Pente côtière (en %).
- c) Taux relatif de l'élévation du niveau de la mer (mm/an).
- d) Taux d'érosion et d'avancement du trait de côte (m/an).
- e) Marnage moyen de la marée (m).
- f) Hauteur moyenne de la houle (m).

Enfin le CVI est calculé par la formule suivante :

$$\text{CVI} = \sqrt{\frac{a \times b \times c \times d \times e \times f}{6}}$$

Méthodologie



³³ Projet BEACHMED-e, 2006, *Processus d'analyse et de gestion des zones côtières : méthodes d'évaluation des risques, de réduction des impacts et d'aménagement du territoire. Rapport de phase A.*

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

Variables	Très faible 1	Faible 2	Modéré 3	Élevé 4	Très élevé 5
Géomorphologie					
Pente côtière (%)					
Taux relatif de l'élévation du niveau de la mer (mm/an)					
Érosion/avancement de la ligne de côte en (m/an)					
Hauteur moyenne de la marée (m)					
Hauteur moyenne des vagues (m)					

Tableau 11 : variables entrant dans le calcul du CVI³³.

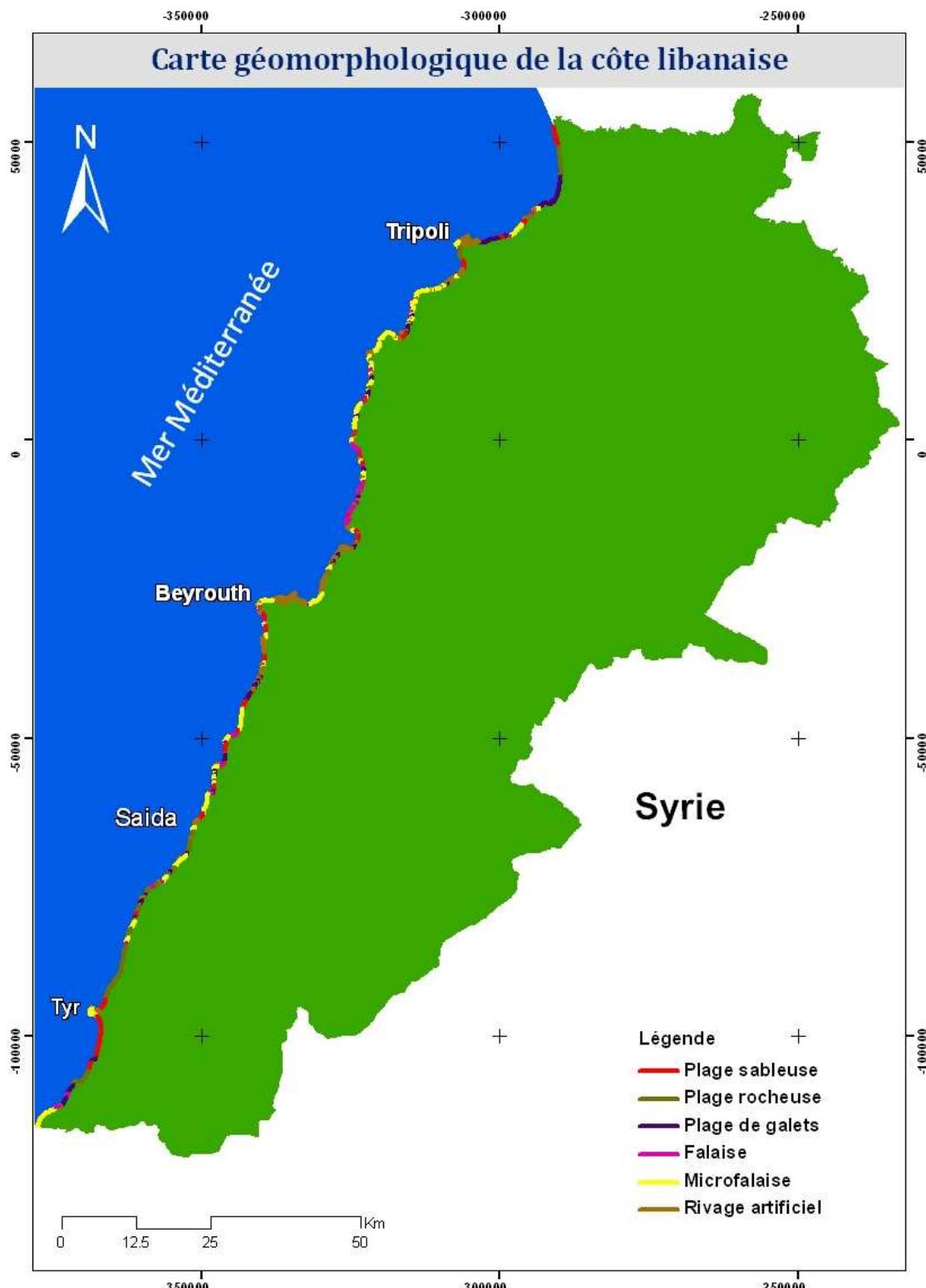
Le CVI est la racine carrée de la moyenne des valeurs correspondantes à la vulnérabilité de chaque variable (entre 1 et 5). Dans la suite on va remplir ce tableau.

1. Mise à jour de la carte géomorphologique

Cette carte présente les différents types géomorphologiques de la ligne de côte. Réalisée par Paul Sanlaville en 1977, elle a été numérisée par le CNRS-L en 2003. Sa mise à jour a été faite par photo-interprétation à partir des images Ikonos. De plus le MNT était employé pour détecter les falaises et les microfalaises. Ces classes sont reparties comme suit : rivage artificiel, plage sableuse, plage rocheuse, plage de galet, falaise, microfalaise.

La démarche suivie consiste à découper le fichier de forme de la ligne de côte en parties correspondantes au type géomorphologique. Le but est d'avoir une carte présentant les différentes classes, ensuite à chaque classe est affectée une valeur présentant leur degré de vulnérabilité à l'érosion. Enfin, cette valeur est utilisée pour calculer l'indice de vulnérabilité de la côte.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 8: carte géomorphologique du littoral libanais.

2. Calcul de l'érosion/Avancement de la ligne de côte

2.1. Numérisation de la ligne de côte

La numérisation de la ligne de côte a été faite par la technique de photo-interprétation. Cette technique consiste à distinguer les différents éléments de l'image grâce à l'observation visuelle. La numérisation a été appliquée sur les cartes topographiques et les images Ikonos.

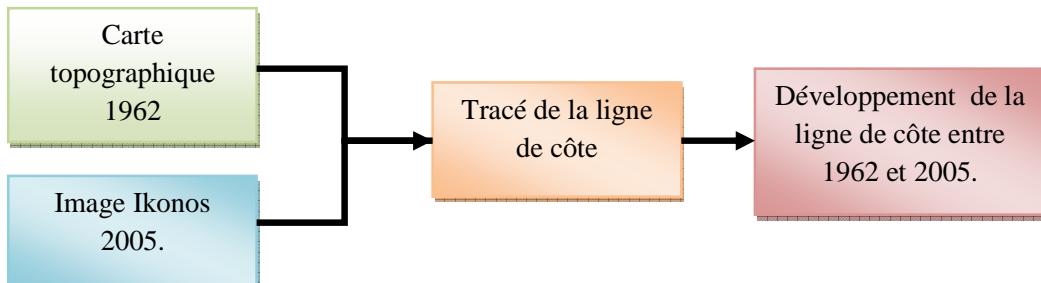


Figure 10 : Schéma présentant le processus de numérisation du trait de côte.

L'échelle au 1/20000 des cartes topographiques utilisée a déterminé l'échelle de numérisation. Sur les images Ikonos la numérisation a été faite sur une échelle au 1/10000 et parfois allant jusqu'à une échelle inférieure dans les zones où la vision n'est pas nette.

Sur les cartes topographiques la ligne de côte est bien présentée ce qui rend facile sa numérisation, tandis que sur les images Ikonos il existe des régions où il y a des nuages qui rendent impossible la numérisation de la ligne de côte. Dans ces zones, une estimation de la ligne côtière a été faite.



Figure 11 : les nuages cachant la ligne de côte.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

L'erreur de numérisation du trait de côte dépend de l'échelle utilisée en numérisant les données, plus elle est grande plus la précision est fine. De plus, sur les images Ikonos il existe des zones ambiguës où la distinction entre l'eau de la mer et le terrain n'est pas possible. A cela s'ajoute des zones cachées par la nébulosité.

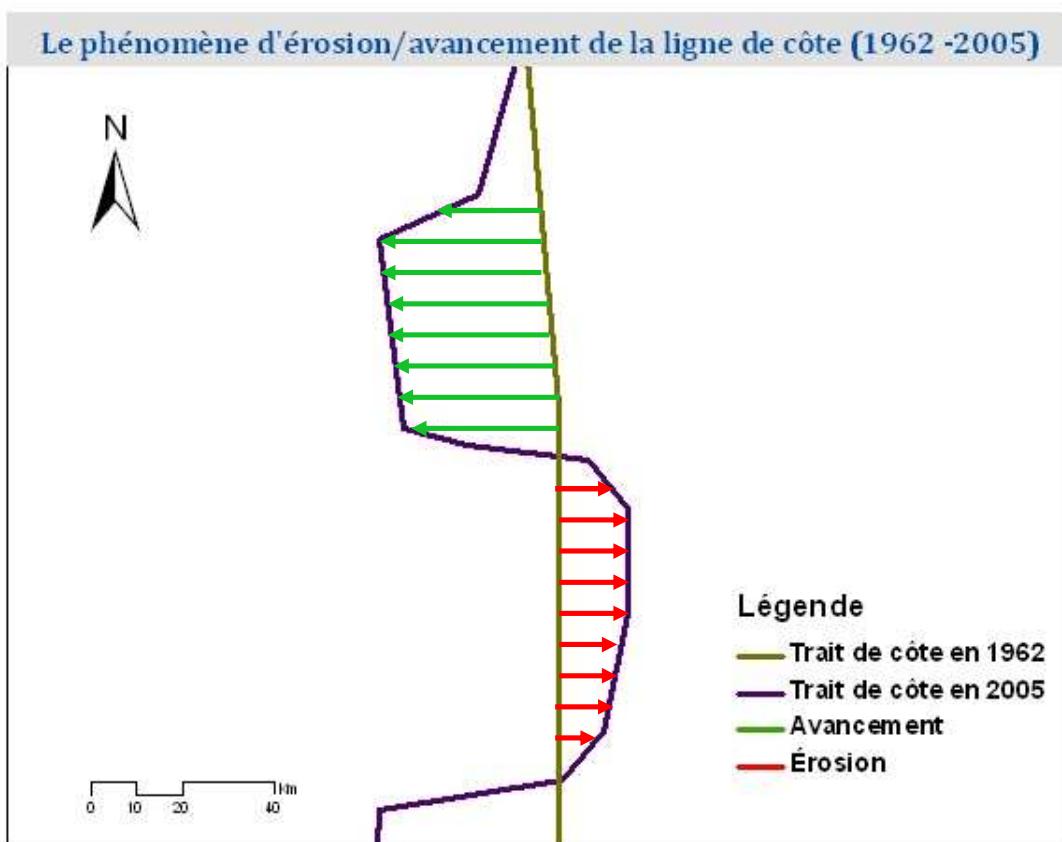
2.2. Calcul de l'érosion/avancement

Pour calculer l'érosion ou l'avancement, il faut calculer la différence entre la ligne de côte de 1962 et celle de 2005. La méthode suivie est la suivante :

Après la conversion des polylignes de 1962 et de 2005 en polygones, des valeurs sont affectées aux zones côtières en fonction des phénomènes d'érosion ou d'avancement (la valeur -1 est affectée aux zones d'érosion et la valeur +1 est affectée aux zones d'avancement). Puis la distance entre les deux polylignes de 1962 et 2005 est calculée. Pour ce faire, on utilise *ArcMap*, qui peut calculer la distance entre des points et une ligne. Il fallait donc créer des points sur une ligne de côte, celle de 1962 a été utilisée comme référence.

La barre d'outils *HawthsTools* permet de créer des points dans des polygones. En utilisant cet outil, trois points ont été créés dans chaque polygone déjà créé. Puis ces trois points ont été basculés vers la ligne de 1962 par la même barre d'outils. L'option *Near* dans *ArcToolbox* permet de calculer la distance entre ces points et la ligne de côte de 2005. Ensuite la moyenne des distances dans chaque polygone a été prise en compte puis elle a été multipliée par -1 ou +1 selon que la zone concernée subit un phénomène d'érosion ou d'avancement.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 9 : le phénomène d'érosion/avancement de la ligne de côte du Akkar (1962-2005).

Les résultats obtenus varient entre les valeurs inférieures à -34 m, surtout au Akkar et à Tyr, et supérieures à 166 m comme à Beyrouth. Cette variation est justifiée par le fait qu'au Akkar et à Tyr il existe des plages de sable qui sont très vulnérables à l'érosion, alors qu'à Beyrouth il y a des rivages artificiels et des falaises comme celles de Raouché.

Dans le calcul de l'érosion/avancement, trois points ont été utilisés dans chaque polygone entre la ligne de 1962 et celle de 2005 pour calculer la distance entre ces deux lignes puis la moyenne a été admise. L'erreur se manifeste par le fait que ces points sont repartis d'une manière aléatoire ; il est possible qu'ils soient proches. En conséquence, la moyenne de distance entre ces points et la ligne de 2005 n'est pas très significative car il se peut que ces points aient été par exemple rassemblés dans la zone la plus proche de la ligne de 2005 alors que la vraie distance est bien plus grande. Cette erreur ne sera pas prise en considération dans la suite de l'étude.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

3. Calcul de la pente

Le calcul de la pente côtière est réalisé en utilisant le MNT déjà créé. Un outil de calcul de la pente en pourcentage est disponible dans la barre d'outils *3D Analyst*. Le fichier obtenu est une image classifiée selon la classification correspondante au CVI.

Modélisation

Variables	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
	1	2	3	4	5
Géomorphologie	Rivage artificiel	Microfalaise, falaise et plage de galet	Plage rocheuse	-	Plage sableuse
Pente côtière (%)	>45	30 ; 45	15 ; 30	8 ; 15	<8
Taux relatif de l'élévation du niveau de la mer (mm/an)	<-1,21	-1,21 ; 0,1	0,1 ; 1,24	1,24 ; 1,36	>1,36
Érosion/avancement de la ligne de côte en m (1962-2005)	>166	73 ; 166	17 ; 73	-34 ; 17	<-34
Hauteur moyenne de la marée (m)	>6	4 ; 6	2 ; 4	1 ; 2	<1
Hauteur moyenne des vagues (m)	<1	1 ; 2	2 ; 2,25	2,25 ; 2,6	>2,6

Tableau 12 : variables entrant dans le calcul du CVI au Liban³³.

Ce tableau présente la vulnérabilité des différentes variables. La vulnérabilité est classée en 5 niveaux allant du très faible jusqu'au très élevé. Le classement de la géomorphologie, de la pente côtière et de l'érosion/avancement de la ligne de côte est modifié afin de convenir le cas libanais. Les autres variables n'ont pas été modifiées.

Le classement des différents types géomorphologiques du terrain a été fait en fonction de la vulnérabilité du terrain à l'érosion. Le taux relatif de l'élévation du niveau de la mer dans cette étude est de 6 mm/an donc, d'après le tableau ci-dessus, ce taux est très élevé. Le classement du phénomène d'érosion/avancement est fait selon des seuils naturels (classement disponible sur *ArcMap*). D'après l'étude du projet BEACHMED-e, la marée haute tend à dissiper la tension des houles ce qui diminue le phénomène de l'érosion³³. Donc, plus les marées sont hautes plus la vulnérabilité des plages est faible. Au Liban, du fait de la valeur de la marée (30 cm), le taux de vulnérabilité est très élevé. De plus la hauteur des vagues (4 m) accentue ce taux.

Résultats

La valeur du CVI varie entre 4 et 51 avec une moyenne de 24 et un écart-type de 9. Le CVI varie selon la vulnérabilité de chaque zone (du très faible au très élevé). Le tableau suivant présente la longueur des différentes parties du trait de côte suivant la vulnérabilité des zones limitrophes.

CVI	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
Longueur (km)	125 (33%)	67 (18%)	119 (32%)	46 (12%)	18 (5%)

Tableau 13 : la longueur des différentes parties du trait de côte selon le CVI.

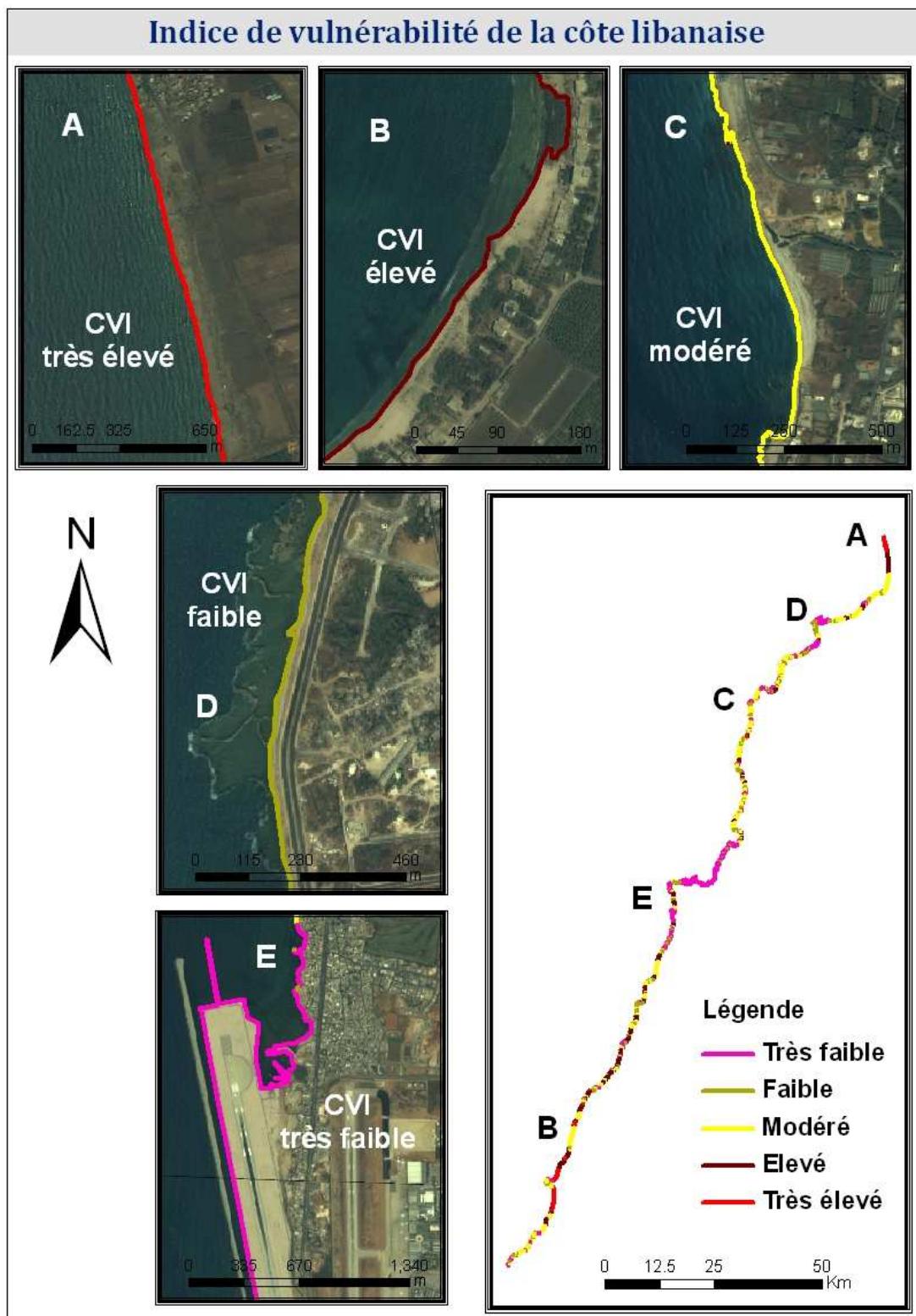
D'après ce tableau, 1/3 de la côte libanaise a une vulnérabilité très faible, 1/3 a une vulnérabilité modérée et le reste se repartit sur les autres classes.

Selon cet indice les régions les plus vulnérables sont celles situées au Akkar et dans les régions de Tyr. Ces zones sont caractérisées par la présence de plages sableuses. Les zones les moins vulnérables sont les rivages artificiels. Ces derniers, ayant une hauteur moyenne de 3 m et une résistance à l'érosion due aux matières utilisées contre l'érosion dans leur construction, présente une vulnérabilité très faible.

Conclusion

Ce chapitre est une estimation de l'indice de vulnérabilité côtière. En effet, ce qui est remarquable est que les zones ayant un CVI très élevé sont celles des plages sableuse. Par contre, les rivages artificiels ont le CVI le plus faible. La carte ci-après présente cinq cas de figure illustrant les différents degrés de vulnérabilité (voir annexe 1 pour une présentation plus détaillée de toute la côte).

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais



Carte 10 : indice de vulnérabilité des différentes zones de la côte libanaise.

Conclusion

Le phénomène de la montée du niveau marin est devenu important à cause de son accélération. Du fait que le littoral libanais contient des zones ayant des altitudes basses, cette étude a été faite afin de découvrir ces zones et le degré de l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur elles.

Les zones les plus inondables et ayant un indice de vulnérabilité côtière très élevé sont les plages sableuses. Or la plupart des activités touristiques sont situées sur ces plages, ce qui rend important l'impact de la montée de l'eau sur le tourisme. Ce secteur étant le plus développé au Liban, l'effet sur l'économie doit être pris en considération. D'autre part, une grande superficie des terrains agricoles (près de la moitié de la zone d'étude) pourrait être inondée suivant le quatrième *scenario* (750 cm). A cela s'ajoute le fait que la pénétration de l'eau salée pourrait causer la salinisation des eaux souterraines qui, en conséquence, ne pourraient plus être utilisées pour l'irrigation. Du fait que l'agriculture est le secteur le plus négligé au Liban, l'impact de la hausse du niveau marin n'est pas très important du point de vue économique mais elle pourrait avoir des conséquences dramatiques sur les populations.

Une partie importante de cette étude a été consacrée sur la recherche des caractéristiques de la zone côtière et celle de la montée marine. La logique suivie avait pour objectif de présenter d'une part la zone d'étude dans son entiereté et la montée des eaux marines et d'autre part le volet technique consacré à la recherche et l'évaluation des résultats. Cette étude a nécessité la prise en main de plusieurs logiciels de télédétection nécessaires à l'exploitation des données. Les difficultés majeures ont été rencontrées lors de l'étude sur l'élévation du niveau de la mer, surtout lors de la détermination des *scenarii*. De même le calcul de l'érosion et de l'avancement de la ligne côtière a présenté des difficultés qui ont pu être résolues par l'utilisation de plusieurs outils informatiques.

Proposition pour améliorer la qualité du travail

Dans le but d'avoir de meilleurs résultats, plusieurs mesures doivent être prises. En premier lieu, le MNT a besoin de plus de précision afin d'avoir des valeurs plus significatives.

Ce qui est remarquable, c'est que la plupart des zones présentant l'erreur la plus élevée sont les zones ayant un CVI modéré. En conséquence, cette étude vise à avoir le plus de précision sur les zones ayant un CVI entre très élevé et élevé, ce qui rend le MNT adéquate à cette étude. La DAG réalise actuellement un MNT pour tout le Liban d'une

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

précision de 30 à 50 cm, mais le modèle n'est pas encore terminé. De plus, pour améliorer la précision du MNT, il existe plusieurs autres techniques en particulier la photogrammétrie numérique, le LIDAR etc.

Du fait de la construction des rivages artificiels tout au long de la ligne de côte, l'altitude de cette dernière n'est pas nulle sur ces rivages. La hauteur moyenne (3 m) de ces derniers adoptée dans ce travail ne représente pas bien la réalité. Dans certaines zones cette valeur augmente tandis que dans d'autres elle diminue. Pour cela, et dans le but d'avoir la valeur exacte de cette hauteur il est important de contacter les responsables afin d'améliorer la qualité du MNT. D'autre part, la densité du point de nivellement délivré par la DAG et ceux obtenus à partir de la carte de 1962 n'est pas suffisante. Il existe des zones où il n'y a pas de points. En conséquence, ces zones devront faire l'objet d'un levé par GPS.

Propositions pour réduire l'effet de la montée marine

Comme il est apparu dans cette étude, les conséquences de la montée de l'eau de la mer peuvent être dangereuses dans différentes zones du Liban. Pour cela plusieurs mesures doivent être prises afin de diminuer l'impact sur la région côtière.

Tout d'abord, dans les régions vulnérables, il faut implémenter des marégraphes pour suivre la montée continuellement. Cette mesure a pour but d'alerter les responsables quand cette montée atteint le niveau d'alerte. Les zones qui devront faire objet de cette mesure sont celles ayant un CVI élevé. De plus ces zones doivent faire l'objet d'une étude sur une échelle plus grande afin d'atteindre des résultats plus précis. Dans ce but, le CNRS-L doit faire les levées GPS dans ces zones afin poursuivre l'évaluation de l'élévation du niveau de l'eau.

D'après la carte de l'indice de vulnérabilité, les plages de sable se distinguent des espaces côtiers par une vulnérabilité très forte. Leur érosion est très forte et peut dépasser 34 m. Pour pouvoir réagir contre ce phénomène, il faut remblayer ces zones avec du sable. Actuellement cette initiative est prise par quelques municipalités, seule une action au niveau national serait efficace.

Une autre mesure importante est la construction des barrages sur la côte pour empêcher l'eau de la mer d'entrer sur le terrain. Cette mesure peut s'avérer coûteuse mais peut préserver plusieurs zones des inondations.

Impact de la montée du niveau de la mer sur le littoral libanais

Enfin, la décision la plus importante est que l'état déclare les zones ayant un indice de vulnérabilité côtière élevé comme zone à risque. En conséquence, les futurs aménagements du territoire devront prendre en considération cette appellation.

Mon stage de fin d'étude au Centre de télédétection a été une première expérience professionnelle très enrichissante. Il m'a permis d'appréhender comment un ingénieur doit penser et quelle logique il doit suivre pour résoudre les problèmes auxquels il est confronté. De plus, grâce à ce travail, j'ai amélioré mon expérience de travail sur différents logiciels très utilisé dans ma spécialité.

Le fait que cette étude porte sur le littoral a motivé mon choix. Je souhaite vivement que cette étude soit prise en considération par les responsables politiques puisqu'elle touche un problème qui concerne la partie la plus importante du Liban. Le problème de l'élévation du niveau marin sur les zones côtières est vaste et constitue un champ d'étude encore peu exploré au Liban. Plus particulièrement, l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les espaces urbanisés, surtout dans les grandes villes côtières, présente le plus de difficultés à être analysé et nécessite d'approfondir les méthodes de simulation par le croisement des données satellitaires et des données statistiques. Sujet d'une haute importance de part ses conséquences sociales et économiques que j'envisage volontiers de poursuivre dans le cadre d'une thèse.

Bibliographie

- ABOUD-ABI SAAB, Marie, février 1985, *Contribution à l'étude des populations micro planctoniques des eaux côtières libanaises*.
- ABDALLAH, Chadi, BOU KHEIR, Rania, KHAWLIE, Mohamad, "Building up an infiltration capacity model using GIS and remote sensing in occidental Lebanon", *Lebanese science journal*, pp. 1-11.
- BEACHMED-e Project, 2006, *Processus d'analyse et de gestion des zones côtières : méthodes d'évaluation des risques, de réduction des impacts et d'aménagement du territoire*, Rapport de phase A, 154 p.
- CAZENAVE et al., 2002, "Sea level variations in the Mediterranean Sea and Black Sea from satellite altimetry and tide gauges", in *Global and Planetary Change*, pp. 34–86.
- DAR & IAURIF (2002) – « Schéma directeur d'aménagement du territoire libanais – rapport provisoire »
- FITCH, Eric J, janvier 2009, "Sea level rise: concerns for management of land and freshwater resources ... an overview", in *Water resources impact*, vol. 11, n.1, p. 2-34.
- IPCC, 2007, *Rapport de synthèse, Changements Climatiques*, OMM, PNUE.
- KABBARA, Najad, 2005, "Wind and wave data analysis for the Lebanese coastal area-preliminary results", in *Lebanese Science Journal*, vol. 6, n. 2.
- FENOGLIO, Marc, 2002, "Long-term sea level change in the Mediterranean Sea from multi-satellite altimetry and tide gauges", in *Physics and Chemistry of the Earth* 27, pp.1419–1431.
- LOMBARD, Alix, novembre 2007, « Les variations actuelles du niveau de la mer : observations et causes climatiques », *La Météorologie*, n°59, pp. 10-56.
- ROOS, Maurice, janvier 2009, "Sea level rise: an increasing risk to California water projects", in *Water resources impact*, vol.11, n.1.

Liste des sites internet

- Aviso : <http://www.aviso.oceanobs.com/en/home/index.html>
- Agriculture news statistics : <http://agriculturenews.net/>
- DH.be : <http://www.dhnet.be/>
- ET Spatial Techniques : <http://www.ian-ko.com/>
- Institut des sciences de l'ingénieur de Toulon et du var : <http://isity.univ-tln.fr/>
- Investment development authority of Lebanon - IDAL: <http://www.idal.com.lb>
- Legos Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiales : <http://www.legos.obs-mip.fr/fr/>
- Ministère de l'Agriculture : <http://www.agriculture.gov.lb/>
- Parlement libanais : <http://www.lp.gov.lb/>
- UNRWA: <http://www.un.org/unrwa>

Liste des cartes

Carte	Titre	Page
1	carte représentant la zone d'étude	10
2	carte représentant la pénétration de l'eau de la mer et les fleuves	14
3	Modèle numérique du terrain de la côte libanaise	27
4	carte d'occupation du sol avec une image Ikonos	30
5	de la vulnérabilité des plages aux infiltrations de l'eau salée	33
6	les zones inondables en fonction des <i>scenarii</i> d'élévation du niveau de la mer	36
7	les zones inondables en fonction des <i>scenarii</i> d'élévation du niveau de la mer	39-40
8	carte géomorphologique du littoral libanais	44
9	le phénomène d'érosion/avancement de la ligne de côte du Akkar	47
10	indice de vulnérabilité des différentes zones de la côte libanaise	50

Liste des figures

Figure	Titre	Page
1	présentation de la hausse du niveau de la mer	6
2	figure présentant les vitesses de changement du niveau marin mondiale entre 1993 et 2006 mesurée par les satellites altimètres	17
3	modèle présentant les tendances du niveau marin de la méditerranée du Janvier 1993 à Juillet 2000	18
4	écart de 10 m et 6 m respectivement	24
5	difficulté à saisir l'altitude	25
6	réseau irrégulier de triangles	26
7	le processus d'interpolation	28
8	calcul de l'erreur en planimétrie	29
9	schéma présentant la logique suivie pour calculer la population vulnérable aux inondations	31
10	Schéma présentant le processus de numérisation du trait de côte	45
11	les nuages cachant la ligne de côte	45

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1	les différents types géomorphologiques du littoral libanais	11
2	contribution des différents facteurs dans la montée de l'eau de la mer (1993-2003)	16
3	les trois prévisions de l'IPCC sur la montée du niveau marin	19
4	présentation des différents <i>scenarii</i> proposés	19
5	présentation de la différence entre le MNT et les points de nivellation	29
6	vulnérabilité des couches géologiques aux infiltrations	32
7	distribution de la superficie des zones inondables suivant les <i>scenarii</i>	34
8	tableau représentant la superficie des différentes zones	37
9	population vulnérable aux inondations	40
10	superficie en km ² des couches géologiques inondables suivant les différents <i>scenarii</i>	41
11	variables entrant dans le calcul du CVI	43
12	variables entrant dans le calcul du CVI du Liban	48
13	la longueur des différentes parties du trait de côte selon le CVI	49

L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral libanais

Résumé

La montée du niveau marin, résultat du réchauffement de l'atmosphère, est l'un des phénomènes les plus importants du XXI^{ème} siècle. Ses conséquences peuvent être graves surtout dans les zones de faibles altitudes. Dans cette étude, nous allons aborder ce sujet afin de pouvoir répondre aux questions suivantes : de combien l'eau va monter jusqu'en 2100 ? Quelles seront les conséquences ? Comment faut-il réagir afin de limiter les dégâts ?

Pour pouvoir évaluer l'impact de la montée des eaux de la mer Méditerranée sur le littoral libanais, la création d'un MNT s'avère indispensable. Ce dernier nous permet de distinguer les zones qui vont être inondables selon les différents *scenarii* élaborés préalablement. Une fois ces derniers déterminés, nous pouvons évaluer l'influence de cette montée sur la population, sur l'occupation du sol et sur les nappes souterraines. Cette étude est destinée à aider les décideurs à déterminer les régions plus vulnérables à la montée des eaux dans le but de prendre des mesures nécessaires concernant ce problème.

Mots clés : montée du niveau marin, vulnérabilité côtière, impact, littoral libanais, risque inondation.

Abstract

One of the most critical and important natural phenomena of the 21st century is the sea level rise resulting from global warming. Low land zones may be the most affected by these consequences. In this study, I am going to answer the following questions: how much is the water level going to rise till 2100? What would the consequences be? How should we react to limit the damage?

A Digital Elevation Model (DEM) is crucial to evaluate the impact of the sea level rise on the Lebanese coast. A DEM would allow us to detect the zones which are most likely to be inundated as foreseen in the earlier scenarios. Once these zones are determinate, we can evaluate the sea level rise on the population, on the land use and on the underground layers. This study is meant to help decision makers spot the most vulnerable regions and remedy to the problem.

Keywords: sea level rise, coastal vulnerability, impact, Lebanese coast, inundation risk.