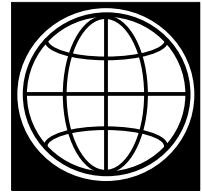




République Arabe d'Égypte
Royaume du Maroc
République Tunisienne

BANQUE
MONDIALE



Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord

Phase 1 : Évaluation des risques en situation actuelle
et à l'horizon 2030 pour la ville de Casablanca et la
vallée du Bouregreg – Rapport commun

Version finale



31 janvier 2011

En association avec



Site du projet : <http://www.egis-bceominternational.com/pbm/>

Informations qualité du document

Informations générales

Auteur(s)	Egis BCEOM International / IAU-IDF / BRGM
Titre du projet	Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord
Titre du document	Phase 1 : Évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Casablanca et la vallée du Bouregreg – Rapport commun – Rapport commun
Date	31 janvier 2011
Référence	GED 80823T

Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
A. Bigio	Banque Mondiale	31.01.11
Copie à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
S. Rouhana	Banque Mondiale	31.01.11
A. Tiwari	Banque Mondiale	31.01.11

Historique modifications

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
Version 1	16.05.10	Y. Ennesser	
Version 2	23.05.10	Y. Ennesser	
Version 3	06.06.10	Y. Ennesser	
Version 4	06.09.10	Y. Ennesser	
Version 5	05.12.10	Y. Ennesser	

Encadrement et direction de l'étude

La présente étude est financée par la Banque mondiale ainsi que par les fonds fiduciaires NTF-PSI, TFESSD et GFDRR, qui sont administrés par la Banque mondiale. Leur soutien à la réalisation de l'étude s'est avéré essentiel, et les responsables de l'étude tiennent à les remercier chaudement.

Le Département du Développement Durable de la Région Moyen Orient et Afrique du Nord de la Banque, dirigé par Laszlo Lovei, et à son intérieur l'Unité de Développement Urbain et Social, dirigé par Anna Bjerde, sont les responsables institutionnels de sa réalisation.

L'étude est dirigée et supervisée par Anthony G. Bigio, qui conduit une équipe composée par Stéphane Hallegatte, Osama Hamad, Salim Rouhana, et Asmita Tiwari.

Les collègues examinateurs qui ont participé au travail de contrôle de qualité de l'étude sont Alexander Bakalian, Henrike Brecht, Philippe Huc, Alexander Kremer, Michel Matera et Edward Tshan, pour le compte de la Région Moyen Orient et Afrique du Nord ainsi que du GFDRR.

Liste des principaux contributeurs

Yves Ennesser (Egis BCEOM International)

Victor Said (IAU-IDF)

Monique Terrier (BRGM)

Ainsi que

Mireille Raymond, Dominique Cataliotti, Franck Zangelmi, Guillaume Dulac, Michel Albientz, François Bertone, François Beauchain, Fabrizio Ferrucci pour Egis BCEOM International; Eric Huybrechts pour l'IAU-IDF; Terry Winter pour le BRGM.

Avec la contribution de

Azzeddine Motia de la société MORA Etudes

Abdalah Mokssit et Fatima Driouech de la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc

Remerciements

La présente étude n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien d'un certain nombre d'institutions et d'organismes marocains.

Nous tenons en particulier à remercier :

- M. Mohamed Nbou du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Secrétariat d'État Chargé de l'Eau, de l'Environnement, Département de l'Environnement, pour son important travail de coordination des institutions marocaines sur cette étude.
- M. Mouâad Jamai, Secvrétaire Général de la Wilaya de la Région du Grand Casablanca.
- M. Lemghari Essakl, Directeur Général de l'Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg

Nous souhaitons également remercier les organismes suivants pour leur assistance dans l'accès aux données, leur écoute et les avis exprimés :

- Secrétariat d'État Chargé de l'Eau, de l'Environnement, Direction Générale de l'Hydraulique
- Ministère de l'Équipement et des Transports, Direction Régionale de l'Équipement du Grand Casablanca, Direction des Ports et du Domaine Public Maritime, Direction des Affaires Techniques
- Ministère de l'Intérieur, Direction Générale de la Protection Civile, Direction des Secours, de la Planification et des Études
- Agence Urbaine de Casablanca
- Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia
- Office National de l'Eau Potable
- Lyonnaise des Eaux de Casablanca (LYDEC)
- Réseau d'électricité, d'eau potable et d'assainissement liquide de la wilaya de Rabat-Salé (REDAL)
- Institut National de Géophysique (ING/CNRST)
- Mme Snoussi, Université de Rabat, Coordinatrice Nationale du Projet PNUE « Évaluation de l'impact et de l'adaptation au changement climatique dans les zones côtières du Maroc ».

Mention spéciale à la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc, qui a rédigé le chapitre relatif à l'analyse du contexte climatologique et a réalisé le travail de projection climatique à l'horizon 2030.

Enfin, signalons le rôle majeur du Centre de Marseille pour l'Intégration en Méditerranée (CMI) dans la diffusion des résultats de cette étude et la concertation à l'échelle des pays concernés.

Sommaire

Chapitre 1 - Résumé exécutif	15
Chapitre 2 - Introduction.....	51
1 Les objectifs de l'étude.....	51
2 Le contenu du rapport	52
3 Présentation des sites	53
3.1 L'aire urbaine de Casablanca	53
3.2 Le site du Bouregreg.....	54
Chapitre 3 - Elements d'évaluation des aléas en situation actuelle.....	59
1 Contexte géologique.....	59
1.1 Le domaine rifain.....	60
1.2 Le domaine mésétien et les chaînes atlasiques	61
1.3 Le domaine anti-atlasique et saharien	62
1.4 Coupe schématique NNE-SSW depuis la mer d'Alboran jusqu'à la Meseta marocaine.....	62
2 Sismologie et tsunamis	64
2.1 Contexte sismotectonique.....	64
2.1.1 Cadre géodynamique global.....	64
2.1.2 Sismicité du Maroc	65
2.1.3 Mécanismes au foyer des séismes	70
2.1.4 Vitesse de mouvement des plaques et taux de déformation	72
2.1.5 Synthèse sismotectonique et situation des sites du Bouregreg et de Casablanca par rapport aux structures actives majeures.....	74
2.2 Évaluation de l'aléa sismique régional.....	77
2.2.1 Notions sur l'évaluation de l'aléa sismique	77
2.2.2 Thèse de M.T-E Cherkaoui Maknassi (1991) sur la « Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc »	80
2.2.3 GSHAP, Global Seismic Hazard Assessment Program	84
2.2.4 Projet SESAME	86
2.2.5 Évaluation de l'aléa sismique au niveau du Maghreb (Benouar et al., 1998) et au nord du Maroc	88
2.2.6 Zonage sismique du Maroc adopté par le RPS2000	88
2.3 Évaluation de l'aléa tsunami	90
2.3.1 Introduction.....	90
2.3.2 Localisation des principales sources sismiques tsunamigènes relatives à la cote ouest marocaine	91
2.3.3 Événements historiques	92
2.3.4 Résultats des principales études de scénario et d'aléa tsunami	96
3 Érosion côtière et submersion marine.....	98
3.1 Conditions océanographiques	98
3.1.1 Les vents	98
3.1.2 Les variations du niveau des eaux	99
3.1.3 Les agitations	102
3.1.4 Les courants.....	110
3.2 Le milieu sédimentaire	111
3.2.1 Caractéristiques sédimentaires générales du plateau continental.....	111
3.2.2 Les transports sédimentaires	112
3.3 Définition des risques en situation actuelle.....	114
3.3.1 La nature du littoral.....	114
3.3.2 Les zones à risque - Définitions	114

4	Ressources et besoins en eau	118
4.1	Études de référence.....	118
4.1.1	Étude d'évaluation des eaux de surface de la zone d'action de l'agence de bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (Royaume du Maroc – Agence de bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia – CID - Avril 2004)	118
4.1.2	Étude du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (PDAIRE)	118
4.1.3	Schéma directeur AEP actualisé (LYDEC – SAFEGE - 2006)	119
4.2	Analyse de la situation actuelle au regard de la ressource	119
4.2.1	Eaux de surface	119
4.2.2	Eaux souterraines	120
Chapitre 4 - Elements d'évaluation des aléas à l'horizon 2030		123
1	Climat et évènements climatiques exceptionnels.....	123
1.1	Introduction	123
1.2	Données et méthodologie utilisées	124
1.2.1	Données de modélisation	124
1.2.2	Horizon	126
1.2.3	Calibrage des données.....	127
1.3	Projections futures de changement climatique	128
1.3.1	Généralités.....	128
1.3.2	Définition des indices considérés	129
2	Changement climatique et élévation des niveaux marins	130
2.1	Les effets du changement climatique	130
2.2	Elévation récente du niveau de la mer.....	133
2.2.1	Les variations du niveau de la mer au cours du XXème siècle	133
2.2.2	Évolution du niveau des eaux au cours des dernières décades.....	134
2.3	Les principaux facteurs d'élévation du niveau de la mer	135
2.4	Bilan de l'élévation du niveau de la mer ces dernières années.....	137
2.5	Projection du niveau moyen des eaux pour le XXIème siècle.....	138
2.5.1	Données générales	138
2.5.2	Données détaillées.....	140
2.6	Proposition de taux d'élévation du niveau global des eaux en 2030.....	146
Chapitre 5 - Évaluation économique.....		149
1	Introduction	149
2	Enjeux méthodologiques et approche proposée	150
2.1	Quelques aspects méthodologiques généraux.....	150
2.2	Les coûts directs	153
2.2.1	Bottom-up vs Top-down et fonction de dommages	153
2.2.2	La valorisation immobilière.....	155
2.2.3	Infrastructures collectives	159
2.3	Les coûts indirects	159
2.4	Discussion sur le domaine de validité des résultats	161
2.4.1	La gestion des incertitudes.....	161
2.4.2	Le dilemme éthique de la valorisation	163
2.4.3	Prise en compte d'autres spécificités locales: effet de hub et patrimoine....	164
3	Évaluation des coûts socio économiques de l'impact du changement climatique et des catastrophes naturelles	165
3.1	Séismes	165
3.2	Tsunamis.....	165
3.3	Inondations.....	166
3.4	Tempêtes	172

3.5 Ressources en Eau.....	174
4 Analyse des résultats.....	175
Chapitre 6 - Evaluation sanitaire.....	179
1 Introduction	179
2 Changement climatique et santé.....	180
3 Eléments de calculs	181
4 Résultats.....	184
Chapitre 7 - Évaluation institutionnelle	187
1 Introduction	187
2 Cartographie institutionnelle.....	190
3 Approfondissements de la cartographie institutionnelle	194
3.1 Le Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE) auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement	194
3.2 Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC).....	195
3.3 La Météorologie Nationale (Maroc Météo)	195
3.4 Agences de Bassin Hydraulique	196
3.5 Ministère de l'Intérieur - Direction Générale de la Protection Civile	198
3.6 Ministère de l'Intérieur – Centre de Veille et de Coordination (CVC)	201
3.7 Ministère de l'Intérieur – Gestion des Risques et de Crise à l'échelle locale.....	201
3.8 Conseil Supérieur de l'Aménagement du Territoire (CSAT).....	202
3.9 CNRST – Institut National de Géophysique (Réseau Sismique National).....	202
3.10 Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS)	203
4 Remarques.....	204
4.1 L'Eau	204
4.2 Les Séismes.....	205
4.3 L'Urbain.....	205
4.4 Les Changements Climatiques	206
4.5 Questions transversales	206
5 Étude de cas	207
5.1 Introduction	207
5.2 Les inondations de l'hiver 2009-2010	207
6 Conclusions.....	210
7 Sources d'information	211
Chapitre 8 - Références bibliographiques.....	213

Liste des figures

Figure 1 : Périmètre et occupation des sols de l'aire d'étude du Grand Casablanca (source : AUG, IAURIF, Image Spot 2004).....	55
Figure 2 : Périmètre et parti d'aménagement du site du Bouregreg	57
Figure 3 : Principaux ensembles géologiques de la région ibéro-maghrébine (d'après Buforn et al., 1995).....	59
Figure 4 : Extrait de la carte sismotectonique de la Méditerranée (CGMW, 2004), modifiée.....	61
Figure 5 : Carte structurale et coupe à l'échelle crustale de la chaîne rifaine (extrait de Michard et al. 2006).....	63
Figure 6 : La limite de frontière de plaques entre l'Europe et l'Afrique, Extrait de la carte sismotectonique du monde à 1/25 000 000 (CGMW et UNESCO, 2001)	64
Figure 7 : Épicentres de séismes de profondeur focale inférieure à 40 km et de magnitude supérieure à 5,0, pour la période 1931-2000 (Buforn, 2009)	65
Figure 8 : Épicentres des séismes historiques dans la région Ibéro-Maghrébine (Buforn, 2009).....	66
Figure 9 : Carte des épicentres de séismes historiques majeurs, d'après Mrabet (2005), Alami et al. (2004), Mezcua et Martinez Solares (1983), la base de données NGDC/NOAA	67
Figure 10 : Carte de séismes historiques majeurs du Maghreb, d'après Mrabet (2005).....	69
Figure 11 : Mécanismes au foyer des séismes (Magnitude > 6, et Profondeur focale < 50km), d'après le catalogue USGS NEIC, in McClusy et al. (2003).....	71
Figure 12 : Moyenne des tenseurs sismiques calculée dans différentes parties de la zone de convergence Afrique Europe depuis les Açores au Tell algérien (Buforn, 2009)	71
Figure 13 : Orientation de la contrainte horizontale majeure et régime de contraintes calculées par Negrodo et al. (2002) au niveau de la zone de convergence actuelle des plaques Afrique et Europe, entre le Maroc, le sud de l'Espagne et l'Algérie.....	72
Figure 14 : Résultat de calculs des vitesses de glissement des principales failles actives, suivant 2 modèles structuraux (dans le 2nd modèle, les chaînes bétique et rifaine sont supposées constituer un arc orogénique unique), d'après Negrodo et al (2002)	73
Figure 15 : Cadre schématique de la tectonique actuelle entre les Açores et la Tunisie (d'après Buforn, 2009)	75
Figure 16 : Structure de la TASZ (Trans Alboran Shear Zone) depuis le sud de l'Espagne au nord du Maroc, d'après Stich et al. (2006)	76
Figure 17 : Principe de l'approche déterministe (d'après Reiter, 1990) : A) prise en compte d'un séisme de référence défini pour la région, B) calcul en chaque point, des pics d'accélération attendus en fonction de la distance à cette source et des lois d'atténuation.....	78
Figure 18 : Principe de l'approche probabiliste (d'après Reiter, 1990) :	79
Figure 19 : Zonage sismique et épicentres de séismes instrumentaux (partie nord, période 1923-1986 ; partie sud : période 1960-1986), réalisé par Cherkoui Maknassi (1991).....	81
Figure 20 : Droites de correspondances entre la magnitude et l'intensité épicentrale selon les relations calculées par Cherkaoui Maknassi (1991).....	82
Figure 21 : Correspondance entre la magnitude et l'intensité épicentrale selon les relations calculées par Lopez Casado et al. (2000).....	82
Figure 22 : Carte de l'aléa sismique, intensités centennales, d'après Cherkaoui Maknassi (1991).....	83
Figure 23 : Carte de l'aléa sismique, intensités bicentennales, d'après Cherkaoui Maknassi (1991).....	84
Figure 24 : Zonation sismique mondiale en accélération maximale (PGA) en m/s ² , résultat du programme GSHAP (1999).....	85

Figure 25 : Carte d'aléa sismique pour la région Ibéro-Maghreb, valeur du PGA en m/s ² avec 10% de chance de survenance en 50 ans, résultat de GHSAP (extrait de Jimenez et al., 1999)	85
Figure 26 : Zonage sismique du Maroc retenu dans le cadre de GSHAP (extrait de Jimenez et al, 1999).....	86
Figure 27 : Le zonage proposé dans le cadre du projet SESAME, différences des contours avec ceux proposés dans le cadre du projet GSHAP (zone en aplat vert), d'après Jimenez et al. (2001).....	87
Figure 28 : Carte d'aléa sismique de la Méditerranée (avec un zoom sur le Maroc) présentant la valeur du PGA en g, avec 10% de probabilité de survenance dans les 50 ans, d'après Jimenez et al. (2001).....	87
Figure 29 : Zonage sismique du Maroc et coefficient d'accélération maximale retenue pour chacune des zones.....	89
Figure 30 : Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage	90
Figure 31 : Localisation des principales zones sources sismiques tsunamigéniques (limite en rouge) pour la cote ouest du Maroc (extrait de Olimira et al., 2009).....	91
Figure 32 : Séismes d'épicentre connu et ayant générés des tsunamis au niveau des côtes du Maroc (d'après Kaaboulen et al., 2009)	93
Figure 33 : Localisation des murs de l'ancienne cité de Salé. La médina est située à l'intérieur de l'enceinte, soit environ à 860 m du rivage. Les descriptions sont cohérentes avec une profondeur d'inondation maximale de 2000 m lors du tsunami de 1755 (Kaaboulen et al, 2009).....	95
Figure 34 : Caractéristiques des ruptures sismiques maximales simulées au niveau de chacune des zones tsunamigéniques identifiées dans le Golfe de Cadix (Omira et al., 2009), cf Figure 31.....	97
Figure 35 : Les différentes composantes des surcotes marines	100
Figure 36 : Histogramme de répartition annuelle de la hauteur de la houle au large de Casablanca. DMN, 2003 (source : Mohamed Idrissi, 2006).....	102
Figure 37 : Répartition fréquentielle mensuelle de la période de la houle au large de Casablanca (DMN, 2003 in Idrissi, 2006)	103
Figure 38 : Répartition fréquentielle mensuelle de la hauteur de la houle au large de Casablanca (DMN, 2003 in Idrissi, 2006)	104
Figure 39 : Carte de la bathymétrie utilisée entre Dar Bouaaza et Mohammedia (in Idrissi, 2006)	106
Figure 40 : Distribution spatiale de la hauteur significative de la houle simulée par le modèle SWAN.....	107
Figure 41 : Plan de vague dans la baie de Mohammedia pour une houle hivernale de 3,4m d'amplitude et de 15s de période (source : F. Gouaud, 2006)	108
Figure 42 : Visualisation des lignes de crêtes (source : F. Gouaud, 2006).....	109
Figure 43 : Carte des faciès du plateau continental marocain (Jaaidi, 1981).	111
Figure 44 : Schéma de l'attaque par les vagues de tempête de la plage et de la dune (Shore Protection Manual, vol 1, Coastal engineering research, 1984).....	117
Figure 45 : Carte des principales nappes de la zone hydrographique de l'Agence de bassin du Bouregreg et de la Chaouia	121
Figure 46 : Évolution des émissions et de la croissance de la température globale suivant les scénarios d'émission du GIEC. Source : quatrième rapport du GIEC.	126
Figure 47 : Représentation schématique de la méthode de calibrage qqplots.	128
Figure 48 : Changements de température et précipitation projetés pour l'Afrique pour la période 2080-2099 par rapport à 1980-1999.	129
Figure 49 : Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (ces incidences varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socio-économique).....	132
Figure 50 : Élévation moyenne du niveau des eaux en mm (à partir de données marégraphiques) depuis 1870 (mise à jour de Church and White, 2006)	134
Figure 51 : Variation du niveau moyen de la mer (différence entre la moyenne de 1993 à mi 2001) obtenue à partir des données altimétriques satellitales de janvier 1993 à octobre 2005.	135

Figure 52 : Élévation moyenne du niveau des eaux entre janvier 1993 et décembre 2008.....	138
Figure 53 : Projections et incertitudes (5% - 95%) de l'élévation du niveau moyen de la mer et des facteurs responsables de l'élévation du niveau des eaux pour la période 2090-2099 pour les six scénarios du SRES.....	139
Figure 54 : Comparaison entre les observations et les projections de l'élévation du niveau la mer entre 1990 et 2006 (D'après Rafmstorf et al., 2006) http://www.legos.obs-mip.fr	140
Figure 55 : Changement du niveau de la mer sur la période 1970-2010.....	141
Figure 56 : Évolution des zones de fonte de la banquise du Groenland obtenue à partir d'observations satellitales	142
Figure 57 : Diminution de la masse de la nappe de glace Antarctique depuis 1992.....	143
Figure 58 : Récente projection de l'élévation du niveau de la mer.....	145
Figure 59 : a) carte de variabilité spatiale des niveaux d'eau entre janvier 1993 et décembre 2008. b) identique à (a) mais la tendance mondiale moyenne de 3,4 mm/an a été supprimée	146
Figure 60 : Évolution de l'urbanisation et de la vulnérabilité	152
Figure 61 : Décomposition et évolution de la valeur de l'immobilier	158
Figure 62 : Hypothèses de valorisation du coût des inondations.....	168
Figure 63 : Décomposition du coût des désastres naturels par type de risque.....	175
Figure 64 : Organisation fonctionnelle (après 2009) de la Direction Générale de la Protection Civile.....	199
Figure 65 : Réseau de stations limnimétriques télémétrées (points verts).....	209
Figure 66 : Relevés pluviométriques (bleu) et limnimétriques (rouge) à la station d'Ain Loudah, au mois de janvier 2010.....	209

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des tsunamis répertoriés au niveau des côtes du Maroc (extrait de Kaaboulen et al., 2009), en caractères gras, ceux ayant touchés la cote ouest du Maroc.....	92
Tableau 2 : Distribution des vents par direction sur la côte de la Meseta marocaine, DMN, 2003 (source: Mohamed Idrissi 2006).....	98
Tableau 3 : Caractéristiques des niveaux d'eau	101
Tableau 4 : Amplitude des houles au large en fonction de leur période de retour	103
Tableau 5 : Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXIème siècle à l'échelle du globe.....	130
Tableau 6 : Exemple d'incidences régionales anticipées.....	133
Tableau 7 : Estimation récentes de l'élévation du niveau des eaux à partir de mesures marégraphiques	133
Tableau 8 : Estimation des différentes contributions à l'élévation du niveau de la mer pour la période 1961-200 » et 1993- 2003 (GIEC, 2007)	137
Tableau 9 : Variations du niveau des eaux pour la période 1993-2007 et 2003-2007	137
Tableau 10 : Projection des élévations du niveau de la mer sur la base des scénarios SRES	139
Tableau 11 : Les différentes composantes de l'élévation du niveau des eaux (mm/an).....	144
Tableau 12 : Hypothèses considérées par l'ONERC	147
Tableau 13 : Niveaux de vulnérabilité en fonction de la typologie urbaine	156
Tableau 14 : Coût moyen annuel des dommages liés à l'érosion marine.....	173
Tableau 15 : Incidence annuelle des maladies diarrhéiques, de la malnutrition et du paludisme par grande région de l'OMS, 2002	180
Tableau 16 : Évaluation économique du risque sanitaire (coûts directs	184
Tableau 17 : Évaluation économique du risque sanitaire (coûts directs	185
Tableau 18 : Dommages économiques des désastres naturels au Maroc (source : PreventionWeb).....	188
Tableau 19 : Questions guide de l'évaluation institutionnelle	189
Tableau 20 : Synthèse de la cartographie institutionnelle.....	191
Tableau 21 : Liste des opérations sous contrôle des Agences de Bassin	197
Tableau 22 : Liste des personnes rencontrées dans le cadre de l'analyse institutionnelle	211

Acronymes et abréviations

ACB	Analyse Coûts Bénéfices
APS	Avant Projet Sommaire
ASE	Agence Spatiale Européenne
BaU	Business as Usual
BEECD	Basic European Earthquake Catalogue Database
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CC	Changement Climatique
CDF	Fonction de distribution cumulative
CMA	Coût moyen annuel
CRU	Climatic Research Unit
DALY	Disease Adjusted Life Year
EANM	Élévation accélérée du niveau marin
EmDAT	Emergency Database
EMS	Échelle macrosismique européenne
GEF	Global Environmental Facility
GES	Gaz à effets de serre
GEV	Generalized Extreme Value
GFDRR	Global Facility for Disaster Reduction and Recovery
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GMES	Surveillance globale de l'environnement et de la sécurité
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GSHAP	Programme d'Évaluation du Risque Sismique Global
IAU-IDF	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile de France
IGN	Institut Géographique National
INGV-SGA	Instituto Nacionales di Geofísica e Vulcanología - Storia Geofísica Ambiente
ISDR	Stratégie Internationale pour la Réduction des Désastres
ISTED	Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement
LCHF	Laboratoire Central d'Hydraulique de France
LYDEC	Lyonnaise des Eaux de Casablanca
MCG	Modèles de circulation générale
MNT	Modèle Numérique de Terrain

MOAN	Moyen Orient – Afrique du Nord
MOS	Mode d'Occupation du Sol
NGDC- NOAA	National Geophysical Data Centre – National Oceanic and Atmospheric Administration
NGM	Nivellement Général du Maroc
NTF-PSI	Norwegian Trust Fund for Private Sector and Infrastructure
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONPC	Office National de la Protection Civile
PGA	Peak Ground Acceleration
PGV	Peak Ground Velocity
PIB	Produit Intérieur Brut
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
RCM	Modèles à aire limitée
SDAU	Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
SDSM	Modèle de réduction d'échelle statistique
SESAME	Seismotectonics and Seismic Hazard Assessment of the Mediterranean Basin
SIG	Système d'information géographique
SMBA	Sidi Mohammed Ben Abdallah
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
STEP	Station d'épuration
TFESSD	Trust Fund for Environmentally & Socially Sustainable Development
TRE	Troisième rapport d'évaluation du GIEC
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
USGS NEIC	National Earthquake Information Center
ZH	Zéro hydrographique

Chapitre 1 - Résumé exécutif

Le présent résumé exécutif fait la synthèse des trois volumes relatifs à l'évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Casablanca et la vallée du Bouregreg : rapport commun, rapport relatif à la ville de Casablanca, rapport relatif au site du Bouregreg.

Une étude pilote s'inscrivant dans un cadre régional

La présente étude, dirigée et financée par la Banque Mondiale, concerne **l'adaptation au changement climatique et aux désastres naturels de la région du Grand Casablanca et de la vallée du Bouregreg au Maroc**. Elle s'inscrit dans un cadre plus large d'évaluation de la vulnérabilité des villes côtières d'Afrique du Nord face au changement climatique et aux désastres naturels. Ce premier volume de l'étude constitue le **rapport de phase 1**, relatif à l'évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030.

La zone d'étude est définie par le périmètre considéré au Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de Casablanca et le périmètre officiel établi pour l'aménagement de la vallée du Bouregreg. L'analyse porte néanmoins essentiellement sur les aires urbaines de ces deux périmètres.

Des risques naturels dominés par les inondations

Sur le plan géologique, les sites de Casablanca et du Bouregreg appartiennent à la partie côtière du domaine de la Meseta marocaine très peu sismique aujourd'hui. La Meseta côtière est séparée de la Meseta centrale par un accident ancien de direction NNE-SSW, non actif aujourd'hui. Au niveau du site du Bouregreg, les formations néogènes et quaternaires (peu cohésives et donc soumises à des phénomènes de tassement ou liquéfaction) sont épaisses, et la mauvaise **qualité géotechnique des terrains** en place contribue à majorer le risque sismique. Les versants de la vallée du Bouregreg présentent par ailleurs des signes d'instabilité par glissement de terrain ou chutes de blocs, ce qui constitue également un facteur aggravant du risque sismique.

De fait, si sur Casablanca l'on peut considérer un **risque sismique** négligeable, soit une intensité de l'ordre de IV à IV-V pour une période de retour de 50 ans, correspondant à des dommages potentiels inexistantes ou très faibles, le niveau de risque peut être relevé d'un degré pour le site du Bouregreg, où de légers dommages peuvent apparaître sur les habitations les plus sensibles.

L'analyse des événements historiques et du contexte sismotectonique indique une exposition relativement importante de la cote ouest marocaine au **risque de tsunami**. Néanmoins, pour un événement de type 1969, la période de retour est de l'ordre de 200 ans. La hauteur des vagues à la cote ouest marocaine pour cet événement est estimée inférieure à 1m, ce qui correspond en intensité à des ondes de tempête de fréquence cinquantennale.

La cartographie des risques littoraux, établie par confrontation des enjeux-sensibilités socioéconomiques et environnementales du littoral et des aléas d'érosion ou de submersion,

fait apparaître un **risque d'érosion côtière et de submersion marine** essentiellement localisé entre l'extrémité est de Casablanca et la centrale thermique de Mohammedia, sur un secteur d'une dizaine de kilomètre de plages. En tout, 40 à 50 km de linéaire côtier sont considérés en risque fort sur la zone d'étude. Ces risques sont également jugés importants à l'embouchure du Bouregreg. Le risque d'érosion est fonction de la nature du littoral (sableux ou rocheux) et des mécanismes d'évolution en jeu (apports sédimentaires, aménagement du littoral). Le risque de submersion est quant à lui établi à partir d'une surcote marine de 1 m qui, s'ajoutant à une cote de marée de vive eau, peut conduire à une hauteur de submersion de 2,77 m NGM à Casablanca, 2,65 m NGM à l'embouchure du Bouregreg, pour une fréquence cinquantennale.

Ce sont sans conteste les **risques d'inondation** fluviale ou par ruissellement qui constituent les principaux risques naturels sur les deux zones d'étude. Déjà en situation actuelle le niveau de protection sur Casablanca est faible, celui-ci correspondant à une période de retour de seulement 5 ans en zone urbaine. Une dizaine de « points noirs » répertoriés par la LYDEC occasionnent des débordements fréquents dans des secteurs très urbanisés et pénalisent des voies de communication importantes. Les débordements dans ces secteurs sont dus à différents facteurs :

- insuffisance des collecteurs principaux, constatée depuis 1997, pour la moitié d'entre eux,
- absence de réseau d'assainissement pluvial pour deux d'entre eux,
- densification de l'urbanisation sur le bassin versant pour trois d'entre eux conduisant à l'insuffisance des collecteurs face à l'accroissement des débits.

Le développement galopant de l'urbanisation en amont des secteurs urbains existants conduit à l'apparition de nouveaux points de débordement du fait de l'insuffisance des collecteurs aval pour absorber les débits supplémentaires, et de la non prise en compte des principes d'aménagements à respecter pour limiter les débits en aval des zones nouvellement urbanisées.

Le lit naturel de l'oued Bouskoura traverse la zone urbaine de Casablanca et est complètement urbanisé. La section d'écoulement dans sa traversée de l'agglomération est très largement réduite, puisque la capacité du collecteur est de 2 m³/s (à comparer avec le débit décennal de l'ordre de 45 m³/s). En cas de forte pluie comme en 1996, des inondations se produisent dans le centre ville. Les difficultés pour l'estimation des débits caractéristiques de l'oued Bouskoura conduisent à des fourchettes d'estimation assez larges, selon la pluviométrie prise en compte et la méthode d'évaluation.

L'oued El Maleh a provoqué des inondations catastrophiques en novembre 2002 dans la ville de Mohammedia. Ces inondations ont été aggravées par de nombreux facteurs tels que l'occupation du lit majeur, la présence d'obstacles à l'écoulement, des sections hydrauliques de franchissement insuffisantes. Cette crue de période de retour estimée à 65 ans en amont du barrage El Maleh, a été fortement écrêtée par ce barrage.

En ce qui concerne le Bouregreg, Des études hydrauliques détaillées ont été effectuées dans le cadre du projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg. Elles ont défini les hypothèses à prendre en compte pour les études à venir : conditions hydrologiques en amont du barrage SMBA, conditions de laminage des crues, conditions de concomitance avec l'oued Arach, conditions aval. En situation actuelle, les inondations sont généralisées dans la vallée du Bouregreg pour la crue de référence centennale, les inondations commencent dans la partie amont et centrale dès la crue décennale. Les ouvrages de franchissement ne sont pas submergés pour la crue de référence.

Les **risques de pénurie des ressources en eau** sont relativement faibles en situation actuelle, grâce l'important programme de barrages mis en œuvre par les autorités marocaines depuis plusieurs décennies. L'alimentation en eau du Grand Casablanca est ainsi assurée par deux ressources principales : le barrage SMBA, sur l'oued Bouregreg, qui assure 38% des besoins ; et le barrage El Massira, sur l'Oum Er Rabia, pour le reste. La disponibilité des eaux superficielles régulées par les barrages permet de limiter l'incidence des sécheresses.

Un changement climatique déjà sensible ...

Casablanca et Rabat ont connu un **réchauffement durant les cinq dernières décennies**. A l'échelle annuelle, la température moyenne a augmenté, sur la période 1961-2008, avec une tendance de 0,3°C par décennie à Casablanca et de 0.2°C par décennie à Rabat. En termes pluviométriques, les deux villes marocaines montrent une claire tendance à la baisse au niveau des cumuls annuels ; soit une diminution d'environ 2,8 mm/an.

Les projections futures à l'horizon 2030, évaluées à l'aide de modèles de descente d'échelle dynamique sur plusieurs scénarios d'évolution des gaz à effet de serre, prévoient pour Casablanca un réchauffement de 0,8 à 1,3 °C à l'échelle annuelle, accompagné d'une faible augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur estivales. Les cumuls pluviométriques annuels sont supposés baisser de 6 à 20%, ceux de l'hiver de 15 à 35%. Les évolutions prévisibles sur Rabat sont du même ordre de grandeur.

Les extrêmes quotidiens (précipitations maximales sur 24h) n'évoluent pas de la même façon pour tous les modèles-scénarios. L'incertitude concerne aussi bien les amplitudes que les périodes de retour. Pour les pluies maximales journalières de période de retour 10 ans, les prévisions de variation entre la situation actuelle et la période future (horizon 2030), varient ainsi entre - 30% et + 27% selon les modèles. Cette variabilité s'accroît encore pour la période de retour 50 ans. A défaut, il est décidé dans le cadre de la présente étude de considérer les résultats du modèle-scénario le plus pessimiste, soit CNRM_A1B, ne serait-ce que pour répondre au principe de précaution.

... qui peut exacerber certains risques naturels

En dehors des risques géologiques (instabilités des terrains naturels) et sismiques, les autres risques naturels seront affectés par le changement climatique.

Les conditions d'érosion et de submersion côtières seront notamment affectées par **l'élévation du niveau marin** indirectement provoquée par le réchauffement climatique, via les phénomènes d'expansion thermique des masses d'eau (dilatation) et la fonte des calottes polaires. Sur la base d'une analyse critique des projections du GIEC et des dernières références bibliographiques sur ce sujet, nous considérons pour cette étude une **élévation globale du niveau marin de 20 cm à l'horizon 2030**. Signalons qu'il s'agit d'une hypothèse haute, impossible à affiner sur la côte atlantique marocaine en l'absence de données marégraphiques sur une longue période.

En dépit des nombreux projets de protection du littoral, **l'élévation du niveau marin va réactiver ou amplifier le processus d'érosion côtière**, et donc de recul du trait de côte. Les plages sableuses encore à l'état naturel risquent de **reculer en moyenne de 10 à 15 m** d'ici 2030. Dans les secteurs urbanisés, les murs de protection construits pour protéger les habitations vont accentuer le recul de plage et connaîtront des dommages notables

(affouillements en pied des murs). **En cas de tempêtes associées avec un haut niveau des eaux** (prise en compte d'une valeur de + 2,85 m NGM pour le Bouregreg, + 3 m NGM pour Casablanca), les aménagements de haut de plage dans les zones urbanisées risquent de **subir d'importants dommages**, la largeur de plage étant insuffisante pour amortir l'effet des houles car trop proche de la laisse de mer. Les plages sableuses restées à l'état naturel seront totalement immergées et devraient montrer un recul significatif. Toutefois elles devraient pouvoir se reconstituer partiellement pendant les périodes de beau temps, et quasiment en totalité lorsque l'arrière-plage est constituée de dunes.

Sur la région de Casablanca, les linéaires de côte exposés à un fort risque d'érosion ou de submersion resteront sensiblement identiques par rapport à la situation actuelle, soit environ 40 km de côte. L'élévation du niveau de la mer augmentera néanmoins légèrement les **risques de submersion des terrains les plus bas**, notamment au niveau des débouchés des oueds principaux : Mehla et Nfifich (+ 140 ha de zones submergées pour un évènement de fréquence cinquantennale). Par contre, au niveau de l'embouchure de la vallée du Bouregreg, le projet de digue devrait fortement diminuer les impacts négatifs de la surélévation du niveau des eaux associée à de fortes houles. L'érosion des plages se poursuivra mais à un rythme plus faible.

En ce qui concerne les **risques d'inondation fluviale ou par ruissellement**, sur Casablanca, la prise en compte par Maroc Météo de l'évolution climatique sur la période 1960-2004 a déjà conduit à un accroissement des débits décennaux de l'ordre de 20%. L'objectif de protection retenu dans le cadre du nouveau schéma directeur d'assainissement en cours d'élaboration est de 10 ans, sur la base des courbes intensité-durée-fréquence réévaluées.

L'aménagement du Super Collecteur Ouest permettra de dévier les eaux de crue de **l'oued Bouskoura**. Le projet est dimensionné pour une période de retour de 20 ans, et le collecteur recevra également les eaux de ruissellement de plusieurs bassins versants existants ou en cours d'urbanisation. Pour ces bassins, les débits de projet à drainer par le Super Collecteur Ouest correspondent à la période de retour 10 ans. L'incidence de la montée du niveau marin ne devrait pas perturber de manière significative le fonctionnement de ce collecteur pour l'évacuation des crues compte tenu de la pente relativement importante de l'ouvrage (0,7%). Le changement climatique pourrait néanmoins entraîner un accroissement des débits de crue de l'ordre de 15%, ce qui réduirait le niveau de protection de 20 ans à 15 ans environ. Cependant, l'incertitude sur l'estimation des débits de l'oued est forte, et une attention particulière devra être portée sur le comportement du collecteur en cas d'épisodes exceptionnels, dépassant la crue de projet.

Les aménagements prévus, notamment les barrages sur **l'oued El Maleh** et ses affluents, ont pour objectif de réduire les débits de crue à l'entrée de la ville de Mohammedia. L'incidence du changement climatique pourrait conduire à un accroissement des débits de crue de 15%, hors incidence des barrages. Cette incidence ne se manifesterait en aval qu'à partir de la crue centennale, du fait de la forte incidence des barrages sur les crues inférieures à la crue centennale (les crues seront notamment complètement écrêtées par le barrage de Boukerkour jusqu'à la période de retour 100 ans ; ce barrage contrôle environ la moitié du bassin versant). Les aménagements en aval permettent d'améliorer l'évacuation en mer et de protéger les secteurs les plus vulnérables. L'incidence de la montée du niveau marin reste à analyser, les informations disponibles n'étant pas suffisantes pour l'évaluer plus précisément.

Au niveau de **la plaine de la Chaouia**, en amont de Casablanca, le développement et l'urbanisation des bassins versants demandent une vigilance particulière. En effet, actuellement les eaux de crue de ces bassins s'étalent et s'infiltrent dans la plaine de Berrechid qui constitue une vaste zone d'épandage. Les eaux de crue participent notamment à la recharge de la

nappe. Le risque d'inondation des zones situées en aval de la plaine de Berrechid en cas de forte crue n'est pas à écarter, compte tenu du développement de l'urbanisation et de la concentration des eaux de ruissellement qui y sera nécessairement associée.

Les aménagements urbains projetés dans la vallée de l'**oued Bouregreg** prévoient une protection localisée des zones à maintenir hors d'eau pour la crue centennale (digues), crue de référence du projet d'aménagement. La mise hors d'eau de la zone urbaine de 370 hectares prévue en séquence 3 en amont de la voie ONCF entraîne une surélévation maximale des niveaux d'eau dans le secteur amont de l'ordre de 35 cm (résultats issus de la modélisation 2D réalisée dans les études complémentaires du projet). Les hypothèses associées au changement climatique pourraient entraîner un accroissement du débit de pointe de la crue centennale en aval du barrage SMBA de l'ordre de 17%. Cet accroissement entraînerait une surélévation des niveaux d'eau dans la zone inondable de l'oued Bouregreg variant entre +35 cm en aval du pont Moulay Hassan, entre +20 et +30 cm dans le secteur compris entre le pont ONCF et la voie de contournement. Le cumul des deux impacts entraînerait une surélévation de l'ordre de 65 cm en amont de la zone urbaine. Ces niveaux sont à prendre en compte pour la détermination des ouvrages de protection, et l'analyse des variantes. Le projet d'aménagement comprend la réalisation de deux plans d'eau, dont les volumes oscillants, suivant les cycles de marée, doivent permettre de maintenir des vitesses suffisantes dans les chenaux pour assurer des niveaux minimaux. Des variantes du projet sont en cours d'analyse afin d'atteindre l'objectif souhaité. L'incidence de la montée du niveau marin de 20 cm au niveau de l'embouchure s'amortit rapidement vers l'amont pour la crue centennale : elle n'est plus que de 5 cm à 850 mètres en amont. Cette montée du niveau marin pourrait cependant avoir une incidence sur les vitesses d'écoulement dans les chenaux de navigation hors période de crue.

Enfin, s'agissant de la **gestion des ressources en eau**, l'évolution de la demande dans le Grand Casablanca devrait croître de 1,7% sans les grands projets, et de 1,9% par an avec les grands projets. Ces taux sont basés sur l'atteinte d'un rendement du réseau de distribution de 80%, qui est actuellement de 72%, et sur une relative stagnation des dotations unitaires. L'incidence du changement climatique pourrait être importante sur la disponibilité de la ressource du barrage du Bouregreg (SMBA), les apports moyens pouvant diminuer de l'ordre de 30%, et même jusqu'à 40%. Les informations disponibles sont insuffisantes pour une évaluation plus précise de l'allocation besoins-ressources pour le Grand Casablanca, qui doit prendre en compte l'évolution des besoins de toute la zone desservie par le barrage SMBA, ainsi que l'évolution éventuelle de la dotation sur l'Oum Er Rabia, de 120 Mm³ par an. Cette dotation représenterait en effet la moitié de la demande en eau du Grand Casablanca à l'horizon 2030. Le projet d'urbanisation de la vallée du Bouregreg contribuera à augmenter la pression sur les ressources en eau.

L'apparition de nouvelles vulnérabilités à l'horizon 2030

La population de la région du Grand Casablanca est répartie entre **3 325 000 habitants** en zone urbaine et 305 000 en milieu rural. Elle a progressé de plus de 504 000 personnes au cours de la période intercensitaire 1994-2004, soit une croissance annuelle soutenue, même si elle apparaît en léger retrait par rapport à la période antérieure. Cette progression régulière en volume depuis 1994 traduit en revanche un **rythme annuel moyen en régression constante** (+ 1,5 % par an en moyenne de 1994 à 2004, contre + 2,0 % par an de 1982 à 1994).

Il convient de noter une progression près de deux fois plus rapide du nombre de ménages que de la population, ce qui induit une **très forte pression urbaine**. De fait, l'on assiste actuellement à une croissance urbaine de 700 ha à 1000 ha par an. Mais cette urbanisation a

changé de configuration. Longtemps située dans le prolongement immédiat de l'agglomération, et produite essentiellement par des opérations publiques, elle s'est progressivement développée « hors les murs », prenant des formes diverses, plus ou moins conformes aux règlements d'urbanisme.

En situation actuelle, **les principales vulnérabilités** aux risques naturels de la région de Casablanca sont :

- les quartiers d'habitation dense construits en matériaux de mauvaise qualité (médiina, casbah, habitat précaire, habitat urbain d'après-guerre de mauvaise qualité). L'aléa sismique est cependant jugé suffisamment faible pour que les risques soient négligeables.
- S'agissant du risque d'érosion et de submersion marine, les vulnérabilités concernent essentiellement le front de mer urbanisé bordant la plage entre Casablanca et Mohammedia, Rappelons que les risques de tsunamis évalués dans le cadre de la présente étude sont du même ordre que ceux induits par une surcote marine engendrée par une tempête cinquantennale.
- Vis-à-vis des risques d'inondation, les secteurs à risques sont relativement dispersés, et correspondent surtout à des zones peu ou mal dotées en matière d'assainissement pluvial. Depuis l'aménagement hydraulique de l'oued El Maleh, les inondations se concentrent surtout sur la partie urbaine du bassin de l'oued Bouskoura.

Le SDAU retient comme hypothèse une population de 5,1 millions d'habitants en 2030, correspondant à un taux de croissance annuel de 1,3%. Les besoins en logements qui découlent des projections démographiques sont considérables. Pour satisfaire ces besoins, découlant de la seule croissance du nombre des ménages, il faudrait construire entre 24 000 logements et 28 000 en moyenne par an. Le parti d'aménagement préconisé consiste à maîtriser la croissance de la ville-centre (Casablanca) et d'organiser l'accueil de la majeure partie de la croissance démographique et économique dans les pôles périphériques plutôt qu'en expansion en tâche d'huile de la ville-centre.

Avec la résorption de l'habitat insalubre, la tendance à la réduction de la densité urbaine, et l'amélioration de la qualité des matériaux de construction, l'on devrait assister à une réduction de la vulnérabilité aux risques sismiques, même si – avec la croissance démographique – une plus forte population sera exposée. En revanche, le **renforcement de l'urbanisation et le développement de grands projets tout au long du littoral** risque de créer des conflits d'usage et être en contradiction avec les mesures préventives et de protection lié au changement climatique, notamment en matière d'érosion, de tsunami et d'élévation du niveau de la mer. Ces risques sont d'autant plus importants au niveau des sites sensibles tels que la raffinerie SAMIR et le pôle industriel et portuaire à Mohammedia. Notons que ces sites sensibles sont également situés à l'embouchure de l'oued El Maleh, et donc sous la menace d'inondations fluviales exceptionnelles (au-delà de la fréquence centennale). En zone urbaine, en dépit d'une augmentation possible de 15 à 20 % des débits de crue, les programmes d'assainissement pluvial et en particulier le projet de super-collecteur ouest de l'oued Bouskoura devraient significativement améliorer la situation. Cela suppose néanmoins la prise en compte des contraintes de non aggravation des débits en aval dans la planification du développement urbain et la maîtrise de l'occupation des sols en zone inondable.

S'agissant du **site du Bouregreg**, les vulnérabilités en situation actuelle sont peu nombreuses, la vallée servant de réserve foncière dans le cadre d'un vaste programme d'aménagement urbain, dont la première séquence, à l'embouchure du cours d'eau, est en voie d'achèvement. En situation future, la vallée va connaître de profonds changements, même si les secteurs urbains ne devraient représenter que 8% de la surface totale du périmètre. La densité urbaine

sur ces secteurs sera par contre forte à très forte (137 600 habitants attendus et 88 200 emplois), sur un site fortement exposé aux risques naturels : inondations par le Bouregreg, submersion marine, instabilité des sols, risque sismique. Le programme d'aménagement devra soigneusement intégrer ces contraintes, qui généreront des surcoûts non négligeables.

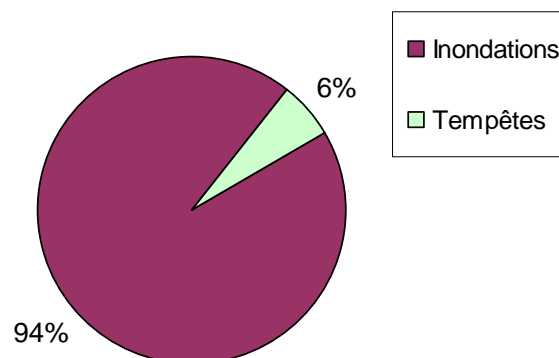
Des dommages qui peuvent être évalués

Une **première approche** du coût des désastres naturels et du changement climatique à l'horizon 2030 est proposée. Elle intègre les dommages relatifs aux séismes, aux inondations, aux tempêtes (érosion côtière et submersion marine), et à la réduction des ressources en eau. Sont différenciés les coûts directs (dommages) et les coûts indirects (pertes économiques liées à l'évènement). Les résultats sont exprimés en coûts moyens annuels

La totalité des coûts annuels afférents aux désastres considérés par l'étude, en tenant compte du changement climatique, est estimée à **1 162 MDH** à l'horizon 2030, exprimé en DH actuels. Cela représente **222 DH/pers/an**, soit **0,26% du PIB** de Casablanca et de la vallée du Bouregreg à ce même horizon (2030). **L'incertitude est forte** et estimée de l'ordre de 0,3% du PIB, soit une **fourchette entre 0,1% et 0,4% du PIB**.

Exprimée non plus sur une base annuelle mais à l'échelle de la période considérée, la **valeur actuelle nette des désastres considérés sur la période 2010-2030 est de l'ordre de 11 milliards de DH**, en termes constants de 2010, ce qui représente **environ 7% du PIB du grand Casablanca** (actuel).

Les coûts indirects représentent environ 20% des coûts totaux. La grande majorité des coûts est due aux **inondations**. Par ailleurs, la **part imputable au changement climatique est jugée négligeable**.



Le cas de **l'impact sur la santé** est un peu particulier : dans ce cas, les coûts calculés représentent uniquement la part imputable au changement climatique, alors que pour les autres aléas, c'est un coût global qui est présenté, prenant en compte, entre autres, le changement climatique. Il est donc plus prudent de désagréger ces données non homogènes. Les coûts moyens annuels **sont d'environ 521 MDH pour Casablanca et 8,9 MDH pour la vallée du Bouregreg, représentant autour de 0,12% du PIB total de la zone**. Les questions de santé ont donc un impact non négligeable dans le mix global des coûts des différents risques considérés dans cette étude.

Rappelons néanmoins que **l'exercice est difficile**, et que le calcul économique reste largement empreint d'incertitudes.

Un cadre institutionnel en amélioration

En matière de gestion des risques naturels, la revue de littérature permet de constater que **le Maroc s'est clairement soucié d'adapter son corpus réglementaire à ses objectifs**. Suite à la restructuration de la Direction Générale de la Protection Civile survenue entre février et mars 2009, la gestion des situations d'urgence a changé. De l'avis de l'ensemble des interlocuteurs rencontrés, la nouvelle structure de protection, et en particulier le fonctionnement du Comité de Veille et de Coordination, apparaissent satisfaisants.

Cette satisfaction découle notamment des **récents résultats obtenus** en termes de préparation (stockage décentralisé de matériel par la Protection Civile), prévision (alertes météorologiques diffusées par Maroc Météo) et réponse organisée aux **pluies torrentielles et inondations conséquentes ayant eu lieu de décembre 2009 jusqu'en Mars 2010**. Un effort important en matière d'amélioration, modernisation et fonctionnement des réseaux de surveillance et d'alerte semble également avoir été réalisé.

Sur le plan organisationnel, notons la **suppression des recouvrements interministériels** des compétences au niveau national, laissant un cadre relativement simplifié, avec un schéma de coordination relativement bien rodé, qui présente l'avantage de séparer les fonctions d'État Major – assurant la structure de Communication-Commande-Contrôle – de celles plus proprement techniques des Sapeurs-Pompiers.

Vulnérabilités et risques sur Casablanca - Tableau de synthèse

Aléas	Horizon temporel	Composantes urbaines sensibles	Risque			
			Nature (hors risque sécuritaire)	Localisation	Intensité	Niveau
Instabilité des sols / sismicité	2010	Quartiers d'habitation denses construits en matériaux de mauvaise qualité : médina, casbah, habitat précaire, habitat urbain d'après-guerre dégradé.	Risque de dommages structurels et d'effondrement en cas de tremblement de terre.	Voir Figure 70	Dommages sismiques nuls ou très faibles (intensité de l'ordre de IV à IV-V pour une période de retour de 50 ans).	Très faible
	2030	Mêmes composantes, mais en superficie réduite du fait de la résorption de l'habitat insalubre, la tendance à la réduction de la densité urbaine et l'amélioration de la qualité des matériaux de construction.		Idem Figure 70, l'habitat précaire (bidonvilles) en moins	Même intensité.	Très faible
Tsunami / submersion marine	2010	Côtes naturelles hors agglomération et zones urbaines denses en front de mer.	Dommages structurels aux bâtiments situés en première ligne ; submersion des points bas.	Voir Figures 71-72	50 km de côte considérée à risque fort de submersion (environ 1200 ha exposés à un risque de submersion pour une tempête de fréquence 50 ans). Risque de tsunami comparable à la surcote de tempête.	Moyen
	2030	Mêmes composantes, mais vulnérabilité croissante du front de mer dans le cadre de grands projets (Aïn Sebaa, Port, Marina, Avenue Royale, Nouvelle Corniche, El Ank, Sidi Abderrahmane ...)		Voir Figures 71-72	Même linéaire côtier concerné par des risques forts de submersion (augmentation d'environ 12% des superficies potentiellement exposées à un risque de submersion pour une tempête de fréquence 50 ans).	Moyen
Érosion côtière	2010	Côtes naturelles hors agglomération et zones urbaines denses en front de mer.	Disparition des plages et dommages structurels aux bâtiments situés en première ligne.	Voir Figure 27	42 km de côte considérée à risque fort d'érosion.	Elevé
	2030	Mêmes composantes, mais vulnérabilité croissante du front de mer dans le cadre de grands projets (Aïn Sebaa, Port, Marina, Avenue Royale, Nouvelle Corniche, El Ank, Sidi Abderrahmane ...)		Voir Figure 53	Même linéaire côtier concerné par des risques forts d'érosion.	Elevé
Inondation	2010	Quartiers denses d'habitation le long de l'ancien lit de l'Oued Bouskoura à Casablanca ; quartiers d'habitation dense et zone industrialo-portuaire de Mohammedia au débouché de l'oued El Maleh.	Inondation des rez-de-chaussée (dommages aux bâtiments)	Voir Figure 73 pour vue d'ensemble et Figures 74 à 75 pour vues de détail	Environ 5 500 ha de terrains inondés en crue centennale, sur l'ensemble du Grand Casablanca. Une dizaine de points noirs correspondant à des débordements du réseau primaire pour des pluies de période de retour inférieure à la décennale.	Elevé
	2030	Mêmes composantes, avec en plus de grands projets d'équipement et d'urbanisme (cœur de ville et Anfa à Casablanca ; renforcement du pôle industriel et logistique, immeubles de bureaux et grands équipements à Mohammedia)		Non localisable en l'absence de modélisation hydraulique.	Sur Casablanca, en dépit d'une augmentation possible de 15 à 20 % des débits de crue, les programmes d'assainissement pluvial et notamment le super-collecteur ouest devraient améliorer la situation. Deux nouveaux barrages sur l'oued El Maleh devraient également réduire les risques d'inondation sur Mohammedia.	Elevé
Pénurie d'eau	2010	Population et activités économiques (besoins en eau)	Pénurie d'eau	Non cartographiable	Alimentation en eau à partir de deux grands barrages (SMBA et El Massira). Aucune restriction d'usage en saison sèche ces dernières années.	Faible
	2030	Mêmes composantes, mais accroissement des besoins (+ 32% pour l'eau potable) d'ici 2030.			Augmentation de la capacité d'adduction depuis le barrage du Bouregreg (SMBA), récemment surélevé, jugée suffisante pour satisfaire les besoins à l'horizon 2030. Le changement climatique (non pris en compte dans les projections nationales) pourrait néanmoins induire une réduction des volumes régularisables de l'ordre de 30 à 40%.	Moyen

Vulnérabilités et risques sur la vallée du Bouregreg - Tableau de synthèse

Aléas	Horizon temporel	Composantes urbaines sensibles	Risque			
			Nature (hors risque sécuritaire)	Localisation	Intensité	Niveau
Instabilité des sols / sismicité	Avant démarrage du programme d'aménagement urbain	Quelques douars disséminés dans la vallée (habitat rural de mauvaise qualité). <i>Nota</i> : la kasbah des Oudayas et les médinas de Rabat et Salé sont également à forte sensibilité sismique, mais sont considérées hors zone d'étude.	Risque de dommages structurels et d'effondrement en cas de tremblement de terre.	Voir Figure 40 (situation actuelle)	Dommages sismiques très faibles à faibles (intensité de l'ordre de V à V-VI pour une période de retour de 50 ans), mais facteur aggravant lié à la forte instabilité des sols sur les versants de la vallée (risques de glissement de terrain, chute de blocs) et à de probables phénomènes de subsidence en fond de vallée.	Faible
	2030	Mêmes composantes. Le programme d'urbanisation de la vallée, basé sur des constructions de « standing », est jugé peu sensible à ce risque.		Voir Figure 40 (situation 2030)	Même intensité, mais exposition accrue au risque.	Moyen
Tsunami / submersion marine	Avant démarrage du programme d'aménagement urbain	Plages sableuses à l'embouchure du Bouregreg.	Dommages structurels aux bâtiments situés en première ligne ; submersion des points bas.	Voir Figure 15 et Figure 40 (situation actuelle)	Les plages de Rabat et Salé sont respectivement à risques fort et moyen de submersion pour une tempête de fréquence 50 ans. La superficie totale submergée pour cet événement est d'environ 860 ha, essentiellement situés en zone centrale de la vallée, mais il n'y a pas de construction dans ce secteur. Risque de tsunami comparable à la surcote de tempête.	Moyen
	2030	Même situation, mais urbanisation du haut de plage ; nouveaux quartiers denses d'habitation construits en fond de vallée.		Voir Figure 33 et Figure 40 (situation 2030)	Réduction du risque de submersion à l'embouchure du Bouregreg, du fait de la construction d'une nouvelle digue, mais augmentation d'environ 16% des superficies potentiellement exposées à un risque de submersion pour une tempête de fréquence 50 ans (impact potentiel sur l'aménagement de la séquence 3 du programme d'urbanisation).	Elevé
Érosion côtière	Avant démarrage du programme	Plages sableuses à l'embouchure du Bouregreg.	Disparition des plages	Voir Figure 14	Les plages de Rabat et Salé sont à risque fort d'érosion.	Moyen
	2030	Même situation, mais urbanisation du haut de plage ; nouveaux quartiers denses d'habitation construits en fond de vallée.		Voir Figure 32	Réduction du risque d'érosion (risque moyen) à l'embouchure du Bouregreg, du fait de la construction d'une nouvelle digue.	Faible
Inondation	Avant démarrage du programme d'aménagement	Quelques douars disséminés dans la vallée ; quelques équipements et zones d'activités vers l'embouchure ; liaisons routières et ferroviaire.	Inondation des rez-de-chaussée (dommages aux bâtiments)	Voir Figure 40 (situation actuelle)	Environ 1 800 ha de terrains inondés en crue centennale. Douars hors zone inondable, mais majorité des activités industrielles ou commerciales en zone potentiellement inondable.	Faible
	2030	Disparition de certains équipements et zones d'activités existants ; construction de nouveaux quartiers denses d'habitation en fond de vallée ; renforcement des liaisons existantes et création d'une ligne de tramway.		Voir Figure 40 (situation 2030). N.B. : en l'absence de modélisation, l'enveloppe de la zone inondable correspond à la situation actuelle	Surélévation des niveaux d'eau en crue centennale, variant entre +35 cm en aval du pont Moulay Hassan, entre +20 et +30 cm dans le secteur compris entre le pont ONCF et la voie de contournement. Environ 100 000 personnes (habitants + employés) potentiellement exposées aux crues du fleuve.	Très élevé
Pénurie d'eau	Avant démarrage du programme	Population et activités économiques (besoins en eau)	Pénurie d'eau	Non cartographiable	Alimentation en eau à partir du barrage SMBA. Aucune restriction d'usage en saison sèche ces dernières années.	Faible
	2030	Mêmes composantes, mais accroissement des besoins (pour une nouvelle « ville » d'environ 140 000 habitants et 90 000 emplois) d'ici 2030.			Barrage du Bouregreg (SMBA) récemment surélevé + projets de barrage Boukhmiss et de transfert d'eau à partir du bassin de Sevou, jugés suffisants pour satisfaire les besoins. Le changement climatique (non pris en compte dans les projections nationales) pourrait néanmoins induire une réduction des volumes régularisables de l'ordre de 30 à 40%.	Moyen

Executive Summary

A pilot study within a regional framework

This study, led and financed by the World Bank, addresses **adaptation to climate change and natural disasters in the Greater Casablanca region and the Bouregreg Valley in Morocco**. It is part of a wider framework to assess the vulnerability of North African coastal cities in view of climate change and natural disasters. This first part of the study constitutes the **Phase 1 Report** regarding the assessment of risks at present as well as for the year 2030.

The study area is defined by the perimeter of the “Schéma Directeur d’Aménagement et d’Urbanisme de Casablanca” (Casablanca development and urban planning master plan) and the official area earmarked for the development of the Bouregreg Valley. The analysis nonetheless mainly focuses on the urban sites of both perimeters.

Natural risks dominated by flooding

In geological terms, the Casablanca and Bouregreg Valley sites belong to the coastal area of the Moroccan Meseta which, at present, is not much seismic. The coastal Meseta is separated from the central Meseta by an ancient fault in the NNE-SSW direction which is currently inactive. On the Bouregreg site, neogenic and quaternary (less cohesive therefore subject to settlement or liquefaction phenomena) formations are thick and the existing poor **geotechnical quality of the ground** contributes to increasing seismic risk. The Bouregreg Valley slopes also show signs of instability due to landslides and rock fall which is also an aggravating factor of seismic risk.

In fact, if there is relatively low **seismic risk** in Casablanca, i.e. an intensity of IV to IV-V for a return period of 50 years, corresponding to inexistent or very little potential damage, the risk level could be slightly increased for the Bouregreg site where slight damage may become visible on the most vulnerable residential areas.

The analysis of historic events and the seismotectonic situation indicates that the western Moroccan coastline is exposed to a relatively high degree of **tsunami risk**. Nevertheless, for an event similar to that of 1969, the return period is around 200 years. The wave height on the western Moroccan coastline is estimated to be less than 1m which, in terms of intensity, corresponds to a 50-year storm surge.

The map of coastal risks, established by comparing the coastline’s socioeconomic and environmental stakes/vulnerabilities and the submersion and erosion hazard, shows the **coastal erosion and marine submersion risk** essentially located between the far eastern end of Casablanca and the Mohammedia power plant, on an area with approx. ten kilometres of beaches. In total, 40 to 50 kilometres of coastline are considered to be at a high risk in the study area. These risks are also considered to be high at the mouth of the Bouregreg. The risk of erosion varies according to the type of coastline (whether sandy or rocky) and the mechanisms of change in play (sedimentary inflows and coastal development). The risk of submersion is established on the basis of a 1m storm surge which, along with a high spring tide, may lead to a

50-year submersion depth of 2.77m NGM in Casablanca and 2.65m NGM at the mouth of the Bouregreg.

These are undoubtedly the river **flood** or run-off **risks** which constitute the main natural risk factors for these two study areas. The level of protection in Casablanca is already low at present which corresponds to a return period of just 5 years in the urban areas. Around ten “black spots” have been identified by LYDEC which cause frequent flooding in highly urbanised areas and lead to disruptions in the lines of communication. Flooding in these sectors is due to various factors, such as:

- Poor standard of main water drainage systems, observed for half of them since 1997.
- Absence of a storm water drainage network for two of them.
- Intensified urbanisation of the catchment area for three of them leading to the insufficiency of the water drainage systems in view of increasing flow rates.

Rapid urban development upstream from the existing urban sectors leads to new flood areas due to the incapacity of downstream water drainage systems in handling the additional flow rates and not taking into consideration the principles of development that need to be respected to contain the downstream volumes of water in the newly urbanised areas.

The Bouskoura wadi's natural bed crosses the Casablanca urban area and is completely urbanised. Its flow area is greatly reduced when it passes through the conurbation since the water drainage system's capacity is 2m³/s (to be compared to the decennial flow rate of 45m³/s). During heavy rainfall, such as in 1996, the city centre was flooded. The difficulty in estimating the characteristic flow rates of the Bouskoura wadi leads to a very wide range of estimates in accordance with the pluviometry taken into consideration and the assessment method used.

The El Maleh wadi provoked catastrophic flooding in November 2002 in the city of Mohammedia. These floods were aggravated by a number of factors such as the occupancy of the flood plain, the presence of obstacles to runoff, and insufficient hydraulic crossing sections. This flood, with an estimated return period of 65 years, upstream from the El Maleh Dam, was strongly tempered by the dam.

With regard to the Bouregreg, detailed hydraulic studies were carried out within the framework of the Bouregreg Valley development project. These studies defined the hypotheses to be taken into consideration for forthcoming studies: hydrological conditions upstream from the SMBA (Sidi Mohammed Ben Abdallah) Dam, flood reduction conditions, simultaneous conditions with the Arach wadi, and downstream conditions. At present, flooding has been generalised in the Bouregreg Valley for the 100-year reference flood; the floods begin in the upstream and central part as from the 10-year flood. The bridges are not submerged for the reference flood.

The **risk of water shortage** is relatively low at present thanks to the important dam construction programme that has been implemented by the Moroccan Authorities for several decades. Water supply to Greater Casablanca is provided by two main sources: the SMBA Dam, on the Bouregreg wadi which supplies 38% of needs, and the El Massira Dam, on the Oum Er Rabia, for the remaining needs. The availability of surface water controlled by the dams enables the impact of droughts to be contained.

An already perceptible climate change...

Casablanca and Rabat have experienced **warming for the last five decades**. On an annual level, the average temperature, for the 1962-2008 period has risen and shown an increase of 0.3°C per decade in Casablanca and 0.2°C per decade in Rabat. In pluviometric terms, both Moroccan cities show a clear decreasing tendency in annual rainfall accumulation; i.e. approximately 2.8mm/year.

The future projections for the year 2030, evaluated using dynamic downscaling models for several greenhouse gas emission development scenarios, foresee a warming up of 0.8 to 1.3°C at the annual scale for Casablanca, accompanied by a slight increase in the number of summer heat wave days. Annual rainfall accumulation is assumed to decrease by 6 to 20%, and by 15 to 35% in winter. The planned changes for Rabat are of the same dimension.

The daily extremes (maximum rainfall over 24h) do not change in the same way for all the models/scenarios. Uncertainty remains as much for the amplitude as the return period. For maximum daily rainfall for a return period of 10 years, the variation forecasts, between the current and future (2030) scenarios, vary between -30% et +27% depending on the models. This variability becomes even more accentuated for a return period of 50 years. By default, it has been decided within the framework of this study to consider the results of the most pessimistic model/scenario, i.e. CNRM_A1B, if only as a precaution.

... which may further aggravate natural risks

Apart from the geological (instability of natural ground) and seismic risks, other natural risks will be affected by climate change.

Coastal erosion and submersion will be particularly affected by the **sea level rise** indirectly provoked by global warming through the thermal expansion of water masses (dilation) and the melting of the polar ice caps. On the basis of a critical analysis of the IPCC forecasts and the latest bibliographic references on the subject, we consider for this study an **overall sea level rise of 20cm by the year 2030**. It should be noted that this is a high hypothesis and it is impossible to have an accurate reading of the Moroccan Atlantic coast in the absence of tidal data over a long period.

In spite of a number of coastal protection projects, **the sea level rise is going to reactivate or increase the coastal erosion process** and therefore the coastline will retreat. The sandy beaches still in a natural state face the risk of **retreating by an average of 10 to 15m** by the year 2030. In the urbanised sectors, the walls built to protect the residential areas will enhance the coastal retreating process and will face major damage (undermining at the bottom of the walls). **In the case of storms combined with a high sea level** (a value of +2.85m NGM taken into consideration for the Bouregreg, and +3m NGM for Casablanca), the development works at the top of the beach in the urbanised areas will face the risk of **severe damage** as the width of the beach is insufficient to withstand the swell impact being too close to the sea. The sandy beaches still in a natural state will be totally immersed and should manifest a significant amount of retreat. However, they should be able to partially reconstruct during the good weather and almost entirely when the upper beach is formed by dunes.

In the Casablanca region, the coastal stretch exposed to a high risk of erosion or submersion will remain approximately identical to the present situation, which is around 40km of coastline. The sea level rise will however slightly increase the **risk of submersion of low-lying areas**, especially around the outlets of the main wadis Mehla and Nfifich (+140 ha of submerged area

for a 50-year flood). On the other hand, at the mouth of the Bouregreg Valley, the breakwater construction project should be in a position to reduce the negative impact of sea level rise associated with strong swells. Beach erosion will continue, however, at a slower pace.

As regards the **river flooding or runoff risk** in Casablanca, the climate changes taken into account by “Maroc Météo” (Moroccan meteorological department) between 1960 and 2004 have already shown an increase of 20% in the decennial flow rates. The objective of protection considered in the new sewerage master plan currently under way is 10 years, based on reevaluated intensity-duration-frequency curves.

The development of the “Super Collecteur Ouest” (western mega drainage system) will enable the flood waters from the **Bouskoura wadi** to be diverted. The project is designed for a return period of 20 years and the drainage system will also receive the runoff from several existing catchment areas or from areas being urbanised. For these catchment areas, the “Super Collecteur Ouest” will drain the projected flow rates corresponding to a return period of 10 years. The effect of the sea level rise should not significantly disturb the functioning of this main water drainage system given the relatively important slope of the structure (0.7%). Climate change could however lead to an increase in the flood water flow rates of 15%, which would reduce the protection level roughly from 20 to 15 years. However, there is a high degree of uncertainty regarding the wadi’s flow rate estimate and particular attention should be paid to the behaviour of the drainage system during exceptional events which exceed the design flood.

The planned development works, in particular the dams on the **El Maleh wadi** and its tributaries, aim to reduce the flood water flow rates at the entrance of the city of Mohammedia. The climate change impact could lead to an increase in flood water flow rates by 15%, excluding the impact of the dams. This impact would only be visible downstream during the 100-year flood, due to the high impact of the dams on lower-degree flooding compared to the 100-year flood (the floods will, in particular, be fully tempered by the Boukerkour Dam until a return period of 100 years; this dam controls approx. half of the catchment area). The downstream development works enable sea water evacuation to be improved and the most vulnerable sectors to be protected. The sea level rise effect remains to be analysed as the available information does not suffice to assess it more accurately.

With regard to the **Chaouia Plain**, upstream from Casablanca, the development and urbanisation of the catchment areas require particular surveillance. In fact, the flood waters of these catchment areas currently spread out and infiltrate the Berrechid Plain which constitutes a vast area of surface spreading. The flood waters particularly help to recharge the ground water. The risk of flooding the areas situated downstream from the Berrechid Plain during heavy flooding cannot be put aside given the urban development and the concentration of runoff which will be necessarily associated with it.

The projected urban development in the valley of the **Bouregreg wadi** foresees a localised protection for areas to be kept out of water during the 100-year flood (dikes), reference flood of the development project. Keeping 370 hectares of urban area out of water, planned in sequence 3 upstream from the ONCF railway line, leads to a maximum rise of water level in the downstream sector of 35cm (results obtained from the 2D model realised during the project’s complementary studies). The hypotheses associated with climate change could lead to an increase of 17% in the peak flow rate of the 100-year flood downstream from the SMBA Dam. This increase would lead to the raising of water levels in the Bouregreg wadi floodable area ranging between +35cm downstream from the Moulay Hassan Bridge, and between +20 and +30cm in the sector between the ONCF Bridge and the bypass. The combination of these two impacts would lead to a water level rise of roughly 65cm upstream from the urban area. These

levels need to be taken into consideration for the definition of protection structures and the analysis of variants. The development project includes the realisation of two water bodies whose oscillating volumes, in accordance with tidal cycles, should allow sufficient speed in the channels to be maintained in order to ensure minimum water levels. Variants of the project are being analysed in order to attain the desired objective. The effect of a sea level rise by 20cm at the mouth rapidly gets weaker towards the upstream level for the 100-year flood: it is only 5cm at 850 meters upstream. This rise in sea water level may, though, have an impact on the flowing speed of navigational channels at times not during the flooding period.

Lastly, with regard to **water resource management**, the change in the demand pattern in Greater Casablanca should increase by 1.7% excluding major projects and by 1.9% per year including major projects. These figures are based on achieving a distribution network yield of up to 80%, which is currently 72%, and on a relative stagnation of unitary consumptions. There will be a significant climate change impact on the availability of the Bouregreg (SMBA) Dam's resource as average supply could reduce by 30%, or even up to 40%. The available information is insufficient for a more detailed assessment of need-resource allocation for Greater Casablanca which needs to take into account the changing pattern of needs for the entire area supplied by the SMBA Dam as well as a possible change in provision of the Oum Er Rabia by 120 Mm³ per year. This provision would represent half of the water demand of Greater Casablanca for the year 2030. The Bouregreg Valley urban development project will contribute towards increasing pressure on water resources.

Emergence of new vulnerable areas by 2030

The population of Greater Casablanca is **3,325,000 inhabitants** in urban areas and 305,000 in rural areas. It has increased by 504,000 during the intercensal period of 1994-2004, maintaining a sustained increase, even if it appears to be a little less compared to the previous period. This regular increase in volume since 1994 translates into, on the other hand, an **average annual rate of constant decline** (+1.5% on average per year between 1994 and 2004, compared to +2.0% per year from 1982 to 1994).

It should be pointed out that there has been a rapid two-fold increase in the number of households compared to the population itself which leads to **very high urban pressure**. In fact, an urban increase of 700 ha to 1,000 ha per year is currently being observed. However, this urbanisation has changed shape. For a long time situated in the immediate extension of the conurbation, and mainly produced by public operations, it has progressively developed "beyond the walls" of the city, taking various forms which more or less comply with the rules of urban development

At present, the **main vulnerable areas** facing natural risks in the Casablanca region are:

- Dense residential areas built with poor quality materials (medina, kasbah, precarious housing areas, poor quality post-war urban housing units, etc.). The seismic hazard, however, is deemed to be sufficiently low so the risks are negligible.
- As regards erosion and marine submersion risks, the vulnerable areas are mainly limited to the urbanised seafront bordering the beach between Casablanca and Mohammedia. It should be recalled that tsunami risks, assessed within the framework of this study, are similar to those of the storm surge caused by a 50-year storm.
- Regarding flood risks, the at-risk sectors are relatively dispersed and either they have inadequate or badly-equipped storm water drainage systems. Since the hydraulic

development of the El Maleh wadi, floods are mainly concentrated in the urban section of the Bouskoura wadi basin.

The SDAU (development and urban planning master plan) hypothetically calculates the population to be 5.1 million inhabitants in 2030, corresponding to an annual growth rate of 1.3%. The housing requirements which result from demographic forecasts will be considerable. In order to meet such requirements, resulting only from the increased number of households, it will be necessary to build between 24,000 and 28,000 housing units on average per year. The recommended development works consist in managing the Centre-City (Casablanca) growth and organising the reception of most of the demographic and economic growth in the outskirts rather than “oil patch” spreading of the city centre.

With the reduction in unhealthy living quarters, the tendency to reduce urban density, and the improvement of the quality of construction material, there should be a reduction in vulnerability to seismic risks, even if, with demographic growth, a greater part of the population will be exposed to such risks. On the other hand, the **urban strengthening project and the development of major projects all along the coastline** may create a conflict of use and contradict the preventive and protection measures linked to climate change, especially in terms of erosion, tsunamis and sea level rise. These risks are even more pronounced in a few sensitive sites such as the SAMIR refinery and the Mohammedia port and industrial area. It should be noted that these sensitive sites are also situated at the mouth of the El Maleh wadi, and hence are under threat of exceptional river flooding (beyond the 100-year flood frequency). In urban areas, in spite of a possible 15 to 20% increase in flood water flow rates, the storm water drainage programmes and particularly the western mega drainage system project of the Bouskoura wadi should significantly improve the situation. This, however, assumes taking the non-aggravation constraints of flow rates downstream into consideration in urban development planning and land occupancy management of floodable areas.

As regards the **Bouregreg site**, there is little vulnerability at present, the valley being used as a land reserve within the framework of a vast urban development programme. The first part of this programme, at the mouth of the river, is being completed. In the future, the valley will undergo significant changes even if the urban sectors are only going to represent 8% of the total surface area of the perimeter. The urban density in these sectors will be rather high to very high (137,600 inhabitants are expected and 88,200 jobs), on a site largely exposed to natural risks: flooding from the Bouregreg, marine submersion, ground instability, and the risk of earthquakes. The development programme needs to carefully integrate such constraints which will generate non-negligible additional costs.

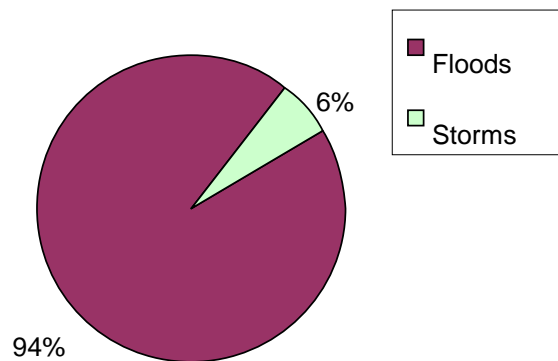
Damage that can be assessed

A **preliminary approach** to the cost of natural disasters and climate change for the year 2030 has been proposed. It includes damage relating to earthquakes, flooding, storms (coastal erosion and marine submersion), and the reduction of water resources. The direct (damage) and indirect costs (economic loss relating to the event) are distinguished. The results are expressed in average annual costs.

The total amount of annual costs pertaining to disasters considered in this study, taking into account the climate change factor, is estimated to be **1,162 MDH** for the year 2030, expressed in current Dirhams. This represents **222 DH/person/year**, i.e. **0.26% of the GDP** of Casablanca and the Bouregreg Valley for the same target year (2030). **Uncertainty is high** and estimated to be 0.3% of GDP, i.e. a bracket of **0.1% and 0.4% of GDP**.

No longer expressed on an annual basis but on a scale of the period considered, the **present net value of disasters considered for the period 2010-2030 is approx. 11 billion DH**, in constant 2010 terms, which represents **around 7% of the GDP of Greater Casablanca** (at present).

The indirect costs represent about 20% of total expenditure. The majority of costs are due to **floods**. Moreover, the **portion attributable to climate change is considered to be insignificant.**



The case of **the impact on health** is a little particular: in this case, the calculated costs only represent the portion attributable to climate change, whereas for the other risks, it is an overall cost that is presented, which takes climate change into account, amongst other factors. It is therefore safer to break down this non-homogeneous data. The average yearly costs **are around 521 MDH for Casablanca and 8.9 MDH for the Bouregreg valley, representing roughly 0.12% of the area's total GDP.** Health-related issues therefore have a significant impact on the overall structure of the costs of the different risks presented in this study.

It should nevertheless be recalled that the **exercise is rather difficult** and the economic calculations remain largely replete with uncertainties.

An improving institutional framework

Regarding natural risk management, examining documents helps to observe that **Morocco has clearly taken due care to adapt its regulatory body to its objectives.** Following the restructuring of the "Direction Générale de la Protection Civile" (general directorate for civil protection) carried out between February and March 2009, the management of emergency situations has changed. As per the opinion of the stakeholders interviewed, the new protection mechanism and in particular, the "Comité de Veille et de Coordination" (supervision and coordination committee) seem to be satisfactory.

This element of satisfaction is particularly derived from the **recently obtained results** in terms of preparedness (decentralised storage of materials by the "Protection Civile" (civil protection)), forecast (meteorological warnings announced by "Maroc Météo") and organised response to **torrential rain and subsequent flooding occurring between December 2009 and March 2010.** A significant amount of effort seems to have been made to ensure the improvement, modernisation and better functioning of the surveillance and warning systems.

In organisational terms, it should be noted that **removing the inter-ministerial overlaps** of skills at the national level left a relatively simplified structure, with a coordination framework functioning rather smoothly. This shows the advantage of separating the role of high command levels, ensuring a Communication-Command-Control structure, from the technical role of the Fire Department.

Vulnerabilities and Risks in Casablanca - Synthesis Table

Hazard	Time Horizon	Urban Sensitive Components	Risk			
			Type (casualties excluded)	Location	Intensity	Level
Ground instability / seismicity	2010	Dense residential districts built with poor quality materials: medina, Kasbah, insecure housing, deteriorated post-war urban housing, etc.	Risk of structural damage and collapses in the case of an earthquake.	See Figure 70	No or very little damage (intensity ranging from IV to IV-V for a return period of 50 years).	Very low
	2030	Same components, but a reduced surface area due to slum clearance, the tendency to reduce urban density and the improvement in the quality of construction materials.		Same as Figure 70, minus the insecure housing (slum settlements).		Very low
Marine submersion / tsunami	2010	Natural coastline outside of the conurbation and dense urban areas along the seafront.	Structural damage to buildings situated at the front; submersion of low areas.	See Figures 71-72 (submersion).	50km of coastline considered to be at a high risk of submersion (approx. 1,200 ha exposed to a risk of submersion for a storm with a frequency of 50 years). Risk of a tsunami comparable to the storm surge.	Medium
	2030	Same components, but increasing urbanisation along the seafront within the framework of major projects (Aïn Sebaa, Port, Marina, Avenue Royale, Nouvelle Corniche, El Ank, Sidi Abderrahmane, etc.).		See Figure 71-72 (submersion).		Same linear of coastline concerned by high risk of submersion (increase of roughly 12% of surface area potentially exposed to a risk of submersion for a storm with a frequency of 50 years).
Marine erosion	2010	Natural coastline outside of the conurbation and dense urban areas along the seafront.	Beaches destruction and structural damage to buildings situated at the front (erosion).	See Figure 27	42km of coastline considered to be at a high risk of erosion.	High
	2030	Same components, but increasing urbanisation along the seafront within the framework of major projects (Aïn Sebaa, Port, Marina, Avenue Royale, Nouvelle Corniche, El Ank, Sidi Abderrahmane, etc.).		See Figure 53		Same linear of coastline concerned by high risk of erosion
Flooding	2010	Dense residential districts along the former Bouskoura riverbed in Casablanca; dense residential districts and industrial-port area of Mohammedia at the opening of the El Maleh wadi.	Flooding of ground floors (damage to buildings).	See Figure 73 for overall view and Figures 74 to 75 for detailed views.	Approx. 5,500 ha of land flooded by the 100-year flood all over Greater Casablanca. Ten hot spots corresponding to the overflowing of the primary network for rainfall with a return period lower than ten years.	High
	2030	Same components, also with major development and urban planning projects (heart of the city and Anfa in Casablanca; strengthening the industrial and logistics centre, business centres and major facilities in Mohammedia).		Cannot be located without a hydraulic model.		In Casablanca, despite a possible increase by 15 to 20% of flood flow rates, the storm water drainage programmes and, in particular, the western super-collector should improve the situation. Two new dams on the El Maleh wadi should also reduce the risk of flooding in Mohammedia.
Water scarcity	2010	Population and economic activities (water needs).	Water shortage.	Cannot be mapped.	Water supply from two major dams (SMBA and El Massira). No restriction of use in the dry season for the last few years.	Low
	2030	Same components, but increase in needs (+32% for drinking water) between now and the year 2030.				Increase in the supply capacity from the Bouregreg dam (SMBA), the height of which was recently raised, and is deemed sufficient to meet needs for the year 2030. Climate change (not taken into account in the national forecasts) could, nevertheless, bring about a reduction in the regularisable volumes by roughly 30 to 40%.

Vulnerabilities and Risks in Bouregreg Valley - Synthesis Table

Hazard	Time Horizon	Urban Sensitive Components	Risk			
			Type (casualties excluded)	Location	Intensity	Level
Ground instability / seismicity	Before starting the urban development program	Several douars spread out in the valley (poor quality rural housing). <i>N.B.</i> the Oudayas Kasbah and the Rabat and Salé medinas are also highly sensitive to earthquakes, but are considered to be outside the study area.	Risk of structural damage and collapses in the case of an earthquake.	See Figure 40 (current situation).	Very little to little damages (intensity ranging from V to V-VI for a return period of 50 years)	Low
	2030	Same components. The valley's urban planning programme, based on high standing buildings, is assessed as not being very sensitive to this risk.		See Figure 40 (2030 situation).	Same intensity, but increased exposure to risks	Medium
Marine submersion / tsunami	Before starting the urban development program	Sandy beaches at the mouth of the Bouregreg.	Structural damage to buildings situated at the front; submersion of low areas.	See Figures 15 and 40 (submersion).	The Rabat and Salé beaches are at a high risk of submersion for a storm with a frequency of 50 years. The total submerged surface area for this event is approx. 860 ha, mainly situated in the central area of the valley, but no construction in this sector. Risk of tsunami comparable to the storm surge.	Medium
	2030	Same situation, but urbanisation at the top of the beach; new dense residential districts built at the bottom of the valley.		See Figures 33 and 40 (submersion).	Reduction in the risk of submersion at the mouth of the Bouregreg due to the construction of a new breakwater, but increase by roughly 16% of the surface area potentially exposed to a risk of submersion for a storm with a frequency of 50 years (potential impact on the development of sequence 3 of the urban planning programme).	High
Marine erosion	Before starting the development program	Sandy beaches at the mouth of the Bouregreg.	Beaches destruction and structural damage to buildings situated at the front	See Figure 14	The Rabat and Salé beaches are at high risk of erosion for a storm with a frequency of 50 years	Low
	2030	Same situation, but urbanisation at the top of the beach; new dense residential districts built at the bottom of the valley.		See Figure 32	Reduction in the risk of erosion at the mouth of the Bouregreg due to the construction of a new breakwater	Medium
Flooding	Before starting the development program	Several douars spread out in the valley; several facilities and commercial activities towards the river mouth; road and railway links to Rabat-Salé.	Flooding of ground floors (damage to buildings).	See Figure 40 (current situation).	Approx. 1,800 ha of land flooded by the 100-year flood. Douars outside of the floodable area, but majority of industrial or commercial activities are in potentially floodable areas.	Low
	2030	Suppression of some existing facilities and activities; construction of new dense residential districts at the bottom of the valley; strengthening of existing links and creation of a tramway line.		See Figure 40 (2030 situation). <i>N.B.</i> without a model, coverage of the floodable area corresponds to the current situation.	Rise in water levels during the 100-year flood, ranging from +35cm downstream from the Moulay Hassan Bridge, between +20 and +30cm in the sector between the ONCF Bridge and the bypass. Approx. 100,000 people (inhabitants + employees) potentially exposed to the river flooding.	Very high
Water scarcity	Before starting the program	Population and economic activities (water needs).	Water shortage.	Cannot be mapped.	Water supply from the SMBA dam. No restriction of use in the dry season for the last few years.	Low
	2030	Same components, but increase in needs (for a new "city" with roughly 140,000 inhabitants and 90,000 jobs) between now and the year 2030.			Height of the Bouregreg Dam (SMBA) recently raised + Boukhmiss Dam and water transfer from the Sevou basin projects judged to be sufficient to meet needs. Climate change could, nevertheless, bring about a reduction in the regularisable volumes by roughly 30 to 40%.	Medium

الفصل الأول – الملخص التنفيذي

دراسة نموذجية تدرج في إطار إقليمي.

تتعلق هذه الدراسة التي يمولها البنك العالمي، بالتكيف مع التغير المناخي و الكوارث الطبيعية المتوقعة لإقليم الدار البيضاء الكبرى و لوادي بورقراق في المغرب. هي تدرج في إطار أفسح لتقييم هشاشة المدن الساحلية لشمال إفريقيا إزاء التغير المناخي و الكوارث الطبيعية. يشكل هذا المجلد الأول من الدراسة، تقرير المرحلة الأولى، الخاص بتقييم المخاطر في الوضع الحالي و في أفق سنة 2030.

لقد حدّدت منطقة الدراسة حسب المساحة التي اعتبرها المثل المدير للتهيئة و التعمير للدار البيضاء و المساحة الرسمية المعتمدة لتهيئة وادي بورقراق. إلا أن التحليل يشمل أساسا المساحات الحضرية لهذين النطاقين.

مخاطر طبيعية تسيطر عليها الفيضانات

على الصعيد الجيولوجي، ينتمي موضعا الدار البيضاء و بورقراق إلى القسم الساحلي من نطاق "الميزيتا" المغربية وهو يمثل اليوم منطقة ذات قابلية زلزالية ضعيفة. تتفصل "الميزيتا" الساحلية عن "الميزيتا" الوسطى بتصدع بنيوي قديم ذي اتجاه ش - ش ثم ج - ج غ ' وهو غير نشيط اليوم. بالنسبة إلى موضع وادي بورقراق فإن التكوينات النيوجينية و الرباعية (و هي ضعيفة التماسك و بالتالي خاضعة إلى ظاهرة التضغط أو التسيّل) سميكة و تسهم رداءة النوعية الجيوتقنية للصخور، في ازدياد مخاطر الرجّات الأرضية. و من ناحية أخرى فإن سفحي وادي البورقراق يعرضان علينا علامات اللاتبات بفعل انزلاق التراب أو انهيار الصخور، الأمر الذي يشكل كذلك عاملا معمقا لمخاطر الإرتجاج الأرضي.

في الواقع، لئن أمكن بالنسبة إلى نطاق الدار البيضاء أن نعتبر المخاطر الزلزالية ضعيفة للغاية، (أي بحدّة متراوحة بين IV و V-IV على مدى فترة ارتداد بخمسين سنة متطابقة مع أضرار محتملة منعدمة أو جدّ ضعيفة، يمكن أن نرفع مستوى المخاطر بدرجة في موضع البورقراق حيث قد تصيب أهش المساكن بعض الأضرار الطفيفة.

إن تحليل الأحداث التاريخية و الظرفية الإرتجائية - البنيوية يشير إلى أن الساحل الغربي المغربي معرّض بشكل هام نسبياً إلى مخاطر "التسونامي". إلا أن فترة الارتداد بالنسبة إلى حدث من صنف سنة 1969 تقدّر بنحو 200 سنة. لقد قدّر ارتفاع الأمواج على الساحل الغربي المغربي بالنسبة إلى هذا الحدث، بما هو دون المتر الواحد، الأمر الذي يتطابق من حيث الحدّة مع موجات عاصفية ذات تواتر خمسينيّ .

إن رسم خريطة للمخاطر المرتبطة بالسواحل، وفق المقارنة بين الرهانات - الحساسيات الاجتماعية - الاقتصادية و البيئية للسواحل [من ناحية] و احتمالات التعرية أو الغمر [من ناحية أخرى] ، تبرز مخاطر تعرية ساحلية و غمر بحري متموقعة محليا ما بين الطرف الشرقي للدّار البيضاء و المحطة الحرارية بالمحمدية أساسا ، و ذلك على امتداد قطاع بنحو عشر كيلومترات من الشواطئ. ففي الجملة هنالك في منطقة الدّراسة ما بين 40 و 50 كلم من الخط الساحلي الذي يعتبر مهدّدا بالمخاطر بدرجة عالية. و تعدّ هذه المخاطر مرتفعة كذلك في مستوى مصبّ البورقراق. تخضع مخاطر التعرية إلى طبيعة الساحل (إن كان رملياً أم صخرياً) و إلى آليات التطور المتواجدة (المجلوبات الرسوبية و تهيئة السواحل). أمّا بخصوص مخاطر الغمر فإنّها تضبط انطلاقاً من مستوى ارتفاع بحري قدره متر، قد يؤدّي إذا ما أضيف إلى مستوى المياه النشيطة عند المدّ و الجزر ، إلى ارتفاع مياه الغمر بقدر 2,77 م بالنسبة إلى المستوى الحالي (NGM) بالدّار البيضاء و بقدر 2,65 م (NGM) عند مصبّ البورقراق، و ذلك في تواتر خمسينيّ.

لا شكّ أن مخاطر الفيضان النهري أو بسبب السيّلان هي التي تمثل أهمّ المخاطر الطبيعيّة في منطقتي الدّراسة. ففي الوضع الحالي، يبدو مستوى حماية الدّار البيضاء ضعيفا إذ أنّ هذا الأخير يتطابق في المنطقة الحضرية مع فترة ارتداد بخمس سنوات فقط. فقرابة عشر "نقاط سوداء" أحصتها شركة ليون لتوزيع المياه بالدار البيضاء (Lydec) تتسبّب في طفوحات مائية متواترة، داخل قطاعات حضرية كثيفة، مهدّدة بذلك عدّة طرقات هامة. تعود عمليّات الطّح في تلك القطاعات، إلى عوامل مختلفة:

- نقص في المجمّعات الرئيسيّة وهو نقص سجّل منذ سنة 1997 بالنسبة إلى نصفها.
- غياب شبكة تصريف مياه الأمطار بالنسبة إلى اثنين منهما.

- تكثف التحضر على الحوض السّحي بالنسبة إلى ثلاثة منها، الأمر الذي يؤدي إلى نقص المجمعّات إزاء، تزايد المناسيب.

إن التوسع الحضري المتسارع عند عالية القطاعات الحضريّة المتواجدة، يؤدي إلى ظهور نقاط جديدة للطّح المائي، بسبب نقص المجمعّات عند السافلة لاستيعاب المناسيب الإضافية، وكذلك بسبب عدم اعتبار مبادئ التهيئة الواجب احترامها قصد الحدّ من المناسيب عند سافلة المناطق العمرانيّة الحديثة.

يعبر المجرى [السرير] الطبيعي لواد بوسكورة منطقة الدّار البيضاء الحضريّة وقد تمّ تمدينه كليًا. إن قطاع السيلان محدود للغاية عند عبوره للتجمّع الحضري، إذ أنّ سعة المجمعّ تبلغ 2م مكعب في الثانية (قياسا بالمنسوب العشري و هو بنحو 45م³/ث). ففي حالة تهاطل أمطار غزيرة على غرار ما حصل سنة 1996، تحدث فيضانات في مركز المدينة. إن صعوبات تقدير المناسيب المميّزة لواد بوسكورة تدفعنا إلى اعتبار مروحة تقديرية عريضة، وفق كميّة الأمطار المعتبرة و طريقة التقدير.

لقد سبّب واد المالح فيضانات كارثية بمدينة المحمدية في شهر نوفمبر سنة 2002 ، وقد تعمق خطر هذه الفيضانات بفعل عوامل عديدة مثل إشغال المجرى [السرير] الكبير، ووجود حواجز تمنع السيلان و نقص في مقاييس القنوات المخصّصة للعبور المائي. و هذا الفيضان ذو فترة الارتداد المقدّرة بنحو 65 سنة عند عالية سدّ المالح، قد تمّ امتصاص ذروته بشدّة، بفضل هذا السدّ.

و بخصوص البورقراق، أجريت دراسات مائيّة مفصّلة، في إطار مشروع تهيئة وادي بورقراق. و قد حدّدت تلك الدراسات الفرضيات التي ينبغي اعتبارها في الدراسات القادمة مثل الإطار الهيدرولوجي في عالية سدّ سيدي محمد بن عبد الله (SMBA)، وشروط "امتصاص" الفيضانات، وظروف التزامن مع فيضان واد عرش وأخيرا خصوصيات السافلة. في الوضع الحالي فإن الفيضانات متعمّمة في وادي بورقراق و ذلك بالنسبة إلى الفيضان المرجعي المائي و الفيضانات تحدث في القسم الواقع في العالية و في الوسط بداية من الفيضان العشري. إن منشآت العبور لا تغمر بالنسبة إلى الفيضان المرجعي.

تعدّ مخاطر نقص الموارد المائيّة ضعيفة نسبيًا في الوضع الحالي، بفضل برنامج السدود الهام الذي ركّزته السلطات المغربية منذ عدّة عقود. فتزويد الدّار البيضاء الكبرى بالمياه مضمون بفضل موردين أساسيين هما سدّ سيدي محمد بن عبد الله (SMBA) على البورقراق وهو يوفر 38% من الحاجيات، و سدّ المسيرة على

واد أمّ الربيع، بالنسبة إلى البقيّة. إن توقّر المياه السطّحية التي يتم تعديلها بواسطة السدود، يسمح بالحدّ من انعكاسات أزमत الجفاف.

تغيير مناخي أضحي بعد محسوسا...

لقد شهدت مدينتنا الدّار البيضاء و الرّباط ارتفاعا حراريا خلال العقود الخمسة الأخيرة. فعلى المستوى السنوي ارتفع متوسط درجة الحرارة خلال الفترة 1961 – 2008 وفق نزعة قدرها 0,3 درجة مائوية خلال كلّ عقد بالدّار البيضاء و 0,2 درجة مائوية بالرّباط. و من حيث كميات الأمطار، تبرز المدينتان المغربيتان نزعة واضحة نحو الانخفاض و ذلك بالنسبة إلى المجاميع السنويّة، أي بتراجع يقارب 2,8 مم سنويًا.

و الإسقاطات المستقبلية لأفق سنة 2030 و التي تمّ تقديرها وفق نماذج التنازل على مقياس ديناميّ، تشمل عدّة "سيناريوهات" (احتمالات) لتطورّ غازات الاحتباس الحراري، وهي تتوقع بالنسبة إلى الدّار البيضاء ارتفاعا لدرجات الحرارة يتراوح بين 0.8 و 1.3 درجة مائوية سنويًا، ترفقه زيادة طفيفة لعدد أيام موجات القيقظ الصيفيّة. أما مجاميع الكمّيات المطريّة السنويّة فيفترض أنها ستنقلص بنسبة تتراوح بين 6 و 20 % و المجاميع الشتويّة بما بين 15 و 35%. و التطوّرات التي يمكن توقّعها بالنسبة إلى الرّباط تعدّ مماثلة.

أما الكمّيات القصوى اليوميّة (الأمطار القصوى على امتداد 24 ساعة) فإنها لا تتغيّر بنفس الشّكل في كلّ "السيناريوهات" (التوقعات) النموذجيّة. فجانبا الشكّ يشمل المدى الحراري مثلما يشمل كذلك فترات الارتداد و حتى التغيرات. و بالنسبة إلى الأمطار اليوميّة القصوى لفترة الارتداد بعشر سنوات، فإنّ توقعات التغيرات بين الوضعيّة الحاليّة و الفترة المستقبلية (أفق سنة 2030) تتراوح هكذا ما بين - 30% و + 27% حسب النماذج. و يتعمّق هذا التغير أكثر بالنسبة إلى فترة الارتداد بخمسين سنة. و كبديل عن "سيناريو" أمثل، تقرّر في إطار هذه الدراسة الاعتماد على نتائج "السيناريو- النموذج" الأكثر تشاؤما أي **CNRM_A1B**، حتى و إن كان ذلك احتراما لمبدأ التحدّر.

... قد يعمّق بعض المخاطر الطبيعيّة

إذا ما استثنينا المخاطر الجيولوجيّة (إنزلاق الأراضي الطبيعيّة) والزلزاليّة ستتأثر المخاطر الطبيعيّة الأخرى بالتغير المناخي.

إن ظروف التعرية و غمر السواحل ستتأثر خاصةً بارتفاع المستوى البحري الناجم بصفة غير مباشرة عن الاحتباس الحراري، و ذلك عن طريق ظاهرتي التمثط الحراري للكتل المائية و ذوبان الأغطية الجليدية القطبية. واعتمادا على تحليل نقدي لإسقاطات "فريق الخبراء الدولي حول تطور المناخ" (G.I.E.C) و على المراجع البيبليوغرافية الأخيرة حول الموضوع، اعتبرنا في هذه الدراسة، ارتفاعا إجماليا لمستوى البحر بقدر 20 سنتيمترا في أفق سنة 2030. لنشر هنا أنّ الأمر يتعلق بفرضية عالية، يستحيل تجويدها بالنسبة إلى الساحل الأطلنطي المغربي نظرا لغياب معطيات تخصّ المدّ والجزر و تمتدّ على فترة طويلة.

و رغم العديد من المشاريع لحماية السواحل، فإنّ ارتفاع مستوى البحر سينشط مجدداً أو سيعمق عملية التعرية الساحلية و بالتالي تقهقر خطّ الساحل. والشواطئ الرملية التي مازالت في حالة طبيعية قد تتوارى بمعدّل ما بين 10 و 15 مترا من اليوم إلى أفق 2030. و في القطاعات الحضريّة فإنّ الجدران الواقية المشيّدّة لحماية المساكن، ستعمق تراجع الشاطئ و ستتعرّض إلى أضرار ملحوظة (الجرف عند أسفل الجدران). و في حالة حدوث عواصف يرفقها مستوى مياه مرتفع (باعتبار علوّ قدره +2,85 م N.G.M بالنسبة إلى البورقراق، و +3 م N.G.M بالنسبة إلى الدار البيضاء) ، فإنّ عمليّات تهيئة أعالي الشواطئ في المناطق العمرانية المحضّرة قد تتعرّض إلى أضرار هامة إذ أن عرض الشواطئ لا يكفي لتخفيض تأثير التموّج لأنها قريبة أكثر مما ينبغي من جزر البحر. إن الشواطئ الرملية التي ظلّت في وضع طبيعي ستعمر كلياً، و يتوقع أن تتعرّض إلى تراجع ذي بال. إلا أنه من المتوقع أيضا أنها ستقوى على التجدد جزئياً خلال فترات الطقس الجميل، أو كلياً إذا ما كان ظهير الشاطئ متكوّنا من الكثبان.

و في منطقة الدار البيضاء ستظل خطوط السواحل المعرضة بشدّة إلى مخاطر التعرية أو الغمر، ستظل مماثلة بشكل محسوس لما هي عليه الآن أي بنحو 40 كلمترا من السواحل. إلا أن ارتفاع مستوى البحر سيعمق مخاطر الغمر البحري بالنسبة إلى أخفض الأراضي و بالأخصّ في مستوى مصبّات الوديان الرئيسية أي مهلة و نفيش (أكثر من 155 هك من المساحة المغمورة بالنسبة إلى حدث ذي تواتر خمسيني). خلافا لذلك، من المتوقع أنّ مشروع المحجز الذي سيقام في مستوى مصبّ البورقراق، سيقفّ بشدّة الانعكاسات السلبية لارتفاع مستوى المياه الذي يضاف إليه تموّج شديد . أمّا تعرية الشواطئ فإنها ستتواصل لكن بنسق أضعف.

و في ما يخصّ مخاطر الفيضان النهري أو بسبب السيلان في منطقة الدار البيضاء، فإنّ ما أخذته مصالح الرصد الجوي المغربي بعين الاعتبار حول التطور المناخي

خلال فترة 1960-2004 ، قد أدى بعد إلى استنتاج ارتفاع في المناسيب العشرية بنحو 20%.

ستسمح تهيئة الأنبوب المجمع الضخم في المنطقة الغربية بتحويل مياه الفيضان لواد بوسكورا. فالمشروع قد قدر حجمه لفترة ارتداد بعشرين سنة. كما سيقتبل الأنبوب المجمع مياه السيلان القادمة من عدة أحواض سفحية موجودة أو بصدد التحضر. فبالنسبة إلى هذه الأحواض، فإن مناسيب المشروع التي سيجلبها المجمع الغربي الكبير تتطابق مع فترة ارتداد بنحو 10 سنوات. و من المفروض أن انعكاسات ارتفاع مستوى البحر لن تحدث اضطرابا ذا بال في اشتغال هذا المجمع من حيث تحويل مياه الفيضان، نظرا لما يميز هذه المنشأة من تحدر هام نسبيا (0,7%). إلا أن التغير المناخي قد يؤدي إلى ارتفاع مناسيب الفيضان بنحو 15%، الأمر الذي قد يقلص الحماية من 20 إلى 15 عشرة سنة تقريبا. و لكن درجة الشك حول تقدير مناسيب الواد عالية و ينبغي أن يركز الاهتمام بشكل خاص على ردة فعل المجمع في حالة حقبات استثنائية قد تتجاوز حجم الفيضان المعتبر في المشروع.

إن التهيئات المنتظرة و خاصة منها السدود المبرمجة على واد المالح و روافده، تهدف إلى تقليص مناسيب الفيضان عند مدخل مدينة المحمدية. وانعكاسات التغير المناخي قد تؤدي إلى ارتفاع مناسيب الفيضان بنحو 15%، بقطع النظر عن الانعكاسات التي قد تنجم عن السدود. و قد لا تتجسم تلك الانعكاسات في مستوى السافلة إلا بداية من الفيضان المائي و ذلك بفعل الانعكاسات الشديدة للسدود بالنسبة إلى الفيضانات ذات تواتر دون الفيضان المائي (يكون أوج الفيضانات ممتصا كليًا من قبل سد بوكركور إلى فترة الارتداد بمائة سنة. و هذا السد يتحكم تقريبا في نصف الحوض السفحي). و التهيئات المنجزة عند السافلة تسمح بتحسين التحويل المائي نحو البحر و بحماية أكثر القطاعات هشاشة. وانعكاس ارتفاع مستوى البحر مازال ينتظر التحليل نظرا لكون المعطيات المتاحة تعد غير كافية و لا تسمح بتقديرها بأكثر دقة.

و في مستوى سهل الشاوية، عند عالية الدار البيضاء، يدعو تطور الأحواض السفحية و تحضرها إلى يقضة خاصة. فعلا تنتشر مياه الفيضان و تتسرب داخل سهل بالرشد الذي يمثل منطقة انفراس فسيحة. تسهم مياه الفيضان بالأخص في تغذية المائدة المائية. إن مخاطر الغمر في المناطق الواقعة عند سافلة سهل بالرشد عند حصول فيضان عارم أمر لا ينبغي تجاهله نظرا للتوسع الحضري و لتركز مياه السيلان الذي سيرافقه حتما.

إن عمليات التهيئة المبرمجة في وادي البورقراق تتوقع حماية موضعية لمواقع ينبغي الحفاظ عليها خارج مساحة الغمر المائي بالنسبة إلى الفيضان المائي (المحاجز) وهو الفيضان المرجعي لمشروع التهيئة. إن حماية المنطقة الحضرية الممتدة على 370 هك ووضعها خارج مساحة الغمر مثلما تم توقع ذلك في المرحلة

الثالثة، عند عالية خط الديوان الوطني للسكك الحديدية (ONCF)، يفترض ارتفاعا أقصى لمستويات المياه في قطاع العالية بنحو 35 سنتم (نتائج أفرزتها النمذجة ببعدين (2D) و المنجزة في إطار الدراسات التكميلية للمشروع). إن الفرضيات المدمجة إلى التغيير المناخي قد تحدث ارتفاعا للمنسوب الأقصى للفيضان المائي، عند سافلة سدّ سيدي محمد بن عبد الله (SMBA) بنحو 17%. و مثل هذا العلوّ قد يؤدي إلى زيادة في ارتفاع مستويات المياه في المنطقة القابلة للغمر لواد البورقراق، يتراوح بين 35+ سنتم عند سافلة جسر مولاي حسن، و 20+ 30+ سنتم عند القطاع الموجود ما بين جسر السكة الحديدية (ONCF) و الطريق الالتفافية. إن الالتقاء بين الانعكاسين قد يؤدي إلى زيادة ارتفاع بنحو 65 سنتم عند عالية المنطقة الحضرية. ينبغي أن تؤخذ هذه المستويات بعين الاعتبار لتحديد منشآت الحماية و لتحليل المتغيرات. يشمل مشروع التهيئة إنشاء مسطحين مائيين ينبغي، نظرا لتغير حجمهما وفق دورات المدّ و الجزر، أن يسمحا بالحفاظ على سرعة داخل القنوات، تكفي لضمان مستويات دنيا. و بعض بدائل المشروع هي حاليا بصدد التحليل حتى ندرك الهدف المرجو. إن انعكاسات ارتفاع مستوى البحر بعشرين سنتم في مستوى المصبّ تتقلص بسرعة عند العالية بالنسبة إلى الفيضان المائي: فهذا الانعكاس لا يعدو أن يتجاوز 5 سنتم على ارتفاع 850م عند العالية. إلا أن هذا الارتفاع لمستوى البحر قد يؤدي إلى التأثير في سرعة السيلان داخل ممرات الملاحة خارج فترات الفيضان.

في الأخير، و في ما يتعلق بالتصرف في الموارد المائية، يفترض أن يتطور الطلب داخل الدار البيضاء الكبرى بنسبة 1,7% إذا ما لم نعتبر المشاريع الكبرى، و بنسبة 1,9% باعتبار المشاريع الكبرى. تركز هذه النسب إلى استهداف مردود لشبكة التوزيع بنسبة 80% (وهو الآن بقدر 72%) و كذلك إلى ركود نسبي للتخصيصات حسب الوحدات. إن تأثير التغيير المناخي قد يكون عميقا بالنسبة إلى حجم المتوفرات من موارد سدّ البورقراق (سيدي محمد بن عبد الله)، إذ أن متوسط الموارد قد يتقلص بنحو 30% و حتى إلى 40%. إن المعلومات المتوفرة غير كافية و لا تسمح بإجراء تقديرات أدقّ حول حصة "الحاجيات - الموارد" بالنسبة إلى الدار البيضاء الكبرى، وهي حصة ينبغي أن تأخذ بعين الاعتبار تطور الحاجيات لكامل المنطقة التي يشملها سدّ سيدي محمد بن عبد الله (SMBA)، و كذلك التطور الاحتمالي لحصة أم الربيع بنحو 120 مليون م3 سنويا. فهذه الحصة قد تمثل فعلا نصف الطلبات من الماء في الدار البيضاء الكبرى عند أفق سنة 2030. و مشروع التوسع الحضري في وادي البورقراق سيسهم في ترفيع الضغط على الموارد المائية.

بروز أشكال جديدة من الهشاشة في أفق سنة 2030

تنقسم ساكنة إقليم الدار البيضاء الكبرى إلى 3.325.000 ساكن في المنطقة الحضرية و 305.000 ساكن في الوسط الريفي. و خلال الفترة الفاصلة بين التعدادين (1994-2004)، ازداد عدد السكان بأكثر من 504.000 شخص أي بنسبة زيادة سنوية مرتفعة حتى و إن بدت بشيء من التقهقر الطفيف، قياسا بالفترة السابقة. إلا أن مثل هذا التطور المنتظم من حيث الحجم منذ سنة 1994، يعكس خلافا لذلك، متوسط نسق سنوي في تراجع مستمر (+1,5% كمتوسط سنوي لفترة 1994-2004 مقابل +2,0% سنويا لفترة 1982-1994).

تجدر الملاحظة إلى أن عدد الأسر قد تزايد بنسق أسرع بمرتين من نسق زيادة عدد السكان، الأمر الذي يفرز **ضغطا حضريا شديدا للغاية**. في الواقع نشهد حاليا توسعا حضريا متراوفا بين 700 و 1000 هك سنويا. و لكن هذا التوسع الحضري قد غير من ملامحه. فلئن كان التوسع الحضري حاصلًا طويلا، عند الامتداد المباشر للمدينة و ناتجا أساسا عن التدخلات العمومية، نراه اليوم قد نما تدريجيا "خارج الأسوار" متخذا أشكالا متنوعة متطابقة إن قليلا أم كثيرا، مع قوانين التعمير.

في الوضع الحالي، تبدو **أهمّ مواضع الهشاشة** تجاه المخاطر الطبيعية بالنسبة إلى إقليم الدار البيضاء، كما يلي:

- أحياء السكن المكثف المبنية بمواد رديئة النوعية (المدينة العتيقة، القصبة، السكن الهش، المساكن الحضرية لما بعد الحرب وهي من صنف رديئ). إلا أن الاحتمال الزلزالي يعدّ ضعيفا إلى درجة تدفع إلى الاعتبار بأن هذه المخاطر لا أهمية لها تذكر.
- بالنسبة إلى مخاطر التعرية و الغمر البحري، تخصّ أشكال الهشاشة بالأخصّ الواجهة البحرية الحضرية المحاذية للشواطئ، ما بين الدار البيضاء و المحمدية. لنذكر بأنّ مخاطر "التسونامي" التي تمّ تقديرها في إطار هذه الدارسة هي من نفس حجم تلك التي قد تنجم عن ارتفاع مستوى البحر بفعل عاصفة ذات تواتر خمسيني.
- وازاء مخاطر الفيضان، تبدو القطاعات المعرضة للمخاطر متناثرة نسبيا وهي تتطابق خاصة مع نطاقات غير مجهزة أو ضعيفة التجهيز بشبكة تصريف مياه الأمطار. و منذ أن أنجزت منشآت التهيئة المائية على واد المالح، أضحت الفيضانات متركزة خاصة على المنطقة الحضرية في حوض واد بوسكورة.

لقد اعتبر الممثل المدير للتهيئة الحضرية فرضية 5,1 مليون ساكن في أفق سنة 2030 وهي فرضية تتطابق مع نسبة نموّ سنوي تبلغ 1,3%. و الحاجيات من المساكن الناتجة عن الإسقاطات الديمغرافية ضخمة. و لتلبية هذه الحاجيات، اقترانا

زيادة عدد الأسر فحسب، ينبغي تشييد معدّل ما بين 24.000 و 28.000 مسكن سنويا.

فالاختيار التهوي المنصوح به يتمثل في التحكم في نموّ المدينة-المركز (أي الدّار البيضاء) و في تنظيم استقبال أكبر قسط من النموّ الديمغرافي والاقتصادي في الأقطاب الحضريّة الطرفيّة عوضا عن توسع المدينة-المركز، في شكل انتشار بقع الزيت.

بالقضاء على السكن غير الصّحي و بفضل نزع تقلص الكثافة الحضريّة و بتحسّن نوعية مواد البناء، من المتوقّع أن نشهد تراجعا للهشاشة تجاه المخاطر الزلزاليّة، حتى و إن كان ذلك - في ظلّ الزيادة الديمغرافيّة - يعرّض عددا أكبر من السكان إلى تلك المخاطر. و خلافا لذلك فإنّ تدعّم التحضرّ وانتشار المشاريع الكبرى طوال السواحل قد تحدث تطاحنات استعمال و قد تكون في تعارض مع الإجراءات الوقائيّة و الحماييّة المقترنة بالتغيّر المناخي ، بالأخصّ من حيث التعرية و بالنسبة إلى "التسونامي" وارتفاع مستوى البحر. فهذه المخاطر تعد أكثر أهميّة إذا ما تعلق الأمر بالمنشآت الحساسّة مثل مصنع تكرير النفط (الشركة المغربية خفيّة الاسم لتكرير النفط - SAMIR) و القطب الصّناعي و المرفئي بالمحمديّة. نلاحظ أن هذه المنشآت الحساسّة تقع كذلك عند مصبّ واد المالح، أي أنّها مهدّدة بالتالي بالفيضانات النهريّة الاستثنائيّة (أي لما فوق التواتر المائي). و في المناطق الحضريّة، و رغم الزيادة المحتملة بما بين 15 و 20% لمناسيب الفيضان، فإنّ برامج شبكة تصريف مياه الأمطار و بالأخصّ مشروع المجمع الغربي العملاق لواد بوسكورة و بالأخصّ مشروع المجمع الغربي، ستحسّن الوضع على الأرجح بشكل بارز. إلا أن هذا يفترض أن تؤخذ بعين الاعتبار في تخطيط التوسّع الحضري، ضغوطات عدم اشتداد المناسيب عند السافلة، و كذلك ضرورة التحكم في إشغال الأراضي في المواقع القابلة للغمر.

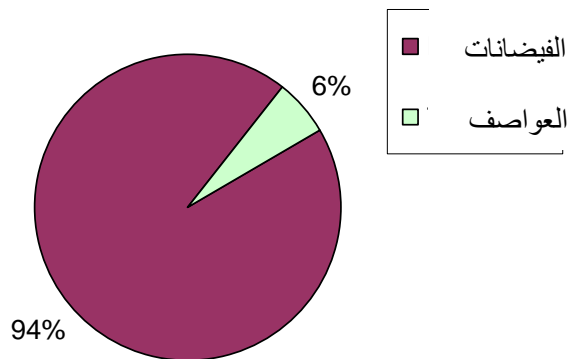
و في ما يخصّ موضع البورقراق، تعدّ أشكال الهشاشة بالنسبة إلى الوضع الحالي ضعيفة، إذ أنّ الوادي يستخدم كاحتياطيّ عقاري، و ذلك في إطار برنامج واسع للتهيئة الحضريّة يعدّ قسمه الأول، عند مصبّ المجرى المائي، في طور الاستكمال. و في الوضع المستقبلي، سيشهد الوادي تغيّرات عميقة، حتى و إن اعتبرنا أن القطاعات الحضريّة لن تمثل سوى 8% من المساحة الجمليّة. إلا أنّ الكثافة الحضريّة في هذه القطاعات ستكون مرتفعة أو مرتفعة جدًا (يتوقع 137.600 ساكن و 88.200 موطن شغل)، و ذلك على مواضع جدّ معرّضة إلى المخاطر الطبيعيّة مثل الفيضانات من جراء البورقراق و الغمر البحري و مثل انزلاق الأراضي و المخاطر الزلزاليّة. فبرنامج التهيئة ينبغي أن يدمج بعناية هذه الضغوطات التي ستحدث تكاليف إضافيّة لا يستهان بها.

أضرار يمكن تقديرها

لقد اقترحت مقارنة أولى لتقدير تكلفة الكوارث الطبيعية و للتغير المناخي في أفق سنة 2030. و أدمجت هذه المقاربة الأضرار المتصلة بالزلازل و الفيضانات و العواصف (التعرية الساحلية و الغمر البحري) و كذلك الأضرار المتعلقة بتقلص الموارد المائية. و قد تم التمييز بين التكاليف المباشرة (الأضرار) و التكاليف غير المباشرة (الخسائر الاقتصادية الناجمة عن الحدث). هذا و يعبر عن النتائج المتحصل عليها حسب متوسط التكاليف السنوية.

إن مجمل التكاليف السنوية المتصلة بالكوارث الطبيعية المعتبرة في هذه الدراسة، و بالنظر إلى التغير المناخي، مقدرة بمبلغ **1162 مليون درهم** في أفق سنة 2030 وفق قيمة الدرهم الحالية. يمثل هذا معدل **222 درهم للشخص سنويًا**، أي **0,26% من الناتج الداخلي الخام** في نفس ذلك التاريخ (2030). و هامش الشك عريض وهو بنحو **0,3%** من الناتج الداخلي الخام، أي بمروحة بين **0,1%** و **0,4%** من الناتج الداخلي الخام.

و إذا ما عبرنا عنها بالنسبة إلى كامل الفترة ولا على أساس تكلفة سنوية، فإن القيمة الحالية الخام للخسائر المقدرة بالنسبة إلى فترة 2010-2030، تبلغ حوالي **11 مليار درهم** وفق القيمة الثابتة لسنة 2010 و هذا يمثل قرابة **7%** من الناتج الداخلي الخام في الإقليم الحالي للدار البيضاء. و التكاليف غير المباشرة تمثل حوالي **20%** من التكاليف الجمالية. و أغلب قسط من هذه الأخيرة يقترن بالفيضانات. و من ناحية أخرى يعدّ القسم الذي يعزى إلى التغير المناخي ضعيفا للغاية.



إن مسألة التأثيرات الصحية تعدّ من صنف خاصّ بعض الشيء : ففي هذه الحالة لا تمثل التكاليف المحسوبة سوى الجزء الذي يعزى إلى التغير المناخي، بيد أن التكلفة

المتصلة بالمخاطر الأخرى المحتملة، تعرض في شكل تكلفة إجمالية تأخذ التغيير المناخي بعين الاعتبار، ضمن جملة الاعتبارات. فحينئذ، حريّ بنا أن نفكك هذه المعطيات غير المتجانسة. فمتوسط التكاليف السنوية تبلغ حوالي 521 مليون درهم بالنسبة إلى الدار

البيضاء و 8.9 مليون درهم بالنسبة إلى واد البورقراق. و تمثل هذه التكاليف 0.12 من الناتج الداخلي الخام لكامل المنطقة. فالمسائل المتصلة بالصحة لها حينئذ تأثير لا يستهان به في تركيبة التكلفة الجمالية لمختلف المخاطر المعروضة في هذه الدراسة. إلا أنه ينبغي التذكير بأن المسألة عسيرة التقدير و بأن احتساب الجانب الاقتصادي يظلّ معرّضا إلى هامش واسع من الشك.

إطار مؤسّساتي متحصّن

في ما يتعلّق بالتصرّف في المخاطر الطبيعيّة يسمح استعراض النصوص بالقول إنّ المغرب قد انشغل بوضوح بضرورة جعل جهازه التشريعي مطابقا لأهدافه. تبعا لإعادة هيكلة الإدارة العامّة للحماية المدنيّة، الحاصلة بين شهري فيفري و مارس 2009، تغيّرت طرق التصرّف في الوضعيّات الطارئة. و تبعا لرؤى كلّ الأطراف المتحاور معها، تبدو الهيكلة الجديدة للحماية المدنيّة، و بالأخصّ اشتغال لجنة اليقظة و التنسيق، أمرين مرضيين.

لقد نجم هذا الرضا بالأخصّ عن النتائج الحديثة المتحصّل عليها في ما يخصّ الاستعدادات (تخزين غير مركز للمعدّات من قبل مصالح الحماية المدنيّة) و التوقّعات (إنذارات الرصد الجوّي التي تنشرها مؤسسة الرصد الجوي المغربي)، و ردود الفعل المنظمة عند تهطل الأمطار الإعصاريّة و الفياضانات الناجمة عنها و الحاصلة بين ديسمبر 2009 و مارس 2010. يبدو كذلك أن مجهودا كبيرا قد بذل من حيث تحسين و تحديث و تشغيل شبكات المراقبة و الإنذار.

في المستوى التنظيمي، لنلاحظ حذف تداخل الكفاءات بين الوزارات على الصعيد الوطني، و تعويضه بإطار مبسّط نسبيا، له هيكل تنسيقي ذو تجربة و من مزاياه أنه يفصل وظائف القيادة العليا – التي تضمن تركيبة "الاتصال- القيادة- المراقبة" – عن تلك التي تعدّ تقنية بحتة لرجال المطافئ.

المخاطر و أشكال الهشاشة المتعلقة بالدار البيضاء : جدول تلخيصي شامل

لمخاطر				المكونات الحضرية الحساسة	الأفق الزمني	المخاطر المحتملة
المستوى	الحدة	الموقع	النوع (باستثناء المخاطر الأمنية)			
ضعيف جدا	أضرار زلزالية منعدمة أو طفيفة للغاية (تتراوح حدتها بين 4 و4-5 لمدة ارتداد بخمسين سنة).	أنظر إلى الرسم رقم 70	مخاطر أضرار هيكلية و مخاطر انهيار في حالة حدوث رجّة أرضية	أحياء سكنية كثيفة مبنية بمواد رديئة النوعية: المدينة العتيقة- القصبه-سكن الهش-سكن مترد يعود إلى ما بعد الحرب	2010	انزلاق الأراضي/ قابلية التزلزل
ضعيف جدا	نفس الحدة	نفس الرسم رقم 70 ينقص منه السكن الهش (الأحياء الكوخية)		نفس المكونات و لكن بمساحات منحسرة بفعل القضاء على السكن غير الصحي و نزعة التراجع المسجلة في الكثافة الحضرية و بفعل تحسن نوعية مواد البناء	2030	
متوسط	هنالك 50 كم من السواحل التي تعتبر ذات درجة عالية من مخاطر الغمر البحري (حوالي 1200 هك تتعرض إلى مخاطر الغمر من جراء عاصفة ذات تواتر خمسيني).مخاطر التسونامي شبيهة بتجاوز مستويي المد و الجزر.	أنظر إلى الرسمين 71 و 72	أضرار هيكلية تلحق بالمباني الواقعة عند الواجحة . غمر المواقع المنخفضة.	السواحل الطبيعية خارج التجمعات و المناطق الحضرية المواجهة للبحر.	2010	التسونامي/ الغمر البحري
متوسط	نفس خط الساحل تشمله مخاطر كبرى من التعرية و الغمر (زيادة بنحو 12 % للمساحات التي يحتمل تعرضها إلى الغمر من جراء عاصفة ذات تواتر خمسيني) .	أنظر إلى الرسمين 71 و 72		نفس المكونات ولكن مع هشاشة متزايدة على واجهة البحر في إطار مشروعات كبرى (عين السبع،الميناء،المارينا،الشارع الملكي، الكرنيش الجديدة، العنق، سيدي عبد الرحمان.	2030	
مرتفع	42 كلم من السواحل المعتدلة ذات مخاطر تعرية كبرى	أنظر إلى الرسم رقم 27	اختفاء الشواطئ و أضرار هيكلية تلحق بالمباني الواقعة عند الواجحة.	السواحل الطبيعية خارج التجمعات و المناطق الحضرية المواجهة للبحر.	2010	التعرية الساحلية
مرتفع	نفس خط الساحل تشمله مخاطر كبرى من التعرية.	أنظر إلى الرسم رقم 53		نفس المكونات ولكن مع هشاشة متزايدة على واجهة البحر في إطار مشروعات كبرى (عين السبع،الميناء،المارينا،الشارع الملكي، الكرنيش الجديدة، العنق، سيدي عبد الرحمان.	2030	

مرتفع	حوالي 5.500 هكتار من الأراضي المغمورة بفيضان ذي تواتر مئوي يشمل مجموع مساحة الدار البيضاء الكبرى. حوالي عشر نقاط سوداء تتطابق مع تجاوز لمستوى الشبكة الأولية بأمطار ذات فترة ارتداد دون القرن.	أنظر إلى الرسم 73 للمشهد العام والرسوم من 74 إلى 75 بالنسبة إلى المشاهد التفصيلية	فيضان يغمر الطوابق السفلى (أضرار تلحق بالبناءات)	أحياء سكنية كثيفة على امتداد المجرى القديم لواد بوسكورة في الدار البيضاء, أحياء سكنية كثيفة والمنطقة الصناعية- المرفئية بالمحمدية عند مصب واد المالح.	2010	I الفيضان
مرتفع	بالنسبة إلى الدار البيضاء و رغم زيادة محتملة قد تتراوح بين 15 و 20 % من منسوب الفيضان, ينبغي لبرامج التطهير المخصصة لمياه الأمطار و خاصة بالنسبة إلى المجمع الغربي الكبير, أن تحسن الوضع بشكل ملموس و من المفروض أن يسهم سدان يقامان على واد المالح في تقليص مخاطر الفيضان بالنسبة إلى المحمدية.	غير قابل للموقعة عند غياب النمذجة المائية.		نفس المكونات، تضاف إليها مشروعات كبرى في التجهيز و العمران (قلب المدينة و أنفا بالدار البيضاء)- تدعيم القطب الصناعي و التجهيزي و بناءات المكاتب و تجهيزات كبرى بالمحمدية.	2030	
ضعيف	التزويد بالمياه انطلاقا من سدين كبيرين (سد سيدي محمد بن عبد الله و سد المسيرة). و في السنوات الأخيرة لم يحصل أي تحديد للاستعمال خلال الفصل الجاف.	غير قابل للرسم الخرائطي	نقص في المياه	السكان و الأنشطة الاقتصادية (الحاجيات إلى المياه)	2010	الجفاف
متوسط	ترفيح طاقة تحويل المياه انطلاقا من سد بورقراق (سد سيدي محمد بن عبد الله)، الذي تم ترفيحه مؤخرا. تعد هذه الطاقة كافية للاستجابة لحاجيات أفق 2030 . إلا أن التغير المناخي (و لم يؤخذ بعين الاعتبار في الإسقاطات) قد يؤدي إلى تقليص الكميات القابلة للتعديل بما قدره 30 – 40 % .			نفس المكونات و لكن مع تزايد الحاجيات (زيادة بقدر 32 % بالنسبة إلى الماء الشروب) إلى أفق سنة 2030.	2030	

المخاطر و أشكال الهشاشة المتعلقة بوادي البورقراق : جدول تلخيصي شامل

المخاطر				المكونات الحضرية الحساسة	الأفق الزمني	المخاطر المحتملة
المستوى	الحدة	الموقع	النوع (باستثناء المخاطر الأمنية)			
ضعيف	أضرار زلزالية ضعيفة جدا أو ضعيفة (حدة متراوحة بين 5 و 6 لفترة ارتداد خمسيني). و لكن هنالك عوامل معمقة للمخاطر تتصل بخطر شديد لانزلاق الأراضي في مستوى سفحي الوادي (مخاطر انزلاق الأراضي وسقوط الكتل الصخرية) كما تتصل بعمليات محتملة من الانخساف في مستوى قاع الوادي.	أنظر إلى الرسم 40 (الوضع الحالي)	مخاطر أضرار هيكلية في حالة حدوث زلزال	بعض الدواوير المتناثرة في الوادي (سكن ريفي رديء النوعية) ملاحظة: إن قصبه أودايا و المدينتين العتيقتين بالرباط و سلا مواقع تتميز هي أيضا بحساسية كبرى للارتجاج و لكنها خارجة عن نطاق الدراسة.	قبل انطلاق برنامج التهيئة الحضرية	انزلاق الأراضي / قابلية التزلزل
متوسط	نفس الحدة و لكن مع تعرض متزايد للمخاطر	أنظر إلى الرسم 40 (الوضع في أفق 2030)		نفس المكونات. يعتبر برنامج التوسع الحضري في الوادي، اعتمادا على البناءات الفاخرة، ضعيف الحساسية تجاه هذه المخاطر.	2030	
متوسط	تعدّ شواطئ الرباط و سلا تباعا ذات درجة عالية و متوسطة من مخاطر الغمر بفعل عاصفة ذات ارتداد خمسيني. و المساحة الجمالية المغمورة بسبب مثل هذا الحدث هي بنحو 860 هك و هي تقع أساسا في المنطقة الوسطي بالوادي و لا توجه أية بناءات في هذا القطاع. أما مخاطر التسونامي فهي شبيهة بمخاطر تجاوز مستويي المد و الجزر.	أنظر إلى الرسم 15 و الرسم 40 (الوضع الحالي)	أضرار هيكلية تلحق بالمباني الواقعة عند الواحة. عمر المواقع المنخفضة.	الشواطئ الرملية الواقعة عند مصب البورقراق	قبل انطلاق برنامج التهيئة الحضرية	التسونامي / الغمر البحري
مرتفع	تقلص مخاطر الغمر البحري عند مصب البورقراق بفعل تشييد حاجز جديد و لكن مع زيادة بنحو 16 % للمساحات المعرضة ضمنا إلى مخاطر الغمر البحري بفعل عاصفة ذات ارتداد خمسيني (تأثير محتمل على مشاريع التهيئة الخاصة بالمرحلة الثالثة الواردة في برنامج التوسع الحضري).	أنظر إلى الرسم 33 و الرسم 40 (وضع أفق 2030)		نفس الوضعية و لكن مع توسع حضري في عالية الشاطئ. ظهور أحياء جديدة للسكن الكثيف مبنية في قاع الوادي.	2030	

متوسط	تعدّ شواطئ الرباط و سلا ذات درجة عالية من مخاطر التعرية	أنظر إلى الرسم 14		الشواطئ الرملية الواقعة عند مصب البورقراق	قبل انطلاق برنامج	
ضعيف	تقلص مخاطر التعرية (مخاطر متوسطة الحدة) عند مصب البورقراق بفعل تشييد حاجز جديد.	أنظر إلى الرسم 32	اختفاء الشواطئ	نفس الوضعية و لكن مع توسع حضري في عالية الشاطئ، ظهور أحياء جديدة للسكن الكثيف مبنية في قاع الوادي.	2030	التعرية الساحلية
ضعيف	حوالي 1800 هك من الأراضي المغمورة عند حدوث فيضان مائوي. دواوير تقع خارج المنطقة القابلة للغمر و لكن أغلب الأنشطة الصناعية و التجارية تقع داخل المنطقة القابلة للغمر.	أنظر إلى الرسم 40 (الوضع الحالي)	فيضان يغمر الطوابق السفلى (أضرار تلحق بالبناءات)	بعض الدواوير المتناثرة في الوادي. بعض التجهيزات و مناطق الأنشطة عند المصب. الخطوط الطرقية و الحديدية الرباط – سلا	قبل انطلاق برنامج التهيئة	
مرتفع للغاية	ارتفاع إضافي لمستويات المياه عند الفيضان المائوي متراوح بين + 35 سنتيمترا عند سافلة جسر مولاي الحسن و بين + 20 و + 30 سنتيمترا في القطاع الواقع بين جسر الديوان الوطني للسكة الحديدية و الطريق الدائرية. حوالي 100 000 شخص (السكان و المستخدمون) هم معرضون ضمنا لفيضانات النهر.	أنظر إلى الرسم 40 (الوضع في أفق 2030). ملاحظة: نظرا لغياب النمذجة، تتطابق مساحة المنطقة القابلة للغمر مع الوضع الحالي.		اختفاء بعض التجهيزات و مناطق الأنشطة المتواجدة. بناء أحياء جديدة للسكن الكثيف في قاع الوادي. تدعيم شبكة المواصلات القائمة و مد خط للترامواي.	2030	الفيضان
ضعيف	التزويد بالمياه إنطلاقا من سد سيدي محمد بن عبد الله. و في السنوات الأخيرة لم يحصل أي تحديد للاستعمال خلال الفصل الجاف.	غير قابل للرسم الخرائطي	نقص في المياه	السكنة و الأنشطة الاقتصادية (الحاجيات إلى المياه)	قبل انطلاق برنامج	
متوسط	سد البورقراق (سد سيدي محمد بن عبد الله) الذي تم ترفيعه مؤخرا + مشاريع سد بوخميس و تحويل المياه انطلاقا من حوض السبو وهي مشاريع تعد كافية للإستجابة للحاجيات، إلا أن التغير المناخي قد يؤدي إلى تقليص الكميات القابلة للتعديل بنحو 30 – 40 % .			نفس المكونات و لكن مع تزايد الحاجيات (لتزويد "مدينة" جديدة بنحو 140000 ساكن و 90000 موطن شغل) إلى أفق سنة 2030.	2030	الجفاف

Chapitre 2 - Introduction

La Banque Mondiale apporte son soutien aux Gouvernements de la région du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord (MOAN) pour faire face aux défis résultant du changement climatique et des désastres naturels et pour intégrer des stratégies d'adaptation dans leurs plans de développement. **Une étude portant sur la vulnérabilité des villes côtières d'Afrique du Nord face au changement climatique et aux désastres naturels** a par conséquent été lancée en 2008, financée par la Banque Mondiale et par les fonds fiduciaires NTF-PSI, TFESSD et GFDRR, administrés par la Banque.

L'étude se concentre sur trois villes de première importance dans la région : Alexandrie en Égypte, Tunis en Tunisie, et Casablanca au Maroc. Le site du projet de développement urbain de la Vallée du Bouregreg au Maroc a également été inclus dans l'étude. Le choix de ces villes a été concerté avec les Autorités nationales responsables, qui ont exprimé un intérêt majeur pour l'étude.

1 Les objectifs de l'étude

Les principaux objectifs de l'étude sont les suivants :

1. Évaluer les vulnérabilités des quatre zones urbaines à l'horizon 2030 face au changement climatique et aux désastres naturels, à travers, a) des projections scientifiques du changement climatique futur, de l'élévation du niveau de la mer, ainsi que la prévision des risques liés aux désastres naturels, b) une analyse exhaustive de la nature géologique, topographique, hydrologique, et environnementale des quatre sites, c) l'évaluation de l'extension urbaine actuelle et de la vulnérabilité des infrastructures urbaines présentes sur les sites, d) la projection de l'extension urbaine à l'horizon 2030, sur la base des tendances démographiques et d'urbanisation, des plans d'aménagement et de développement urbain, e) la production de cartes de vulnérabilité sous format SIG, f) l'évaluation des coûts socio-économiques des impacts du changement climatique et des désastres naturels sur les quatre sites, et g) l'évaluation des rôles et responsabilités des institutions nationales et locales dans les domaines de l'urbanisme, de l'aménagement d'infrastructures, et de la prévention des désastres naturels.

2. Développer des plans d'action pour améliorer l'adaptation des villes au changement climatique et leur préparation aux désastres naturels, en formalisant des recommandations quant à : a) la planification urbaine des quatre sites, afin de minimiser les vulnérabilités identifiées, b) les infrastructures et les investissements physiques qui seront nécessaires pour protéger les zones et systèmes urbains, c) la vigilance institutionnelle et les plans d'urgence pour faire face aux impacts du changement climatique et des désastres naturels, d) les campagnes d'information publique et d'éducation à lancer au niveau local, e) une évaluation économique de la mise en œuvre des actions d'adaptation recommandées, face aux coûts de la non-action.

3. Diffuser les résultats de l'étude et engager les parties prenantes dans la prise de décisions, par le biais de : a) la coopération avec les contreparties nationales et locales

responsables pour l'aménagement et le développement des quatre sites, b) l'organisation d'événements locaux et régionaux de validation et de dissémination des résultats de l'étude.

La sélection compétitive du bureau d'étude chargé de la réalisation des travaux techniques s'est achevée fin mai 2009, et le **groupement Egis Bceom International / IAU-IDF / BRGM** a été retenu. Le contrat prévoit un démarrage des travaux techniques au 15 juin 2009 et un achèvement de l'étude le 15 décembre 2010. Le bureau d'étude travaille en étroite collaboration avec les différents acteurs nationaux et locaux, tandis que l'équipe de la Banque Mondiale responsable de l'étude maintient les rapports institutionnels et se charge de la facilitation des échanges régionaux.

2 Le contenu du rapport

Le présent rapport concerne l'étude des sites de Casablanca et de la Vallée du Bouregreg (Maroc). Dans cette **première phase d'étude**, il présente les éléments communs d'analyse des aléas et des risques naturels sur ces deux sites, ainsi que les volets économiques, sanitaires et institutionnels de l'étude.

Il est accompagné de **deux autres volumes**, dans lesquels sont exposés les informations détaillées sur les risques et vulnérabilités propres à chaque site. Afin que chaque volume puisse être lu et utilisé indépendamment des deux autres, ils comportent tous un résumé exécutif de l'ensemble de l'étude, présenté en trois langues dans le rapport commun.

Le rapport commun, qui fait l'objet du présent volume, se compose des parties suivantes :

Chapitre 1 - Résumé exécutif

Chapitre 2 - Introduction

Chapitre 3 - Eléments d'évaluation des aléas en situation actuelle

Chapitre 4 - Eléments d'évaluation des aléas à l'horizon 2030

Chapitre 5 - Évaluation économique

Chapitre 6 - Evaluation sanitaire

Chapitre 7 - Évaluation institutionnelle

Ce rapport est la **version définitive**, complétée et amendée suite à un atelier réunissant les différents partenaires nationaux et locaux de l'étude à Casablanca le 22 et 23 juin 2010.

La deuxième phase d'étude consistera en l'élaboration de recommandations pour l'adaptation au changement climatique et aux désastres naturels, incluant toutes les propositions élaborées par le bureau d'études pour répondre aux vulnérabilités identifiées.

Ce rapport a été préparé par le groupement **Egis BCEOM International, IAU-IDF et BRGM**, avec la contribution de **MORA Études**. Les auteurs assument l'entière responsabilité du contenu du présent rapport. Les opinions exprimées n'engagent pas la Banque Mondiale.

Pour de plus amples informations sur le contexte et les objectifs du projet, prière de se reporter au rapport d'établissement de septembre 2009.

3 Présentation des sites

Au Maroc, deux sites ont été retenus pour la présente étude : l'aire urbaine de Casablanca et la vallée du Bouregreg.

3.1 L'aire urbaine de Casablanca

Pour des raisons pratiques de disponibilité de données, de documents cartographiques, de planification ou de gestion urbaine, l'aire urbaine qui a été retenue pour l'étude correspond au le périmètre de l'agglomération du Grand Casablanca, tel qu'il apparaît au **Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme**. Ce périmètre permet de caler la vision de développement urbain à l'horizon 2030.

Situation

La Wilaya de la Région du Grand Casablanca est située sur la côte Atlantique, au centre ouest du Maroc. En coordonnées géographiques, la ville se trouve à environ 33°35 en latitude Nord et 7°25 en longitude Ouest. Le territoire de la région est limité :

- Au Nord, par les eaux de l'Atlantique.
- A l'Est, par les plateaux de Benslimane.
- Au Sud et à l'Ouest, par les riches et fertiles plaines relevant de la province de Settat.

Son littoral s'étend sur plus de 60 Kilomètres.

Superficie

Le territoire concerné couvre une superficie totale de l'ordre de 122 000 hectares.

Limites administratives

La Région du Grand Casablanca comprend :

- 2 préfectures : Casablanca, divisée en 8 préfectures d'arrondissement, et Mohammedia,
- 2 provinces : Médiouna et Nouaceur,

Le territoire de la Wilaya est découpé en 16 communes : 6 municipalités (communes urbaines) et 10 communes rurales. L'aire de l'étude couvre l'ensemble du territoire de la Wilaya de la Région du Grand Casablanca, et la commune de Mansouria qui relève de la province de Benslimane.

Physionomie

Le relief est peu accidenté ; une pente de 2 degrés en moyenne descend tout doucement vers la mer, les hauteurs culminant à environ 230 m à Sidi Othmane, 100 m au boulevard Panoramique et 40 à 45 m à Mers Sultan.

Les pentes les plus fortes sont de 0,8 degrés environ, à l'ancienne Médina et à l'aéroport de Casa-Anfa. A l'extrémité occidentale de la ville, les formes topographiques sont nettement différentes et les altitudes sont un peu plus fortes. Le littoral est assez bas. En général, la pente s'étale et descend lentement vers la mer, mais en centre ville la façade maritime est en corniche.

Population

Au recensement de 2004, la ville de Casablanca comptait 2 936 874 habitants et le reste de la Wilaya 679 029 habitants.

3.2 Le site du Bouregreg

Le périmètre de l'étude suit les limites géographiques de la vallée et non les limites administratives. Il fait l'objet d'une affectation spéciale à l'Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg, par la loi n°16-04 et son décret d'application (Dahir n°1-05-70 du 23 novembre 2005). Seul le cours aval du Bouregreg, à l'aval du Barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah (SMBA) est concerné par le projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg. Le Plan d'Aménagement Spécial de la vallée du Bouregreg est actuellement en phase finale d'homologation.

Situation

La vallée du Bouregreg sépare les villes de Rabat et de Salé. Elle est située sur la côte Atlantique, au Nord de Casablanca. En coordonnées géographiques, la vallée se trouve à environ 34°01 en Latitude Nord et 6°49 en Longitude Ouest.

Superficie

Le territoire concerné par le projet d'aménagement couvre une superficie totale de l'ordre de 6000 hectares. La vallée s'étend sur 24 km, de l'embouchure au barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah.

Limites administratives

La vallée du Bouregreg concerne les préfectures de Rabat et de Salé. Le lit du Bouregreg marque la séparation entre les deux préfectures. Côté Rabat, deux communes développent une façade sur la vallée : Rabat Hassan et El Youssoufia. Côté Salé, trois communes sont concernées : Bab Lamrissa, Bettana et Hssaïne.

Physionomie

La vallée du Bouregreg est relativement encaissée ; c'est le seul accident d'importance du relief du site de l'agglomération. Elle se développe entre les plateaux de Youssoufia Akreuch à l'Ouest et de Kariat Hssaine à l'Est, où le fleuve côtier décrit d'amples méandres. Elle se resserre près de l'embouchure et au niveau de la confluence avec l'oued Akreuch. Le barrage SMBA est construit à la sortie des gorges.

Population

Le site du Bouregreg n'est actuellement que très peu urbanisé, essentiellement sous forme d'habitat informel. Il ne semble pas y avoir de recensement de cette population.

Les cartes présentées aux pages suivantes montrent l'occupation actuelle des sols dans la région de Casablanca et au niveau de la vallée du Bouregreg. Pour plus d'informations sur les éléments de définition de ces sites, se reporter au rapport d'établissement de septembre 2009.

Figure 1 : Périmètre et occupation des sols de l'aire d'étude du Grand Casablanca (source : AUG, IAURIF, Image Spot 2004)

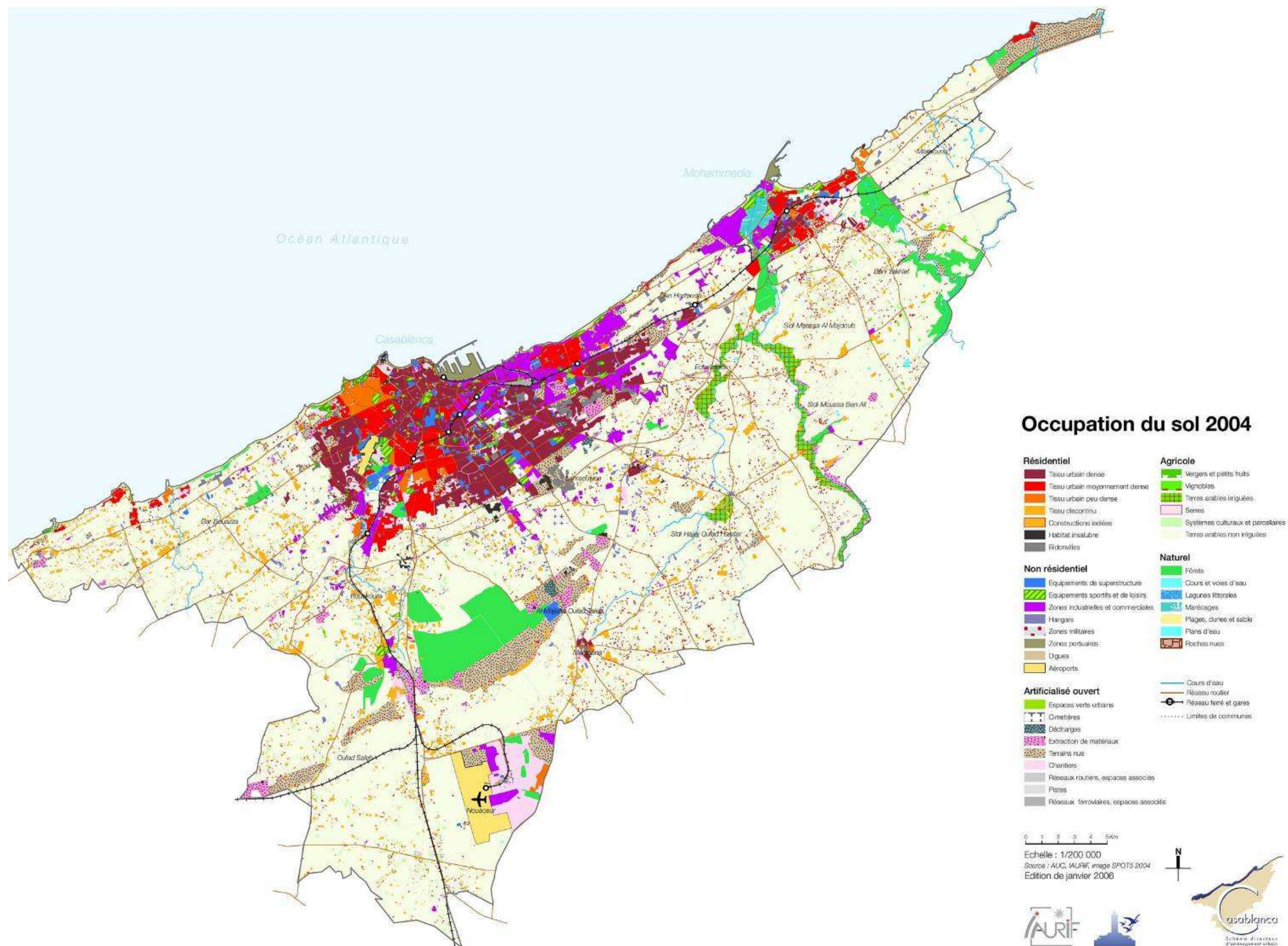


Figure 2 : Périmètre et parti d'aménagement du site du Bouregreg



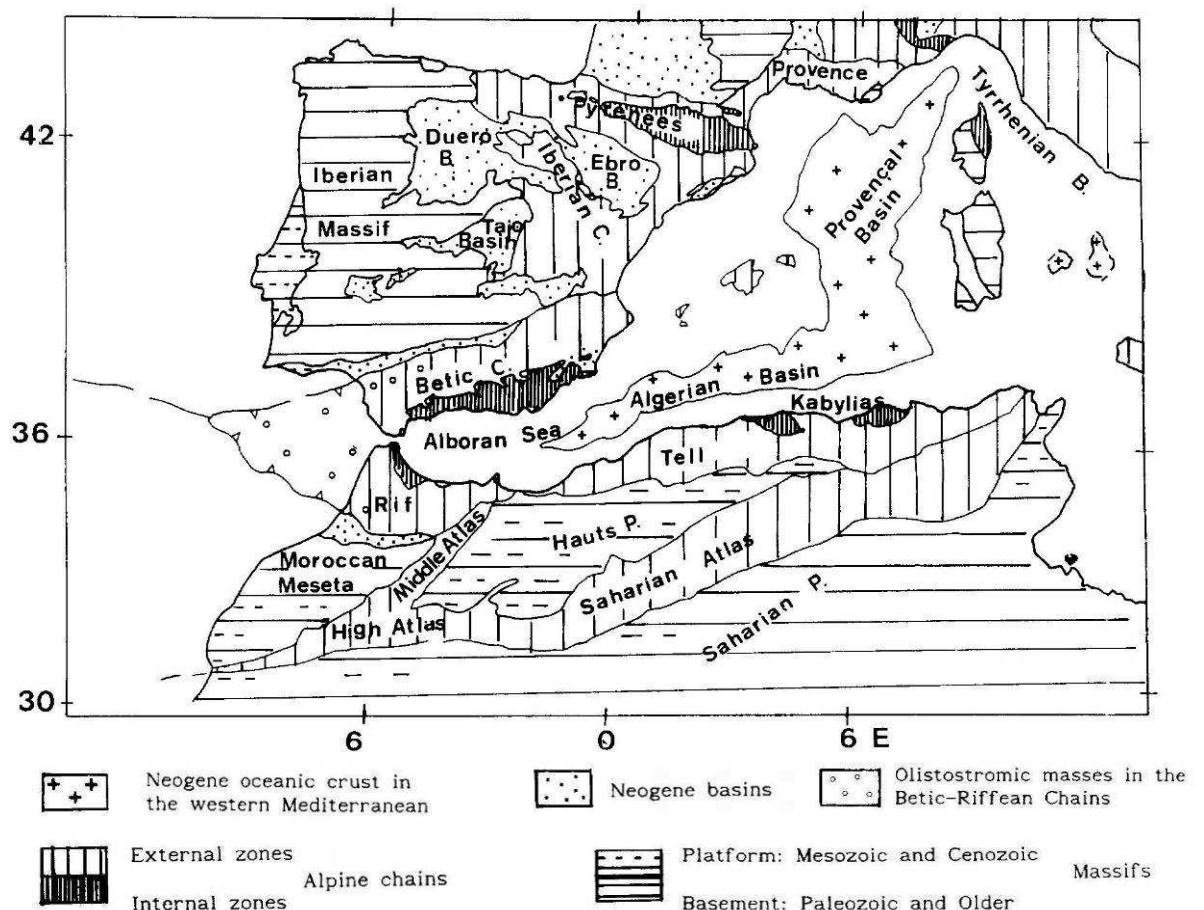
Chapitre 3 - Elements d'évaluation des aléas en situation actuelle

1 Contexte géologique

Cette partie présente les éléments communs d'information des sites de Casablanca et du Bouregreg concernant le contexte géologique.

Au niveau du Maroc, **trois domaines géologiques majeurs** se distinguent, du Nord au Sud : le domaine rifain, le domaine mésétien et atlasique, le domaine anti atlasique et saharien (Figure 3).

Figure 3 : Principaux ensembles géologiques de la région ibéro-maghrébine (d'après Buform et al., 1995)



1.1 Le domaine rifain

Le domaine rifain occupe la partie nord du Maroc. Il appartient à l'arc bético-rif-tellien de la chaîne alpine périméditerranéenne (Figure 3).

La mise en place de la chaîne alpine s'est faite durant la collision créacée à paléogène des plaques Europe et Afrique, avec notamment la mise en place des chevauchements à vergence nord, au niveau de la chaîne bétique, et sud, au niveau du Rif et du Tell. Toutefois, selon Michard et al. (2006), la subduction alpine-bétique de sens opposée est peut-être antérieure à celle du Maghreb.

Les chaînes bétiques, du Rif et du Tell constituent la partie la plus occidentale de la chaîne alpine interne. Cette chaîne se referme au niveau du golfe de Cadix où les structures chevauchantes des chaînes bétiques et du Rif se rejoignent.

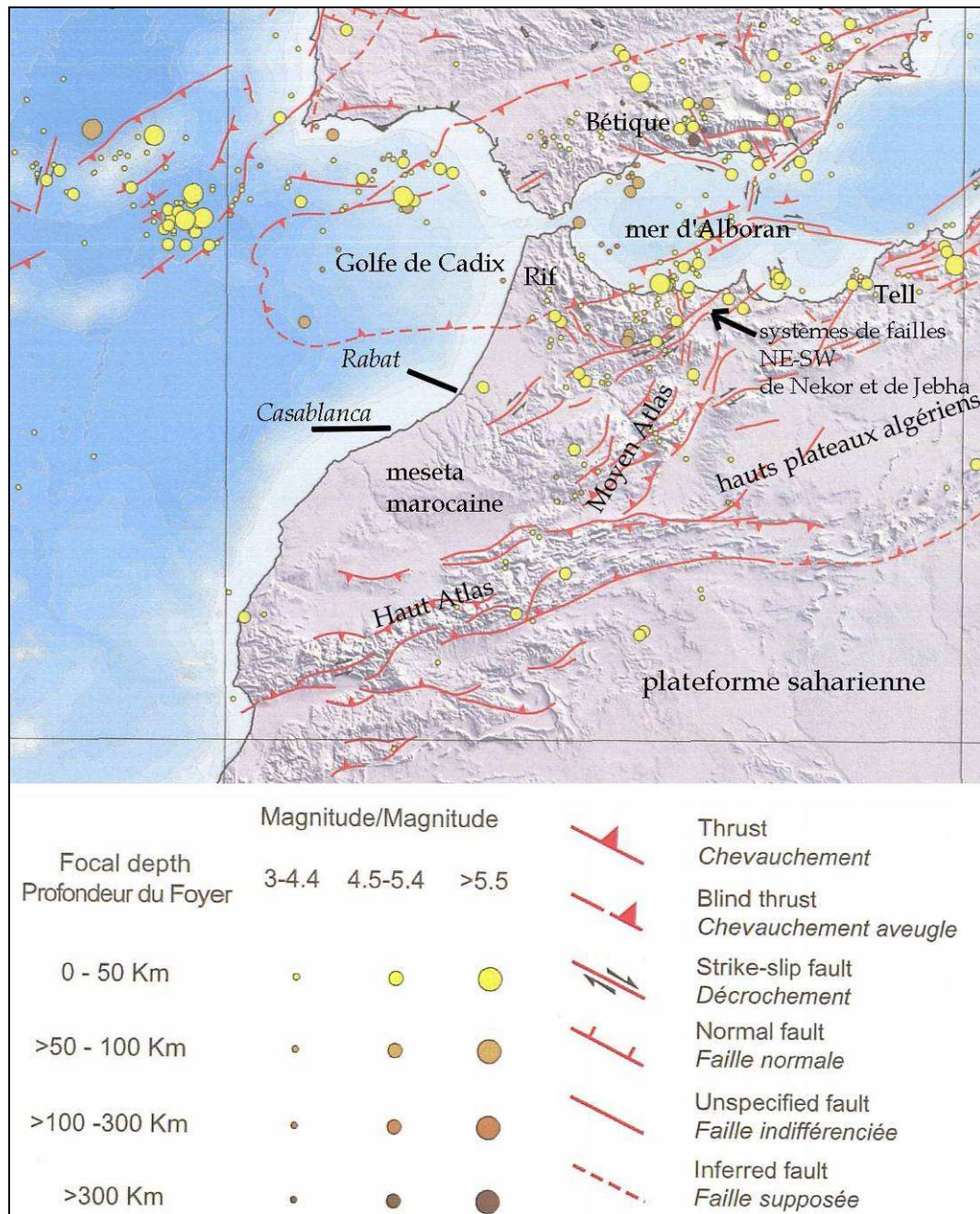
A l'est, les deux chaînes s'écartent, pour donner la place à la mer d'Alboran, tandis que plus loin, la chaîne du Rif se poursuit à travers celle du Tell, bordée au nord par le bassin océanique algéro-provençal.

Schématiquement, la chaîne du Rif-Tell est composée de trois ensembles tectonostratigraphiques, du nord vers le sud (Figure 3) :

- le **domaine des zones internes** ou d'Alboran, d'origine européenne, partie la plus interne de la zone alpine, constitué de terrains métamorphiques. Initialement il s'agissait d'un domaine continu du nord au sud, entre les cordillères bétiques et le Rif. Du début au milieu du Miocène, le domaine Alboran est soumis à une extension, donnant lieu à un amincissement important de la croûte continentale. Cette extension est contemporaine à la mise en place des chevauchements de la zone externes. Plusieurs modèles ont été avancés pour expliquer les régimes extensif au niveau de la Mer d'Alboran et compressif des chaînes externes : expulsion vers l'ouest d'un bloc rigide considéré alboran, subduction roll-back combinée avec une extension d'arrière arc, mouvement convectif dans la lithosphère, composition asymétrique de la lithosphère mantellique.
- le **domaine intermédiaire ou zone de flysch**, il s'agit de la couverture sédimentaire de l'ancien océan Téthys, datée début Crétacé à début Miocène.
- les **zones alpines externes** (Tell-Rif S.S.), elles sont constituées de roches sédimentaires mésozoïques à tertiaires et correspondent aux paléo-marges continentales sud ibérique et maghrébine.

L'architecture actuelle de la chaîne rifaine est donc pour l'essentiel héritée de la tectonique oligo-miocène, qui a conduit à un empilement de nappes à vergence sud ou sud-ouest, de structure beaucoup plus complexe que celle de la zone atlasique. La mise en place de ces nappes est associée au jeu de grands décrochements crustaux de direction NE-SW, assimilés à des rampes latérales, dont les failles de Jebha et de Nekor, pour la partie centrale du Rif (Figure 4). Les accidents de Jebha et de Nekor, transversaux à l'axe de la chaîne du Rif, correspondent à des failles décrochantes senestres. Ces accidents appartiennent très probablement à une zone faillée majeure, de direction NE-SW, qui intéresse toute l'épaisseur de la croûte, et constituée par un système de failles en échelon depuis la marge SE de l'Espagne, jusque au moyen Atlas.

Figure 4 : Extrait de la carte sismotectonique de la Méditerranée (CGMW, 2004), modifiée



1.2 Le domaine mésétien et les chaînes atlasiques

La croûte du domaine atlasique et mésétien appartient à la partie intracontinentale de l'orogénèse varisque qui a évolué près de la bordure du craton ouest-africain. Il s'agit d'un domaine profondément affecté par l'orogénèse varisque, et dont les structures tectoniques mises en place au Paléozoïque contrôleront fortement l'évolution et la géométrie de la marge africaine méso-cénozoïque, actuellement incluse dans l'orogène tello-rifain.

Les chaînes atlasiques comprennent le Haut Atlas, le Moyen Atlas, la Meseta orientale et le Maroc nord-oriental (Figure 3). Ce domaine est limité au nord par le front de chevauchement des nappes alpines rifaines. Au Sud, il s'agit du front de chevauchement sud-atlasique.

Ce domaine comprend aussi des dépressions sub-atlasiques (sillon sud atlasique, Moulaya, sillon sud rifain, etc.) siège de dépôts tertiaires et quaternaires intensément déformés.

Dans les zones de plateaux qui encadrent les chaînes, la couverture jurassico-crétacé est restée subhorizontale.

Il s'agit du domaine d'avant-pays des nappes alpines maghrébines (Rif et Tell). Le Trias argileux ou gypseux correspond à la base du décollement de la couverture et son chevauchement sur le socle hercynien ou antécambrien. La couverture sédimentaire post paléozoïque est pour l'essentiel d'âge jurassique à crétacé. Les accidents chevauchants de la couverture sur le socle correspondent généralement à d'anciennes failles normales de la paléomarge téthysienne repris en mouvement inverse lors de la phase orogénique atlasique.

Le raccourcissement évalué pour le Haut Atlas durant la période orogénique cénozoïque est de 36 km (Beaucham et al., 1999), tandis que pour l'Atlas saharien, il avoisinerait les 10 km (Benouali-Mebarek et al. 2006).

Aujourd'hui plusieurs auteurs s'accordent pour lier le relief particulièrement élevé du Haut Atlas (4200m) aux effets combinés du raccourcissement tectonique avec l'existence d'un dôme thermique asthénosphérique du fait de la faible épaisseur (70 km au lieu de 170 km sous le craton africain, 100 à 130 km au niveau du golfe de Cadix) à cet endroit de la lithosphère. A l'échelle du Maroc, Fullea Urchulutegui et al. (2006) indiquent en fait que la zone lithosphérique amincie dessinerait une ellipse d'axe NE-SW et recouperait les principales frontières tectoniques du Rif et de l'Atlas. A noter que cette zone se superpose avec la région du moyen Atlas, et se trouve dans le prolongement SE des systèmes de failles de Nekor et de Jebah et plus au nord des failles NE-SW de la mer d'Alboran.

1.3 Le domaine anti-atlasique et saharien

Le domaine anti-atlasique appartient à l'ancien craton africain, d'âge précambrien, peu déformé au cours des orogènes paléozoïques et ultérieures.

Il est constitué de terrains du Précambrien, du Paléozoïque et par une couverture post-paléozoïque peu épaisse. Il est limité au nord par l'accident sud-atlasique qui s'étend d'Agadir à l'Ouest à Figuig à l'Est. Cet accident correspond au chevauchement frontal de la chaîne du Haut Atlas sur le domaine anti-atlas et saharien (Figure 4).

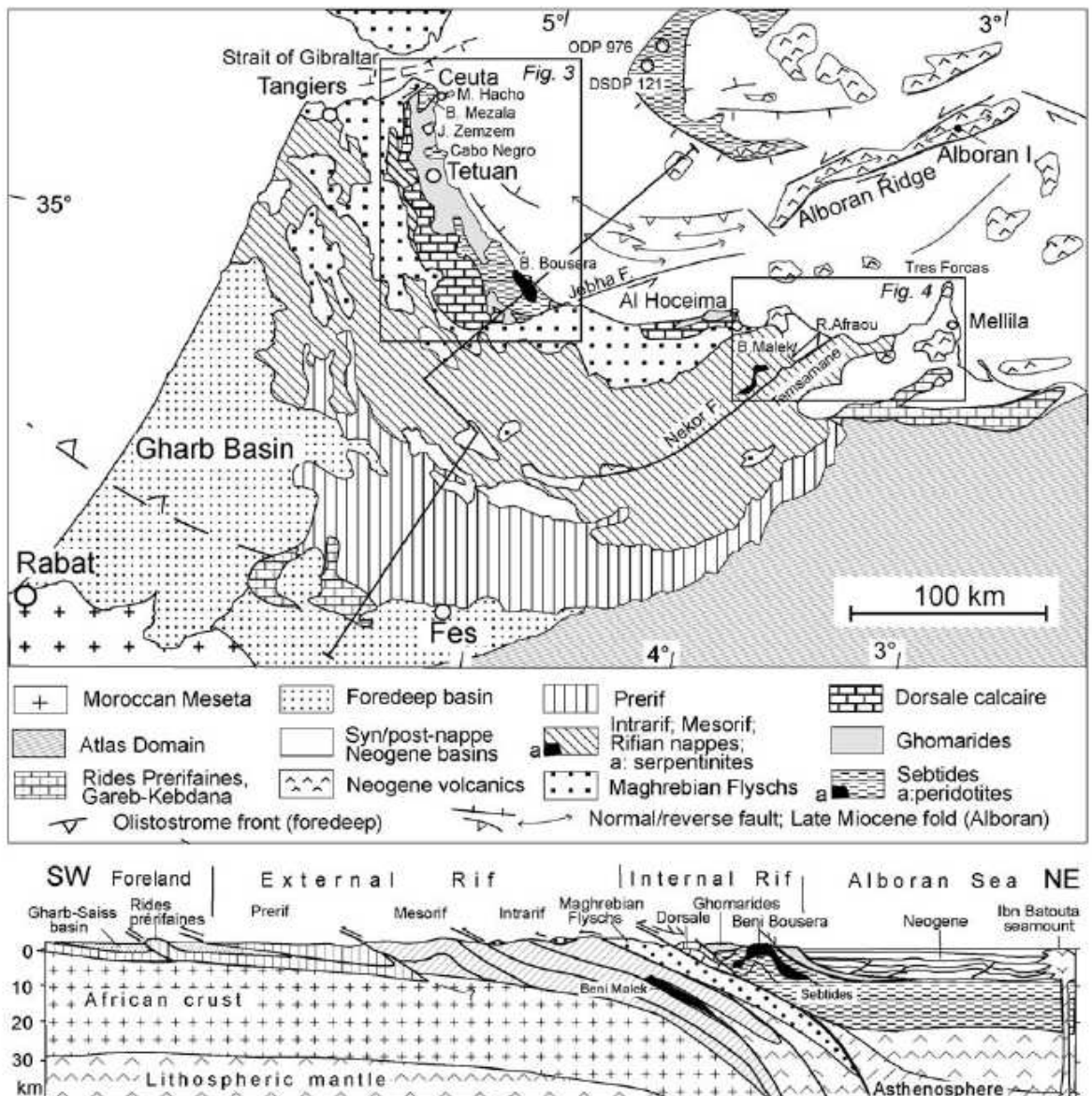
1.4 Coupe schématique NNE-SSW depuis la mer d'Alboran jusqu'à la Meseta marocaine

La coupe schématique NNE-SSW depuis la mer d'Alboran jusqu'à la Meseta marocaine montre (Figure 5) :

- Au niveau de la **mer d'Alboran**, une épaisse série turbiditique néogène (supérieure à 8 000 m), qui recouvre une fine croûte continentale (15 km d'épaisseur au lieu de 32 à 35 km en moyenne), traversés localement par des pointements volcaniques miocène à fini-Miocène. Ces formations chevauchent vers le sud le domaine du Rif interne.
- **Le rif interne**, il s'agit de formations sédimentaires Mésozoïque à Cénozoïques métamorphisées, et de lambeaux de la croûte continentale hercynienne chevauchants sur la série de flyschs maghrébins, ancienne couverture sédimentaire de l'ancien océan Téthys. Ces chevauchements s'enracinent très profondément dans la croûte. Ils peuvent localement concerner des lambeaux de l'ancienne croûte océanique téthysienne (serpentinites de Beni Malek).

- Le **domaine des Rifs externes**, essentiellement constitué de sédiments Mésozoïques à Éocènes, sédiments pré-orogéniques hérités du rifting de la marge continentale africaine, chevauchants vers le sud sur l'Atlas et la Meseta, les chevauchements s'enracinent au toit de la croûte.
- Au sud, au niveau de la Meseta, il s'agit du **craton africain**, avec une croûte continentale peu affectée par la tectonique post primaire.
- Les failles chevauchantes ou inverses de la mer d'Alboran et du Rif interne montrent des **rejeux normaux post miocènes**.
- Au sud, en plus des déformations orogéniques, la **remontée de la lithosphère** contribue au soulèvement de l'Atlas.

Figure 5 : Carte structurale et coupe à l'échelle crustale de la chaîne rifaine (extrait de Michard et al. 2006)



2 Sismologie et tsunamis

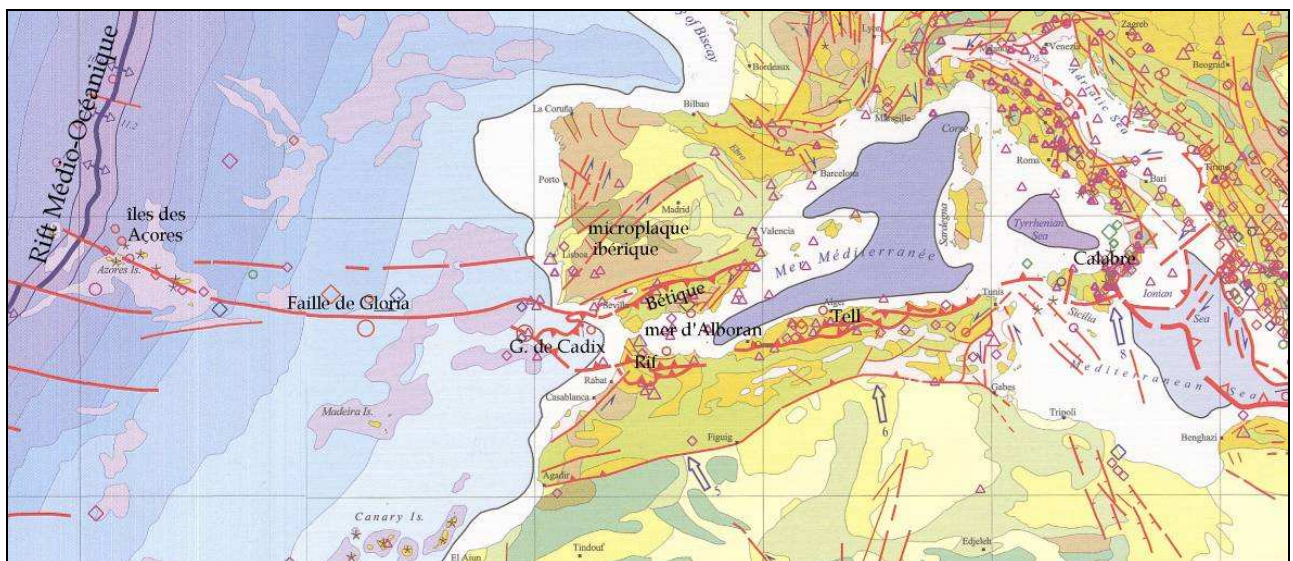
Cette partie présente les éléments communs d'information des sites de Casablanca et du Bouregreg concernant les phénomènes sismiques et les tsunamis.

2.1 Contexte sismotectonique

2.1.1 Cadre géodynamique global

Le domaine méditerranéen correspond à la **zone de convergence active entre les plaques Afrique et Europe**. En Méditerranée orientale, cette convergence est accommodée par une subduction de la plaque africaine sous la plaque européenne. A l'Ouest, cette frontière est plus complexe, Figure 6. Au nord de l'Algérie et dans le sud-ouest de la microplaque ibérique, les failles inverses de direction WNW-ESE dominant. Au centre, Sud de l'Espagne – mer d'Alboran, nord du Maroc, il s'agit plutôt de déformation NE-SW senestre à normale, tandis qu'à l'Ouest, entre le golfe de Cadix et le point triple des Açores, il s'agit d'un mouvement à composante principale dextre, orientée EW.

Figure 6 : La limite de frontière de plaques entre l'Europe et l'Afrique, Extrait de la carte sismotectonique du monde à 1/25 000 000 (CGMW et UNESCO, 2001)



Le nord du Maroc appartient à la chaîne alpine du Rif. Les Atlas correspondent par contre à des orogènes intracontinentaux. **La Meseta marocaine au niveau de la quelle se trouvent les suites du Bouregreg et de Casablanca reste éloignée des déformations alpines les plus actives**. Néanmoins, elle reste exposée aux fortes secousses sismiques localisées dans les régions périphériques.

2.1.2 Sismicité du Maroc

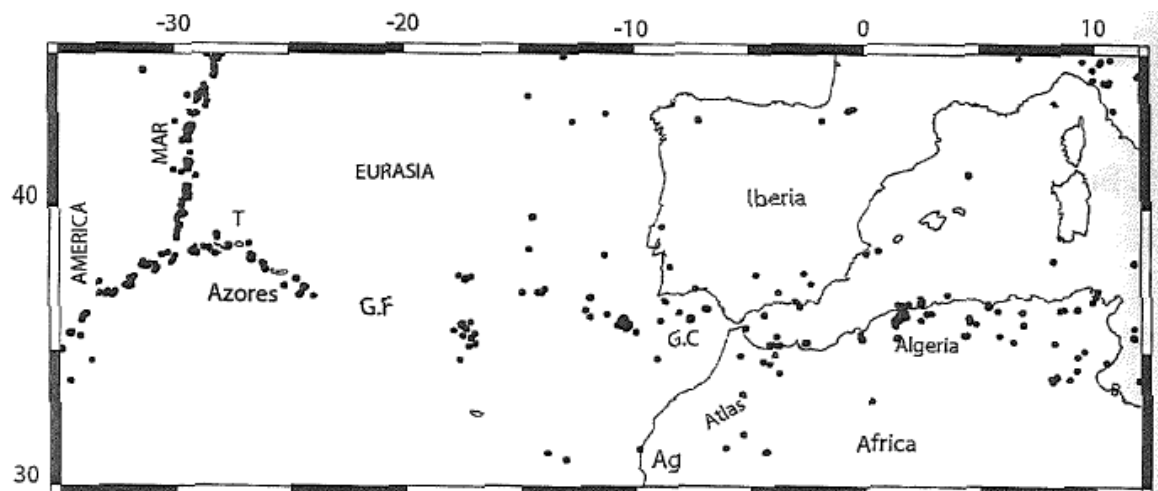
Les **principales données** de la sismicité consultées pour cette analyse sont :

- le catalogue de séismes historiques du IX^{ème} siècle à 2004 de Mrabet (2005),
- la publication de Alami et al. (2004) sur la sismicité du Maroc enregistrée entre 1987 et 1994,
- la liste des séismes historiques connus depuis l'antiquité jusqu'à 1980 établie par Mezcua et Martinez Solares (1983),
- Le catalogue de sismicité pour la période historique antérieure au XI^{ème} siècle, de Guidoboni et al. (1994),
- le catalogue de sismicité pour la période XI^{ème} à fin XV^{ème} siècle, de Guidoboni et Comastri (2005),
- le fichier de sismicité instrumentale du monde (1973 à Aujourd'hui) de l'USGS/NEIC (National Earthquake Information Center), les données proviennent de différents catalogues mondiaux,
- la base de données des grands séismes historiques connus dans le monde (The Significant Earthquake Database), publiée par le NGDC (National Geophysical Data Center) du NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) des États-Unis.

2.1.2.1 Les zones sismiques majeures à l'échelle de la frontière des plaques occidentale et centrale Afrique-Europe

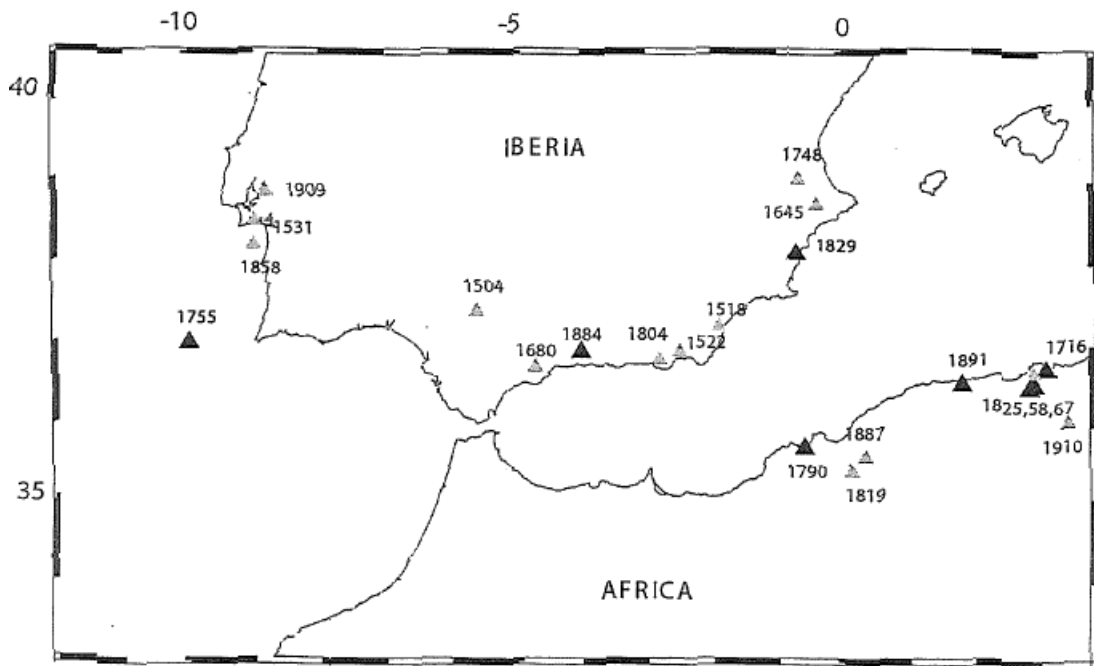
La frontière entre les plaques Afrique et Eurasie est soulignée par une ceinture de sismicité le long du 36^{ème} parallèle. Cette zone sismique joint les Açores à la Sicile, à travers le nord du Maghreb (Figure 6). Elle peut être divisée en **3 zones sismiques majeures**, Figure 7: 1) à l'Ouest, la zones des Açores au Golfe de Cadix, 2) au centre, la zone d'Alboran et le rif marocain, 3) à l'Est, la zone interne atlasique (Buforn, 2009).

Figure 7 : Épicentres de séismes de profondeur focale inférieure à 40 km et de magnitude supérieure à 5,0, pour la période 1931-2000 (Buforn, 2009)



MAR : Ride médio-atlantique, G.F : faille de Gloria, T : Ile de Terceira, GC : golfe de Cadix, Ag, Agadir.

Figure 8 : Épicentres des séismes historiques dans la région Ibéro-Maghrébine (Buforn, 2009)



En noir, lo proche de X MSK ; en gris, lo proche de IX MSK

Concernant la **zone sismique des Açores – Golfe de Cadix** (Figure 7) :

L'activité la plus importante est concentrée le long du rift médio-océanique, où elle est représentée par des séismes de magnitude inférieure à 7, et généralement de faible profondeur.

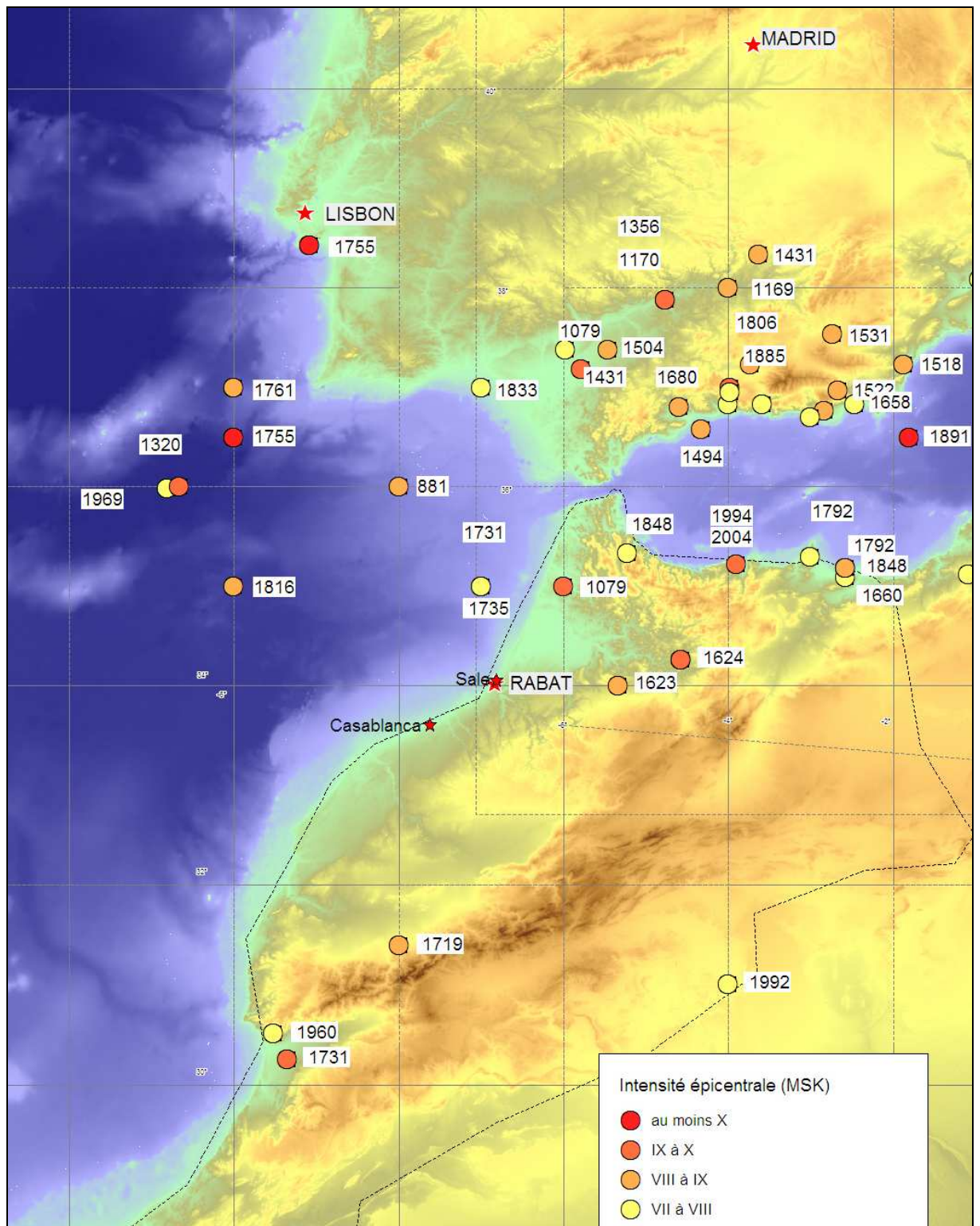
A l'Est du point triple marquant la limite des plaques Eurasie, Afrique et Amérique, entre 30°W et 24°W de longitude, un alignement sismique se distingue clairement, d'abord de direction EW puis NE-SW, il concerne les îles des Açores puis de Terceira. Les plus forts séismes enregistrés au niveau de cette zone correspondent aux secousses du 8 mai 1939 et du 1^{er} janvier 1980, de magnitude $M_s=7,1$ (Buforn et al., 1988).

Entre 24°W et 19°W, il s'agit de la zone faillée de Gloria. Bien qu'aujourd'hui, la sismicité instrumentale y soit relativement peu élevée, elle a donné lieu dans la période historique aux très forts séismes de 1522, 1757 et 1926. Ces derniers sont à l'origine de dommages sévères au niveau des îles de Terceira, Faial et San Miguel, avec une intensité probable de IX degré MSK.

Entre 19°W et 12°W, les épicentres de séismes dessinent très nettement un alignement E-W. Il marque la limite de plaques Afriques-Eurasie. Cette zone est caractérisée par des séismes relativement superficiels et qui peuvent être de forte magnitude. Il s'agit par exemple de celui du **15 novembre 1941**, de magnitude 8.0.

Dans cette partie de la plaque Africaine, un autre alignement sismique est individualisé. De direction NW-SE, il est localisé entre la longitude 19°W jusqu'à Agadir. Le séisme du **26 mai 1975**, de magnitude 7,9, se trouve dans cet alignement sismique EW. Selon plusieurs auteurs (Buforn et al., 1988 ; Vegas, 1991, par exemple), cette alignement sismique marquerait la limite d'une microplaque de forme triangulaire, la limite nord étant représentée par l'alignement sismique localisé entre 19°W et 12°W de longitude.

Figure 9 : Carte des épacentres de séismes historiques majeurs, d'après Mrabet (2005), Alami et al. (2004), Mezcuca et Martinez Solares (1983), la base de données NGDC/NOAA



Entre le golfe de Cadix jusqu'au Tell algérien, la sismicité se caractérise par l'occurrence de tremblements de terre de forte magnitude (Figure 9).

Au niveau du Golfe de Cadix, du rif marocain, de la chaîne bétique et de la mer d'Alboran, les épacentres de séismes dessinent une bande assez large de direction E-W, indiquant la complexité tectonique à cette endroit de la limite entre les plaques Europe et Afrique (*Figure 7*). Plusieurs séismes d'au moins IX degrés d'intensité MSK ont été ressentis dans cette zone (*Figure 8*). Ainsi, au Portugal, depuis le Cap Saint Vincent jusqu'à Lisbonne, il s'agit notamment du **séisme de 1755**, d'intensité X. Au niveau de la cote espagnole, sud orientale, on cite les séismes d'intensité X de 1829 et 1884. Les principaux séismes connus au niveau de la partie nord marocaine sont ceux localisés dans la **région d'Al Hoceima, du 26 mai 1994, de magnitude 5,8 (intensité VIII-IX), et de 2004, de magnitude 6,0 (intensité IX)**.

Au niveau du Tell algérien, l'activité sismique redevient importante. On distingue en particulier deux régions marquées par des évènements historiques majeurs, la région d'Oran (séisme d'intensité X de 1790) et d'El Asnam (séismes d'intensité X de 1891, 1716 et 1825, 1980).

Depuis le golfe de Cadix jusqu'à la mer d'Alboran inclus, bien que l'essentiel des secousses sismiques correspondent à des séismes de profondeur inférieures à 40 km, une sismicité notable entre 40 km et 120 km de profondeur focale est enregistrée.

2.1.2.2 Principaux séismes ressentis au Maroc

Le séisme de Lisbonne, du 1^{er} novembre 1755, est considéré comme un des séismes les plus violents. Son intensité épacentrale est estimée de X à XI degré MSK, sa magnitude est évaluée de l'ordre de 8,5. Son épicentre se trouve dans le golfe de Cadix, à près de 400 km de Casablanca ou de Rabat (*Figure 8*).

Lisbonne a subi les dommages les plus importants. Mais le Maroc a lui aussi été très affecté par le tremblement de terre de 1755, déplorant la morts de plusieurs milliers de victimes, l'écroulement de nombreux édifices, notamment à Fez (I=VII), Meknès (I = VIII) et Marrakech (I=VII). Ce séisme a en outre généré un tsunami transocéanique considéré d'intensité la plus forte connue pour la période historique qui ait été ressenti en océan Atlantique.

Selon Mrabet (2005), ce séisme aurait été précédé en **1731 et 1735** par des séismes d'intensité épacentrale estimée respectivement de l'ordre de VII-VIII et VIII, localisé au large de la côte marocaine, à près de 100 km au nord de Rabat.

Localisé au nord de la mer d'Alboran, à proximité d'Almeria en Espagne, le séisme du **15 janvier 1891**, d'intensité épacentrale X, de magnitude estimée de l'ordre de 7,5, a très fortement touché la côte nord du Maroc (Melilla) et d'Algérie.

La région de Melilla a par ailleurs été le siège de plusieurs secousses historiques (*Figure 10*), dont le séisme du **31 août 1792**, d'intensité épacentrale VIII.

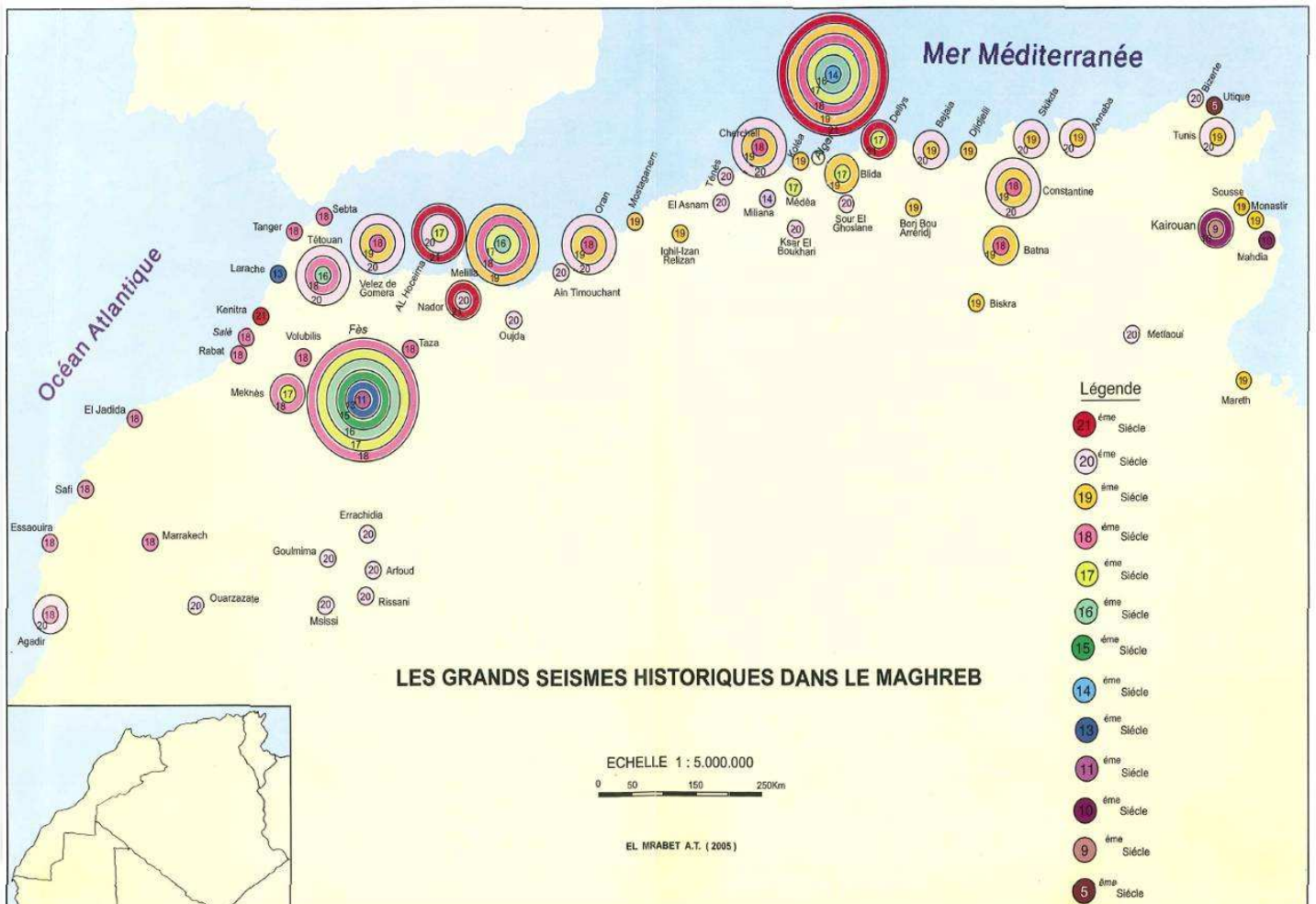
Le séisme du 29 février 1960, de magnitude 5,7, correspond au séisme le plus violent enregistré durant le XX^{ème} siècle au niveau du Maroc (*Figure 10*). Il a causé la mort de 12 000 personnes et plusieurs milliers de personnes ont du être dégagées des décombres. L'intensité épacentrale du séisme est évaluée à X (MSK). Cette très forte intensité du séisme est liée à la faible profondeur focale du foyer, à moins de 1,5 km **sous la ville même d'Agadir**, ainsi qu'à l'amplification du signal sismique par les couches sédimentaires plioquaternaires épaisses par endroit de 200 m (Cherkaoui et Medina, 1988). Le mécanisme au foyer du séisme indique le jeu probable d'une faille NE-SW selon un mouvement dextro-inverse, compatible avec les directions structurales du Haut Atlas. La ville d'Agadir aurait déjà subi des destructions considérables lors du séisme de 1731, d'intensité épacentrale IX selon Mrabet (2005).

Le séisme du **28 février 1969**, localisé dans le golfe de Cadix, à proximité de l'épicentre de 1755, a atteint la magnitude de 7,3. L'intensité du séisme est estimée entre VI et VII (MSK) à Salé et à Safi où de nombreux dommages ont été occasionnés. A Salé, ce séisme a causé le décès de 6 personnes.

La région d'Al Hoceima a été affectée par deux séismes de forte magnitude durant ces 16 dernières années :

- Le séisme d'Al Hoceima, du **26 mai 1994**, de magnitude 5,6. Ce séisme est à l'origine du décès de 2 personnes ainsi que de nombreux dommages, avec la destruction de près de 70% de constructions traditionnelles dans plusieurs villages situées au SE d'Al Hoceima. Son intensité est estimée entre VIII et IX.
- Le **24 février 2004**, le séisme a atteint une magnitude de l'ordre de 6,0, et une intensité de l'ordre de IX MSK. Ce séisme a détruit plusieurs habitations traditionnelles de villages proches d'Al Hoceima.

Figure 10 : Carte de séismes historiques majeurs du Maghreb, d'après Mrabet (2005)



Parmi les autres secousses historiques localisées au niveau du Maroc, il s'agit notamment (Mrabet, 2005) :

- des séismes localisés à proximité de Fez, 11 mai 1624 (Io=IX-X), 16 octobre 1663 (Io=VII), 12 avril 1173 (Io=VII),
- de l'essaim sismique de 1079, localisé à environ 25 km au SE de Larache, en octobre, la plus forte secousse aurait atteint une intensité IX.
- De juillet 1719, ce séisme d'intensité épiscopentrale de l'ordre de VIII à Marrakech, a aussi été fortement ressenti à Fez où il a occasionné de nombreux dommages.

D'un point de vue général, sur la base des descriptions de destructions occasionnées par les séismes, Alami et al. (1994) constatent que **des dommages modérés peuvent apparaître dès la magnitude 4,5, en particulier pour de faible profondeur focale et si les conditions locales géologiques et topographiques sont favorables aux effets d'amplification de la vibration sismique**. Ces dommages concernent plus particulièrement les constructions traditionnelles, où les règles de constructions parasismiques ne sont généralement pas appliquées.

2.1.3 Mécanismes au foyer des séismes

Les informations sur les mécanismes au foyer du Maroc sont essentiellement tirées de la base de données USGS-NEIC, et des publications de Medina (2008) et Buforn (2009).

Le long de la **ride médio-océanique**, les mécanismes au foyer des séismes montrent un mouvement extensif selon une direction E-W (Figure 11).

A l'Est de la ride médio océanique, entre 30°W et 24°W, au niveau de l'archipel des Açores (Figure 12, zone A), on observe un changement de mécanisme de déformation, encore difficilement explicable aujourd'hui : 1) du point triple à l'île Terceira, un régime de déformation décrochant, avec une direction EW de la contrainte extensive, et NS de la contrainte compressive, 2) de l'île Terceira à la faille de Gloria, un régime de déformation extensif selon une direction NE-SW.

Au centre, entre les Açores et le golfe de Cadix (24°W à 12°W, Figure 12, zone B), les mécanismes indiquent un régime décrochant, avec le jeu décrochant dextre de failles verticales principalement orientées EW. La contrainte extensive est orientée NE-SW et la contrainte compressive NW-SE.

Plus à l'est, dans le **golfe de Cadix** (Figure 12, zone C1), les mécanismes indiquent le jeu inverse de failles subéquatoriales, compatible avec une direction de compression NNW-SSE.

Au niveau du **Rif marocain et de la mer d'Alboran** (Figure 12, zone C2), il s'agit principalement de mécanismes décrochants, avec une contrainte extensive horizontale orientée approximativement ENE-WSW. Au niveau de la chaîne bétique, il s'agit d'un mécanisme décrochant à inverse. Dans l'un ou l'autre cas, la direction de la contrainte principale horizontale reste NNW-SSE.

Dans le nord du Maroc, les mécanismes au foyer disponibles suggèrent donc la prédominance : d'un axe P (pression) horizontal et de direction NNW-SSE ; d'un axe T (tension) horizontal de direction WSW-ENE.

Au niveau du **Tell algérien** (Figure 12, zone C3), le mécanisme de déformation redevient inverse, avec une contrainte horizontale majeure NNW-SSE.

Figure 11 : Mécanismes au foyer des séismes (Magnitude > 6, et Profondeur focale < 50km), d'après le catalogue USGS NEIC, in McClusky et al. (2003)

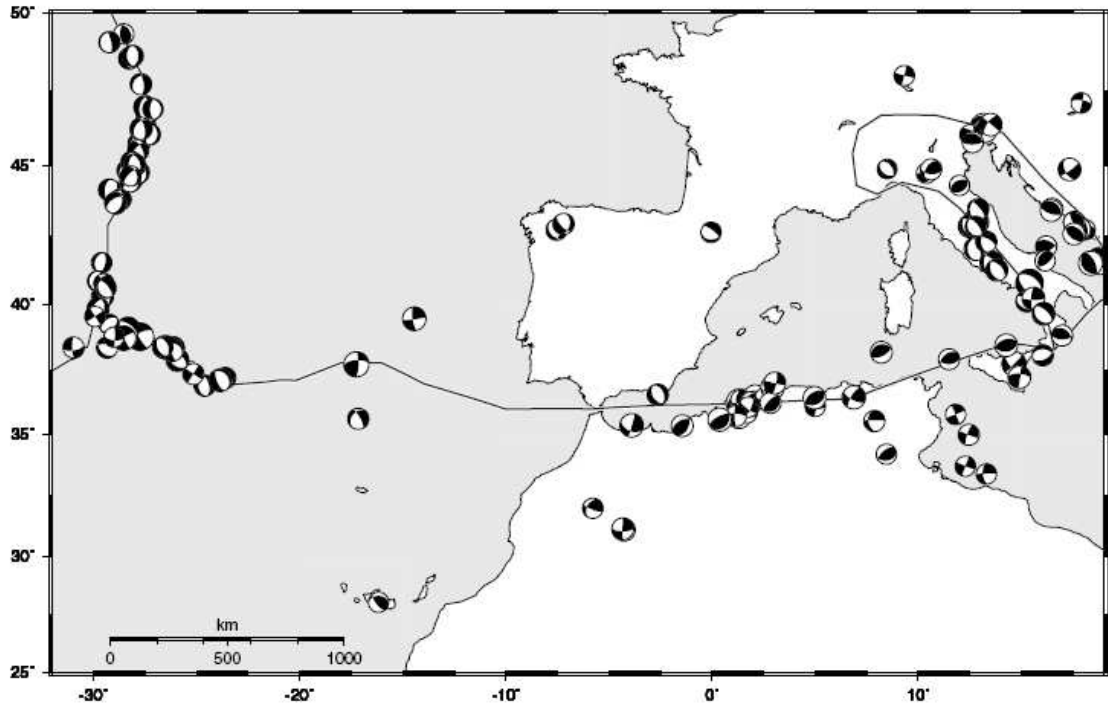
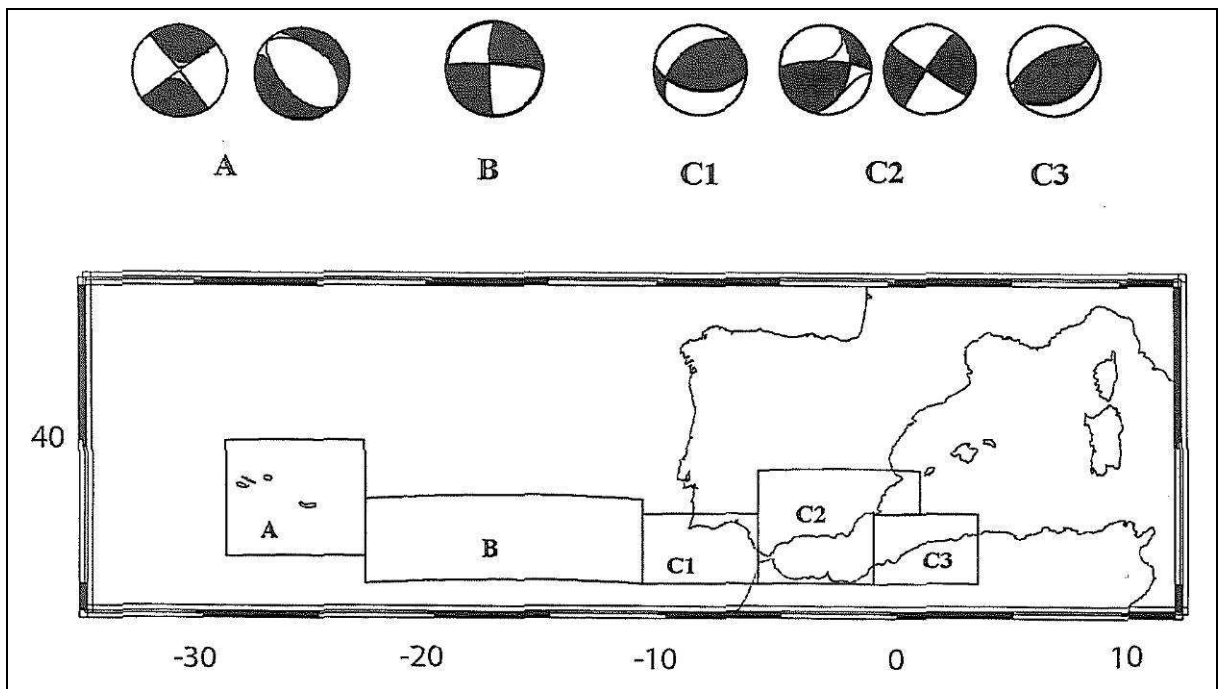


Figure 12 : Moyenne des tenseurs sismiques calculée dans différentes parties de la zone de convergence Afrique Europe depuis les Açores au Tell algérien (Buforn, 2009)



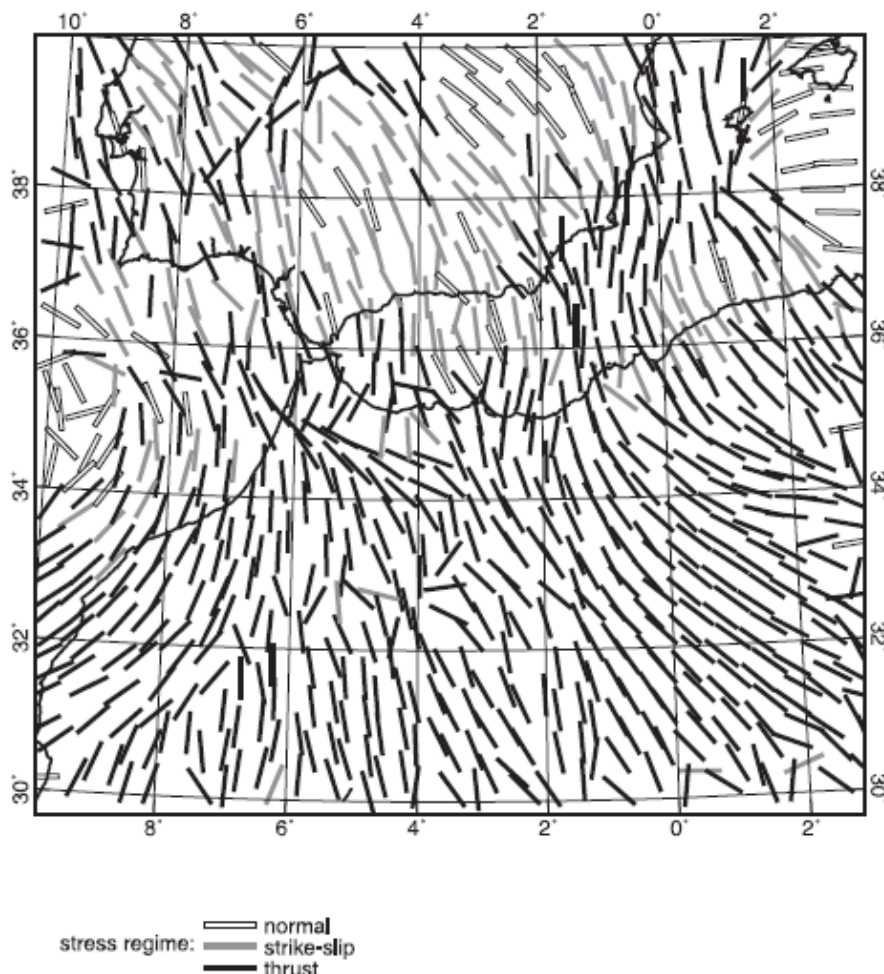
A : zone des Açores ; B : zone centrale de la faille de Gloria au golfe de Cadix ; C1 : golfe de Cadix ; C2 : mer d'Alboran, SE ibérique, rif marocain ; C3 : Tell algérien.

2.1.4 Vitesse de mouvement des plaques et taux de déformation

A partir notamment de la connaissance de l'état de contraintes actuel, du taux de déformation moyen, de la cartographie, géométrie et type de mouvement des principales failles, et des informations sur la rhéologie de la croûte, Negredo et al. (2002) proposent une **modélisation de la déformation de la zone sud-ibérique à marocaine** avec localisation des zones de concentration de contraintes (Figure 13) et l'estimation des vitesses de mouvement des principales failles actuellement actives. De façon générale, les auteurs trouvent une augmentation de la vitesse de mouvement de l'Est vers l'Ouest. Cette augmentation est particulièrement significative depuis le bassin algérien vers l'arc de Gibraltar. Au niveau des failles inverses nord algériennes, la vitesse de glissement calculée est de l'ordre de 3,5 à 5 mm/an, ce qui est en cohérence avec le niveau d'activité sismique élevé de cette zone.

Plus à l'Ouest, la vitesse de mouvement est distribuée de façon plus homogène entre le sud de l'Espagne, la mer d'Alboran et le nord du Maroc, ce qui s'accorde avec l'interprétation d'une limite des plaques Afrique-Europe diffuse dans cette partie de la zone de convergence. Un mouvement latéral du bassin Alboran et des chaînes bétique et rifaine de direction WNW-ESE par rapport à la plaque Europe, et de l'ordre de 3mm/an, est par ailleurs souligné.

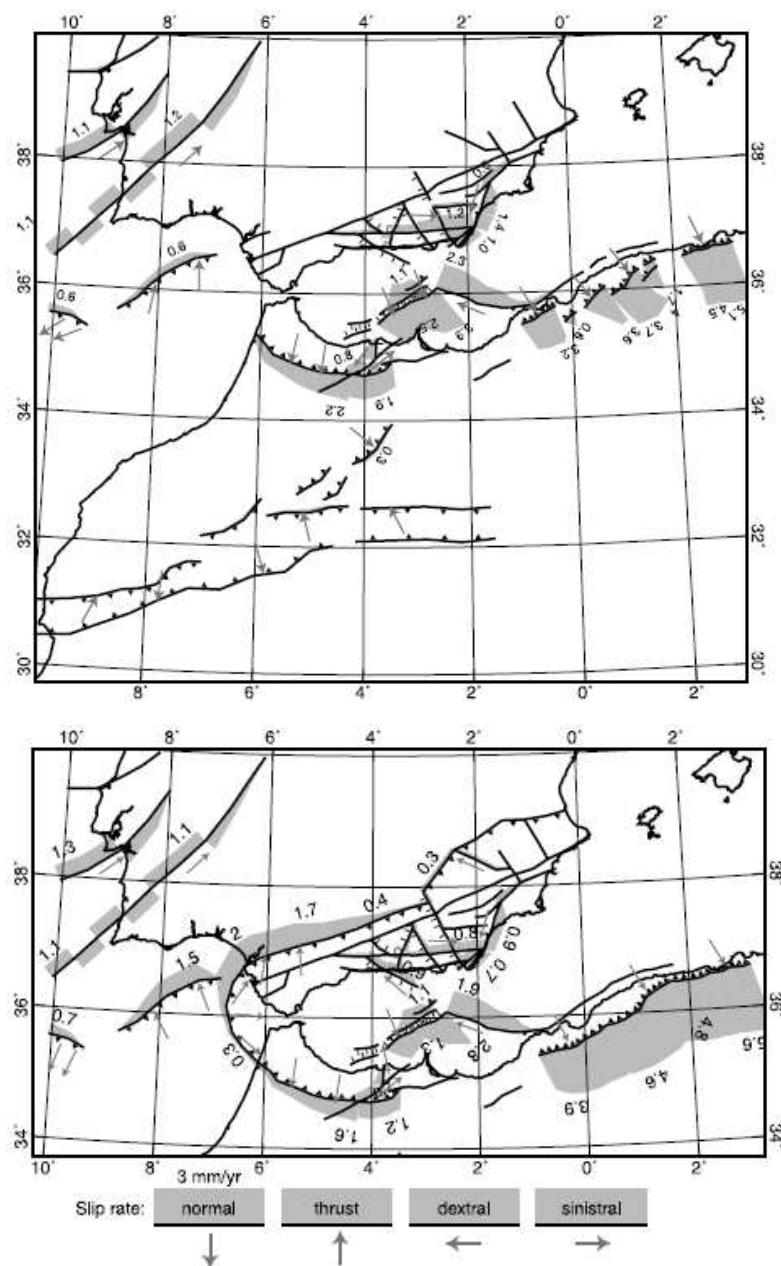
Figure 13 : Orientation de la contrainte horizontale majeure et régime de contraintes calculées par Negredo et al. (2002) au niveau de la zone de convergence actuelle des plaques Afrique et Europe, entre le Maroc, le sud de l'Espagne et l'Algérie



Le modèle indique un changement de régime de contraintes entre la région nord algérienne soumise à un régime compressif, et les chaînes bétique/Rif et mer d'Alboran, soumise à un régime décrochant-normal (Figure 13). Il montre aussi une concentration des contraintes le long des failles NNE-SSW de Cadix-Alicante et de Nekor, favorable à un rejeu de ces accidents décrochants senestres avec une vitesse moyenne évaluée entre 1 et 2 mm/an (Figure 14).

D'après les résultats de Negredo et al. (2002), **la meseta marocaine centrale reste par contre éloignée des zones les plus actives**. L'essentiel de la déformation est absorbée à l'est par les chaînes du Tell, et à l'Ouest au niveau des chaînes bétique, du Rif et mer d'Alboran.

Figure 14 : Résultat de calculs des vitesses de glissement des principales failles actives, suivant 2 modèles structuraux (dans le 2nd modèle, les chaînes bétique et rifaine sont supposées constituer un arc orogénique unique), d'après Negredo et al (2002)



(En légende : l'épaisseur de la zone grisée le long du trait de faille est proportionnelle à la vitesse calculée, en exemple épaisseur pour 3 mm/an)

Plus récemment, sur la base des catalogues de sismicité et des mécanismes au foyer, Borges (2003), Buforn et al. (2004) et Buforn (2009) donnent des indications sur une **vitesse moyenne de mouvement en limite de plaques Europe – Afrique** depuis le point triple des Açores jusqu'à la marge algérienne. Selon Buforn (2009), les estimations sont les suivantes (voir la Figure 12 pour la localisation des zones) :

- zone des Açores (A), vitesse moyenne 7,2 mm/an ;
- zone centrale de la faille de Gloria au golfe de Cadix (B), la vitesse moyenne estimée est de l'ordre de 20 mm/an, en comparaison avec les autres zones citées, il s'agit de la partie la plus active de cette frontière de plaque ;
- golfe de Cadix (C1), vitesse moyenne 5,5 mm/an ;
- mer d'Alboran, SE ibérique, rif marocain (C2), vitesse moyenne 1,4 mm/an ;
- Tell algérien (C3), vitesse moyenne 3,7 mm/an.

Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux de Negredo et al. (2002).

2.1.5 Synthèse sismotectonique et situation des sites du Bouregreg et de Casablanca par rapport aux structures actives majeures

Des Açores à l'ouest du golfe de Cadix, la répartition des épacentres de séismes délimite clairement la limite de plaque Europe–Afrique. Les foyers de séismes sont superficiels (généralement inférieurs à 40 km).

Le long de la ride médio-océanique de l'Atlantique, le champs de contrainte indique un régime de déformation extensif selon une direction E-W, conforme au jeu normal de failles subméridiennes (Figure 15).

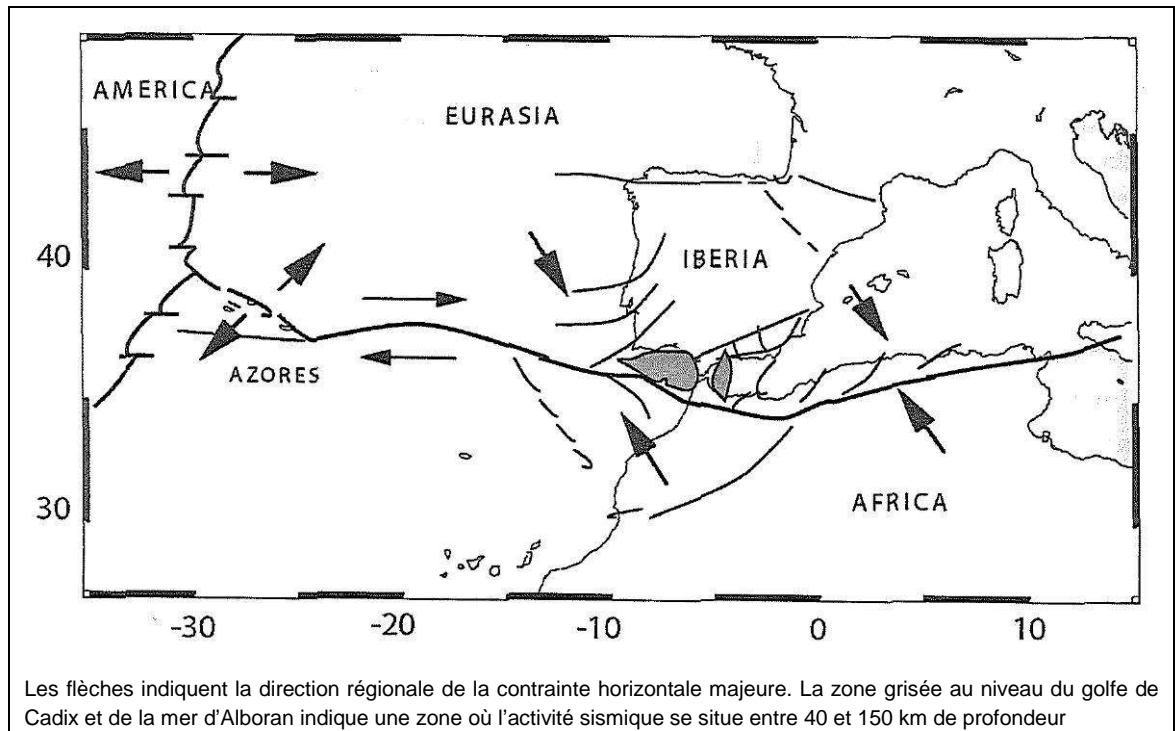
Ce régime change au niveau de la faille de Gloria. Il s'agit alors d'un régime décrochant-distensif. Les failles subéquatoriales jouent selon un mouvement décrochant dextre à normal. Il s'agit de la partie la plus active de la limite de plaque Europe –Afrique localisée entre le point triple des Açores et le Tell Algérien, la vitesse moyenne y est estimée à 20 mm/an (au lieu de 5,5 à 7,2 mm/an pour les zones situées de part et d'autre). La magnitude des séismes peut dépasser 8.

Du Golfe de Cadix à l'Ouest de la mer d'Alboran, la répartition des séismes devient par contre plus diffuse, elle correspond à une limite de plaques de géométrie beaucoup plus complexe. Les profondeurs focales des séismes concernent toute l'épaisseur de la croûte. Une activité sismique est enregistrée jusqu'à plusieurs centaines de km de profondeur (600 à 700 km) indiquant une structuration très complexe de la limite entre les deux plaques à cet endroit. La direction de compression horizontale est NNW-SSE. Le régime est de type décrochant, les failles EW jouent selon un mouvement dextre, les failles NE-SW selon un mouvement inverse à senestre. C'est dans cette zone que se sont produits les très forts séismes de 1755 et 1969.

Au niveau de la mer d'Alboran et du rif nord marocain, la contrainte compressive horizontale reste orientée NNW-SSE, mais le régime de déformation est de type décrochant distensif. Les failles NE-SW ou NW-SE jouent en décrochement respectivement senestre ou dextre. Le taux de déformation y est peu élevé, 1,7 mm/an selon Buforn (2009). Il s'agit d'une zone d'activité sismique plus modérée que celles du golfe de Cadix ou du Tell algérien. Néanmoins selon Buforn (2009), les séismes d'Al Hoceima de 1994 et de 2004 pourraient indiquer l'émergence d'une période plus active.

Au niveau du Tell algérien, il s'agit d'un régime compressif, avec une contrainte principale orientée NNW-SSE, donnant lieu au jeu inverse de failles orientées EW à ENE-WSW.

Figure 15 : Cadre schématique de la tectonique actuelle entre les Açores et la Tunisie (d'après Buforn, 2009)

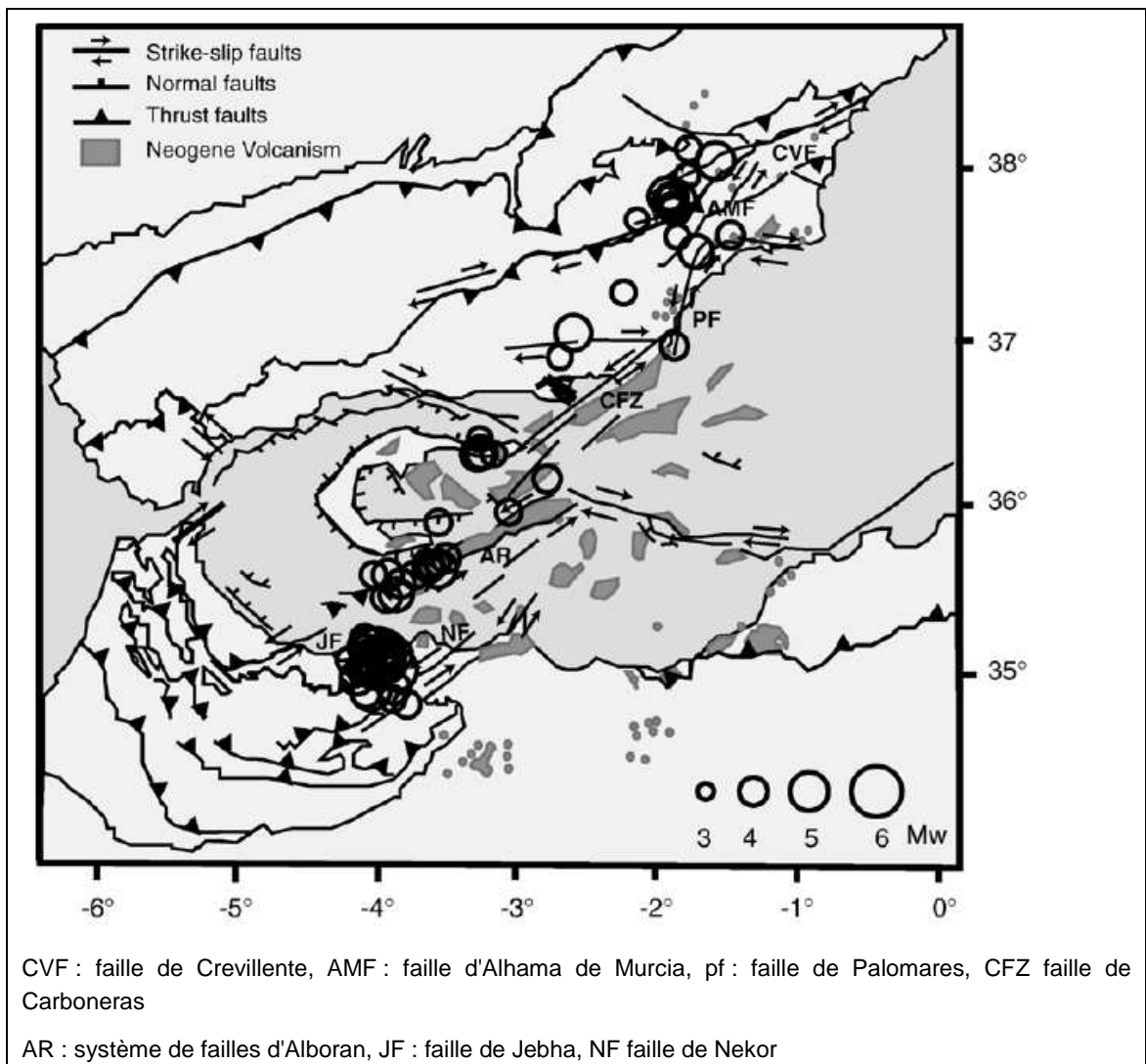


La sismicité du nord du Maroc traduit les manifestations de la convergence des deux plaques. Jusqu'au Pliocène, elle s'exprimait par des chevauchements et le développement des cordillères du Rif et Bétique. Aujourd'hui, la mer d'Alboran est le siège de mouvement distensif, ce qui induit le jeu décrochant senestre d'accidents NE-SW tel que le système de failles de Nekor, au niveau du nord du Maroc.

Les failles de Nekor et de Jebda appartiennent à un accident crustal majeur, lequel se prolonge au sud-ouest, sous la chaîne du moyen Atlas jusqu'à Agadir (Ben Sari, 1988), et au nord-est, à travers la mer d'Alboran et la marge SE espagnole (Stich et al, 2006)

En s'appuyant sur les données paléomagnétiques, mais aussi sur la répartition de la sismicité, Ben Sari (1988) suppose que cet accident majeur délimiterait un bloc structural, bloc de la Meseta, indépendant de la chaîne atlasique située au sud et à l'est, et de celle du Rif au nord.

Figure 16 : Structure de la TASZ (Trans Alboran Shear Zone) depuis le sud de l'Espagne au nord du Maroc, d'après Stich et al. (2006)



Stich et al. (2006) poursuivent l'interprétation structurale relative à la partie nord du système. Selon eux, la tectonique décrochante à extensive ainsi que la structuration actuelle de la mer d'Alboran serait étroitement liée au système de failles trans-alboran (ou TASZ, Trans-Alboran Shear Zone). Celui-ci présente une direction moyenne N50°E, un mouvement principal décrochant senestre, et une structuration en échelon de failles, localisées depuis le sud-est de l'Espagne jusqu'au nord du Maroc avec les failles de Jebha et de Nekor. La sismicité régionale montre, dans cette partie de la zone de convergence, une répartition relativement concentrée des épacentres dans une bande d'environ 100 km de large sur 500 km de longueur, qui correspond à la TASZ. Les mécanismes au foyer calculés dans cette zone de failles sont principalement à mouvement décrochant, mais parfois normaux. Au niveau de la marge marocaine, ce système de failles est notamment à l'origine des séismes de Mw 6.0 de 1994 et Mw 6.3 de 2004.

Sous la mer d'Alboran et le sud de l'Espagne, une sismicité intermédiaire, entre 40 et 120 km de profondeur est localisée. Elle indique une zone de fragilité plus importante (rhéologie de type cassant) dans cette partie du manteau supérieur. A cet endroit l'épaisseur de la croûte est

entre 12 et 15 km. Il s'agit d'une croûte très amincie, sachant qu'au niveau de la plaque ibérienne et du Maroc, l'épaisseur de la croûte est de l'ordre de 30 à 35 km.

La région Alboran-Bétique-Gibraltar paraît limitée à l'Est par la TASZ où les observations néotectoniques et la sismicité indiquent des mouvements senestres à normaux, contrastant avec les déformations compressives du nord algérien et du sud-ouest de l'Ibérie.

La TASZ se poursuit très probablement vers le SW au niveau du moyen Atlas. Mais la composante du mouvement redevient alors senestre à inverse, le raccourcissement observé dans le moyen et Haut Atlas étant de l'ordre de 1 à 2 mm/an. A l'Ouest de la TASZ, le mouvement senestre est limité par un changement de la structure crustale et de la rhéologie. La TASZ présenterait un mouvement senestre, avec un taux de 1 à 2 mm/an depuis le Miocène moyen.

Les sites du Bouregreg et de Casablanca, situés dans la meseta côtière marocaine, se trouvent éloignés des structures actives du Maroc (zone de chevauchements du Rif, zone du Moyen Atlas et le système de failles décrochantes transalboran, zone de chevauchements intraplaques du haut Atlas), de la mer d'Alboran et du golfe de Cadix. Les deux sites peuvent néanmoins être exposés aux fortes secousses sismiques qui pourraient avoir lieu dans ces zones actives.

2.2 Évaluation de l'aléa sismique régional

2.2.1 Notions sur l'évaluation de l'aléa sismique

On peut caractériser la "taille" du tremblement de terre par différents paramètres comme :

- 1) **La magnitude M** : c'est une évaluation de l'énergie libérée au foyer du tremblement de terre. Comme telle, cette quantité n'est pas utilisable par l'ingénieur des constructions qui s'intéresse à un mouvement en surface et dans une zone géographique donnée.
- 2) **L'intensité I** : elle caractérise l'importance des effets matériels observés en surface et la perception par la population. Cette description vaut pour une zone géographique donnée, mais est assez qualitative. L'intensité en un point dépend non seulement de la taille du séisme (magnitude) mais aussi de la distance au foyer, de la géologie locale et de la topographie.
- 3) **L'accélération maximale a_g** du sol ou accélération de pointe, PGA (Peak Ground Acceleration) en anglais : elle permet de se faire une idée de la résultante de force F appliquée à la construction. Pour une construction de masse m : $F = m a_g$ si la construction est indéformable et bouge comme le sol. Son ordre de grandeur est de 0,4 g à 0,6 g en zone très sismique (Japon, Turquie) et de 0 à 0,1g en zone faiblement sismique. C'est en termes d'accélération maximale, a_g , au niveau du bedrock qu'on exprime les cartes de zonation ou zonage sismique quantifiant le niveau sismique à prendre en compte pour l'application des règles de constructions parasismiques.

L'aléa sismique est défini comme la probabilité, en une région et une période de temps données, qu'une secousse sismique atteigne ou dépasse une certaine magnitude, intensité ou accélération du sol. L'évaluation de l'aléa se fait à **deux échelles d'étude** successives :

- une échelle régionale, où le milieu est considéré comme géologiquement homogène
- une échelle locale, où sont pris en compte les effets de site (lithologiques et topographiques), les effets induits (stabilité des pentes, liquéfaction des sols) et éventuellement les déformations cosismiques.

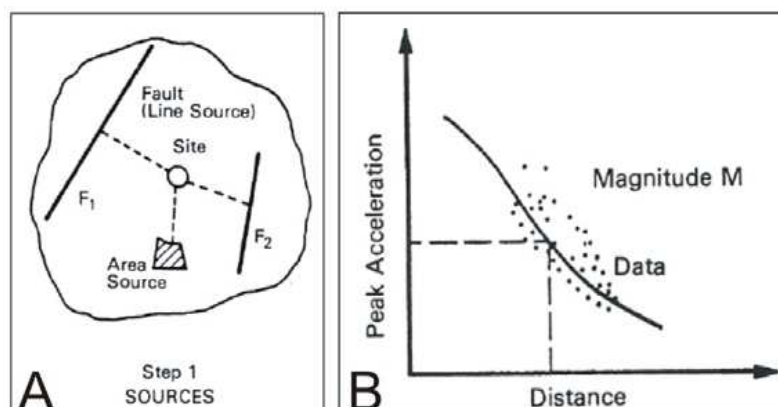
Il existe deux approches principales pour l'évaluation du mouvement sismique de référence d'une région. Chacune d'elles repose sur une analyse de la sismicité et sur des études sismotectoniques et géologiques. Elles diffèrent par le mode d'exploitation de ces données et la représentation des résultats.

L'approche déterministe met l'accent sur une analyse détaillée des différentes sources sismiques régionales, sur les contraintes régissant la déformation et sur une étude la plus complète possible de la sismicité historique. *In fine*, elle associe à chaque unité sismique, une « valeur maximale raisonnable ». Celle-ci correspond à un séisme dit de référence, caractérisé par des paramètres spécifiques (profondeur focale, magnitude, mécanisme à la source).

Classiquement, dans une démarche déterministe, chaque zone sismotectonique est caractérisée par une intensité épacentrale maximale connue dans la zone (SMHV ou séisme maximal historiquement vraisemblable) et ce indépendamment de sa période de retour. Puis généralement, il est défini un séisme majoré de sécurité (SMS), pour lequel 0,5 degré de magnitude est ajouté à la magnitude du SMHV, sous réserve que cette majoration reste compatible avec les données géologiques et sismiques. L'ajout de 0,5 degré de magnitude permet de mieux tenir compte des incertitudes sur les données sismiques (on ne dispose que de quelques décennies d'enregistrement pour la sismicité instrumentale, et quelques siècles d'archives pour la sismicité historique) et géologiques.

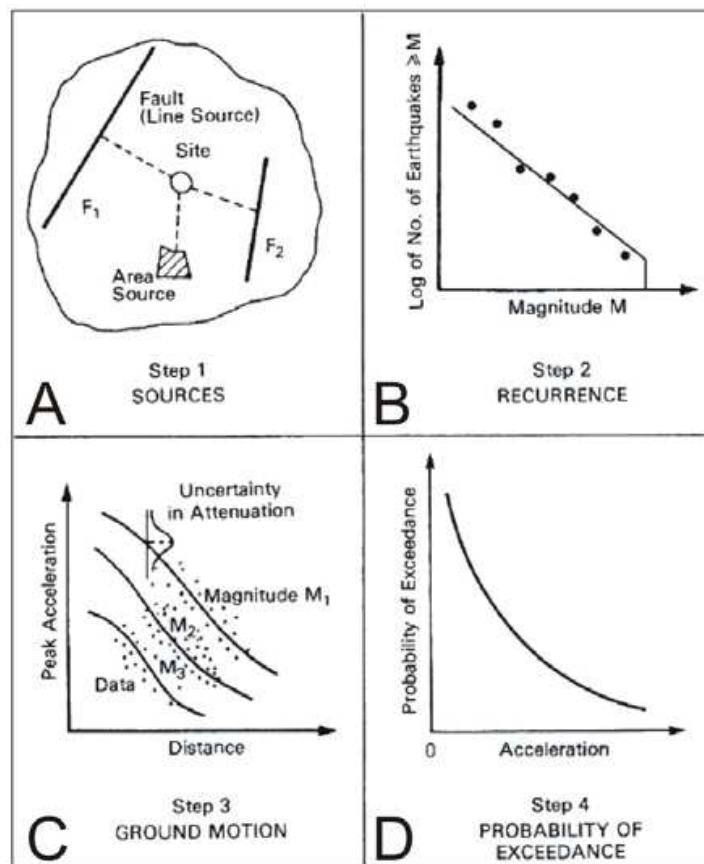
A partir du séisme de référence et des modèles empiriques de mouvement du sol, les pics d'accélération attendus sont calculés en chaque point en fonction de la distance aux différentes sources sismiques et des lois d'atténuation).

Figure 17 : Principe de l'approche déterministe (d'après Reiter, 1990) : A) prise en compte d'un séisme de référence défini pour la région, B) calcul en chaque point, des pics d'accélération attendus en fonction de la distance à cette source et des lois d'atténuation



L'approche probabiliste nécessite une connaissance des différentes sources régionales et d'un catalogue de sismicité le plus complet possible à l'échelle de la région. On s'affranchit de la dépendance à un seul évènement (séisme de référence de l'approche déterministe). Par contre, il est tenu compte de la fréquence d'occurrence des évènements en fonction de la magnitude. Les modèles probabilistes permettent de combiner l'influence de toutes les sources répertoriées pour calculer les mouvements du sol. *In fine*, une évaluation probabiliste de l'aléa exprime en tout point de la région étudiée, le niveau d'accélération du sol susceptible d'être atteint (m/s²) pour une période de temps donnée).

Figure 18 : Principe de l'approche probabiliste (d'après Reiter, 1990) :



A) identification des différentes sources sismiques

B) analyse du catalogue de sismicité (fréquence, magnitude)

C) combinaison des différentes sources

D) calcul de la probabilité de dépasser la valeur du pic d'accélération

L'évaluation probabiliste de l'aléa sismique régional du Maroc a fait l'objet de plusieurs publications. Les principaux résultats sur le Maroc sont indiqués dans la suite du présent chapitre.

2.2.2 Thèse de M.T-E Cherkaoui Maknassi (1991) sur la « Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc »

Publiés en 1991, les résultats du travail de recherche de Cherkaoui Maknassi concernent notamment : la réalisation d'un fichier de sismicité informatisé homogénéisé pour la période du XXème siècle complété par des informations sur les événements historiques connus localisés au Maroc ou dans les régions limitrophes, l'identification et caractérisation des zones sources sismiques du Maroc, l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique du nord et nord-ouest du Maroc. Ce travail constitue toujours une référence quant à la prise en compte du risque sismique au Maroc.

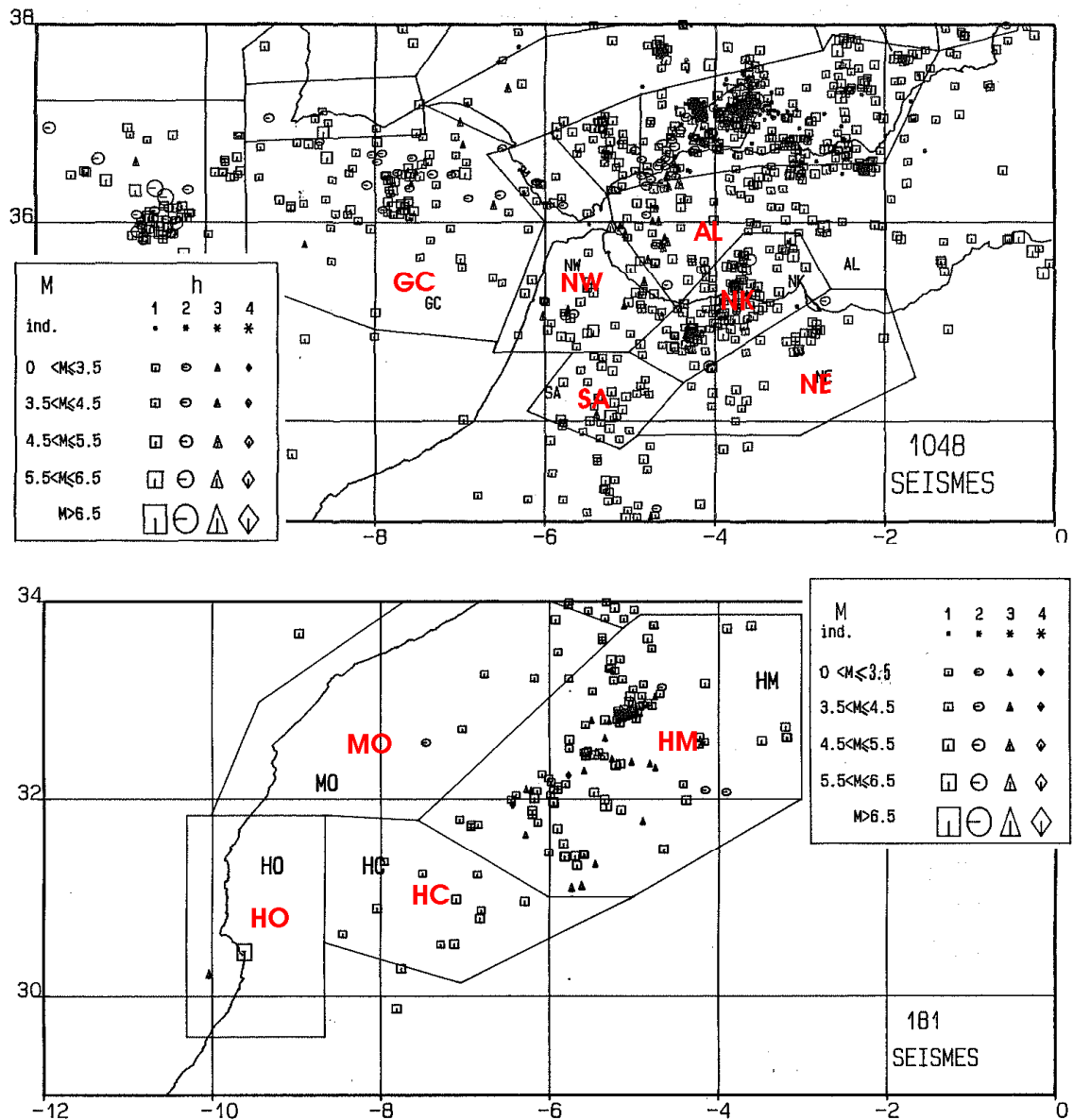
2.2.2.1 Zonage sismique :

Sur la base d'une analyse des données sismiques et de la géologie, les différentes zones sources retenues par Cherckoui Maknassi (1991) sont (Figure 19) :

- NW (Nord-Ouest), ou Rif occidental,
- NK, système de failles de Nekor
- NE (Nord-Est), ou Rif Oriental
- GC, Golfe de Cadix
- AL, mer d'Alboran
- SA, plaine de Saïss, il s'agit du bassin de Saïss-Fès dans le moyen Atlas et des rides prérfaines,
- HM, Haut Atlas central, Haut Atlas oriental, et Moyen Atlas,
- MA, Massif ancien du haut Atlas,
- MO, Meseta occidentale.

Concernant la zone MO, Meseta occidentale, il s'agit de celle où se trouvent les sites du Bouregreg et de Casablanca. Pour cette zone sismique, Cherkoui Maknassi (1991) indique : **« Les rares épicentres localisés dans cette zone, (...), ne présentent aucun danger sismique ni pour la zone elle même ni pour les zones avoisinantes. Elle n'est pas considérée donc comme une source sismique, et nous ne tenons pas compte de cette zone dans le calcul de l'aléa sismique. »**

Figure 19 : Zonage sismique et épicentres de séismes instrumentaux (partie nord, période 1923-1986 ; partie sud : période 1960-1986), réalisé par Cherkoui Maknassi (1991)



2.2.2.2 Relation Magnitude (M) et intensité épicentrale (I₀) :

Sur la base des données sismiques instrumentales et historiques, Cherkoui Maknassi (1991) propose une relation entre la magnitude et l'intensité épicentrale spécifique au contexte marocain.

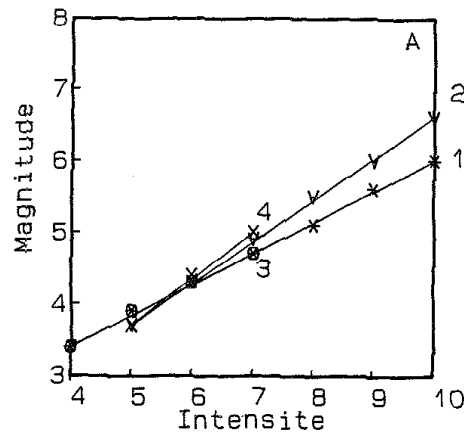
1) pour I₀ compris entre IV et V :

$$M = 0,430 I_0 + 1,706 (\pm 0,652)$$

2) relation applicable pour I₀ supérieure ou égale à V et inférieure à X :

$$M = 0,578 I_0 + 0,849 (\pm 0,646)$$

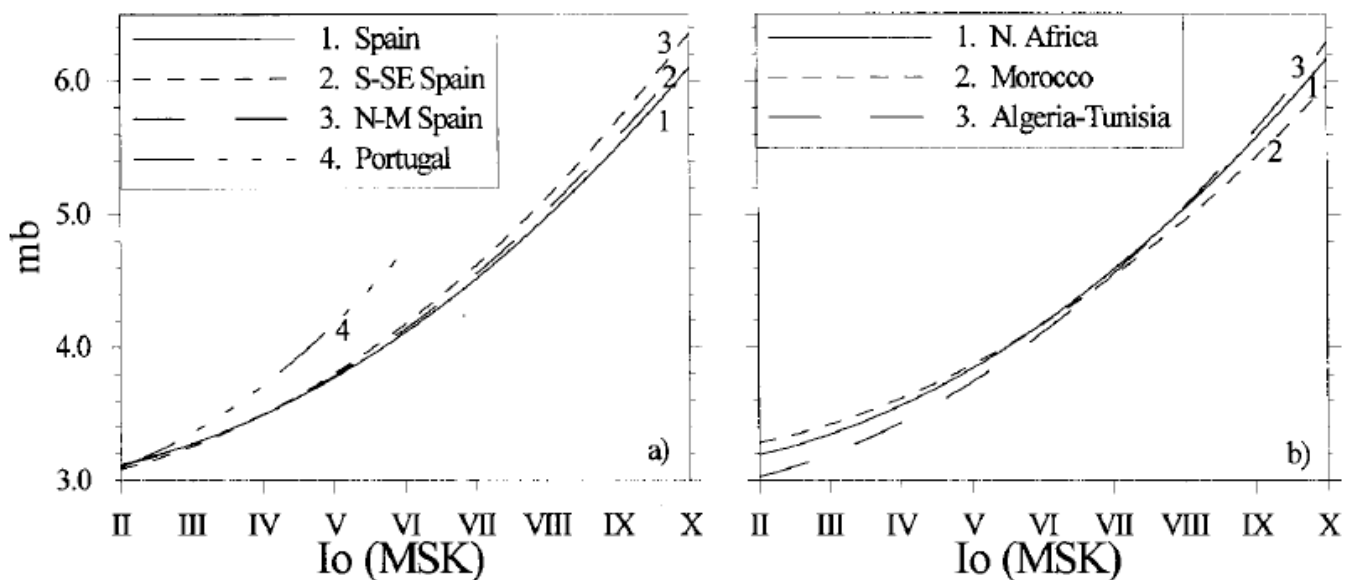
Figure 20 : Droites de correspondances entre la magnitude et l'intensité épacentrale selon les relations calculées par Cherkaoui Maknassi (1991)



Par ailleurs, deux autres relations (notées 3 et 4 sont testées en écartant le séisme d'Agadir (d'intensité épacentrale, $I_0 = X$). les résultats restent relativement proche des deux premières relations (Figure 20).

Par comparaison avec les relations calculées pour la région Ibéro-Maghrébine par Lopez Casado et al. (2000), on notera que la conversion intensité magnitude macrosismique donne des résultats sensiblement équivalents à ceux de Cherkaoui Maknassi (1991) en ce qui concerne le Maroc.

Figure 21 : Correspondance entre la magnitude et l'intensité épacentrale selon les relations calculées par Lopez Casado et al. (2000)



2.2.2.3 Carte de valeurs d'intensité susceptibles d'être ressenties dans le nord du Maroc

A partir notamment du catalogue de séismes réalisé, des relations de conversion magnitude-intensité, de lois d'atténuation calculées et du logiciel modifié EQRISK, Cherkaoui Maknassi (1991) calcule des cartes d'intensité sismique susceptibles d'être dépassées une fois (Figure 22 et Figure 23) :

- tous les cent ans, intensité centennale, ou probabilité annuelle de 0,01,
- tous les deux cents ans, intensité centennale, ou probabilité annuelle de 0,005.

Au niveau de la Meseta occidentale (Figure 22 et Figure 23) :

- la carte des intensités centennales indique des valeurs d'intensité comprises entre 5,5 (V-VI) et 6 (VI),
- la carte des intensités bi-centennales indique des valeurs d'intensité proches de 6,5 (VI-VII).

Figure 22 : Carte de l'aléa sismique, intensités centennales, d'après Cherkaoui Maknassi (1991)

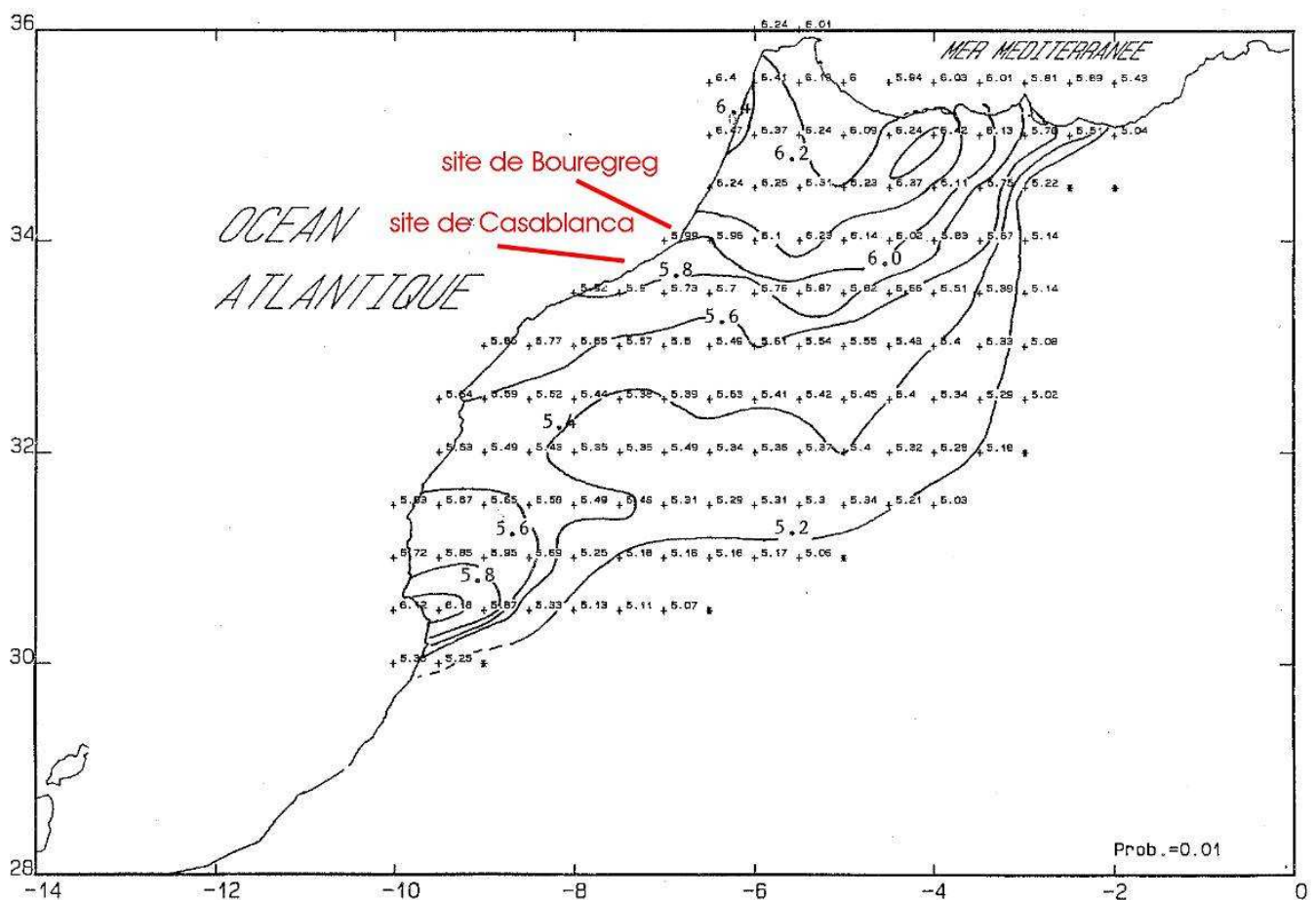
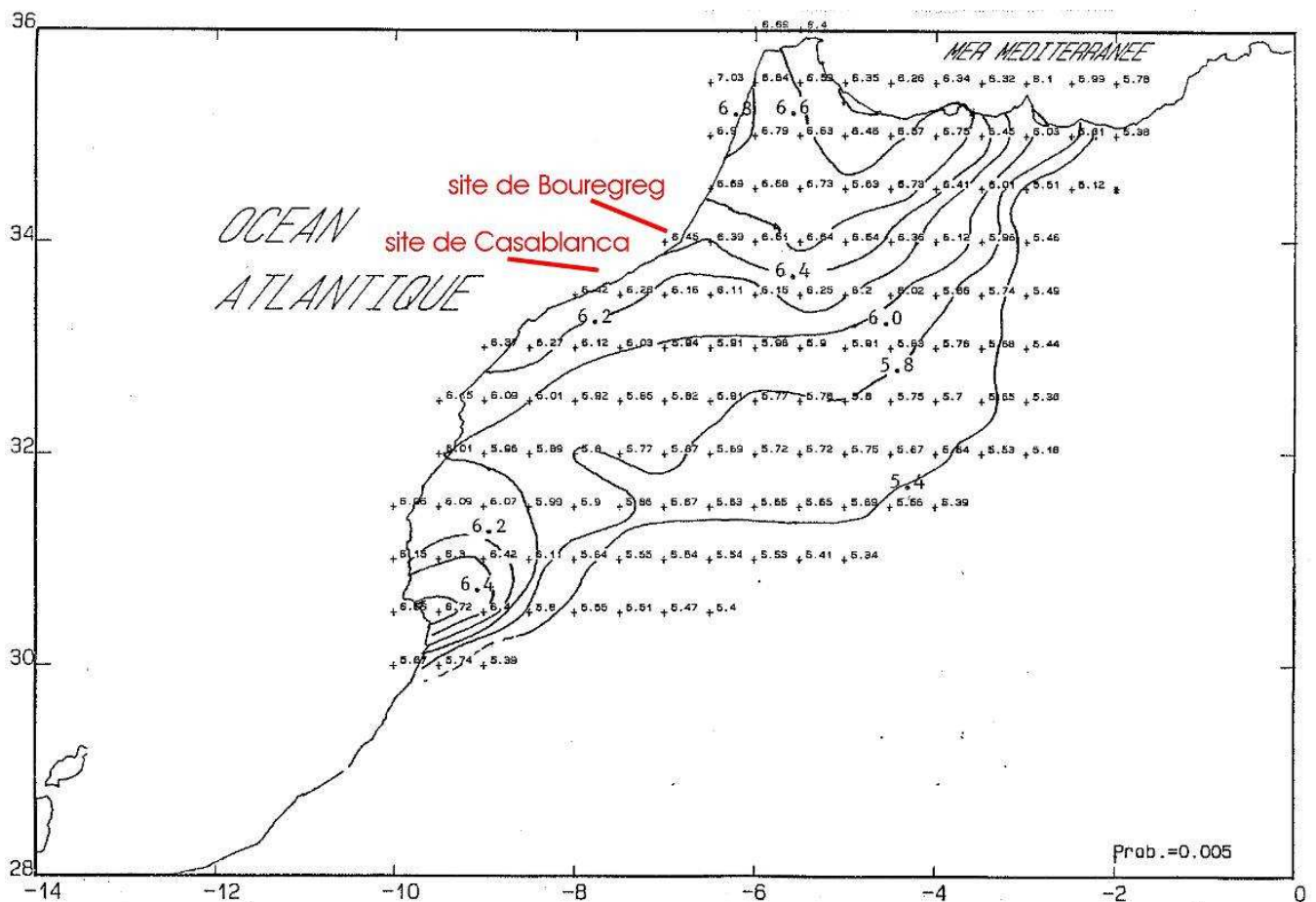


Figure 23 : Carte de l'aléa sismique, intensités bicentennales, d'après Cherkaoui Maknassi (1991)



2.2.3 GSHAP, Global Seismic Hazard Assessment Program

Le projet GSHAP, Global Seismic Hazard Assessment Program, a démarré en 1992 et s'est achevé en 1999. Il a été soutenu par l'ICSU, International Council of Scientific Unions et réalisé dans le cadre des travaux de UN/IDNDR, United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction.

Les résultats de GSHAP concernent plusieurs projets internationaux qui ont permis l'établissement d'une **carte mondiale d'aléa sismique**. Ils sont accessibles à l'adresse suivante : <http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/>. La carte d'aléa sismique mondiale indique l'accélération maximale (PGA en m/s^2) susceptible d'être atteinte durant une période de 475 ans (ou 10% de chances de survenir en 50 ans), Figure 24.

Au niveau des sites du Bouregreg et de Casablanca, c'est-à-dire de la Meseta côtière marocaine, les résultats de GHASP indiquent une **valeur de PGA comprise entre 0,4 et 0,8 m/s^2 pour une période de retour de 475 ans** (soit une valeur de PGA avec 90% de probabilité de ne pas être dépassée dans les 50 ans à venir).

Figure 24 : Zonation sismique mondiale en accélération maximale (PGA) en m/s^2 , résultat du programme GSHAP (1999)

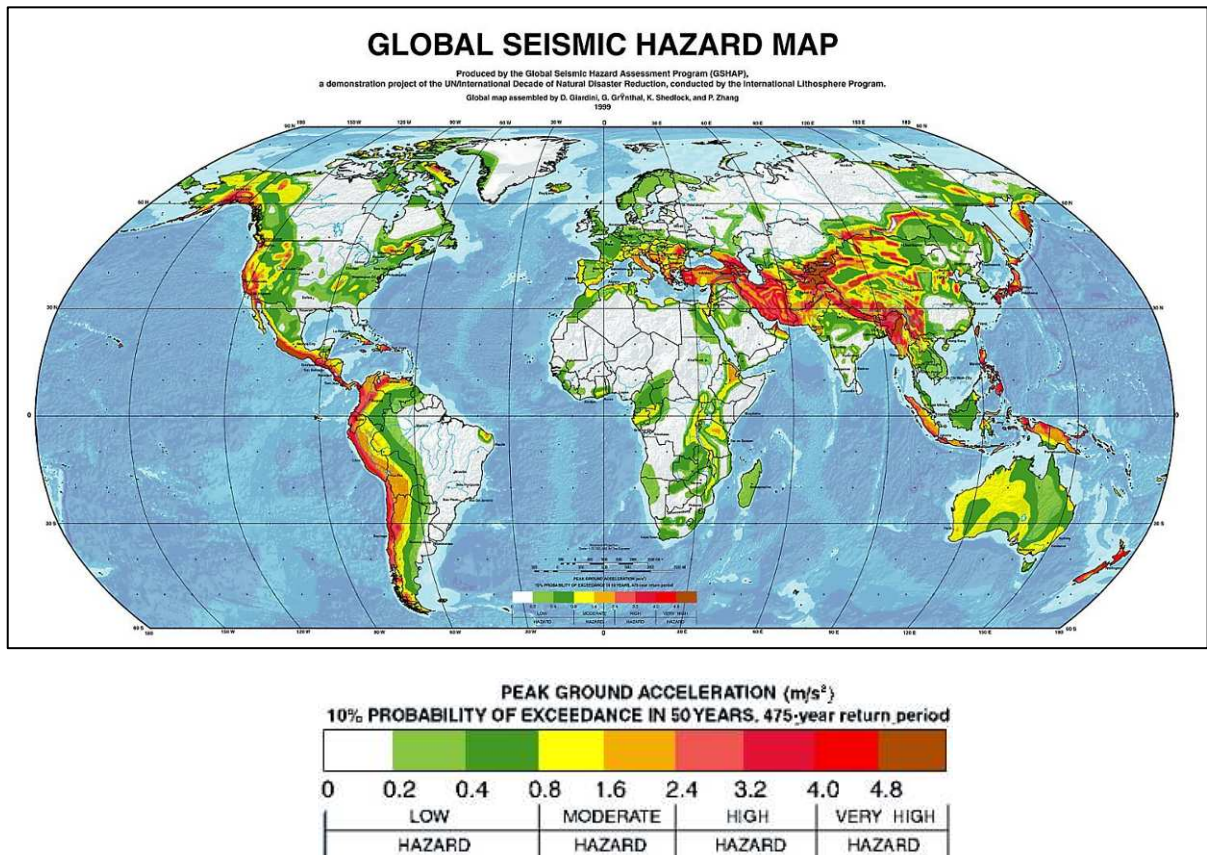


Figure 25 : Carte d'aléa sismique pour la région Ibéro-Maghreb, valeur du PGA en m/s^2 avec 10% de chance de survenance en 50 ans, résultat de GHSAP (extrait de Jimenez et al., 1999)

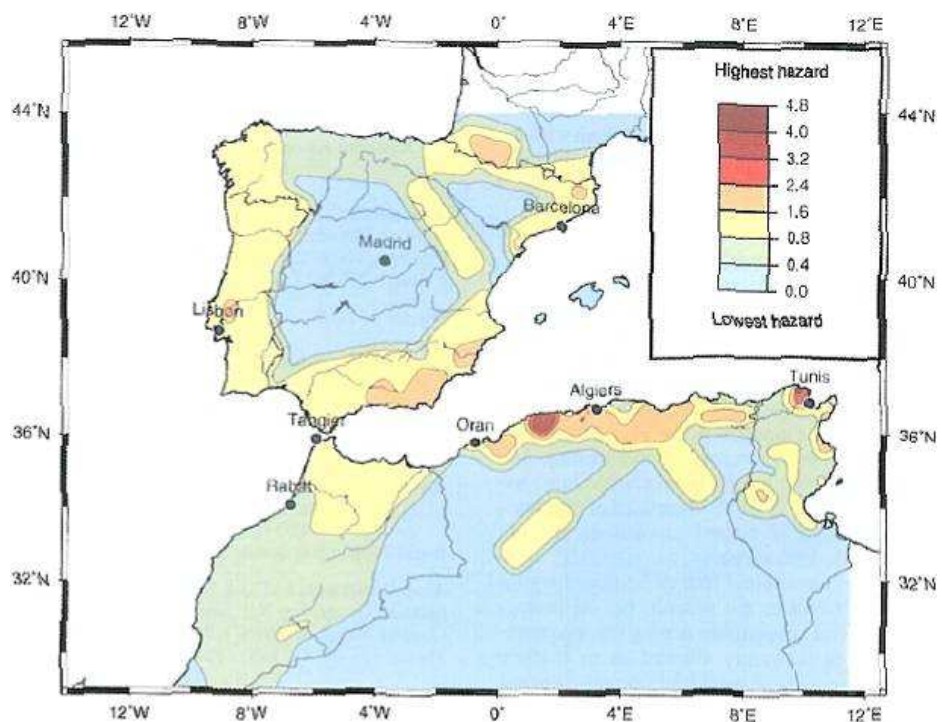
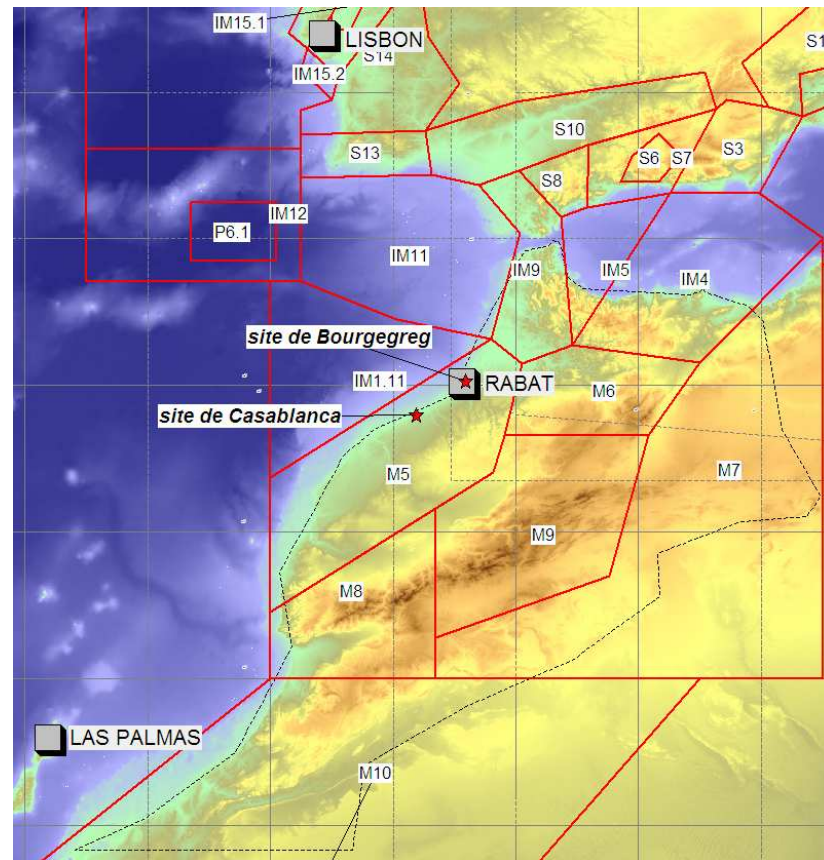


Figure 26 : Zonage sismique du Maroc retenu dans le cadre de GSHAP (extrait de Jimenez et al, 1999)



2.2.4 Projet SESAME

A la suite de GSHAP, la réalisation d'un zonage sismotectonique et de l'aléa sismique unifié des pays du bassin méditerranéen était l'objectif de l'IUGS-UNESCO IGCP-382 project "Seismotectonics and Seismic Hazard Assessment of the Mediterranean Basin" (SESAME) et de European Seismological Commission Working Group on Seismic Hazard Assessment.

Concernant les unités sismiques du Maroc, **les contours restent très proches de ceux proposés par GSHAP ainsi que les valeurs de PGA calculées**, avec des valeurs entre 0,04g et 0,06g (ou 0,4 à 0,6 m/s²) **pour une période de retour de 475 ans (Figure 28)**.

A la différence des résultats du programme GSHAP, les caractéristiques sismiques des zones (magnitude maximale, b, taux de sismicité, etc.) ne sont pas publiées (Jimenez et al., 2001 ; <http://wija.ija.csic.es/gt/earthquakes/>). Il n'est donc pas possible d'évaluer les magnitudes de séismes en fonction d'une période de retour donnée (contrairement à GSHAP, cf. **Figure 26**).

Figure 27 : Le zonage proposé dans le cadre du projet SESAME, différences des contours avec ceux proposés dans le cadre du projet GSHAP (zone en aplat vert), d'après Jimenez et al. (2001)

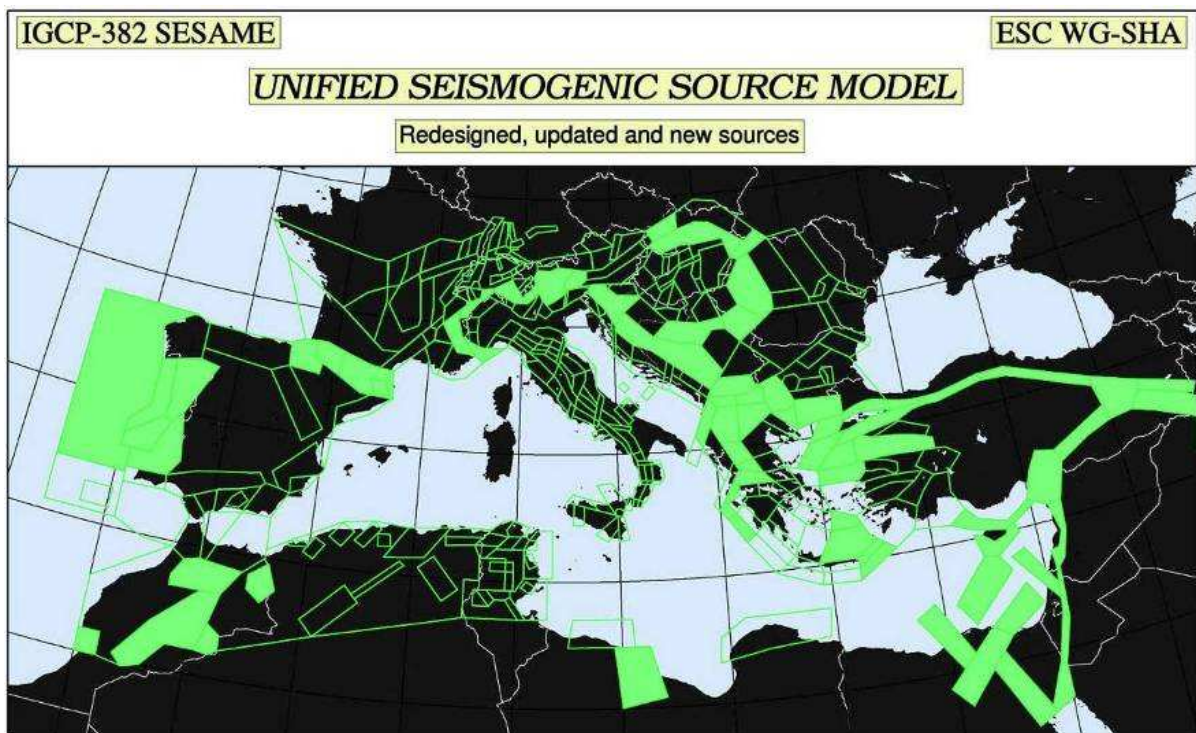
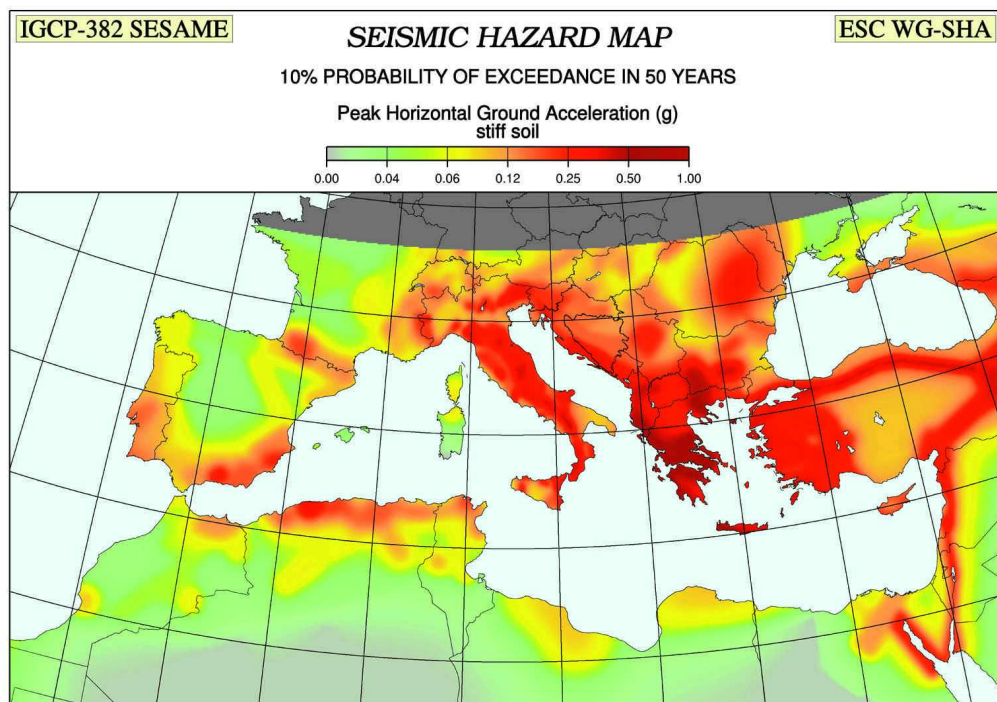
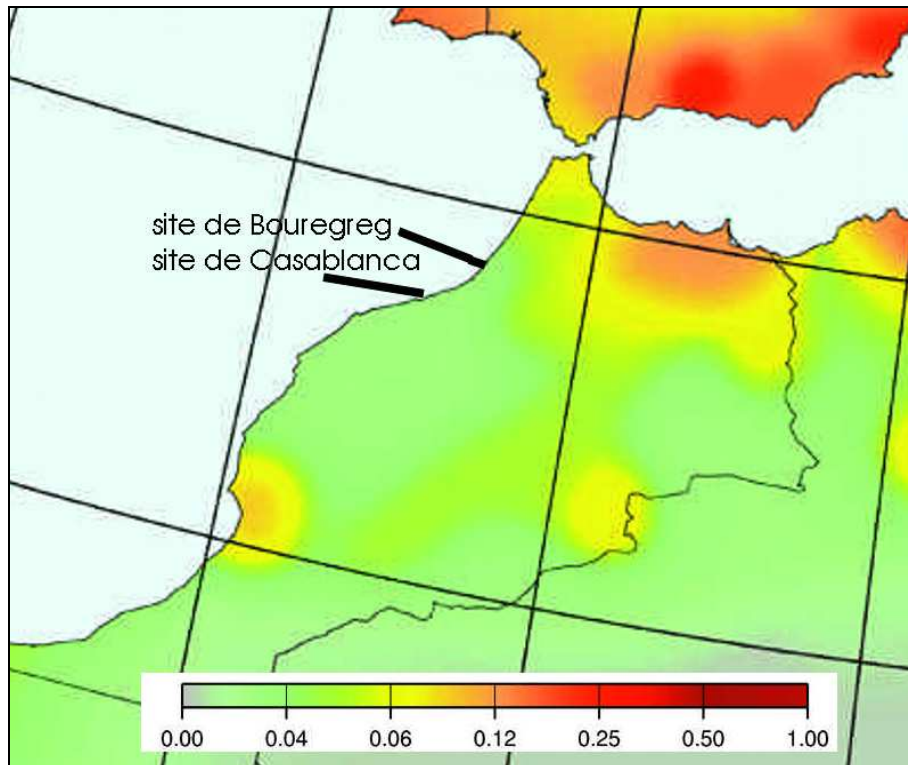


Figure 28 : Carte d'aléa sismique de la Méditerranée (avec un zoom sur le Maroc) présentant la valeur du PGA en g, avec 10% de probabilité de survenance dans les 50 ans, d'après Jimenez et al. (2001)





2.2.5 Évaluation de l'aléa sismique au niveau du Maghreb (Benouar et al., 1998) et au nord du Maroc

Benouar et al. (1998) ont réalisé une évaluation probabiliste de l'aléa sismique sur l'ensemble du Maghreb, Tunisie, Algérie et Maroc. Au niveau des sites de Bouregreg et de Casablanca, les auteurs indiquent **pour une période de retour 100 ans des valeurs d'intensité maximale entre IV et VI MSK** (voire inférieure à IV pour Casablanca). En outre, concernant les valeurs de PGA, pour une période de retour 500 ans, une valeur proche de 0,1g est évaluée.

Plus récemment, Aït Brahim et al. (2004) ont réalisé une évaluation de l'aléa sismique de la région d'Al Hoceïma au nord du Maroc. Ces derniers confirment les résultats obtenus dans le cadre de SESAME (Jimenez et al., 1999), soit 15 à 20%g autour d'Al Hoceïma.

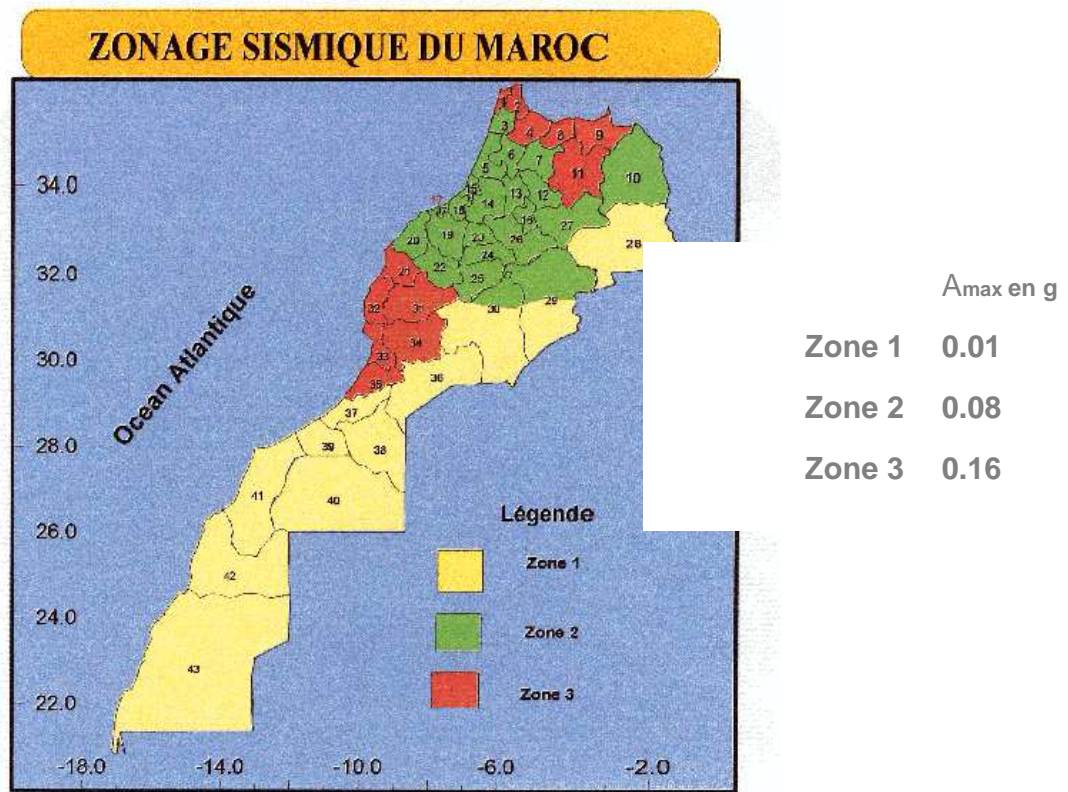
2.2.6 Zonage sismique du Maroc adopté par le RPS2000

Le zonage sismique adopté par la RPS2000, **réglementation de construction parasismique du Maroc**, divise le territoire en 3 zones sismiques (Figure 29).

La carte de zones sismiques adoptée par le RPS 2000 comporte actuellement trois zones reliées à l'accélération horizontale maximale du sol (PGA), pour une probabilité d'apparition de 10% en 50 ans (soit une période de retour de 475 ans). Cette probabilité est considérée raisonnable, car elle correspond à des séismes modérés, susceptibles de se produire plusieurs fois dans la vie d'une structure.

Les sites de Bouregreg et de Casablanca se situent en zone 2, caractérisée par une valeur d'accélération maximale de 0,08g pour une période de retour de 475 ans.

Figure 29 : Zonage sismique du Maroc et coefficient d'accélération maximale retenue pour chacune des zones

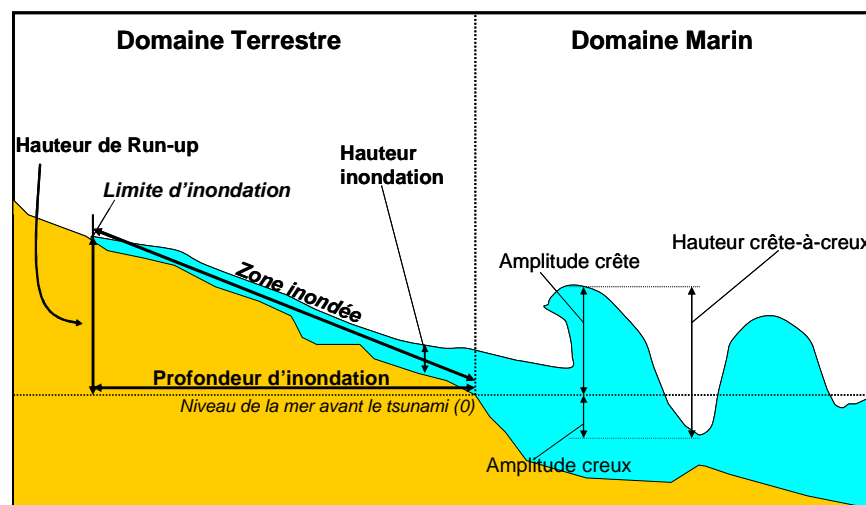


2.3 Évaluation de l'aléa tsunami

2.3.1 Introduction

La **Figure 30** schématise les différents termes utilisés pour décrire les caractéristiques d'un tsunami à proximité du rivage. Dans le texte qui suit, seront indiquées : a) la profondeur d'inondation, soit la distance maximale de pénétration de l'eau à terre, b) la valeur du run-up, soit la hauteur d'eau maximale à terre par rapport au niveau de la mer avant le tsunami, c) la hauteur des vagues ou l'amplitude de la crête de vague.

Figure 30 : Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage



Dans le cadre de ce travail, l'interprétation d'un scénario de tsunami possible dans les 20 ans et susceptible d'affecter les sites de Casablanca et de Bouregreg est basée sur la compilation et analyse des bases de données événementielles, ainsi que sur les publications de résultats de simulations de séismes localisés au niveau des zones tsunamigéniques susceptibles d'intéresser la cote marocaine.

La compilation des catalogues permet une première image des zones les plus fréquemment affectées par ce phénomène. Dans le cadre de cette analyse, les catalogues des événements historiques compilés sont les suivants :

- base de données événementielles des tsunamis de 2000 B.C. à aujourd'hui, de la NGDC-NOAA,
- la publication de Kaaboulen et al. (2009) sur le catalogue de tsunami marocain,
- le catalogue de séismes historiques du IX^{ème} siècle à 2004 de Mrabet (2005),

Le tsunami du 1^{er} novembre 1755 correspond au tsunami le plus désastreux connu au niveau du Maroc. Plusieurs travaux ont concerné la simulation numérique de cet événement majeur. Par rapport aux interprétations tirées des écrits historiques, ces simulations donnent une

meilleure estimation de la hauteur des vagues possibles en cas de survenance d'un évènement comparable.

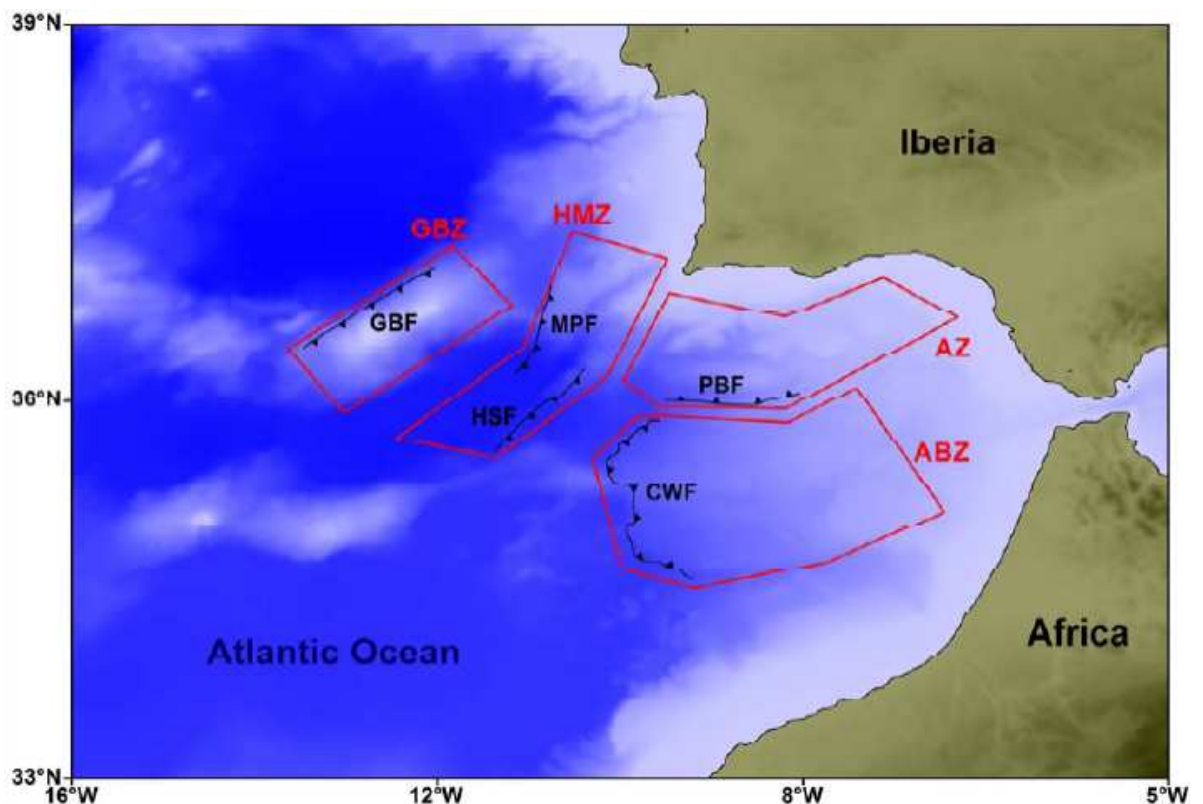
2.3.2 Localisation des principales sources sismiques tsunamigènes relatives à la cote ouest marocaine

L'analyse du contexte sismotectonique actuel et les informations concernant les tsunamis historiques montrent :

1) pour la côte nord marocaine, des sources tsunamigéniques relativement proches, avec la zone sismique de la mer d'Alboran, et celle sur la plateforme ou le talus continental bordant au nord la chaîne maghrébine,

2) **pour la côte Ouest du Maroc, la limite de plaque Afrique – Europe du golfe de Cadix constitue la principale source sismique tsunamigénique.** Pour cette région, Omira et al. (2009) ont représenté de façon schématisée la position des différentes sources sismiques tsunamigéniques qu'il est possible de retenir s'agissant de la cote ouest du Maroc (Figure 31).

Figure 31 : Localisation des principales zones sources sismiques tsunamigéniques (limite en rouge) pour la cote ouest du Maroc (extrait de Olimira et al., 2009)



GBZ : Zone du Banc de Gorringe ; HMZ zone de Horseshoe et du Marqui de Pombal ; AZ, Zone sud d'Algarve ; ABZ zone de subduction de Gibraltar

Failles majeures associées à ces zones : GBF : faille du banc de Gorringe ; MPF : faille du marqui de Pombal ; HSF : faille de Horseshoe ; PBF : faille du banc de Portimao ; CWF : faille de Cadix

2.3.3 Évènements historiques

Selon Kaaboulen et al. (2009), **sept tremblements de terre sont répertoriés de façon certaine pour avoir donné lieu à des tsunamis propagés jusqu'à la côte marocaine**, et plusieurs autres séismes de façon plus douteuse (Tableau 1 et Figure 32).

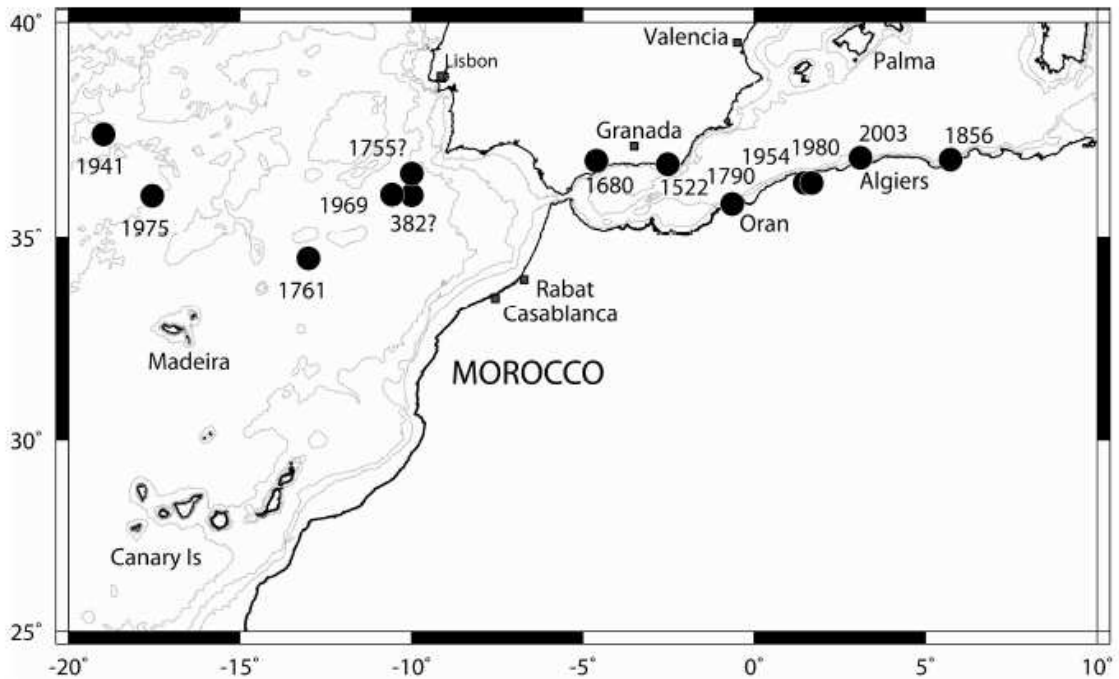
Tableau 1 : Liste des tsunamis répertoriés au niveau des côtes du Maroc (extrait de Kaaboulen et al., 2009), en caractères gras, ceux ayant touchés la cote ouest du Maroc.

Année	mois	Jour	heure	Min	Longitude	Latitude	Origine géographique	Mw	Niveau de fiabilité	Sources biblio.
3 8 2	–	–	–	–	–10 00	36.00	South West Iberia	–	2	3 , 4
8 8 1	5	22		–			West Mediterranean	–	4	1
1522	9	22	10	–	–02.66	36.97	West Mediterranean	6.5	4	1
1680	1 0	9	7	–	–04.60	36.80	West Mediterranean	6.8	4	1
1733	–	–	–	–	–	–	West Mediterranean		0	1 9
1755	1 1	1	10	16	–10 00	36.50	South West Iberia	8.7	4	1,3,5,6,7,8
1761	3	31	12	15	–13.00	34.50	Gloria Fault	8.5	3	2 , 9
1790	1 0	9	1	15	–00.60	35.70	West Mediterranean	6.7	1	1
1856	8	21	21	30	+05.72	36.83	West Mediterranean	–	0	2 0
1941	2 5	11	18	04	–18.98	37.42	Gloria Fault	8.2	4	6 , 1 0
1969	2	28	2	40	–10.57	36.01	South West Iberia	7.9	4	11,12,13,14,15,16,17
1975	5	26	9	11	–17.56	35.98	Gloria Fault	7.9	4	1 1 , 1 8
1980	1 0	10	12		+01.68	36.28	West Mediterranean	5.8	0	2 0
2003	5	21	18	44	+03.08	36.80	West Mediterranean	7.0	0	21, 22, 23

Sources: (1) El Mrabet (1991, 2005); (2) Baptista et al. (2006); (3) Catalogo GITEC; (4) Sousa (1678); (5) Gazette de Cologne (1756); (6) Debrach (1946); (7) Gazette d'Amsterdam (1755); (8) Verdadera Relacion (1756); (9) Le Journal Historique (1773); (10) Moreira (1968); (11) (Baptista et al. (1992); (12) Heinrich et al. (1994); (13) Gjevik et al. (1997); (14) Rabinovich et al. (1998); (15) Di'ario de Noticias (1969); (16) Di'ario da Manh'a (1969); (17) Al Alam (1969); (18) Kaaboulen et al. (2008); (19) Soloviev (1990); (20) USGS online database; (21) Tinti et al., 2005 ; (22) Alasset et al., 2006; (23) Tel et al., 2004 ; (24) Yelles-Chaouche (1991).

Échelle de fiabilité de niveaux croissants : 0 : peu fiable, 4 : très fiable

Figure 32 : Séismes d'épicentre connu et ayant générés des tsunamis au niveau des côtes du Maroc (d'après Kaaboulen et al., 2009)



Ci-après sont décrits **les tsunamis historiques connus ayant affecté (ou ayant pu affecter) la cote ouest marocaine.**

- **Le tsunami de 382**, généré par le tremblement de terre ressenti dans toute la Méditerranée orientale, aurait occasionné un tsunami jusqu'à sur la cote sud-ouest du Portugal et celle du Maroc. Toutefois, cette supposition ne s'appuie aujourd'hui sur aucune description locale précise (Kaaboulen et al., 2009).
- **Le tsunami du 22 mai 881** ; selon Mrabet (2005), la localisation épacentrale du séisme se trouve probablement en mer d'Alboran, le tremblement de terre fut suivi par un tsunami qui aurait atteint le sud de la côte d'Andalousie en Espagne, et probablement aussi la côte nord et nord ouest- du Maroc.
- **Le tsunami du 1^{er} novembre 1755** a donné lieu à un tsunami transocéanique, ayant affecté non seulement la côte nord est et centre atlantique mais a été ressenti également jusqu'aux îles caraïbes. Il s'agit du **tsunami le plus dévastateur concernant le Maroc**. La magnitude du séisme a été estimée de l'ordre de 8,5. Concernant la faille à l'origine du séisme (localisation et mécanisme) de 1755 appartient au système de failles complexe qui constitue la limite de plaques Afrique-Europe au niveau du golfe de Cadix ; toutefois l'identification précise de cette faille fait toujours débat aujourd'hui. Ce sont au niveau des côtes entre Lisbonne et le sud du Portugal, du sud-ouest de l'Espagne et de l'ouest de Maroc que les intensités de tsunami les plus fortes ont été relevées.
- **Le tsunami du 31 mars 1761**, consécutif au séisme de magnitude probablement proche de 8,5, avec un épacentre dans le golfe de Cadix. D'après les témoignages historiques, le tsunami généré aurait non seulement affecté les côtes portugaises, mais il aurait aussi atteint le nord de l'Europe et les îles antillaises de la Barbade. Même si à ce jour, aucun

témoignage n'a été retrouvé concernant les observations du tsunami au niveau du Maroc, vu son ampleur, le tsunami a aussi très vraisemblablement atteint la côte ouest (Kaaboulen et al., 2009).

- **Le tsunami du 25 novembre 1941**, consécutif au séisme de Mw 8,2, localisé en Atlantique, au niveau de la faille de Gloria, correspond à un tsunami transocéanique. Il a été enregistré depuis le Maroc jusqu'aux côtes anglaises ainsi qu'au niveau des côtes des États-Unis. Concernant le Maroc, l'amplitude des vagues enregistrées par les marégraphes a été de 0,25 m à Casablanca et de 0,45m à Essaouira (Mogador), (Kaaboulen et al., 2009).
- **Le tsunami du 28 février 1969** correspond au séisme de magnitude Mw 7,3, avec un épicentre vraisemblablement très proche de celui de 1755. Le tsunami a été enregistré au niveau des côtes portugaises, espagnoles, et marocaines, et des îles des Açores et des Canaries. **A Casablanca, une amplitude de vague de 0,9 m** a été enregistrée. A Rabat et Salé, une forte agitation de la mer est décrite, (Kaaboulen et al., 2009).
- **Le tsunami du 26 mai 1975** est dû au séisme de magnitude Mw 7,9, localisé en Atlantique au niveau de la faille de Gloria. Bien que ressenti au niveau des îles des Açores jusqu'aux côtes du Portugal à celles du nord du Maroc, son amplitude est restée relativement faible, 0,76 m aux Açores (Faial), 0,04 m à Ceuta, (Kaaboulen et al., 2009).

Plusieurs auteurs (dont Mrabet, 2005 ; Blanc, 2009 ; Kaaboulen et al., 2009) ont analysés les archives et interprétés **les dommages liés au tsunami de 1755**. Parmi les villes les plus affectées du Maroc, sont citées notamment, du nord au sud :

- **Ceuta**, il y a eu une surélévation de la mer 2,5 m, puis retrait de la mer, mettant à sec les bateaux (Kaaboulen et al., 2009),
- **Tanger**, certains témoignages indiquent une submersion des remparts de la ville, ce qui correspondrait à un run-up d'une quinzaine de mètres, et une profondeur maximale de l'inondation de plus de 2 km. Néanmoins, en reprenant attentivement les textes historiques, Blanc (2009) met en doute ces interprétations. Selon lui, les témoignages présentent plusieurs contradictions ; le tsunami n'aurait pas dépassé les remparts de la ville.
- **Asila**, l'essentiel des dégâts serait dû à la vibration sismique. Selon Mrabet (2005), le run-up (hauteur maximale de l'eau à terre) serait de 3m environ, et la profondeur maximale du champ inondé, supérieure à une centaine de mètres. L'inondation aurait atteint la moitié de la ville (Blanc, 2009). Le tsunami aurait détruit un bateau de marchandise, celui-ci aurait été emporté à environ 120 m à l'intérieur des terres, soit par les portes de la cité, inondées par les flots, soit par une brèche creusée dans les murailles.
- **Salé**, les principaux dommages générés par le tsunami sont le naufrage de trois bateaux traversant l'estuaire du fleuve Bouregreg, la noyade de 200 personnes (probablement les marins sur les bateaux), une caravane avec plusieurs chameaux lourdement chargés emportée par les flots. Une grande quantité de poissons morts ont été trouvés à l'intérieur de la ville. Selon Mrabet (2005), la profondeur maximale d'inondation serait d'environ 2000 m (**Figure 33**).

- **El Jadida** (nommé à l'époque Mazagao), au sud de Casablanca, selon un témoignage de l'époque, la mer aurait dépassé les remparts, soit une hauteur de 22,5m, le tsunami serait à l'origine de la destruction totale de la ville (Mrabet, 2005). Néanmoins, il pourrait ici y avoir confusion sur l'interprétation des descriptions concernant l'invasion de la ville par la mer. La mer aurait en fait bien envahi les tranchées ceinturant les remparts de la ville, détruisant alors les levées de terre et les palissades. Selon Blanc (2009), la valeur du run-up à El Jadida lors du tsunami du 1^{er} novembre 1755 serait en fait de 2,5 m au maximum.
- **Safi**, certaines descriptions laissent supposer un run-up de 15 m et une profondeur d'inondation de plus d'1 km. Cependant, selon Blanc (2009), les seuls dommages qui puissent être directement liés au tsunami sont des débris flottants, des poissons morts dans les rues et la destruction de bateaux. Par contre, il est difficile de dire si la destruction des nombreuses maisons a été du directement au séisme ou au tsunami généré.

Par ailleurs, au niveau de la cote de Rabat, Mhammdi et al. (2008) décrivent en plusieurs points de la cote la présence de blocs rocheux transportés jusqu'à 300m du rivage probablement par le tsunami de 1755.

En résumé, **concernant le tsunami majeur de 1755, plusieurs travaux relatent des hauteurs de vagues supérieures à la dizaine de mètres en plusieurs points de la côte marocaine. Néanmoins, cette estimation doit être révisée à la baisse** sachant que : 1) Il est dans la plupart des cas difficile de faire la part des dommages liés à la vibration sismique avec les dommages dus au tsunami, 2) une confusion a probablement été faite avec les dégâts causés par un séisme survenu le 18 ou 27 novembre 1755, c'est-à-dire moins de 3 semaines après celui du 1^{er} novembre de Lisbonne (Blanc, 2009). Après une analyse minutieuse des archives, Blanc (2009) affirme que la hauteur crête à creux des vagues n'aurait pas excédé 5 m lors du tsunami de 1755 au niveau de la côte marocaine.

Figure 33 : Localisation des murs de l'ancienne cité de Salé. La médina est située à l'intérieur de l'enceinte, soit environ à 860 m du rivage. Les descriptions sont cohérentes avec une profondeur d'inondation maximale de 2000 m lors du tsunami de 1755 (Kaaboulen et al, 2009)



2.3.4 Résultats des principales études de scénario et d'aléa tsunami

Plusieurs travaux récents ont concerné **la simulation d'évènements sismiques tsunamigéniques**, de 1755 ou fictifs extrêmes. Ces simulations sont réalisées sur la base de modèles bathymétriques régionaux, avec des mailles d'ordre kilométrique.

Si, concernant les inondations à terre, il serait nécessaire de disposer de modèle altimétrique beaucoup plus précis, par contre, ces simulations régionales donnent des enseignements relativement fiables sur les hauteurs de vagues possibles à proximité du rivage.

Simulations de l'évènement du 1^{er} novembre 1755 :

Gutscher et al. (2006) supposent que la rupture la plus probable à l'origine du séisme de 1755 correspond un plan de faille relatif à une subduction sous l'arc de Gibraltar, de la croûte continentale sur la croûte océanique (cf. *Figure 31*, faille ZWF). La longueur de rupture considérée est de près de 180 km, pour un déplacement lors du séisme de 10 m ou 20 m. Quel que soit le modèle de rupture considéré, les calculs indiquent des **hauteurs de vagues au moins 30% à 50% plus faibles que les interprétations historiques**. Au niveau de Safi, au Maroc, Gutscher et al. (2006) atteignent une valeur maximale de hauteur vague de 1,2 m.

Plus récemment, Santos et al. (2009) ont réalisé des simulations du tsunami de 1755 en tenant compte des différentes sources possibles. Sur la base des descriptions historiques (en particulier le temps d'arrivée du tsunami) et des observations sur les dépôts sédimentaires (notamment localisation et datation de turbidites), les auteurs concluent que l'origine du tremblement de terre de 1755 et du tsunami est très vraisemblablement du au jeu d'une faille active dans la région du Banc de Gorringe (cf *Figure 31*, faille GBF). Les caractéristiques de la rupture de faille considérées les plus probables selon Santos et al. (2009) sont : longueur du plan 200 km, largeur du plan 80 km, direction 60°E, plongement 40°E, jeu inverse, profondeur focale 8km, décalage lors de la rupture 12,1 m.

D'une façon générale, les calculs de simulation du tsunami généré par cette rupture donnent des valeurs plus faibles de hauteur des vagues que celles interprétées sur la base des archives historiques. Ainsi, Santos et al. (2009) calculent une hauteur maximale de vague de l'ordre de 3 m au Cabo Sao Vicente, 2,5 m à Cadix. **A Salé, la hauteur maximale de vague est inférieure à 2 m**. Une hauteur maximale de l'ordre de 6m est calculée au niveau de Porto Novo au Nord de Lisbonne.

Simulations d'évènements extrêmes :

Sur la base du zonage des différentes sources tsunamigéniques identifiées dans le golfe de Cadix (*Figure 31*), Omira et al. (2009) ont réalisé des simulations de ruptures sismiques considérées les plus fortes possibles pour chacune de ces zones (évènement de type MCE, Maximal Credible Earthquake), *Figure 34*. Les auteurs montrent que pour plusieurs des scénarios extrêmes considérés, **la hauteur des vagues peut dépasser 3 m au niveau de la côte ouest marocaine**, avec un temps d'arrivée en moyenne de 30 mn.

Figure 34 : Caractéristiques des ruptures sismiques maximales simulées au niveau de chacune des zones tsunamigéniques identifiées dans le Golfe de Cadix (Omira et al., 2009), cf Figure 31

Nom du plan de faille modélisé	longueur du plan de faille (km)	largeur du plan de faille (km)	Épicentre simulé : coordonnées en Longitude et Latitude		Profondeur de l'eau à l'aplomb de la faille (km)	Rejet (m)	Direction du plan de faille	Plongement	Rake	Module de cisaillement, μ (Pa)	Mw	Nom de la zone source
GBF	127	60	-11.332	36.665	5.0	8.3	233.0	35	90	3.0×10 ¹⁰	8.1	GBZ
HSF	165	70	-9.913	35.796	4.0	10.7	42.1	35	90	3.0×10 ¹⁰	8.3	HMZ
MPF	129	70	-9.890	36.574	4.0	8.0	20.0	35	90	3.0×10 ¹⁰	8.1	HMZ
PBF	105	55	-8.585	36.314	2.5	7.2	266.3	24	90	3.0×10 ¹⁰	8.0	AZ
CWF	168	200	-8.059	35.407	5.0	10	349.0	5	90	3.0×10 ¹⁰	8.6	ABZ

Période de retour des évènements tsunamigéniques

- Type 1755** : En considérant les différents systèmes de failles actives du golfe de Cadix, la vitesse de déformation enregistrée au niveau de cette partie de la limite de plaques Europe – Afrique, le déplacement et le relâchement de contraintes relatifs à chaque évènement sismique majeur, Gutscher et al. (2006) calculent une **période de retour de 1000 à 2000 ans** pour un évènement similaire à celui du 1^{er} novembre 1755.
- Type 1969** : Dans le cadre la mise en place d'un système d'alerte aux tsunamis, Ribeiro et al. (2009) ont analysé le risque de tsunami dans le golfe de Cadix. Les auteurs reprennent les conclusions de Gutscher et al. (2006) pour la période de retour d'évènement type 1755. Pour ce qui concerne un évènement sismique plus faible, type 1969 (magnitude 7,3), Ribeiro et al. (2009) indiquent une **période de retour de 200 ans environ**.
- Évènement de type MCE (Maximal Credible Earthquake)** : Les simulations réalisées par Omira et al. (2009) concernent des évènements les plus forts possibles considérés pour plusieurs sources tsunamigéniques localisées dans le golfe de Cadix. Ces évènements supposent une longueur de rupture supérieure à la centaine de kilomètres. Si l'on se réfère aux analyses de Guschter et al. (2006) il faut considérer des périodes de retour minimales **d'ordre millénaire à pluri millénaire** pour ces évènements extrêmes.

3 Érosion côtière et submersion marine

3.1 Conditions océanographiques

3.1.1 Les vents

Le régime des vents sur la côte ouest du Maroc est régi par la présence de l'**anticyclone des Açores**, plus ou moins associé aux dépressions traversant l'Atlantique nord.

En été, le régime des vents est caractérisé par les alizés de Nord - Est. En hiver, les dépressions qui traversent l'atlantique d'Ouest en Est, associées à la formation de dépressions secondaires au droit des Açores rejettent au Sud du Maroc les alizés qui sont remplacés par des vents plus violents de secteur nord à nord-est. Lors du passage de perturbations dues au front polaire sur l'Europe, lorsque ce front s'étend jusqu'à proximité du Maroc, ils sont remplacés par des vents de secteur sud à sud-ouest. C'est à l'arrière de ces perturbations que l'on enregistre les vents les plus dangereux d'orientation nord-est. A la fin de l'été, des vents chauds, secs, chargés de sables soufflent parfois d'entre S et SE¹.

Tableau 2 : Distribution des vents par direction sur la côte de la Meseta marocaine, DMN, 2003 (source: Mohamed Idrissi 2006)

Vitesse en m/s	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total (%)
<2									20,94
2 à 5	17,55	11,71	2,85	0,56	6,77	7,44	6,20	9,33	62,41
6 à 10	2,77	3,76	0,32	0,05	0,55	2,62	3,52	2,65	16,24
11 à 16	0,02	0,008	0,008	0,008	0,015	0,10	0,21	0,04	0,41

Les vents enregistrés pendant douze ans (1951 et 1953 à 1963), trois fois par jour à la station météorologique d'Anfa, montre la **prédominance en direction et en force des vents du secteur nord-est**.

¹Les problèmes d'ensablement des ports marocains sur la façade atlantique. Leur impact sédimentologique. Mme Charrouf LATIFA – Thèse de doctorat en Science – Université de Paris sud – juillet 1989

3.1.2 Les variations du niveau des eaux

Les variations du niveau des eaux au littoral sont dues à plusieurs facteurs. Ils sont décrits ci-après.

3.1.2.1 La marée

Pour la marée au Maroc, le port de référence est Casablanca. La marée astronomique à Casablanca est de type semi-diurne presque régulier.

D'après les instructions nautiques, le zéro hydrographique à Casablanca est situé à 0.03 m au-dessus du zéro de l'échelle de marée, scellée dans l'angle sud de la darse ouest du port, à proximité de l'épi. Ce **zéro hydrographique est à 2.17 m au-dessous du zéro N.G.M. de 1963**. La détermination du zéro hydrographique a été faite par la mission hydrographique de 1951.

Le marnage moyen est de 1,30 mètre pour la morte eau et de 2,80 mètres pour la vive eau à Casablanca. La cote de la pleine mer de vive eau exceptionnelle est de +3,94 mètres et de la basse mer de vive eau exceptionnelle, de 0,41 mètres soit une **amplitude de 3,53 mètres**.

A Rabat, la marée est donnée par rapport au port de Casablanca. Les niveaux atteints pour une pleine mer et une basse mer de vives eaux moyennes sont théoriquement de +3,30m et +0,80m par rapport au ZH. Dans sa thèse sur l'oued Bouregreg, B. El KAIM (in thèse de CHARROUF, Latifa, 1989) donne pour le port de Rabat une amplitude de 3,28m pour la marée de vive eau exceptionnelle avec les niveaux de +3,79 m ZH en pleine mer et + 0,51 m ZH en basse mer.

Il n'est pas possible d'analyser dans le temps l'évolution du niveau moyen des eaux dans la zone d'étude car l'installation de marégraphes sur le littoral du grand Casablanca, mais également de tout le littoral marocain, est récente :

- l'agence nationale de la conservation foncière, du cadastre et de la cartographie (ANCFCC) gère deux marégraphes acoustiques opérationnels depuis 2006 à Casablanca et à Al Hoceima,
- la Direction des Ports et Du Domaine Public Maritime (DPDPM) gère dix marégraphes répartis le long du littoral du Maroc : Nador, Tanger, Kenitra, Mohammedia, Jorf Lasfar, Safi, Agadir, Tan Tan, Layoune et Dakhla. Le plus ancien est installé depuis 2003,
- le Service Hydrographique et Océanographique de la marine royale (SHOMAR) disposerait également d'un marégraphe qui servirait pour l'élaboration des cartes marines et pour les tables de prévision des marées atlantiques et méditerranéennes. Nous ne disposons pas d'informations sur cet appareil,
- la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) aurait opéré dans le passé un marégraphe à Casablanca mais nous ne disposons d'aucune information dessus.

3.1.2.2 Les facteurs météorologiques

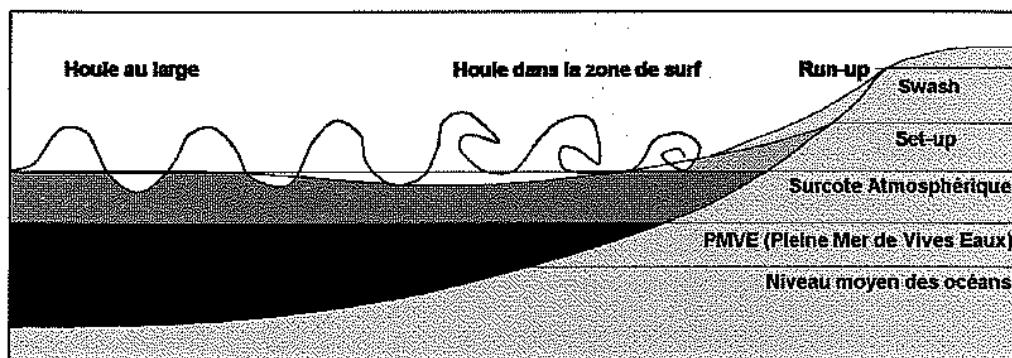
Il s'agit essentiellement de la surcote atmosphérique (ou storm surge) par effets:

- **de baromètre inverse** : les variations de pression font bouger le niveau de la mer de 1 cm par hPa : décote lors de haute pression et surcote lors de basse pression,
- **du vent** : un vent de terre pousse l'eau vers le large et provoque une décote, alors qu'un vent de mer accumule l'eau au rivage. Des dénivellations importantes du niveau des eaux ne sont possibles que sur les étangs et la mer par faibles fonds.

3.1.2.3 Les facteurs hydrodynamiques

Il s'agit principalement des surcotes dues au déferlement des vagues (Set-up et Swash couramment dénommé « wave run up ») et à un fort courant qui vient « buter » sur le littoral. Ces surcotes sont surtout sensibles près du rivage. Elles sont le plus souvent de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, mais peuvent atteindre le mètre, voire plus.

Figure 35 : Les différentes composantes des surcotes marines



3.1.2.4 La morphologie de la côte

Les effets dynamiques dus aux vents, aux courants, aux déferlements des vagues, etc. sont très dépendants de la morphologie du littoral. Les effets sont accentués en fond de baie, et minimisés au niveau des caps et pointes.

Le littoral du secteur d'étude étant sensiblement rectiligne, les effets dynamiques ne seront pas accentués sauf ponctuellement par suite d'aménagements anthropiques ou d'une géomorphologie particulière du littoral.

En plage, les effets les plus marquants sont une accumulation d'eau due au jet de rive (franchissement des vagues) et au vent de mer qui pousse les embruns et l'eau du jet de rive, et les force à s'accumuler au rivage.

En général, le niveau d'eau sur la plage est de 0.2 à 0.3 m plus élevé que le niveau d'eau en faible fonds.

3.1.2.5 Les niveaux d'eau extrêmes

Les niveaux extrêmes sont le résultat de la somme des valeurs extrêmes liées :

- à la marée,
- les surcotes/décotes induites par les vents, la pression atmosphérique,
- à la surélévation globale qui regroupe le cycle saisonnier du niveau marin, les oscillations sub-inertielles et les seiches à grande échelle.

Nous ne disposons pas à l'heure de données sur les cotes générées par les dernières tempêtes les plus importantes sur le littoral du Grand Casablanca et de Rabat. Il est parfois **fait état de surcote de +1m²** mais aucune valeur mesurée ne peut venir corroborer cette proposition.

Latifa Charrouf (1989) fait état dans sa thèse de tempêtes ayant entraîné des variations exceptionnelles du niveau des eaux comme le 19 juin 1953 à Casablanca et le 12- 13 août 1953 à Safi. Elle pense qu'il est prudent d'admettre une surélévation exceptionnelle possible du niveau de l'eau en tempête de 0,70 m à 1m.

La Direction des Ports et du Domaine Public Maritime lors d'études de projets portuaires en accord avec les bureaux d'études locaux (communication orale : DPDPM – Division hydrographie, bathymétrie et océanographie) considère comme **niveau maximal la valeur de +4,50 m ZH soit une surcote marine de 0,56m.**

Par mesure de précaution, **si l'on retient une surcote maritime en cas de tempête exceptionnelle de 1m (valeur pessimiste), la cote du niveau atteinte par les eaux (hors run-up) sera de** (cf. Tableau 3) :

- **A Rabat** : +4,79 m ZH, soit +2,65 m NMG ;
- **A Casablanca** : +4,94m ZH, soit 2,77 m NMG,

Tableau 3 : Caractéristiques des niveaux d'eau

Secteur	Cote de la marée de VEE (m ZH)	de Surcote (m)	Niveau extrême actuel proposé (m ZH)	Différence entre le 0 ZH et le 0 NGM	Niveau extrême actuel proposé (m NGM)
Rabat	+3,79	1,00	+4,79	+2,14	+ 2,65
Casablanca	+3,94	1,00	+4,94	+2,17	+ 2,77

VEE : Vive Eau Exceptionnelle.

Nota: Le littoral de Casablanca –Rabat peut être affecté par des tsunamis. La hauteur de la "vague" au rivage de période de retour de 200 – 300 ans a été estimée à 1m). En conséquence,

² Latifa CHARROUF. Les problèmes d'ensablement des ports marocains sur la façade atlantique. Leur impact sédimentologique sur le littoral. Thèse de Docteur en Science – Université de Paris-sud Centre d'Orsay- 6 juillet 1989

en termes de niveau d'eau, **l'impact du tsunami sur le rivage sera équivalent au niveau d'eau lié à un évènement exceptionnel de tempête maritime.**

3.1.3 Les agitations

La genèse des houles au large du Maroc est la conséquence, la plupart du temps, des dépressions barométriques passant sur l'Atlantique nord entre les Açores et l'Islande.

Les données d'agitation peuvent être considérées comme équivalentes compte tenu que le rivage entre les deux villes a sensiblement la même orientation et ne sont distantes que de 90 km.

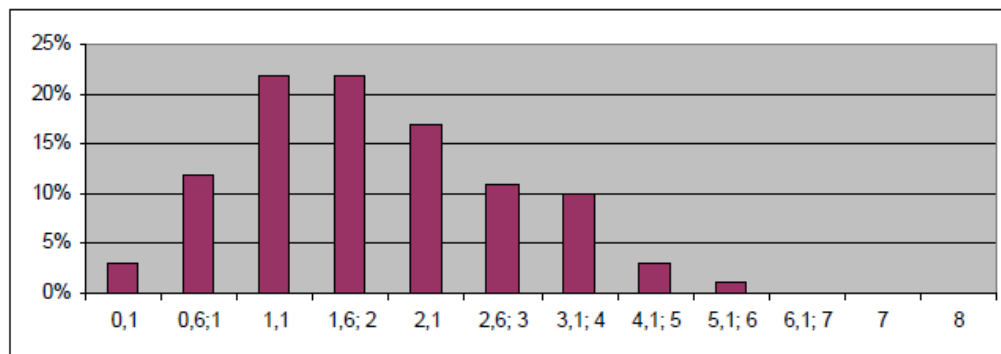
3.1.3.1 Les houles du large

Les roses des houles ci-après ³ illustrent la **prédominance des houles de secteur nord-ouest au droit de Mohammedia**. Elles montrent un secteur unique d'origine des houles quelle que soit leur amplitude : le secteur nord-ouest.

Les houles dominantes ont des hauteurs comprises entre 1 et 2,5m, elles représentent 61% des observations. Les houles de hauteur 3 à 4m représentent 10% des observations alors que les grandes houles d'hiver (> 4m) ne représentent que 3% des observations.

En termes de période, l'intervalle 10-11s domine entre les mois d'avril et de septembre (56% à 68% des observations). Entre les mois de mai et septembre, la période qui domine, est celle de 6 – 7s avec un taux variant entre 50% et 73%.

Figure 36 : Histogramme de répartition annuelle de la hauteur de la houle au large de Casablanca. DMN, 2003 (source : Mohamed Idrissi, 2006)



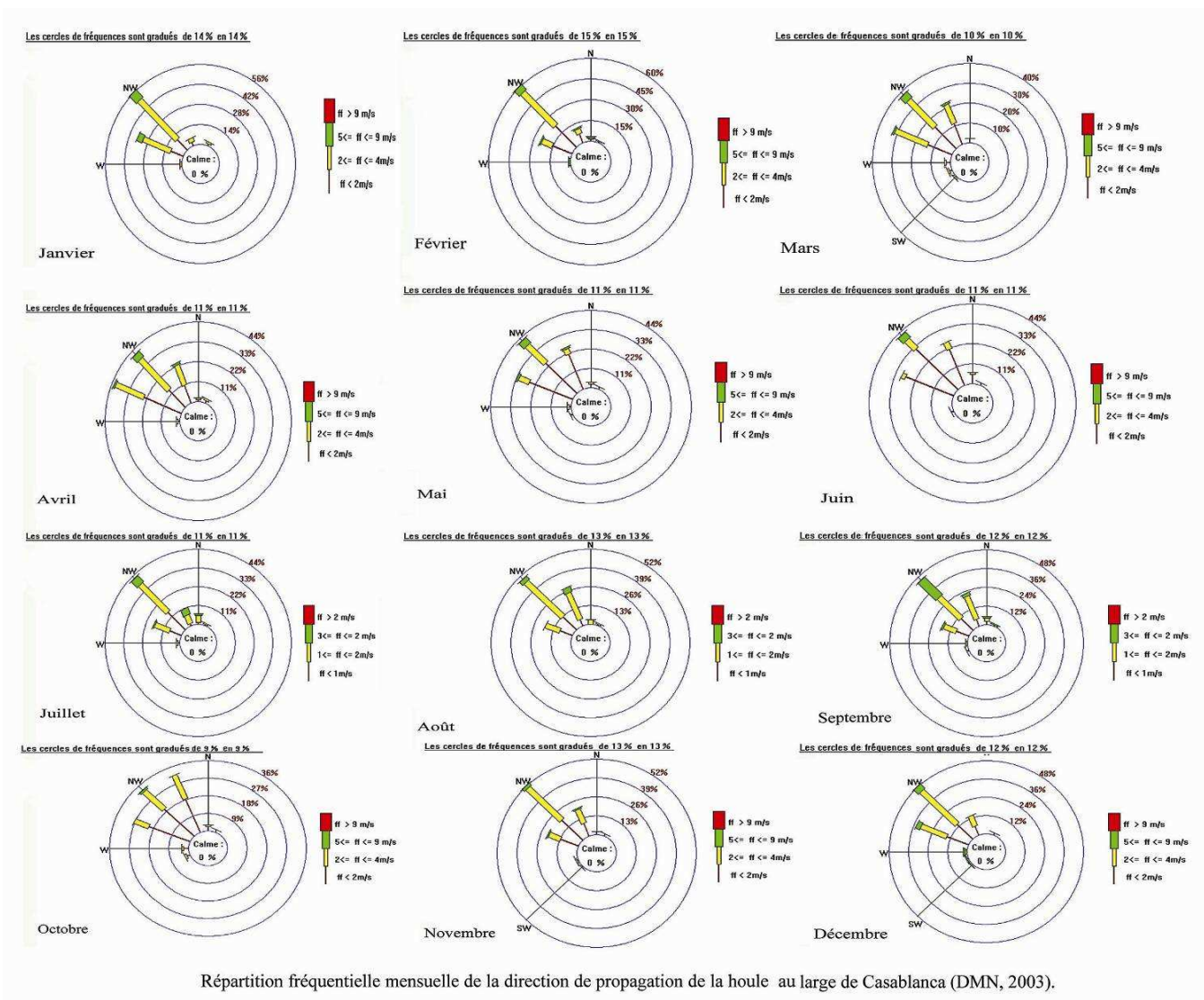
Des études statistiques menées par Sogreah et le LPEE sur la base d'observations de navires ont conduit à retenir au large de Mohammedia les caractéristiques suivantes des houles en fonction de leur période de retour :

³ Évaluation des impacts de l'élévation accélérée du niveau de la mer sur le littoral de Mohammedia : Risque d'inondation et impacts socio-économiques. KHOUAKHI Abdou, Mémoire de Master ; juillet 2008

Tableau 4 : Amplitude des houles au large en fonction de leur période de retour

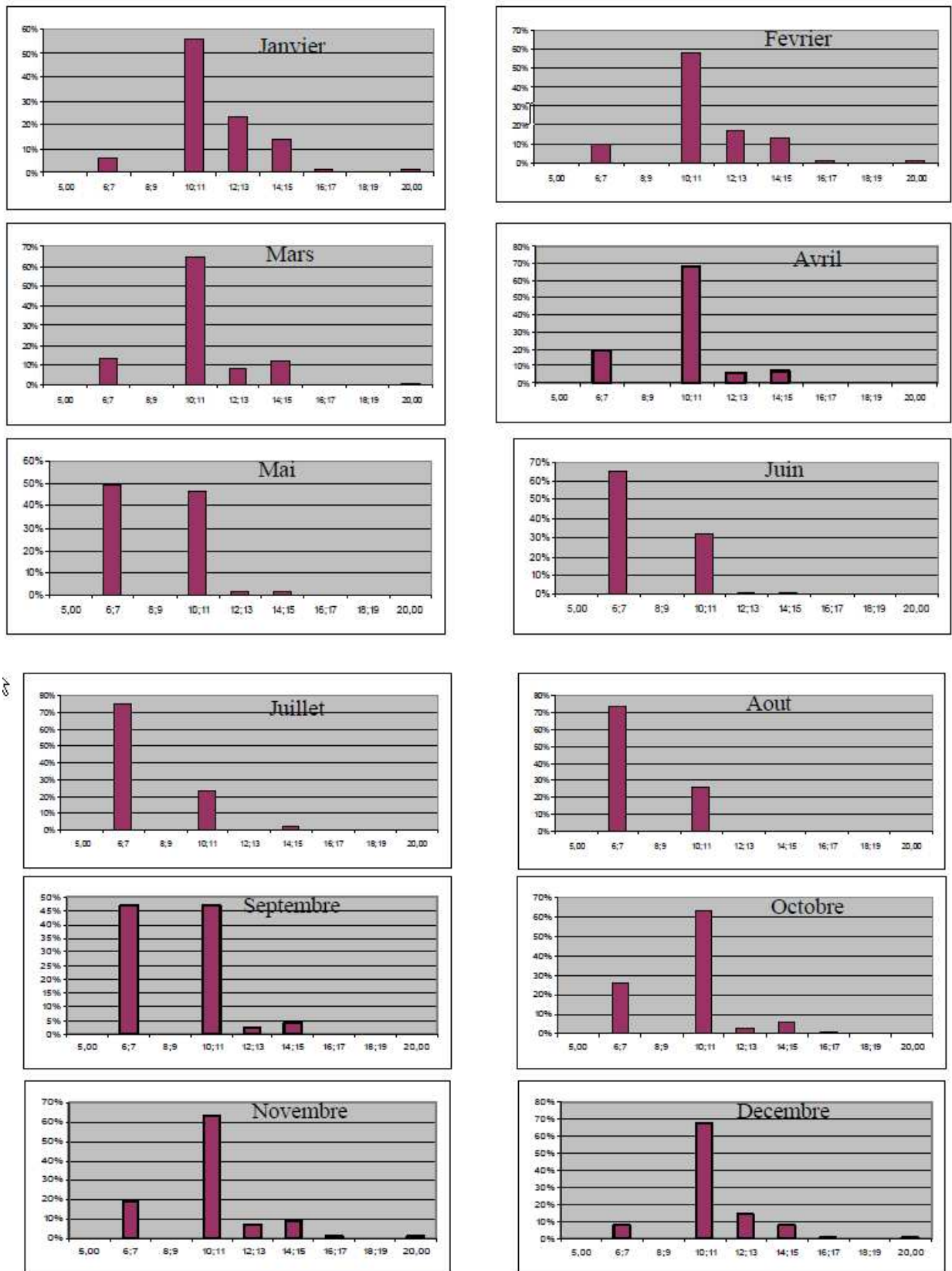
Houle (Hs)	Fréquence de dépassement (%)
5m	2 jours par an
6m	1 jour tous les 3 ans
7m	1 jour tous les 8 ans
8m	1 jour tous les 40 ans
11m	1 jour tous les 100 ans

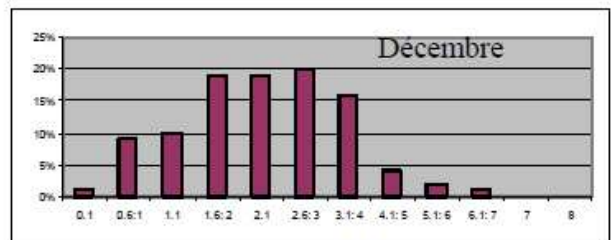
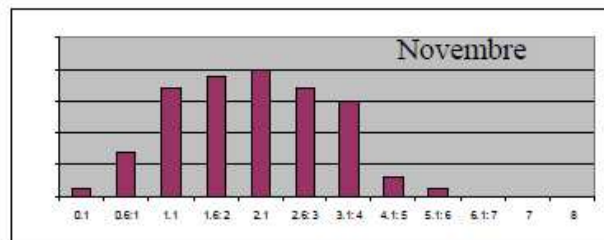
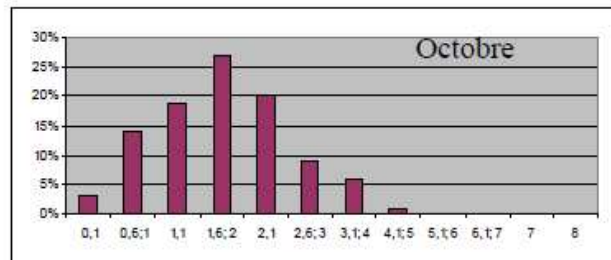
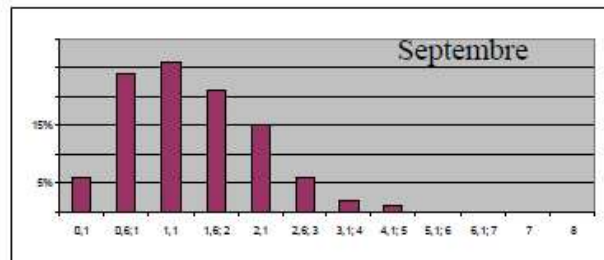
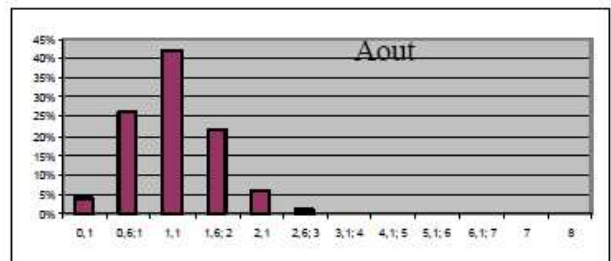
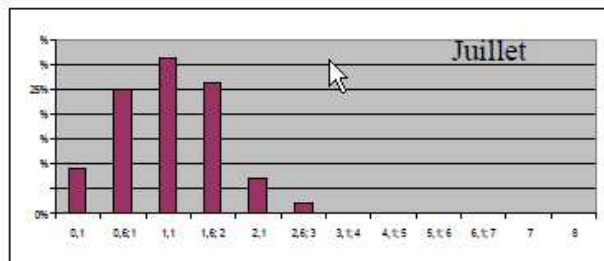
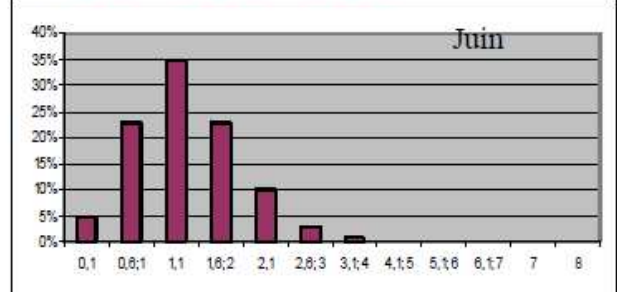
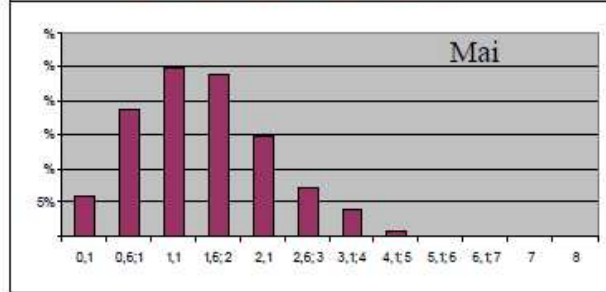
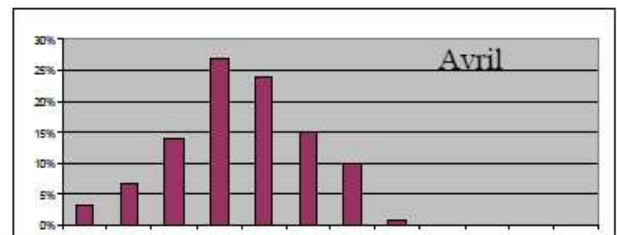
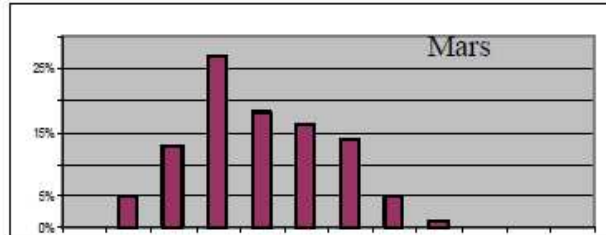
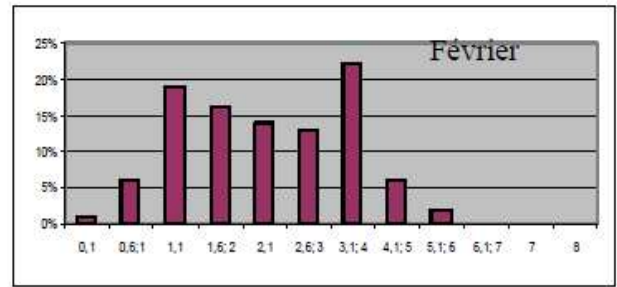
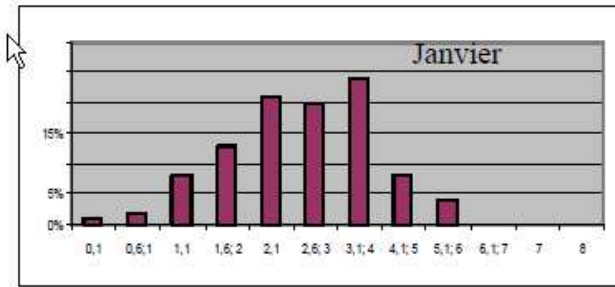
Figure 37 : Répartition fréquentielle mensuelle de la période de la houle au large de Casablanca (DMN, 2003 in Idrissi, 2006)



Répartition fréquentielle mensuelle de la direction de propagation de la houle au large de Casablanca (DMN, 2003).

Figure 38 : Répartition fréquentielle mensuelle de la hauteur de la houle au large de Casablanca (DMN, 2003 in Idrissi, 2006)





3.1.3.2 Les houles à la côte

Du large, les houles se propagent vers la côte. Lors de cette propagation, elles se déforment par suite de l'effet du fond. Comme **la houle est le phénomène principal responsable des évolutions du littoral**, il est important de déterminer ces modifications. Pour se faire, des modèles numériques sont généralement mis en œuvre dénommés « plan de vagues ».

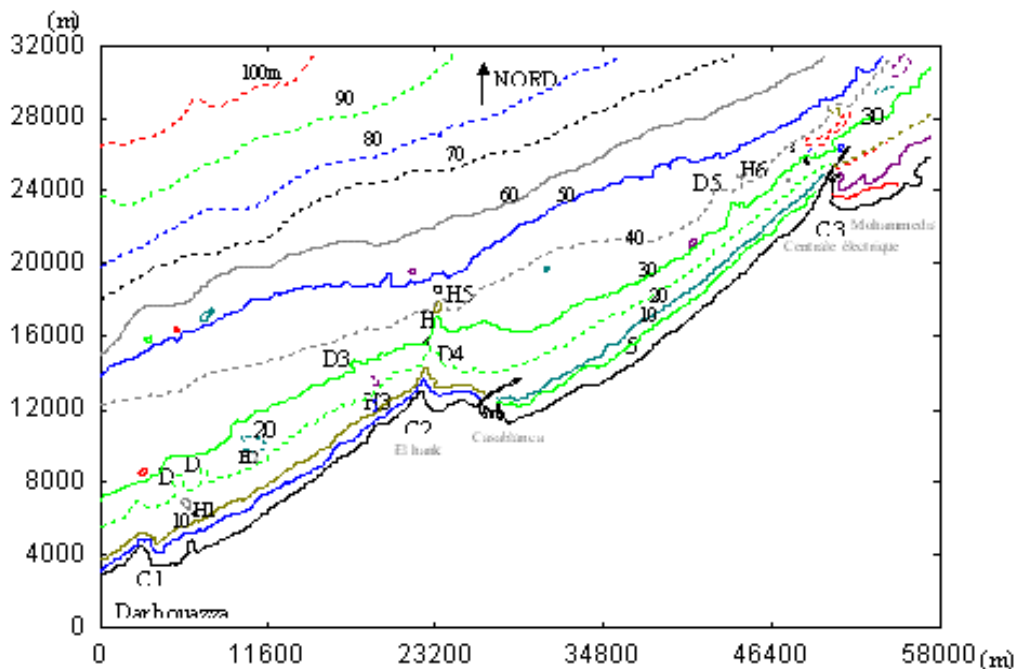
Lors de la collecte locale de données, il ne nous a pas été possible de collecter d'études détaillées de ce type touchant le littoral de Casablanca entre El Jadida et Mohammedia. Il existe par contre quelques données publiées dont nous reprenons ci-après les éléments essentiels.

▪ Littoral de Casablanca

Une **modélisation numérique de l'hydrodynamique entre Dar Bouaaza à l'Ouest et Mohammedia à l'Est** a été réalisée⁴. Les paramètres de la houle sont déterminés au moyen du modèle SWAN (Simulating Waves Nearshore) qui est un modèle numérique qui permet d'obtenir des estimations des caractéristiques des vagues dans les zones côtières, pour des conditions de vent, courant et bathymétrie connus.

Le secteur étudié correspond à une longueur de 57 km et une largeur de 31 km. Les données de la bathymétrie sont obtenues à partir d'une carte bathymétrique fournie par la direction des ports de Casablanca-Mohammedia (cf. Figure 39).

Figure 39 : Carte de la bathymétrie utilisée entre Dar Bouaaza et Mohammedia (in Idrissi, 2006)

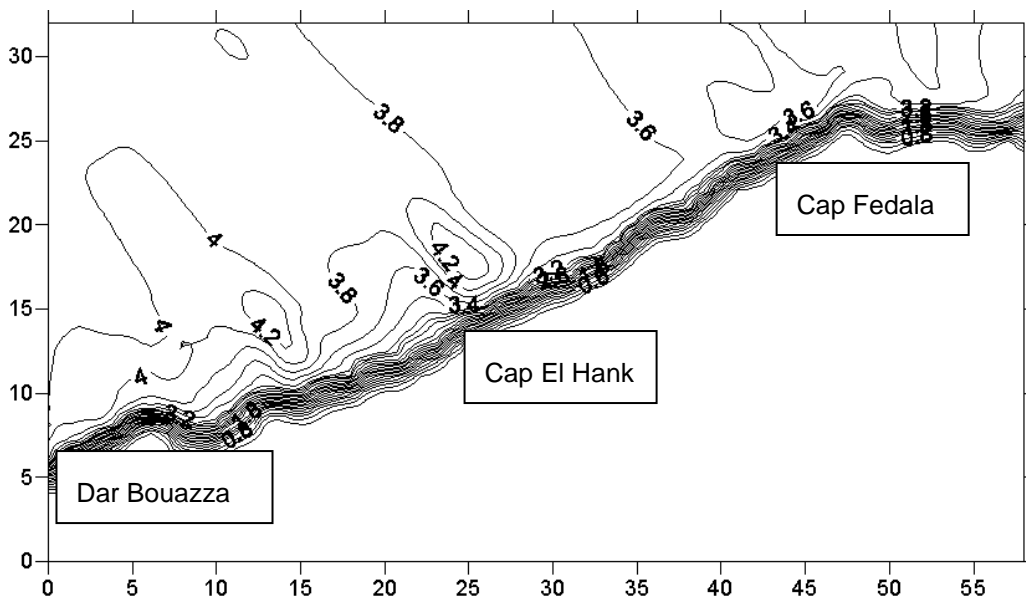


⁴ Laila MOUAKKIR, Hassan SMAOUI, Soumia MODARNE, Mohammed CHADGALL. Modélisation numérique de l'hydrodynamique avec interaction houle-courant : Effet sur le taux de cisaillement de fond. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis

Les simulations numériques de la houle sur le littoral Casablanca-Mohammedia ont été réalisées en s'appuyant sur le cas d'hiver avec une houle en provenance du large de direction NW ayant une hauteur de 4m et une période de 14 secondes.

Les simulations réalisées par le code SWAN montrent que la hauteur significative de la houle diminue lors de son déplacement depuis le large à la côte. L'effet du fond commence à se faire sentir à l'approche du rivage et au voisinage des dorsales sous marine et des hauts fonds. La Figure 40 montre un **accroissement de la hauteur de la houle** (qui passe de moins de 3.8m à 4.5m) au voisinage de Dar Bouazza et plus précisément aux alentours des dorsales D1 et D2 ainsi que des hauts fonds H1 et H2. La même remarque est valable au niveau du cap El Hank surtout sur sa façade ouest ce qui correspond à l'effet de la dorsale D3 et du haut fond H3.

Figure 40 : Distribution spatiale de la hauteur significative de la houle simulée par le modèle SWAN



▪ La baie de Mohammedia

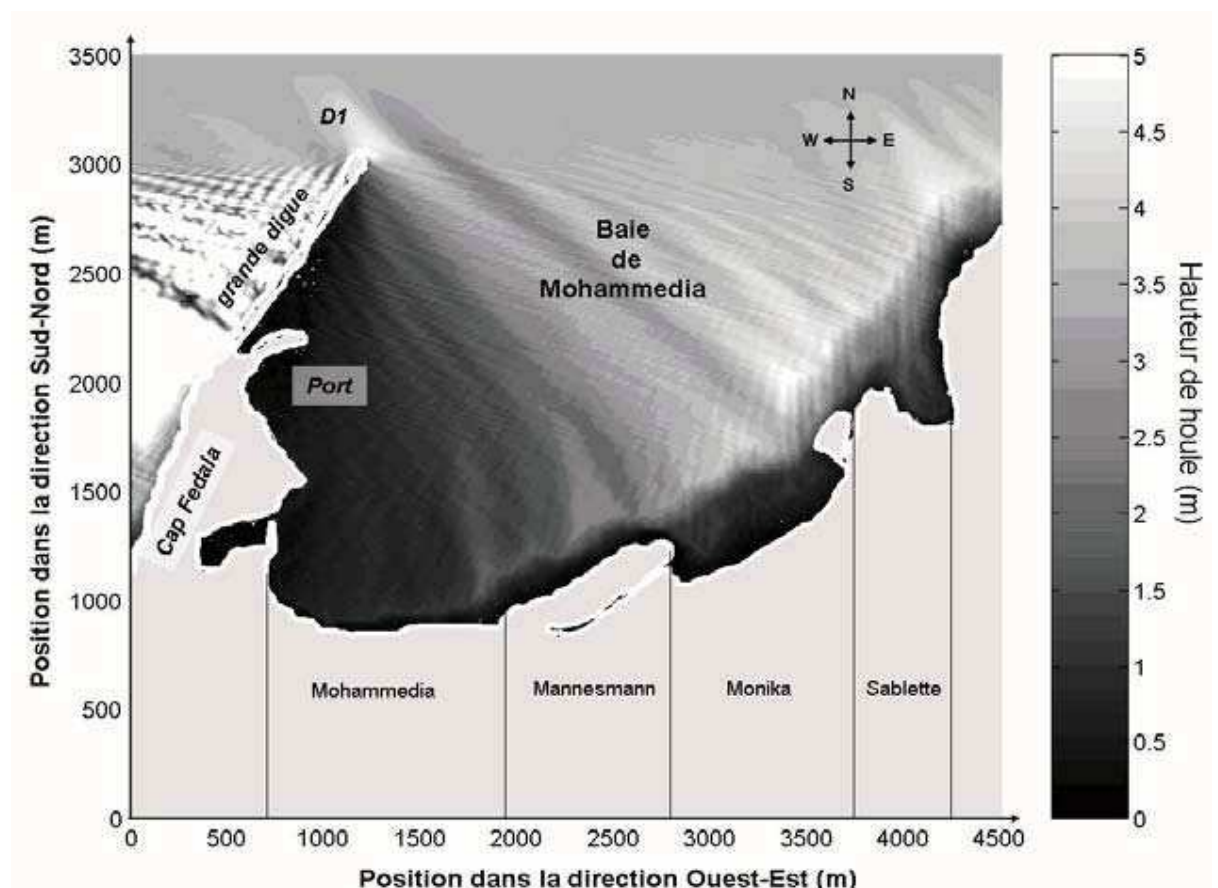
Dans le cadre d'études pour caractériser l'évolution du littoral de la baie à la suite des aménagements côtiers, un **modèle de propagation de houle REFDIF**, qui prend en compte la diffraction et la réfraction a été mis en œuvre⁵

L'étude de la houle depuis vingt ans (1983-2003) a montré que la direction de propagation dominante était le NW. La houle significative a pour caractéristiques une période de 15s en hiver et de 7s en été, pour respectivement une hauteur de 3,4m et de 2m. Les résultats de la modélisation présentés Figure 41, pour une houle significative hivernale, montre que la zone s'étendant du port à la partie Est de Mannesmann est particulièrement abritée. Puis l'agitation devient de plus en plus importante en s'éloignant vers l'Est. Ainsi, au niveau des côtes de Monika et de Sablettes, l'amplitude de la houle, dans les zones de focalisation, est environ 30%

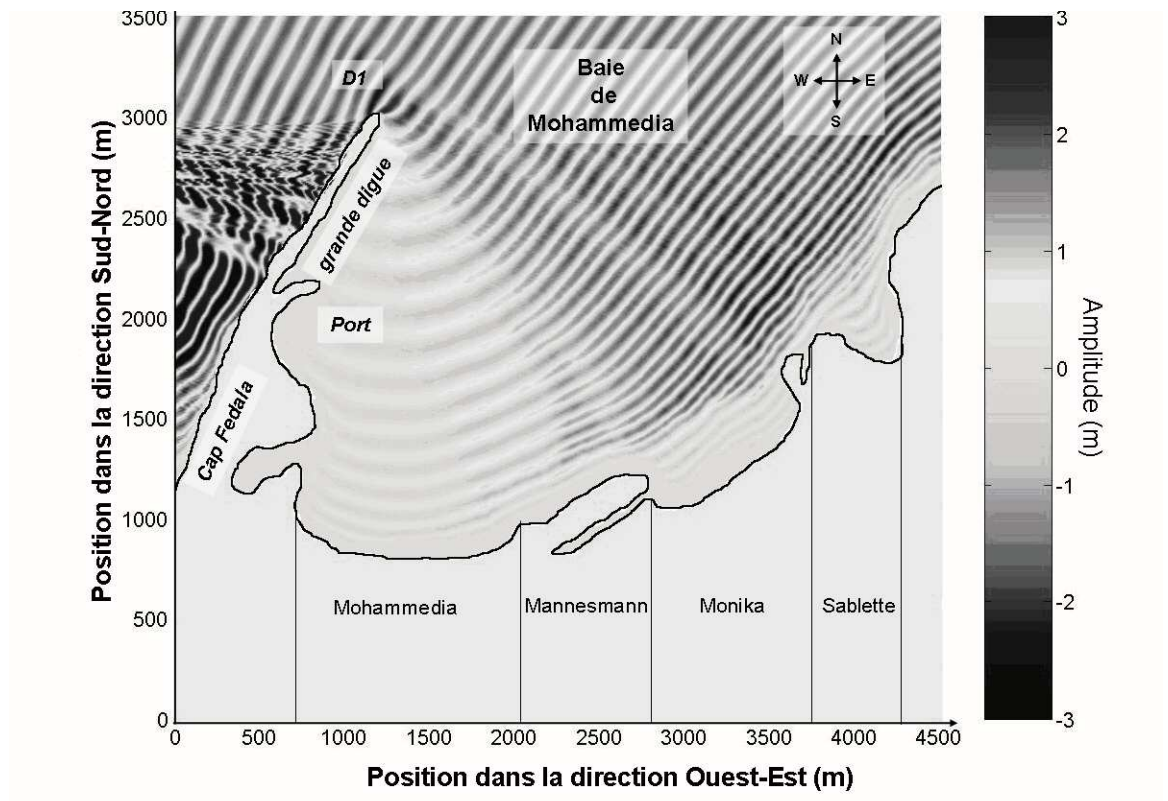
⁵ F. Gouaud, A. Hourimeche, V. Rey, M. Chagdali et M. Idrissi. Une méthodologie multidisciplinaire pour l'étude du littoral : cas du littoral de Mohammedia (Maroc). IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest.

plus importante qu'au large. Dans la baie, la houle est soumise essentiellement à la déformation par diffraction. On observe sur la Figure 42 ce phénomène dont l'effet est prolongé jusqu'au platier rocheux de Mannesmann. Cela entraîne la création d'un courant qui ramène les sédiments de la plage Monika vers la plage Mohammedia et qui est renforcé par le courant de dérive littorale, circulant du Nord vers le Sud le long de la frange côtière. De ce fait, le secteur ouest du littoral de Mohammedia, protégé par la jetée principale, se comporte comme une pompe aspirant en permanence les sables du secteur Est. L'élargissement et la surélévation de la plage Mohammedia sont en relation avec la présence de l'épi transversal qui protège le port de Mohammedia et qui oblige le courant de dérive littorale à déposer une partie de sa charge sédimentaire au niveau de ce secteur Ouest. Les traceurs minéralogiques utilisés dans la partie descriptive confirment cette hypothèse d'un transport suivant la direction Est-Ouest.

Figure 41 : Plan de vague dans la baie de Mohammedia pour une houle hivernale de 3,4m d'amplitude et de 15s de période (source : F. Gouaud, 20066)



⁶ Une méthodologie multidisciplinaire pour l'étude du littoral : Cas du littoral de Mohammedia (Maroc). F. Gouaud, A. Hourimeche, V. Rey, M. Chagdali et M. Idrissi. IXèmes, pp 213-220. IXèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest

Figure 42 : Visualisation des lignes de crêtes (source : F. Gouaud, 2006⁷)

A partir des résultats de la modélisation de la houle au rivage, il est alors possible d'en déduire le flux sédimentaire le long du littoral.

▪ L'embouchure du Bouregreg

Les houles qui atteignent le rivage de Rabat traversent la passe entre les deux digues. La houle subit alors une réfraction en fonction de la profondeur et une diffraction sur les bancs sableux formés le long des digues. Les deux plages intérieures amortissent ensuite la propagation des houles.

3.1.3.3 Les phénomènes tempétueux

Les tempêtes associées à très fortes houles, voire exceptionnelles, se produisent en général au cours de l'hiver.

Sur la base des entretiens menés auprès des services marocains compétents, il n'est pas possible, à l'heure actuelle, de caractériser (surcote, amplitude de la houle etc.) les derniers événements tempétueux qui auraient pu toucher le littoral du Grand Casablanca.

⁷ Une méthodologie multidisciplinaire pour l'étude du littoral : Cas du littoral de Mohammedia (Maroc). F. Gouaud, A. Hourimeche, V. Rey, M. Chagdali et M. Idrissi. IXèmes, pp 213-220. IXèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest

3.1.4 Les courants

3.1.4.1 Secteur du Grand Casablanca

Les courants le long d'une côte sont en général de **quatre types** : les courants généraux, les courants de marée, les courants de dérive dus au vent et les courants générés par la houle.

Les trois premiers types peuvent être considérés comme négligeables le long du littoral du Grand Casablanca :

- les courants généraux sont de l'ordre de 25 cm/s et portent au Sud. Ils sont liés à la circulation de grandes masses d'eau océaniques et ne se font sentir qu'au large,
- les courants de marée sont faibles,
- les courants dus au vent ne dépassent pas 15 à 20 cm/s et ne concernent que la partie superficielle de la masse d'eau.

Seuls les courants dus à la houle sont susceptibles d'agir sur le transit littoral dont :

- les courants de translation et de compensation,
- les courants de retour,
- la dérive littorale,
- les courants d'expansion latérale.

3.1.4.2 L'embouchure de la vallée du Bouregreg

Dans l'estuaire, les courants généraux seront dus à la marée et aux agitations en dehors de toutes crues du Bouregreg. En période de crues, les vitesses générées prédomineront au débouché de l'oued directement sur les autres.

Dans le cadre du Projet d'Aménagement de la vallée du Bouregreg, la société SABR Aménagement a lancé, parmi un ensemble d'études sectorielles, une étude hydraulique par simulations numériques dans le but de déterminer les conditions d'écoulement de l'oued

Il convient de noter qu'en absence de crues de l'oued, seule la marée y fait fluctuer le niveau d'eau et que même les marées exceptionnelles restent confinées dans le lit mineur de l'oued et ne provoquent aucun débordement.

Les résultats de **simulations pour les crues de fréquence de retour, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans** montrent que les vitesses maxima de l'écoulement ne dépassent pas dans la partie aval de l'oued 1,7 m/s (en crue millénale) et sont en moyenne de l'ordre 0,8 à 1 m/s. Et la surcote générée par l'écoulement à l'aval est de l'ordre de 2cm par rapport à la cote projet en mer prise égale à +1,13 m NGT (marée haute)

3.2 Le milieu sédimentaire

3.2.1 Caractéristiques sédimentaires générales du plateau continental

La répartition des principaux faciès sédimentaires sur le plateau continental atlantique marocain est sous le contrôle des facteurs hydrodynamiques, notamment la houle, et de ses courants de dérive.

La couverture sédimentaire du plateau continental montre dans la zone correspondante à la meseta côtière les **principaux faciès suivants** (in M. Idrissi, 2006): les vases, les sables bioclastiques et les sables terrigènes. Leur répartition se fait selon des bandes plus ou moins parallèles à la côte actuelle.

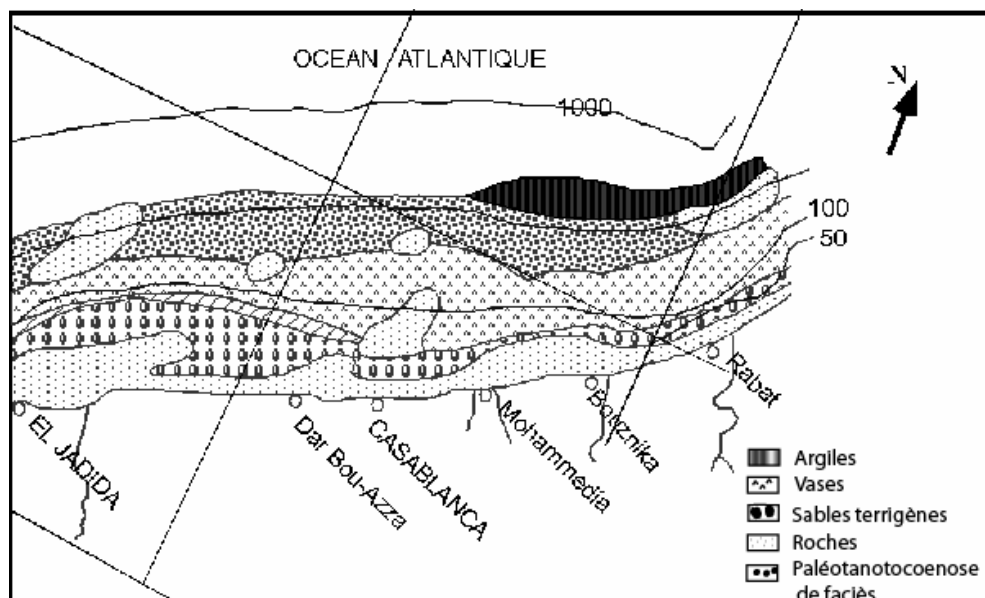
La carte des faciès du plateau continental de la région Casablanca - El Jadida (Jaaidi, 1981) montre deux types de faciès (cf. Figure 43):

- les faciès consolidés correspondant à des formations reconnues sur le continent. Ils sont constitués par des calcarénites dans la zone située au Nord d'El Jadida (Duplantier et al., 1979 ; Griboulard, 1980 ; Jaaidi, 1981),
- les faciès meubles constitués par des sables bioclastiques, des sables terrigènes et des vases. Ils s'étendent parallèlement au rivage.

L'hydrodynamisme de la zone interne du plateau continental atlantique marocain est sous le contrôle des agents hydrodynamiques marins et climatiques. On y rencontre une **sédimentation sableuse**. Ce sont des matériaux apportés par les fleuves, l'érosion des côtes et qui s'accumulent en un prisme littoral.

La zone médiane, entre les isobathes 80 et 120 m, correspond à un milieu de dépôt de faible énergie où les particules les plus fines se décantent pour alimenter une vasière. Cette zone présente un taux maximum en silts et en argiles (Jaaidi, 1981). Sur la bordure externe du plateau apparaît une augmentation de la granulométrie des particules.

Figure 43 : Carte des faciès du plateau continental marocain (Jaaidi, 1981).



3.2.2 Les transports sédimentaires

3.2.2.1 Rappel sur les mouvements sédimentaires

Le LCHF en 1985⁸ (issu d'un document LCHF de 1975⁹) a donné une description générale des mouvements sédimentaires dans le profil et parallèlement au rivage que nous présentons ci-après.

Mouvements dans le profil

Lorsque les fonds marins et les plages sont constitués par des matériaux mobiles, ceux-ci, sous l'action des houles, se modèlent et se déplacent jusqu'à ce que soit atteint un profil d'équilibre correspondant, entre autres paramètres, aux caractéristiques des sédiments et de la houle. Ce profil, lorsque la houle varie, évolue; les volumes de matériaux mis en jeu lors de ces mouvements peuvent être importants.

Ces évolutions du profil **se traduisent par des modifications des niveaux de la plage et des fonds marins et aussi de la répartition des matériaux dans le profil.**

Pente des profils de plage.

D'une manière générale la pente de la plage **va dépendre de la granulométrie du matériau et des caractéristiques de la houle.** Schématiquement, d'après une étude de Wiegél (1950) il apparaît que :

- à diamètre égal, la pente de la plage est d'autant plus forte qu'elle est protégée des houles,
- à agitation égale, la pente croît avec le diamètre.

Type de profils de plage

Depuis longtemps, il a été observé que les houles d'hiver (ou de tempêtes) érodaient le haut de plage, tandis que les houles d'été (ou de beau temps) avaient tendance à le reconstituer. Cette classification est encore utilisée de nos jours mais avec des appellations diverses :

- **profil d'hiver**, de tempête de forme concave ;
- **profil d'été**, de beau temps de forme générale convexe,

Sur la zone d'étude, les deux types de profils généralement rencontrés sont bien caractérisés par la présence ou non de barres qui se forment parallèlement au rivage, au droit de la ligne de déferlement.

Limite d'action des houles

Les mouvements dans le profil se font jusqu'à une certaine profondeur¹⁰, qui dépend des caractéristiques de la houle. Le LCHF, à partir de son expérience, admet qu'il a, dans une zone

⁸ Aménagement du débouché en mer de la rivière Aude - A.I.B.P.A.; C.N.A.R.B.R.L.; SMNLR - LCHF, nov. 1985

⁹ Action de la houle sur les sédiments - publication du CNEXO - LCHF, 1975

donnée, **peu de mouvements au-delà d'une profondeur égale à 2 à 2,5 fois la hauteur de la houle significative annuelle**. Cela rejoint par ailleurs les résultats de Halleimer (1981) qui indique que la profondeur limite de l'action d'une houle donnée est :

$$D = [2,28 - 10,9 H_o/L_o] H_o \text{ (en m)}$$

avec : H_o et L_o hauteur significative et longueur d'onde de la houle au large

Ainsi à Mohammedia, sur la base des houles enregistrées à entre 1983-2003 d'une houle significative de 3,4 m pour une période de 15s avec une occurrence de 10%, la profondeur de fermeture est de l'ordre de 7,5m. En conséquence, les mouvements sédimentaires s'effectueront entre la côte et - 7,5 m de profondeur mais ils seront maximaux au niveau de la plage et jusqu'aux fonds de -2 à -3m.

Pour les plus grandes houles d'hiver qui sont de l'ordre de 6 à 7m et qui représente moins de 0,3 % des observations, la profondeur de fermeture sera plus importante ; elle sera de l'ordre de 14m.

3.2.2.2 Le transit littoral

Les deux types fondamentaux de transport longitudinaux sont :

- à terre de la zone de déferlement, le transport par jet de rive,
- dans la zone de déferlement, le transport par le courant de houle.

Le **transport par jet de rive** provoque un transport en « dents de scie » dans le même sens que la houle. On considère en général qu'il ne représente qu'une faible partie des transports longitudinaux dus à l'action de la houle.

Dans la zone de déferlement, si l'obliquité de la houle par rapport au rivage est telle qu'il existe un courant littoral, les sédiments en suspension sont alors entraînés parallèlement au littoral créant ainsi un débit solide qui constitue quantitativement le mode de transport prédominant dû à la houle.

3.2.2.3 Le transport par le vent

Sous l'action du vent, des masses importantes de sable sec peuvent être déplacées contribuant à la formation des dunes littorales ou à l'ensablement d'infrastructures routières ou d'installations portuaires. Les volumes transportés dépendent en particulier des caractéristiques des sédiments et de la vitesse du vent mais ils dépendent également de l'humidité de l'air, de l'ensoleillement, de la superficie de plage exposée au vent, de la couverture végétale, de la salinité, de la proximité de la nappe d'eau, etc.

Les transports éoliens sont donc tributaires des conditions météorologiques (pluies, humidité, etc.) et océanographiques (marée, surélévation de la mer, embruns, etc.). Ces divers paramètres tendant à favoriser ou à réduire le transport éolien.

Les transports de sable peuvent se faire :

¹⁰ Deux critères sont à considérer : celui du début d'entraînement qui peut correspondre à de très faibles mouvements des grains tels qu'oscillations sans déplacement et, celui des mouvements d'une importance suffisante pour entraîner des modifications de profondeurs mesurables. C'est de ce dernier critère dont il est question dans ce rapport.

- de l'estran vers l'intérieur des terres lorsque soufflent les vents marins,
- du haut de plage vers la mer lorsque soufflent les vents terrestres.

A Casablanca et à Rabat, le vent ne semble pas être actuellement un facteur prépondérant de transport littoral sur le rivage.

3.3 Définition des risques en situation actuelle

3.3.1 La nature du littoral

Les côtes ne réagissent pas toutes et toujours de la même façon à une élévation du niveau de la mer. Selon la nature et la géomorphologie de la côte, l'impact lié à la surélévation du niveau des eaux se manifestera différemment:

- **Falaises** : Les falaises qui sont, par définition, des formes d'érosion, continueront à reculer mais à une vitesse plus importante que celle qui les caractérisait avant l'élévation du niveau marin.
- **Plages** : Les plages ne seront pas obligatoirement condamnées à disparaître. Elles peuvent rouler sur elles-mêmes et donc migrer vers l'intérieur des terres tant qu'un obstacle ne s'oppose pas à une telle dynamique. Cet obstacle peut être naturel (un escarpement ou une falaise morte par exemple) ou anthropique (des constructions). Dans ce dernier cas, et dans l'impossibilité d'une migration, c'est l'érosion qui s'accélérera et la plage finit par disparaître.
- **Zones basses** : Les terrains bas bordant le rivage seront, en plus de l'érosion de leur frange externe, submergés si leurs altitudes sont inférieures à la valeur de l'élévation du niveau marin. Lorsque les rivages sont constitués de matériaux perméables, ils peuvent subir des phénomènes de salinisation suite à l'intrusion des eaux marines.

3.3.2 Les zones à risque - Définitions

Les zones à risque du milieu littoral peuvent être définies par la **combinaison entre un aléa** (submersion et/ou érosion) qui affecte un espace particulier **et la sensibilité** du milieu (degré d'occupation et d'utilisation par les activités) qui peut se traduire en enjeux (enjeux socio-économiques et enjeux patrimoniaux)

Afin de pouvoir les évaluer, les analyses suivantes doivent être effectuées :

- **analyse des risques de submersion marine** (analyse des surcotes mesurées ou observées localement en période de tempêtes, extension des zones touchées par les eaux lors des submersions) en s'appuyant sur les données existantes et celles acquises après une reconnaissance sur site,
- **analyse des risques d'agression mécanique** par la houle conjugués aux effets de l'érosion du rivage,
- **évaluation des enjeux** existants et futurs exposés aux aléas pris en compte.

Les risques de submersion marine sont liés aux variations du niveau de la mer qui dépendent de la combinaison de différents facteurs :

- la marée astronomique,
- les facteurs météorologiques (vent, pression atmosphérique),

- les facteurs hydrodynamiques (set-up, surf-beat, etc.),
- la morphologie de la côte qui minimise ou accentue certaines actions,
- le temps d'application des facteurs érosifs.

Les variations séculaires du niveau des mers, et l'élévation récente sont aussi à prendre en compte.

3.3.2.1 La submersion marine : Définitions et généralités

Dans le guide méthodologique sur les PPR ¹¹ les submersions marines sont définies comme « des **inondations temporaires de la zone côtière par la mer** dans des conditions météorologiques (fortes dépressions et vent de mer) et marégraphiques sévères provoquant des ondes de tempête (ou storm surge). Elles envahissent en général des terrains situés au dessous du niveau des plus hautes eaux mais parfois également au-dessus si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protections ».



Zones inondées de la baie de l'Aiguillon (France) le 04/03/2010 après la tempête XYNTHIA du 28/02/2010 par suite d'une surcote marine de +1,5m concomitante d'une grande marée (coef. 102)

¹¹ Plans de prévention des risques littoraux (PPR) – guide méthodologique – La documentation française, 1977.

Les submersions **peuvent être dues** :

- à la rupture ou à la destruction d'un cordon dunaire,
- au débordement ou à la rupture d'ouvrages de protection longitudinaux ou encore à leur franchissement exceptionnel par des « paquets de mer »,
- à des vagues de forte amplitude (tsunamis) provoquées par des glissements sous marins ou des tremblements de terre.

Les submersions marines sont **généralement de courte durée** (quelques heures à exceptionnellement à quelques jours) en raison de leur origine. Elles se traduisent par l'invasion des biens bâtis ou non bâtis par des eaux salées.

3.3.2.2 L'aléa érosion : Définitions et généralités

Dans le guide méthodologique sur les PPR, « *la zone d'aléa érosion correspond à la **bande de terrain « érodable » à l'échéance de 100 ans** (dans le cas de la présente étude cette échéance a été fixée à 2030 soit dans 20 ans) . Cette zone n'est pas définie par une probabilité d'occurrence qui est difficile à appréhender. En effet chaque tempête possède une probabilité d'occurrence conjuguant à la fois la probabilité d'apparition d'un niveau extrême de la mer (marée + surcote) et la probabilité d'occurrence d'une agitation de la mer* ».

La délimitation de cette zone **s'appuie donc sur la détermination du taux annuel moyen d'érosion** mis en évidence lors des études diagnostics. Et son évolution est à extrapoler sur le long terme en considérant comme invariant le taux moyen annuel calculé.

La détermination de l'aléa érosion à l'horizon 2030 peut s'appuyer sur ce principe : application du taux annuel moyen pour les 20 ans à venir basé sur les données de diagnostic existantes. Toutefois, à ce recul « moyen annuel » va se rajouter l'effet sur le littoral du à l'élévation du niveau des eaux en relation avec le changement climatique. Cet effet va amplifier le recul des littoraux sableux, s'il y en a déjà un, ou en favoriser un si les plages étaient stables auparavant. L'application de la règle de Bruun sur la base de la valeur de l'élévation du niveau des eaux à l'horizon 2030 va conduire à estimer une fourchette de recul de la ligne de rivage sur la durée de l'élévation du niveau d'eau en fonction du profil de plage. Cette valeur ramenée également à un taux moyen annuel devrait se rajouter au taux moyen annuel d'érosion liée aux conditions locales hydrodynamiques (houles, courants) car celles-ci n'auront pas, *a priori*, changé. Il est très probable que le phénomène de recul du aux conditions hydrodynamiques locales et à la surélévation du niveau des eaux en relation avec le changement climatique ne soit pas linéaire, mais la fourchette de valeurs obtenues donnera néanmoins une information sur l'ampleur du recul potentiel ; et les valeurs obtenues ne pourront être inférieures au taux moyen annuel d'érosion mis en évidence lors des études diagnostics.

En présence d'ouvrages le long du littoral, les principes posés dans le guide seront retenus, à savoir :

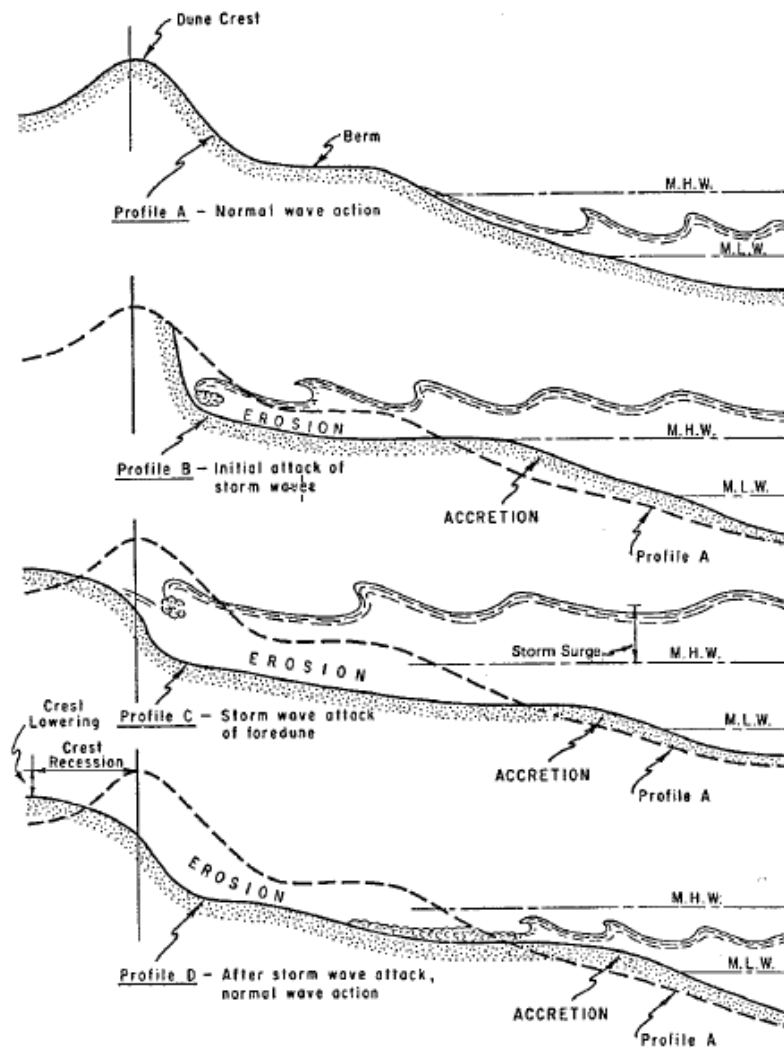
- « *pour les aménagements et ouvrages qui ne fixent pas le trait de côte (épis, brise-lames, rechargements, protections dunaires), l'effet des ouvrages est pris en considération dans l'évolution future du trait de côte ce qui revient à intégrer l'efficacité passée des ouvrages et à parier sur leur pérennité* »,
- « *pour les ouvrages longitudinaux qui fixent la position du trait de côte (digues, enrochements), l'aléa résulte principalement de ruptures en principe limitées et rapidement*

réparées. Il est donc rare d'enregistrer un réel recul du trait de côte sauf si les ouvrages ne sont pas dimensionnés pour les conditions hydrodynamiques du site. Dans ce cas, la zone d'aléa sera fixée en extrapolant l'évolution annuelle des zones voisines non protégées en s'assurant qu'elles ne présentent pas de grande variabilité ».

Au terme de cette analyse des risques et d'évaluation des enjeux, il peut donc être évalué le niveau de contribution des aménagements envisagés à l'amélioration de la sécurité des biens et des personnes.

La figure ci-après extraite du Shore Protection Manual (CERC, 1984) illustre **l'effet des vagues sur le littoral en relation avec un haut niveau des eaux**. Si la plage n'est pas suffisamment large pour amortir la houle ou si le haut de plage est limité par des aménagements « durs » (habitations, murs longitudinaux, etc.), l'érosion du profil de plage est exacerbée et des affouillements apparaissent aux pieds des points « durs » favorisant leur déstabilisation.

Figure 44 : Schéma de l'attaque par les vagues de tempête de la plage et de la dune (Shore Protection Manual, vol 1, Coastal engineering research, 1984)



4 Ressources et besoins en eau

4.1 Études de référence

4.1.1 Étude d'évaluation des eaux de surface de la zone d'action de l'agence de bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (Royaume du Maroc – Agence de bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia – CID - Avril 2004)

Cette étude a pour objectif l'évaluation des eaux de surface sur tout le territoire de l'agence de bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia. Elle comporte plusieurs missions :

- Mission I : Analyse critique des données pluviométriques, actualisation des séries pluviométriques, établissement des cartes des isohyètes et détermination des courbes IDF.
- Mission II : Analyse critique des données hydrométriques, établissement des séries mensuelles des débits et évaluation du potentiel des eaux de surface.

4.1.2 Étude du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (PDAIRE)

Le PDAIRE, démarré en 2005, est composé de plusieurs missions :

- Mission I du PDAIRE : Évaluation des ressources en eau et des systèmes aquatiques
 - Sous-mission 1.1 : présentation de la zone d'étude
 - Sous-mission 1.2 : évaluation quantitative des ressources en eau souterraines et des écosystèmes :
 - Sous mission 1.3 : Evaluation quantitative des ressources en eau
 - Sous mission 1.4 : diagnostic des ouvrages hydrauliques
- Mission II : Évaluation des besoins en eau et utilisations potentielles des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques
- Mission III : Confrontation Ressources Besoins et définition des objectifs du PDAIRE :
 - Sous mission III.1 : Elaboration du modèle de planification du schéma du système hydraulique actuel et confrontation ressources besoins
 - Sous mission III.2 : Définition des objectifs du PDAIRE
- Mission IV : Élaboration du PDAIRE, des conditions de sa mise en œuvre et de son système d'information (mission en cours).

Les missions III et IV du PDAIRE sont en cours. Pour la mission III, un rapport provisoire datant de 2006 est disponible. Ce rapport ne prend pas en compte l'ensemble des données de la Mission II, finalisée en 2008.

4.1.3 Schéma directeur AEP actualisé (LYDEC – SAFEGE - 2006)

Ce schéma directeur fournit les informations sur la distribution, la consommation en eau et la projection des besoins jusqu'à l'horizon 2027, pour le Grand Casablanca.

4.2 Analyse de la situation actuelle au regard de la ressource

4.2.1 Eaux de surface

Trois principaux systèmes de prélèvements des eaux de surface sont exploités pour l'alimentation en eau, à partir de volumes régularisés par des barrages :

- Le système Bouregreg, qui est la ressource principale
- Les systèmes Douarat et Sidi Said Mâachou complètent la ressource du Bouregreg

Barrage SMBA : système Bouregreg

La ressource en eau pour l'alimentation en eau des villes côtières entre Salé et Casablanca est assurée principalement par le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA), construit sur l'oued Bouregreg, d'une capacité de 1000 Mm³. L'adduction à partir de ce barrage se fait sur une distance de 80km jusqu'à Casablanca, en desservant les villes de Rabat-Salé, Temara-Skhirat, Bouznika, Ben Slimane, Mohammedia et Casablanca.

Après la surélévation du barrage, finalisée en 2006, le volume régularisable garanti à 100% est de 300 Mm³. Les apports moyens annuels au barrage sont estimés à 659 Mm³, avec des pertes par évaporation de 43 Mm³, et des volumes déversés de 316 Mm³. Jusqu'à cette date, **le volume régularisable garanti à 100% est de 212 Mm³**.

L'estimation des apports a été effectuée au pas de temps mensuel (Mission II de l'étude CID) par une modélisation pluie-débit. Le modèle utilisé est un modèle de fonction de production prenant en compte la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle (dépendant de la température). Les températures mensuelles prises en compte sont des moyennes interannuelles. Ce modèle qui comporte 4 paramètres de calage, est **calé sur les apports de la période 1972-2002**. La période de calcul est la période 1939-40 / 2002-03. Il existe une variation importante des apports entre la période « longue » (depuis 1939), et la période plus récente (depuis 1972). Les données prises en compte dans le plan directeur sont les données de la période 1939-2002, (moyenne annuelle des apports respectivement de 660 Mm³ (période longue) et 489 Mm³ (période courte). La période ancienne (avant 1972) résulte des calculs du modèle pluie-débit, avec des données de pluie reconstituées *a priori* à partir d'une seule station ancienne : El Kansera. Les estimations d'apports de cette période comportent donc des incertitudes relativement importantes. La valeur de **660 Mm³** prise en compte résulte d'ailleurs d'une décision concertée, prenant en compte une série d'apports obtenue par d'autres méthodes (série DRPE basée sur l'indice régional). La valeur moyenne des apports calculée à l'aide du modèle pluie-débit sur la période 1939-2002 est en fait de 569 Mm³, et une autre méthode par corrélation directe avec les apports au barrage El Kansera donne un résultat de 814 Mm³.

Systèmes Douarat et Sidi Said Mâachou

Les barrages de dérivation de Daourat et de Sidi Said Mâachou alimentent deux adductions, et **contribuent en partie à l'alimentation en eau de Casablanca**. Ces barrages exploitent les eaux de l'oued Oum Er Rabia (situé au Sud-Ouest de Casablanca), dont les eaux sont

régulées par le barrage El Massira. Le barrage El Massira mis en service en 1979 a une capacité de 2 785 Mm³. Son volume régularisable est de 1 130 Mm³.

Le bassin de l'Oum-Er-Rabia a une superficie de 33 520 km² et prend son origine dans le moyen Atlas à une altitude de 1800 mètres. Ses apports moyens sont évalués à 3360 Mm³/an, avec un minimum de 1300 Mm³. Ses étiages sont soutenus par l'incidence de la fonte de la neige.

Les volumes transférés vers Casablanca en 2005 ont été respectivement de 50,1 Mm³ pour le système Douarat, et de 52,8 Mm³ pour le système Sidi Said Mâachou. La dotation annuelle à partir des ces deux systèmes est de 120 Mm³, cette dotation représente 11% du volume régularisable disponible.

4.2.2 Eaux souterraines

Nappe de la Maamora (système Fouarat Nord)

La nappe de la Maamora, située au Nord-Est de Salé est exploitée pour l'alimentation en eau potable. Avant la mise en service du barrage SMBA, elle desservait la zone côtière entre Kenitra et Casablanca. Du fait de l'accroissement des besoins en eau, **cette ressource est maintenant utilisée seulement pour les villes de Kenitra, Sidi Yahia El Gharb, Mehdia , Bouknadel et Salé**. Les volumes exploités ont été de 14,9 Mm³ en 2001, et 10.7 Mm³ pour Salé (y compris le centre Bouknadel).

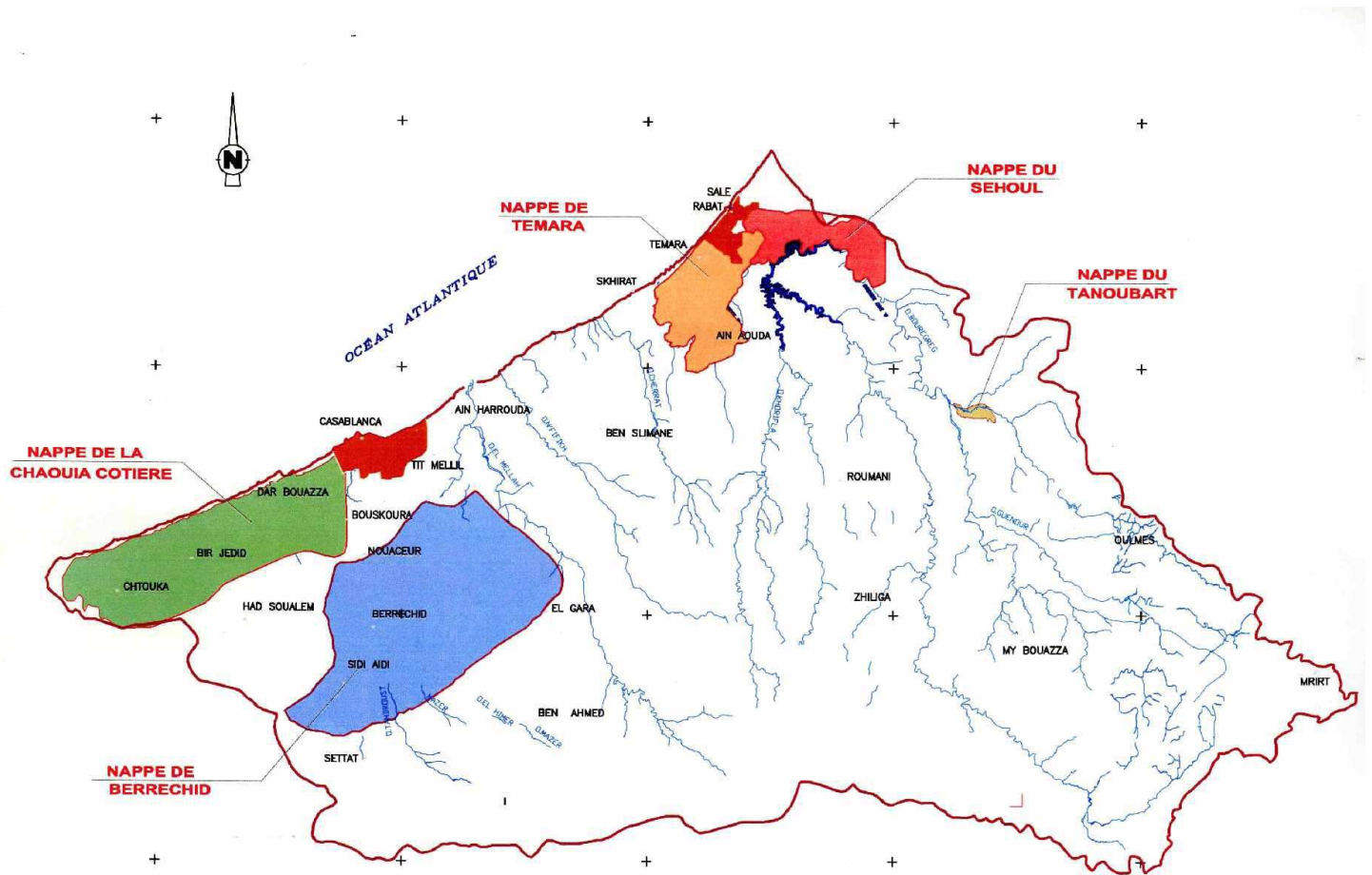
Nappes de Berrechid et de la Chaouia côtière

Les nappes de Berrechid et de la Chaouia côtière sont exploitées dans la **zone du Grand Casablanca pour des usages agricoles** :

- **La nappe de Berrechid** s'étend sur une surface de l'ordre de 1500 km². Elle est en situation de surexploitation. Le bilan établi en 2007 (cf. Mission 1.2 du PDAIRE) montre un déficit de 20 Mm³/an (apports 47 Mm³, sorties 67.5 Mm³ dont 58 Mm³ de prélèvements). Les prélèvements sont majoritairement agricoles (2 Mm³ pour l'AEP). La baisse du niveau piézométrique est d'environ 0.25 m/an sur toute l'étendue de la nappe, de 0.5m sur la moitié de l'étendue de la nappe et de 0.8 m sur le tiers de l'étendue de la nappe. La qualité de l'eau est qualifiée de mauvaise.
- **La nappe de la Chaouia côtière** est soumise sur sa frange littorale à des intrusions d'eau salée suite à sa surexploitation dans les années 1970-1980. L'usage est essentiellement agricole, et lié au fort développement du maraîchage. La réduction des prélèvements qui s'en est suivie du fait de la qualité de l'eau impropre à l'agriculture a permis à la nappe de réduire son déficit. Les prélèvements moyens dans cette nappe sont estimés à 30.6 Mm³ par an sur la période 1995-2003. Le bilan déficitaire est de - 11Mm³ par an. La baisse du niveau piézométrique est d'environ 0,5 m/an. La qualité des eaux de cette nappe est qualifiée de très dégradée.

La Figure 45 représente la position des principales nappes de la zone hydrographique de l'Agence de bassin du Bouregreg et de la Chaouia.

Figure 45 : Carte des principales nappes de la zone hydrographique de l'Agence de bassin du Bouregreg et de la Chaouia



Remarque : le barrage El Malleh sur l'oued El Malleh contribuait également à l'alimentation en eau du Grand Casablanca, mais sa capacité est maintenant réduite du fait de son ensablement (5 Mm³ au lieu de 18 Mm³).

Chapitre 4 - Elements d'évaluation des aléas à l'horizon 2030

1 Climat et évènements climatiques exceptionnels

Cette partie est basée essentiellement sur l'étude réalisée par Maroc-Météo dans le cadre du présent projet.

Références de l'étude : F. Driouech, R. Sebbari, A. Mokssit, A. Nmiri, M.I. OMAR , A. El-Hadidi, D. Bari, (2009) : Scénarios de changement climatique au niveau des villes côtières d'Afrique du nord : Alexandrie, Casablanca, Rabat et Tunis. Projet de la Banque Mondiale « Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord ».

1.1 Introduction

Le réchauffement du système climatique est, selon le Groupe de Travail I du GIEC, sans équivoque et ses effets sont au moins partiellement inévitables dans le demi-siècle à venir. Plusieurs changements résultants sont perceptibles aux échelles continentales et régionales (GIEC, 2007a). Ils ont concerné différents aspects dont les évènements extrêmes comme la sécheresse, les fortes précipitations et les vagues de chaleur.

L'Afrique est le continent le plus vulnérable au changement du climat (GIEC, 2007b) et le réchauffement au cours du 21 siècle y serait plus accentué que le réchauffement global et plus important au niveau de ses régions subtropicales qu'aux tropiques. Les cumuls pluviométriques sont supposés décroître dans la majeure partie de l'Afrique méditerranéenne et au nord du Sahara (Christensen et al., 2007).

La mise en place de stratégies d'adaptation visant la minimisation des impacts négatifs du changement du climat sur les populations et les écosystèmes devient donc une nécessité pressante et bon nombre de pays en sont maintenant conscients. Pour ce faire, les décideurs ont **besoin d'informations climatiques à des échelles locales**.

Étant donné que les **modèles de circulation générale (MCG)** sont généralement tournés avec des résolutions spatiales de l'ordre de la centaine de kilomètres dans les meilleurs des cas et d'environ 250 km dans la plupart des cas, ils ne permettent pas d'accéder aux échelles spatiales locales. Leurs sorties ne peuvent être directement utilisées par exemple pour alimenter les modèles d'impacts qui représentent un passage incontournable dans tout processus d'élaboration de stratégies d'adaptation qui se veut être fondé et objectif. Rappelons en effet que les forçages et les circulations qui modifient le climat régional se produisent généralement à des échelles spatiales plus fines que les quelques centaines de km et peuvent conduire à des conditions climatiques régionales bien différentes de ce que présuppose l'état climatique global.

Les techniques de **réduction d'échelle (downscaling)** spatiale sont alors utilisées pour obtenir des données climatiques à plus haute résolution. Elles servent notamment à élaborer des scénarios de changement climatique à échelles spatiales fines à partir de sorties de MCG à résolution plus grossière. Les techniques de réduction d'échelle spatiale se divisent

en méthodes statistiques (Wilby et al. 1998, Wilby et al. 2002) et en méthodes dynamiques incluant les MCG (Cubasch et al., 1995) à haute résolution, les MCG à résolution variable (Déqué et Pièdelièvre, 1995 ; Mc Gregor, 1996) et les modèles régionaux du climat à aire limitée (Giorgi, 1990 ; Jones et al., 1995 ; Rummukain et al., 2001).

Les **méthodes statistiques** incorporent les techniques de typologie météorologique, les fonctions de transfert ou régression et les générateurs stochastiques de données météorologiques. La technique de réduction d'échelle statistique (Hewitson et Crane, 1996), consiste à établir une relation statistique entre des prédictants (par exemple, les précipitations en un lieu donné) et des prédicteurs (par exemple, le géopotential à 500 hPa) pouvant être obtenue à partir de simulations de modèles de circulation générale (MCG). Cette relation, dérivée d'observations, est ensuite appliquée aux données des simulations du MCG du climat futur afin d'obtenir des informations sur les changements climatiques à l'échelle locale. En plus de la méthode de base qui vient d'être décrite, on peut trouver diverses variantes (Giorgi et al., 2001; Christensen et al., 2007). Les méthodes de réduction d'échelle statistique sont peu coûteuses en moyens de calcul et peuvent facilement être appliquées aux résultats des MCG à condition de disposer de longues séries d'observations de paramètres météorologiques comme les précipitations ou les températures. Elles reposent, cependant, sur l'hypothèse fondamentale que la relation statistique « prédictants – prédicteurs » établie à l'aide de l'information sur le climat actuel est également valide pour le futur (Hewitson et Crane, 1996 ; Solman et Nuñez, 1999). Cette hypothèse est difficile à vérifier tenant compte du fait que les conditions avec un forçage de gaz à effet de serre (GES) accru devraient être très différentes de celles que l'on retrouve dans les archives de données anciennes utilisées pour établir les modèles de réduction d'échelle statistique.

Les **méthodes dynamiques** utilisant les MCG à haute résolution sont les outils de régionalisation les plus coûteux et requièrent généralement de gros systèmes informatiques.

Signalons que les méthodes de descente d'échelle dynamiques et statistiques peuvent être utilisées de manières combinées ou successives; il s'agit des **techniques dites « mixtes »** de descente d'échelle.

1.2 Données et méthodologie utilisées

1.2.1 Données de modélisation

L'étude consiste à faire une évaluation des scénarios futurs de changement climatique, en utilisant les données issues de **méthodes de descente d'échelle dynamique**. Les méthodes concernées sont la descente d'échelles à l'aide de modèles régionaux de climat (RCM) et la descente d'échelle à l'aide de modèles de circulations générale à résolution variable.

Avant de procéder aux analyses des changements projetés pour le climat en termes de moyennes, d'extrêmes et de distributions temporelles et fréquentielles, une brève description climatologique est proposée. Une synthèse des tendances observées est présentée à l'aide des données observées fournies par les services nationaux de météorologie.

Les évolutions futures du climat sont considérées en termes de:

- températures moyennes,
- vagues de chaleur et de froid,
- cumuls pluviométriques,

- évènements de fortes précipitations,
- évènements de sécheresse (examinée sous l'angle pluviométrique),
- variances et fréquence d'extrêmes.
- distribution temporelle de précipitation à travers la courbe de fonction de distribution cumulative (CDF).

Les évolutions futures de climat sont évaluées en utilisant les données quotidiennes de précipitations, températures maximales et minimales issues de descente d'échelle dynamique du **projet européen ENSEMBLES** (<http://www.ensembles-eu.org>). Ce programme de R&D a parmi les objectifs d'affiner les projections climatiques du GIEC tout en quantifiant les incertitudes. Il s'agit des sorties des modèles à aire limitée (RCM) suivants : le modèle français (Aladin-Climat) d'acronyme CNRM (Centre Nationale de Recherches Météorologiques) et dont le forçage aux bords est issu du MCG ARPEGE-Climat (Météo-France), des sorties du modèle anglais (HadRM3) d'acronyme METO-HC (METOffice Hadley Centre) et dont le forçage aux bords est issu du MCG du Centre Hadley (HadCM3) et de celles du modèle Allemand (REMO) d'acronyme MPI-M (Max Planck Institute for Meteorology) dont le forçage aux bords est issu du modèle de circulation générale ECHAM5. Même si les villes concernées se trouvent généralement au sud des domaines de ces modèles, il y a avantage dans la haute résolution spatiale (25 km) des grilles des modèles. On utilise aussi les données quotidiennes de précipitations, températures maximales et minimales issues du modèle global à résolution variable ARPEGE-Climat de Météo-France. Ces données ont été mises à notre disposition par Météo-France.

Les données des trois modèles d'ENSEMBLES sont élaborées sous le scénario GIEC-A1B. Le modèle ARPEGE-Climat est considéré avec trois scénarios : A1B, A2 et B1.

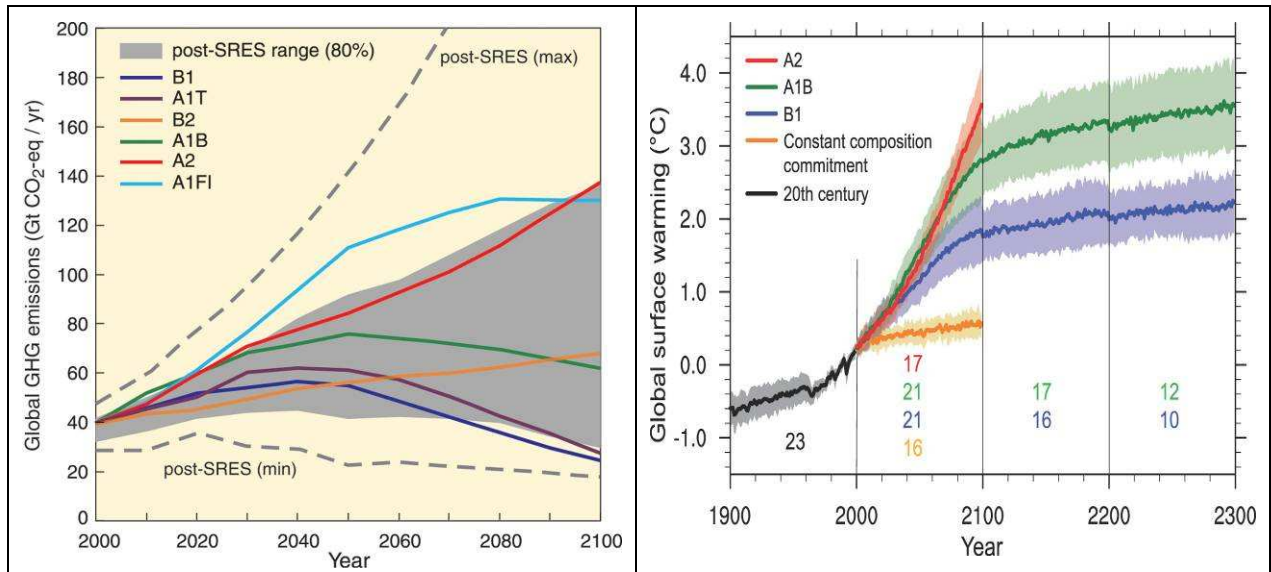
Les trois scénarios A1B, A2 et B1 considérés dans cette étude, font partie des 6 scénarios que le GIEC a définis dans son rapport spécial sur les scénarios d'émission (SRES).

A1B : Le scénario A1B fait partie de la famille de scénarios A1 qui décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide avec une population globale qui plafonne en 2050 et l'introduction rapide de technologies plus efficaces; les grandes régions du monde convergent économiquement et interagissent fortement. Le scénario A1B se distingue des deux autres scénarios de la famille (A1T et A1FI) par l'évolution technologique dans le secteur énergétique. Le scénario A1FI correspond en effet à un recours très intense aux ressources fossiles, A1T a recours rapide et exclusif à des sources non fossiles (A1T) et A1B correspond à un recours équilibré aux deux sources énergétique.

A2 : Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène (affaiblissement du mouvement de mondialisation) ou les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

B1 : Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent avec une population plafonnant en 2050 et une structure économique se tournant rapidement vers une économie de service et d'information et vers un développement durable global.

Figure 46 : Évolution des émissions et de la croissance de la température globale suivant les scénarios d'émission du GIEC. Source : quatrième rapport du GIEC.



L'utilisation de différents modèles-scénarios permet de couvrir une partie des incertitudes liées au changement climatique. En effet, parmi les grandes sources d'incertitudes relatives au changement du climat, figurent les incertitudes liées à la modélisation climatique et les incertitudes liées aux émissions de gaz à effet de serre (Terry et Braconnot, 2008).

Rappelons cependant que, sur un horizon 2030, **l'effet de la variabilité naturelle est très important.** En d'autres termes, deux simulations du même modèle, avec le même scénario d'émission de gaz à effet de serre peuvent aboutir à des résultats significativement différents. Cela est lié au comportement chaotique du système climatique (oscillation El Niño, NAO, etc.), et aux forçages naturels (soleil, volcan, etc.). En revanche, sur cet horizon (2030), la différence entre deux scénarios d'émissions est quasi-nulle (il suffit de regarder les courbes de concentration de CO₂, qui divergent seulement vers 2050). En conséquence, il convient d'avoir à l'esprit que pour un même modèle, la différence entre les résultats faits avec les scénarios B1 et A2 ne vient pas de la différence d'émission, mais seulement du fait que ce sont deux simulations différentes, qui peuvent conduire à des résultats différents (voir article de Terry et Braconnot).

Les trois RCM CNRM, METO-HC et MPI-M sont désignés aussi dans ce document respectivement par CNR_A1B, MET_A1B et MPI_A1B. Le modèle ARPEGE-Climat est désigné suivant le scénario considéré par ARPG_A1B, ou ARPG_A2 ou ARPG_B1.

1.2.2 Horizon

Les projections futures de changement climatique sont considérées à **l'horizon 2030** ; soit la période 2021-2050. Les changements sont déduits en comparant le climat de cette période dite « Futur » à celui de la période 1961-2000 dite « Présent » ou référence.

1.2.3 Calibrage des données

Les modèles d'impact représentent un moyen principal d'appréhension et d'évaluation des effets possibles du changement du climat sur les écosystèmes et les secteurs socio-économiques (ressources hydrologiques, production agricoles, ...). Ils sont en général basés sur des outils statistiques calibrés avec les données météorologiques observées. Ces modèles sont souvent non linéaires et sensibles aux effets de seuil. Il est donc important que les données relatives au climat présent et issues de MCG ou de RCM aient dans la mesure du possible des propriétés statistiques similaires à la série observée. Rappelons que les données de modélisation climatique constituent une composante principale des données d'entrée des modèles d'impacts.

Dans cet objectif, la méthode de **calibrage à l'aide des quantiles** (quantiles-quantiles plots « qqplots ») (Déqué, 2007) est appliquée aux données quotidiennes de précipitations et de températures minimales et maximales. Cette méthode, qui correspond à l'état actuel de l'art dans le domaine, a été utilisée dans le cadre du projet IMFREX visant l'évaluation de l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations sur la France (www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/final-4-02.pdf). Elle consiste à aligner (voir Figure 47) la courbe quantile-quantile, obtenue en traçant les centiles des données modèles en fonction de ceux observés, sur la diagonale, soit avoir les mêmes centiles pour le modèle et pour l'observation. Les valeurs comprises entre deux centiles successifs sont calibrées linéairement. Il est important de signaler que si la méthode des qqplots améliore certaines caractéristiques de la distribution statistique, elle n'améliore pas forcément les propriétés temporelles telles que la persistance, puisqu'elle ne tient pas compte de l'ordre chronologique de la série. Précisons que cette méthode suppose, comme la plupart des méthodes de correction se basant sur le climat présent, que le modèle ferait grosso modo le même type d'erreurs ou biais dans le climat présent que dans le futur, abstraction faite du changement climatique.

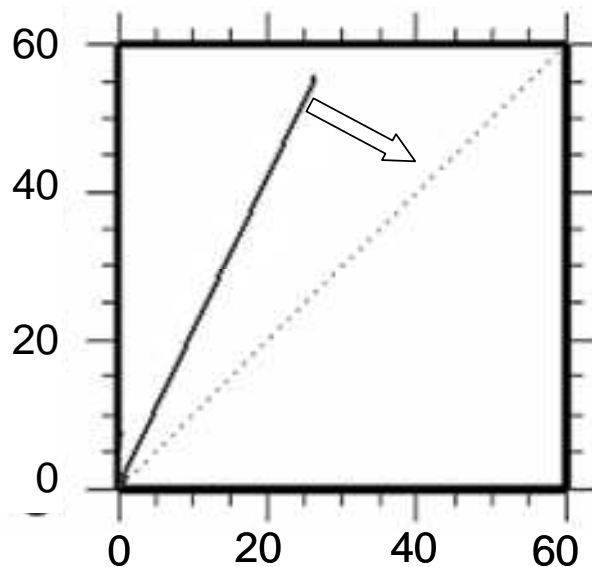
Soulignons également que, pour les précipitations extrêmes, la méthode QQ est appliquée à des modèles à 25 ou 50km de résolution. Si ces modèles ne sont pas capables de reproduire les conditions physiques qui mènent à des précipitations extrêmes (c'est le cas sur les Cévennes en France, par exemple, car les précipitations dépendent de l'orographie à une échelle très fine), la correction QQ n'apportera pas forcément plus d'information. **Cette méthode reste donc limitée pour le cas des précipitations extrêmes**, et il faut prendre ses résultats avec une grande prudence. D'une manière générale, les précipitations extrêmes sont les phénomènes les plus difficiles à reproduire, et anticiper leur changement avec le changement climatique reste très compliqué et incertain. Il faut donc bien faire la différence entre les extrêmes de sécheresse (pour lesquels la méthode QQ fonctionne très bien), et les extrêmes d'intensité de pluie (pour lesquels la méthode fonctionne mal, et donc l'incertitude reste grande)¹².

La méthode qqplots est **appliquée pour chacune des quatre saisons séparément**. A chacune des stations météorologiques on attribue le point de grille du modèle le plus proche. La

¹² Cette méthode revient à supposer implicitement que le modèle est capable de simuler la catégorie et le rang d'un évènement pluvieux mais pas forcément les valeurs quantitatives, c'est à dire que la « prévision » jour très pluvieux suivi par jour très sec est qualitativement juste et que le seul problème concerne les valeurs quantitativement associées aux évènements « très pluvieux » et « très secs » dans le modèle.

période de calibrage est 1961-2000 pour les données observées et celles du climat présent issues des modèles.

Figure 47 : Représentation schématique de la méthode de calibrage qqplots.



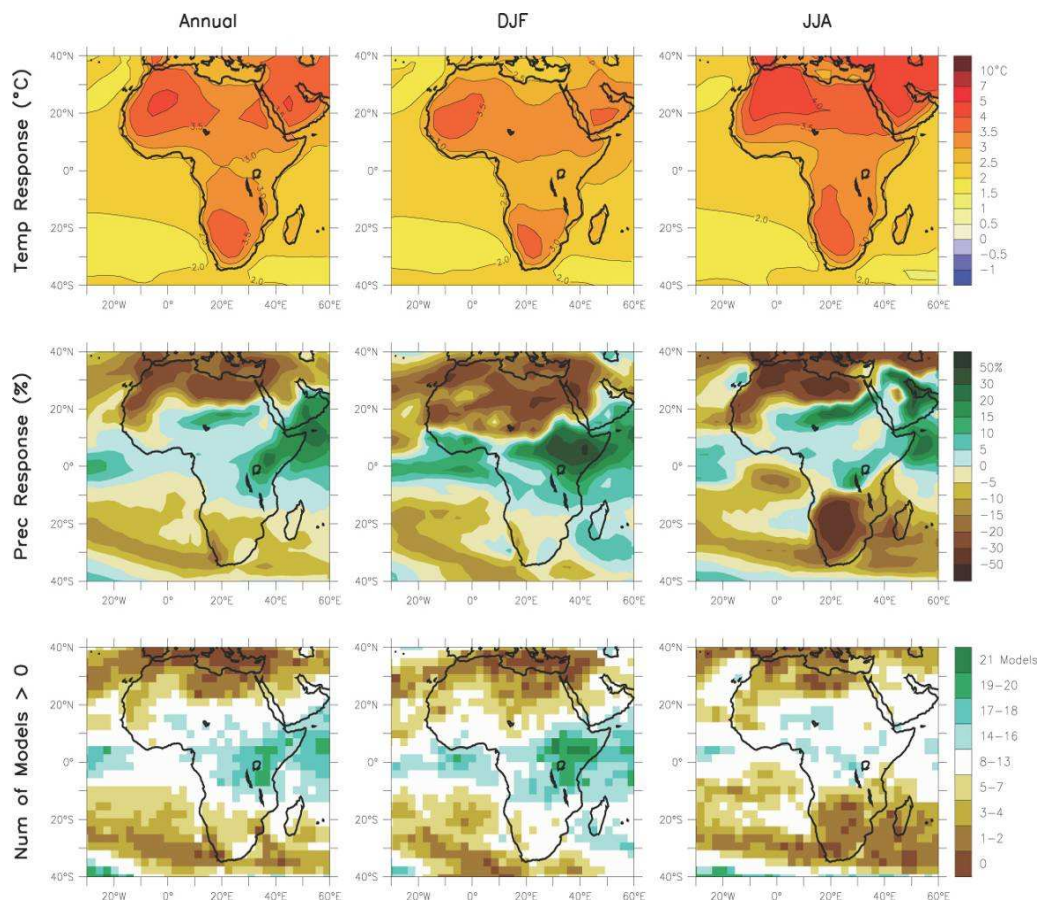
1.3 Projections futures de changement climatique

1.3.1 Généralités

Basé sur les MCG à résolution relativement faible, **le quatrième rapport du GIEC** projette, sous le scénario A1B, pour la fin du siècle un réchauffement en été de 3 à 4 °C pour les régions d'Alexandrie, Rabat, Casablanca et Tunis.

Pour la présente étude, les changements futurs à l'horizon 2030 (2021-2050) des caractéristiques climatiques sont évalués à l'aide des données quotidiennes de précipitation et de température maximale et minimale résultat de la méthode de réduction d'échelle dynamique et issues des modèles d'ENSEMBLES avec le scénario A1B et du modèle ARPEGE-Climat avec les Scénario A1B, A2 et B1 (voir partie « Données et méthodologie utilisées » ci-dessus). En plus des cumuls pluviométriques, des températures moyennes et des fréquences et périodes de retour d'extrêmes, différents indices de changement climatique (STARDEX indices, Goodess 2003) sont considérés dans ce rapport. Ces indices, sont calculés pour chaque modèle-scénario pour la période (dite présente ou de référence) 1961-2000 et pour le futur (2021-2050). Les changements sont obtenus en comparant les deux périodes.

Figure 48 : Changements de température et précipitation projetés pour l'Afrique pour la période 2080-2099 par rapport à 1980-1999.



Les changements sont moyennés sur les 21 modèles du GIEC. Les figures en bas représentent le nombre de modèles projetant une augmentation des précipitations (GIEC, 2007)

1.3.2 Définition des indices considérés

- **Vague de chaleur** : Une vague de chaleur est définie comme une succession d'un minimum de 6 jours avec une température maximale dépassant la normale climatologique par au moins 5°C. Pour chaque jour c alendaire la normale est calculée sur une fenêtre de 5 jours centrée sur celui-ci. Le calcul des normales est fait sur la période de référence.
- **Vague de froid** : Une vague de froid est définie comme une succession d'un minimum de 6 jours avec une température minimale inférieur à la normale climatologique par au moins 5°C. La normale climatologique est calculée de la même façon que pour les vagues de chaleur.
- **Période maximale de sécheresse** : c'est le nombre maximal de jours consécutifs secs. Tenant compte des sites concernés, un jour est considéré sec si son cumul pluviométrique est inférieur à 0.5 mm.
- **Période moyenne de sécheresse** : c'est la moyenne des nombres de jours consécutifs secs.

- **Nombre d'évènements de fortes précipitations** : c'est le nombre total de jours avec précipitation supérieur au 90^{ème} centile calculé sur les jours humides de la période de référence.

2 Changement climatique et élévation des niveaux marins

2.1 Les effets du changement climatique

Le tableau suivant présente les projections de l'élévation moyenne du niveau de la mer pour la période 2090–2099. Les projections ne tenant compte ni des incertitudes liées aux rétroactions entre le climat et le cycle du carbone, ni des effets complets de l'évolution de l'écoulement dans les nappes glaciaires, les valeurs supérieures des fourchettes ne doivent pas être considérées comme les limites supérieures de l'élévation du niveau de la mer. S'il a été tenu compte de l'accroissement de l'écoulement glaciaire au Groenland et en Antarctique aux rythmes observés entre 1993 et 2003, le phénomène pourrait cependant s'accélérer ou ralentir. **Un degré de confiance plus élevé que dans le troisième Rapport d'évaluation est associé aux projections concernant les configurations du réchauffement et d'autres particularités de portée régionale, dont la modification des régimes du vent, des précipitations et de certains aspects des phénomènes extrêmes et des glaces de mer.**

Tableau 5 : Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXI^{ème} siècle à l'échelle du globe

Cas	Variation de température (°C, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999) ^{a,d}		Élévation du niveau de la mer (m, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999)
	Valeur la plus probable	Intervalle probable	Intervalle basé sur les modèles sauf évolution dynamique rapide de l'écoulement glaciaire
Concentrations constantes, niveaux 2000 ^b	0,6	0,3 – 0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Scénario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Scénario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Scénario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Scénario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

Notes :

- Les valeurs les plus probables et les intervalles d'incertitude *probables* sont établis à partir d'une hiérarchie de modèles de complexité variable et compte tenu des contraintes d'observation.
- La composition constante en 2000 est déduite uniquement des modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan.
- Ces scénarios sont les six scénarios SRES de référence. Les concentrations approximatives (en équivalent-CO₂) correspondant au forçage radiatif calculé pour les GES et les aérosols anthropiques en 2100 (voir p. 823 de la contribution du Groupe de travail I au TRE) selon les scénarios SRES illustratifs de référence B1, A1T, B2, A1B, A2 et A1FI s'établissent respectivement à 600, 700, 800, 850, 1 250 et 1 550 ppm environ.
- La variation de température est calculée par rapport à 1980–1999. Il suffit d'ajouter 0,5 °C pour obtenir l'écart relativement à 1850–1899.

Parmi les changements anticipés à l'échelle régionale figurent :

- un réchauffement maximal sur les terres émergées et dans la plupart des régions des hautes latitudes de l'hémisphère Nord et un réchauffement minimal au-dessus de l'océan Austral et d'une partie de l'Atlantique Nord, dans la droite ligne des tendances relevées dernièrement ;
- une contraction de la couverture neigeuse, une augmentation d'épaisseur de la couche de dégel dans la plupart des régions à pergélisol et une diminution de l'étendue des glaces de mer ; selon certaines projections obtenues avec les scénarios SRES, les eaux

de l'Arctique seraient pratiquement libres de glace à la fin de l'été d'ici la deuxième moitié du XXI^e siècle ;

- une hausse très probable de la fréquence des températures extrêmement élevées, des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations ;
- une augmentation probable d'intensité des cyclones tropicaux et, avec un degré de confiance moindre, une baisse du nombre de cyclones tropicaux sur l'ensemble de la planète ;
- le déplacement vers les pôles de la trajectoire des tempêtes extratropicales, accompagné de changements dans la configuration des vents, des précipitations et des températures ;
- une augmentation très probable des précipitations aux latitudes élevées et, au contraire, une diminution probable sur la plupart des terres émergées subtropicales, conformément aux tendances relevées récemment.

Les études postérieures au TRE permettent de mieux comprendre la chronologie et l'étendue des incidences selon l'ampleur et le rythme des changements climatiques.

La Figure suivante présente des exemples de cette évolution pour un certain nombre de systèmes et de secteurs. Dans la partie supérieure sont indiquées des incidences qui s'accroissent parallèlement à la hausse des températures. Leur chronologie et leur ampleur estimées dépendent aussi des modes de développement (partie inférieure de la figure). Le Tableau 6 présente quelques incidences anticipées pour l'Afrique.

Il est *probable* que certains systèmes, secteurs et régions (liste non exhaustive ci-dessous) seront plus durement touchés que d'autres par l'évolution du climat.

Systèmes et secteurs

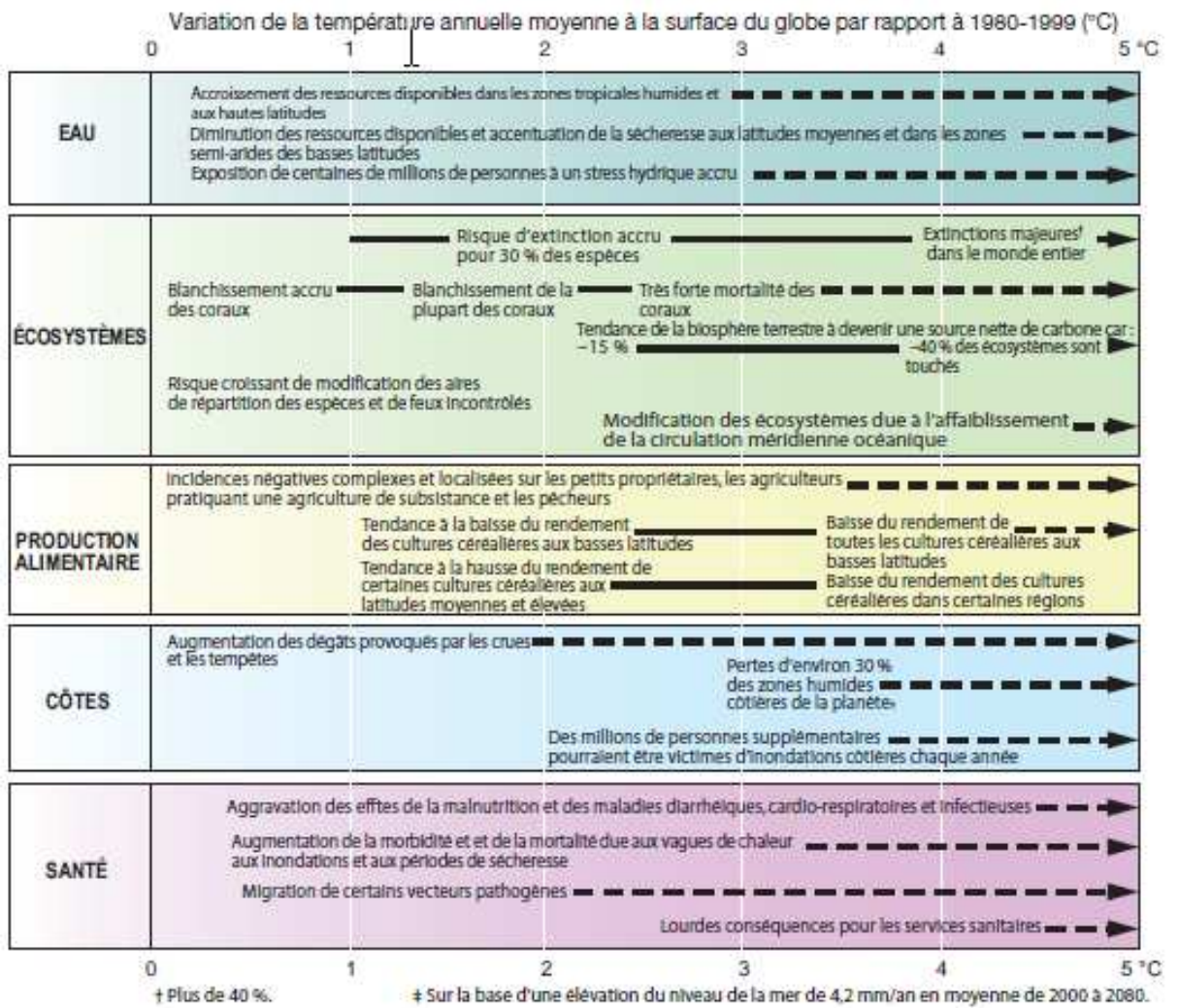
- Écosystèmes :
 - terrestres : toundra, forêt boréale et régions montagneuses, en raison de leur sensibilité au réchauffement ; écosystèmes de type méditerranéen à cause de la diminution des précipitations ; forêts pluviales tropicales dans les zones où la pluviosité diminue ;
 - côtiers : mangroves et marais salants soumis à de multiples contraintes ;
 - marins : récifs coralliens soumis à de multiples contraintes ; biome des glaces de mer, en raison de sa sensibilité au réchauffement ;
- Ressources en eau dans certaines régions sèches des latitudes moyennes et dans les zones tropicales sèches, à cause de la modification de la pluviosité et de l'évapotranspiration, ainsi que dans les zones tributaires de la fonte de la neige et de la glace ;
- Agriculture aux basses latitudes, sous l'effet de la raréfaction des ressources en eau ;
- Basses terres littorales, par suite de la menace d'une élévation du niveau de la mer et du risque accru de phénomènes météorologiques extrêmes ;
- État sanitaire des populations disposant d'une faible capacité d'adaptation.

Régions :

- Arctique, à cause de la vitesse du réchauffement et de ses incidences sur les systèmes naturels et les collectivités humaines ;
- Afrique, vu la faible capacité d'adaptation et les effets projetés ;

- Petites îles, en raison de la forte exposition de la population et de l'infrastructure aux effets projetés ;
- Grands deltas asiatiques et africains, étant donné la densité de population et la forte exposition à l'élévation du niveau de la mer, aux ondes de tempête et aux inondations fluviales.

Figure 49 : Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (ces incidences varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socio-économique)



Réchauffement en 2090-2099 par rapport à 1980-1999 pour des scénarios sans mesures d'atténuation

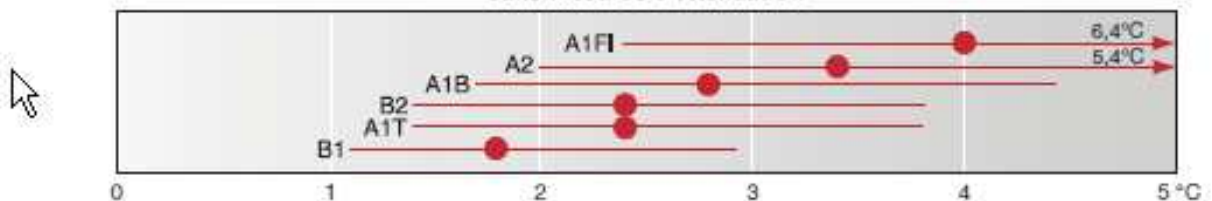


Tableau 6 : Exemple d'incidences régionales anticipées

Afrique	<ul style="list-style-type: none"> • Selon les projections d'ici 2020, 75 à 220 millions de personnes seront exposées à un stress hydrique accentué par les changements climatiques, • Dans certains pays, le rendement de l'agriculture pluviale pourrait chuter de 50% d'ici 2020. On anticipe que la production agricole et l'accès à la nourriture seront durement touchés dans de nombreux pays, avec de lourdes conséquences en matière de sécurité alimentaire et de malnutrition, • Vers la fin du XXI^e siècle, l'élévation anticipée du niveau de la mer affectera les basses terres littorales fortement peuplées. Le coût de l'adaptation pourrait représenter 5 à 10% du PIB, voire plus, • Selon plusieurs scénarios climatiques, la superficie des terres arides et semi-arides pourrait augmenter de 5 à 8% d'ici à 2080 (degré de confiance élevé)
---------	---

2.2 Elévation récente du niveau de la mer

2.2.1 Les variations du niveau de la mer au cours du XX^e siècle

Le Tableau 7 du TRE ci-après donne plusieurs estimations globales et régionales pour le XX^e siècle des tendances de l'élévation du niveau de la mer basées sur les données du « Permanent Service for Mean Sea Level » (PSMSL) (Woodworth and Player, 2003). Toutefois ces données ne sont pas homogènes en qualité et en durée d'observations. Le nombre et la répartition des marégraphes dans le passé ne sont pas comparables avec ceux d'aujourd'hui. Certains marégraphes n'ont pas fonctionné en permanence.

Tableau 7 : Estimation récentes de l'élévation du niveau des eaux à partir de mesures marégraphiques

	Region	VLM ^a	Rate ± s.e. ^b (mm/yr)
Gornitz and Lebedeff (1987)	Global	Geological	1.2 ± 0.3
Peltier and Tushingham (1989, 1991)	Global	ICE-3G/M1	2.4 ± 0.9 ^c
Trupin and Wahr (1990)	Global	ICE-3G/M1	1.7 ± 0.13
Nakiboglu and Lambeck (1991)	Global	Spatial decomposition	1.2 ± 0.4
Douglas (1991)	Global	ICE-3G/M1	1.8 ± 0.1
Shennan and Woodworth (1992)	NW Europe	Geological	1.0 ± 0.15
Gornitz (1995) ^d	N America E Coast	Geological	1.5 ± 0.7 ^c
Mitrovica and Davis (1995), Davis and Mitrovica (1996)	Global far field (far from former ice sheets)	PGR Model	1.4 ± 0.4 ^c
Davis and Mitrovica (1996)	N America E Coast	PGR Model	1.5 ± 0.3 ^c
Peltier (1996)	N America E Coast	ICE-4G/M2	1.9 ± 0.6 ^c
Peltier and Jiang (1997)	N America E Coast	Geological	2.0 ± 0.6 ^c
Peltier and Jiang (1997)	Global	ICE-4G/M2	1.8 ± 0.6 ^c
Douglas (1997) ^d	Global	ICE-3G/M1	1.8 ± 0.1
Lambeck <i>et al.</i> (1998)	Fennoscandia	PGR Model	1.1 ± 0.2
Woodworth <i>et al.</i> (1999)	British Isles	Geological	1.0

^a This column shows the method used to correct for vertical land motion. ICE-3G/M1 is the Post Glacial Rebound (PGR) model of Tushingham and Peltier (1991). ICE-4G/M2 is a more recent PGR model based on the deglaciation history of Peltier (1994) and the mantle viscosity model of Peltier and Jiang (1996). Nakiboglu and Lambeck (1991) performed a spherical harmonic decomposition of the tide-gauge trends and took the the zero-degree term as the global-average rate. They indicated that a PGR signal would make little contribution to this term. The use of geological data is discussed in the text.

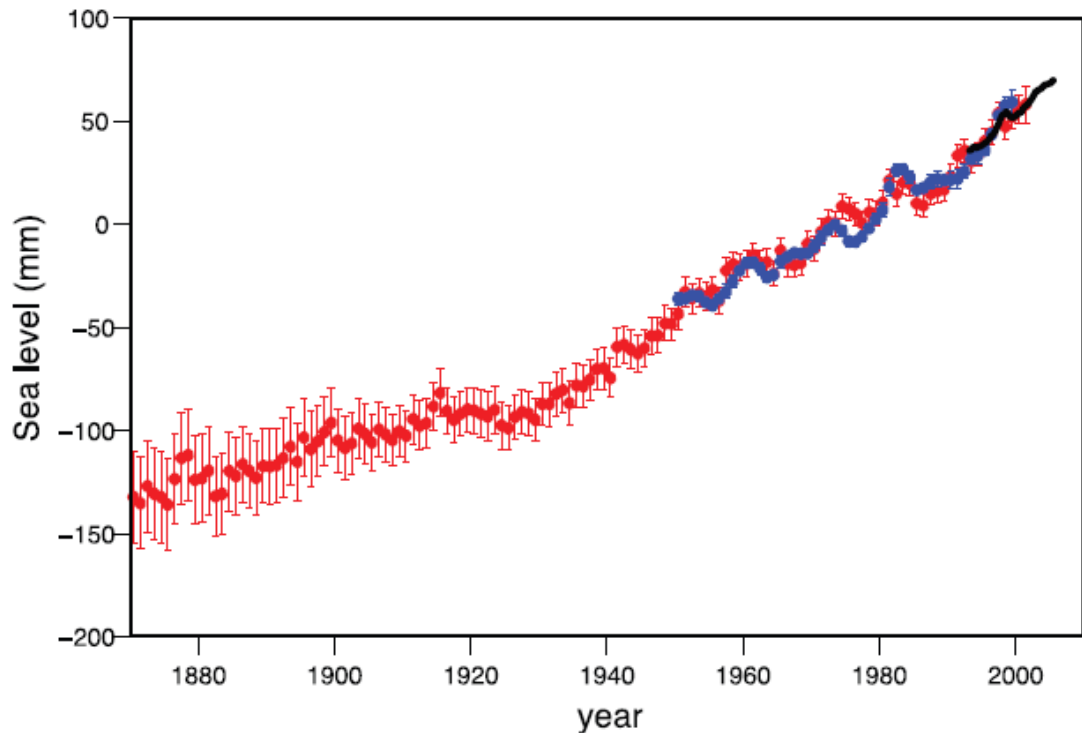
^b The uncertainty is the standard error of the estimate of the global average rate.

^c This uncertainty is the standard deviation of the rates at individual sites.

^d See references in these papers for estimates of sea level rise for various other regions.

La Figure ci-après illustre la comparaison de deux estimations d'élévation du niveau des eaux depuis 1900.

Figure 50 : Élévation moyenne du niveau des eaux en mm (à partir de données marégraphiques) depuis 1870 (mise à jour de Church and White, 2006)



La ligne bleue montre les données marégraphiques depuis 1950 (Holgate et Woodwoth, 2004) et la courbe noire est basée sur les données satellites (Leuliette et al, 2004).

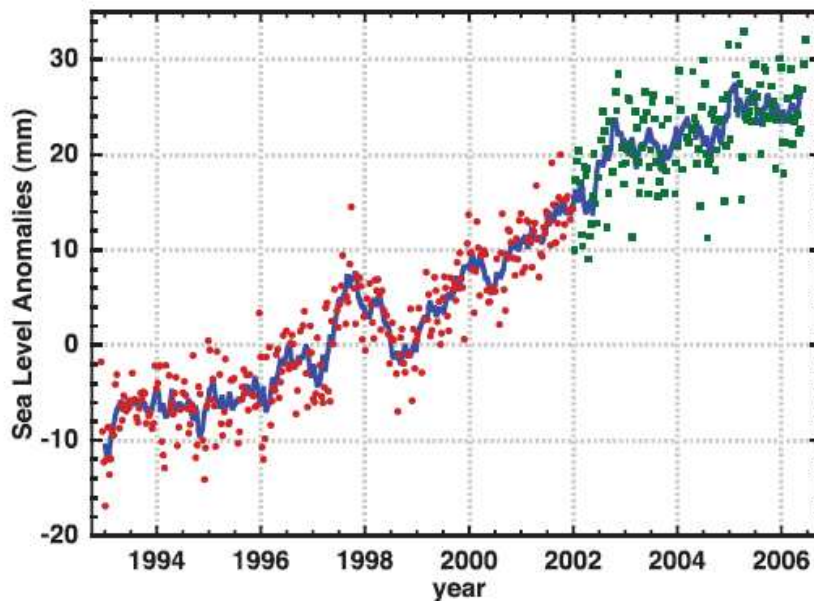
En s'appuyant sur les résultats retranscrits sur la courbe ci-dessus et en tenant compte des tendances mises en évidence par les mesures satellitaires (voir paragraphe ci-après), le taux estimé d'élévation du niveau de la mer pour la période 1961-2003 est de $1,8 \pm 0,5$ mm/an et pour le **XX^e siècle** de **$1,7 \pm 0,5$ mm/an**.

Alors que les publications récentes estiment que l'élévation du niveau de la mer pour les dernières décades restent à l'intérieur de la fourchette du TRE (1 à 2mm/an), il y a de plus en plus de chercheurs qui pensent que le taux est plus proche de 2mm/an que de 1mm/an La borne inférieure prise en compte dans le TRE résulte d'études locales et régionales dont la valeur peut différer du niveau moyen.

2.2.2 Évolution du niveau des eaux au cours des dernières décades

Depuis 1992, le niveau moyen de la mer peut être déterminé à partir des mesures altimétriques réalisées par les satellites TOPEX/Poseidon et JASON. Tous les dix jours, le niveau moyen de la mer est évalué avec une précision de 5mm. De nombreuses publications sur les résultats altimétriques (cf. Cazenave and Nerem, 2004, pour une synthèse) donnent **un taux moyen d'élévation** du niveau de la mer de **3.1 ± 0.7 mm/an pour la période 1993 à 2003** (Cazenave and Nerem, 2004; Leuliette et al., 2004; Figure 51).

Figure 51 : Variation du niveau moyen de la mer (différence entre la moyenne de 1993 à mi 2001) obtenue à partir des données altimétriques satellitaires de janvier 1993 à octobre 2005.



Les points correspondent aux données obtenues tous les 10 jours (de TOPEX/Poseidon en rouge et de Jason en vert). La ligne bleue correspond au lissage sur 60 jours des données des satellites. (Mise à jour de Cazenave and Nerem (2004) et Leuliette et al 52004)

2.3 Les principaux facteurs d'élévation du niveau de la mer

Les phénomènes responsables des variations actuelles du niveau moyen global de la mer peuvent être rangés en deux catégories ¹³:

- les changements du volume des océans résultant de variations de la densité de l'eau de mer, elles-mêmes causées par des variations de la température de l'océan;
- les changements du contenu en eau des océans (donc des masses d'eau) résultant d'échanges d'eau avec les autres réservoirs (atmosphère, réservoirs d'eaux continentales, glaciers de montagne, calottes polaires). Ces échanges d'eau avec l'atmosphère, se produisent par évaporation et précipitation. Les échanges avec les continents résultent de variations d'écoulement d'eau vers les océans via les réseaux hydrographiques. Enfin, les modifications de la masse des glaciers de montagne et des calottes polaires (le Groenland et l'Antarctique) constituent une troisième source d'échanges d'eau avec les océans.

¹³ Anny Cazenave - LEGOS/OMP UMR Univ/CNRS/CNES/IRD

Élévation du niveau de la mer due à l'expansion thermique

La densité de l'eau diminue lorsqu'elle se réchauffe et le volume d'eau augmente : elle se dilate avec la chaleur. L'analyse récente de données de température de l'eau de mer collectées au cours des 50 dernières années, nous apprend que l'océan, tout comme l'atmosphère, s'est réchauffé de façon importante au cours des dernières décennies. La chaleur accumulée dans l'océan, jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 1000 mètres, induit une dilatation thermique de la mer, ce qui fait monter son niveau. Les calculs montrent que le réchauffement de l'océan explique environ 25% de la hausse du niveau de la mer des 50 dernières années (0,4 des 1.8 mm/an observés).

La contribution de la dilatation thermique de la mer (due au réchauffement de l'océan) a triplé au cours de la dernière décennie (~1,5 mm/an pour la période 1993-2005, soit une contribution de l'ordre de 50% à la hausse observée).

Glaciers et calottes de glace³

Le réchauffement climatique est aussi responsable de la fonte des glaces continentales. La plupart des glaciers de montagne de la planète ont perdu une quantité considérable de leur volume au cours des dernières décennies. La fonte de ces glaciers est ainsi responsable d'environ 0,5 mm/an de la hausse du niveau de la mer observée pour la période 1950-2000. Il n'existe hélas aucune estimation quantitative de la contribution des calottes polaires à la hausse du niveau de la mer des dernières décennies. Remarquant que la somme de l'expansion thermique de l'océan et la fonte des glaciers n'expliquent que environ 1 mm/an sur les 1,8 mm/an observés, A. Cazenave (Lettre du Changement global n°19 - Programme International Géosphère Biosphère (IGBP) - Programme Mondial de Recherches sur le Climat (WCRP) - Programme International «Dimensions Humaines» (IHDP) - Diversitas - Earth System Science Partnership (ESSP) propose alors une fourchette pour la contribution des calottes polaires. Il faut toutefois mentionner une autre contribution potentielle : les changements des stocks d'eaux continentales liés à la variabilité climatique et aux activités humaines dont la valeur est hautement incertaine.

Au cours de la dernière décennie la fonte des glaciers de montagne s'est aussi accélérée. Des observations récentes indiquent que leur contribution atteint 1 mm/an pour ces dernières années. Alors que pour les dernières décennies, on ne dispose d'aucune observation fiable sur la contribution du Groenland et de l'Antarctique à la hausse du niveau de la mer, de nouvelles observations par satellites montrent une fonte importante des régions côtières du sud du Groenland. Le phénomène semble même s'accélérer, contribuant pour environ 0,2 mm/an à la hausse du niveau de la mer des années récentes. En revanche l'Antarctique n'a pour l'instant qu'une contribution négligeable. En effet, si on observe bien une fonte significative de l'Antarctique de l'Ouest, sur la partie Est du continent, la glace s'accumule à cause d'une augmentation des précipitations neigeuses (comme cela est d'ailleurs prévu dans le contexte d'un réchauffement climatique). Ainsi le bilan total indique, qu'au moins pour la dernière décennie, la hausse moyenne du niveau de la mer est assez bien expliquée par le réchauffement de l'océan et la fonte des glaces continentales.

2.4 Bilan de l'élévation du niveau de la mer ces dernières années

Le rapport AR4 du GIEC résume les valeurs du changement du niveau des eaux (cf. Tableau 8) pour deux périodes (1961 à 2003 et 1993 à 2003). Pour la période 1961-2003, les contributions totales dues à l'expansion thermique, à la fonte des glaciers et des calottes glacières sont estimées à $1,1 \pm 0,5$ mm à comparer avec les $1,8 \text{ mm} \pm 0,5$ mm observés durant la même période. Dans le rapport AR4 du GIEC, les auteurs en concluent que l'élévation totale sur ces quarante années n'est pas très fiable. Pour la période 1993-2003, l'élévation totale est de $2,8 \pm 0,7$ mm ce qui est plus en accord avec les valeurs mesurées avec les altimètres spatiaux qui donnent $3,1 \pm 0,7$ mm pour la même période.

Tableau 8 : Estimation des différentes contributions à l'élévation du niveau de la mer pour la période 1961-2003 » et 1993- 2003 (GIEC, 2007)

Source	Élévation du niveau de la mer (mm par an)		Référence
	1961-2003	1993-2003	
Expansion thermique	$0,42 \pm 0,12$	$1,6 \pm 0,5$	Section 5.5.3
Glaciers et calottes glacières	$0,50 \pm 0,18$	$0,77 \pm 0,22$	Section 4.5
Groenland	$0,05 \pm 0,12$	$0,21 \pm 0,07$	Section 4.6.2
Antarctique	$0,14 \pm 0,41$	$0,21 \pm 0,35$	Section 4.6.2
Somme	$1,1 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,7$	
Observé	(a) $1,8 \pm 0,5$	(b) $3,1 \pm 0,7$	(a) Section 5.5.2.1 (b) Section 5.5.2.2
Différence (observé – mesuré)	$0,7 \pm 0,7$	$0,42 \pm 0,12$	

Depuis la publication du rapport AR4 du GIEC de 2007 de nouveaux résultats ont été publiés. Ainsi A. Cazenave et al¹⁴ ont publié à partir des données altimétriques spatiales depuis 1993, les variations mesurées des eaux pour deux périodes : 1993 – 2007 et 2003 – 2007.

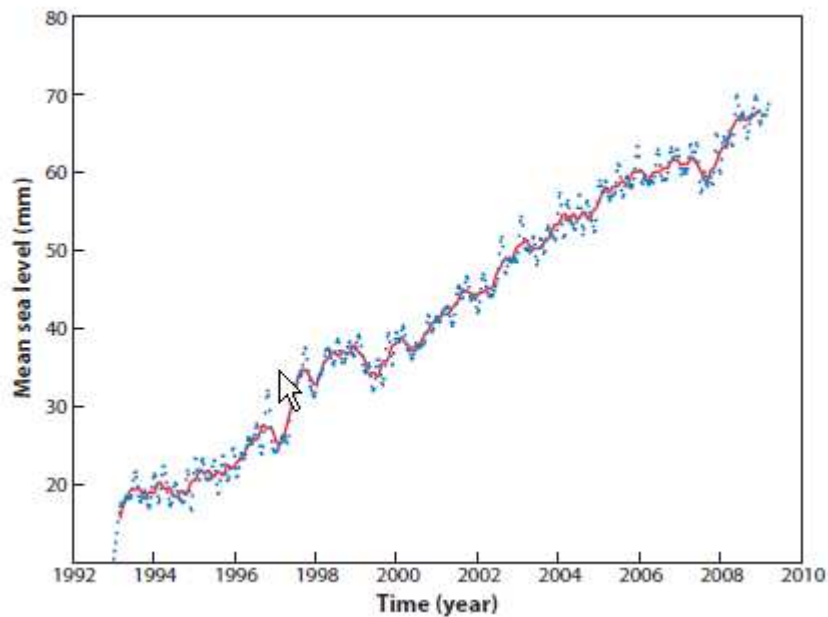
Tableau 9 : Variations du niveau des eaux pour la période 1993-2007 et 2003-2007

	Élévation du niveau de la mer (mm/an)	1993 - 2007	2003 - 2007
		1	Observé
2	Expansion thermique	$1,0 \pm 0,3$	$0,25 \pm 0,8$ (Argo)
3	Masse de l'océan	$2,3 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,1$ (GRACE avec -2mm/an de correction GIA de Cazenave et al, 2009)
4	Glaciers	$1,1 \pm 0,25$	$1,4 \pm 0,25$ (Cogley, 2009)
5	Calottes glacières	$0,7 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,2$ (compilation de résultats publiés)
		(compilation de résultats publiés)	
6	Eaux continentales	-	$-0,2 \pm 0,1$
	Somme (2+4+5+6)	$2,85 \pm 0,35$	$2,45 \pm 0,85$

GIA : Glacial Isostatic Adjustment

¹⁴ A. Cazenave, W. Llovel, Contemporary sea level rise, Annu. Rev.MZR.Sci.2010. 2: 239-269

Figure 52 : Élévation moyenne du niveau des eaux entre janvier 1993 et décembre 2008



Les données en bleu sont les données obtenues tous les 10 jours. La ligne rouge correspond aux données lissées sur 90 jours – L'ajustement isostasique glaciaire a été pris en compte.

Entre 2003-2008, le niveau moyen global de la mer a continué de monter à une vitesse de 2.5 mm/an en moyenne. Pourtant la contribution stérique (effet de la dilatation des eaux) n'explique que 0.4 mm/an de cette hausse. En utilisant les observations de la nouvelle mission spatiale GRACE, les chercheurs du LEGOS et de CLS ont montré que c'est la fonte accélérée des glaces continentales qui explique la grande majorité de la hausse du niveau marin au cours des 5 dernières années. Et ce phénomène va se poursuivre.

2.5 Projection du niveau moyen des eaux pour le XXIème siècle

2.5.1 Données générales

Le Tableau 10 et la Figure 53 montrent les projections du niveau moyen des eaux obtenues par application des différents scénarios testés dans le SRES (Special Report on Emissions Scenarios, 2000) pour le 21ème siècle dus à l'expansion thermique des océans et à la fonte des glaciers basé sur le rapport AR4 AOGCM (voir les sections 10.6.1, 10.6.3 et 10.6.4 dans "Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

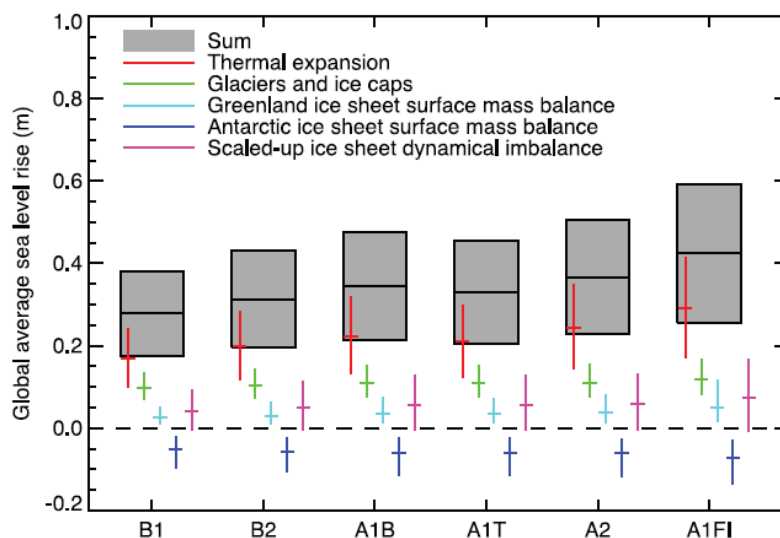
Tableau 10 : Projection des élévations du niveau de la mer sur la base des scénarios SRES

		B1		B2		A1B		A1T		A2		A1FI	
Thermal expansion	m	0.10	0.24	0.12	0.28	0.13	0.32	0.12	0.30	0.14	0.35	0.17	0.41
	mm yr ⁻¹	1.1	2.6	1.6	4.0	1.7	4.2	1.3	3.2	2.6	6.3	2.8	6.8
G&IC	m	0.07	0.14	0.07	0.15	0.08	0.15	0.08	0.15	0.08	0.16	0.08	0.17
	mm yr ⁻¹	0.5	1.3	0.5	1.5	0.6	1.6	0.5	1.4	0.6	1.9	0.7	2.0
Greenland Ice Sheet SMB	m	0.01	0.05	0.01	0.06	0.01	0.08	0.01	0.07	0.01	0.08	0.02	0.12
	mm yr ⁻¹	0.2	1.0	0.2	1.5	0.3	1.9	0.2	1.5	0.3	2.8	0.4	3.9
Antarctic Ice Sheet SMB	m	-0.10	-0.02	-0.11	-0.02	-0.12	-0.02	-0.12	-0.02	-0.12	-0.03	-0.14	-0.03
	mm yr ⁻¹	-1.4	-0.3	-1.7	-0.3	-1.9	-0.4	-1.7	-0.3	-2.3	-0.4	-2.7	-0.5
Land ice sum	m	0.04	0.18	0.04	0.19	0.04	0.20	0.04	0.20	0.04	0.20	0.04	0.23
	mm yr ⁻¹	0.0	1.8	-0.1	2.2	-0.2	2.5	-0.1	2.1	-0.4	3.2	-0.8	4.0
Sea level rise	m	0.18	0.38	0.20	0.43	0.21	0.48	0.20	0.45	0.23	0.51	0.26	0.59
	mm yr ⁻¹	1.5	3.9	2.1	5.6	2.1	6.0	1.7	4.7	3.0	8.5	3.0	9.7
Scaled-up ice sheet discharge	m	0.00	0.09	0.00	0.11	-0.01	0.13	-0.01	0.13	-0.01	0.13	-0.01	0.17
	mm yr ⁻¹	0.0	1.7	0.0	2.3	0.0	2.6	0.0	2.3	-0.1	3.2	-0.1	3.9

La ligne supérieure donne les valeurs à 5% et 95% de confiance pour la période 1980 - 1999 et 2090-2099. La ligne inférieure donne l'écart en mm/an de l'élévation du niveau de la mer pour la période 2090 - 2099 (voir pour plus de détails le chapitre 10.6.5 du TRE).

Fourchettes couvertes par les modèles ne tenant pas compte de futurs changements dynamiques rapides au niveau de l'écoulement des glaces.

Figure 53 : Projections et incertitudes (5% - 95%) de l'élévation du niveau moyen de la mer et des facteurs responsables de l'élévation du niveau des eaux pour la période 2090-2099 pour les six scénarios du SRES



Faute de données pertinentes publiées, les projections de l'élévation du niveau de la mer ne tiennent compte ni des incertitudes liées aux rétroactions entre le climat et le cycle du carbone, ni de l'intégralité des effets de l'évolution de l'écoulement dans les nappes glaciaires. Aussi les valeurs supérieures des fourchettes ne doivent-elles pas être considérées comme les limites supérieures de l'élévation du niveau de la mer. Bien que les projections tiennent compte de l'accroissement de l'écoulement glaciaire au Groenland et en Antarctique

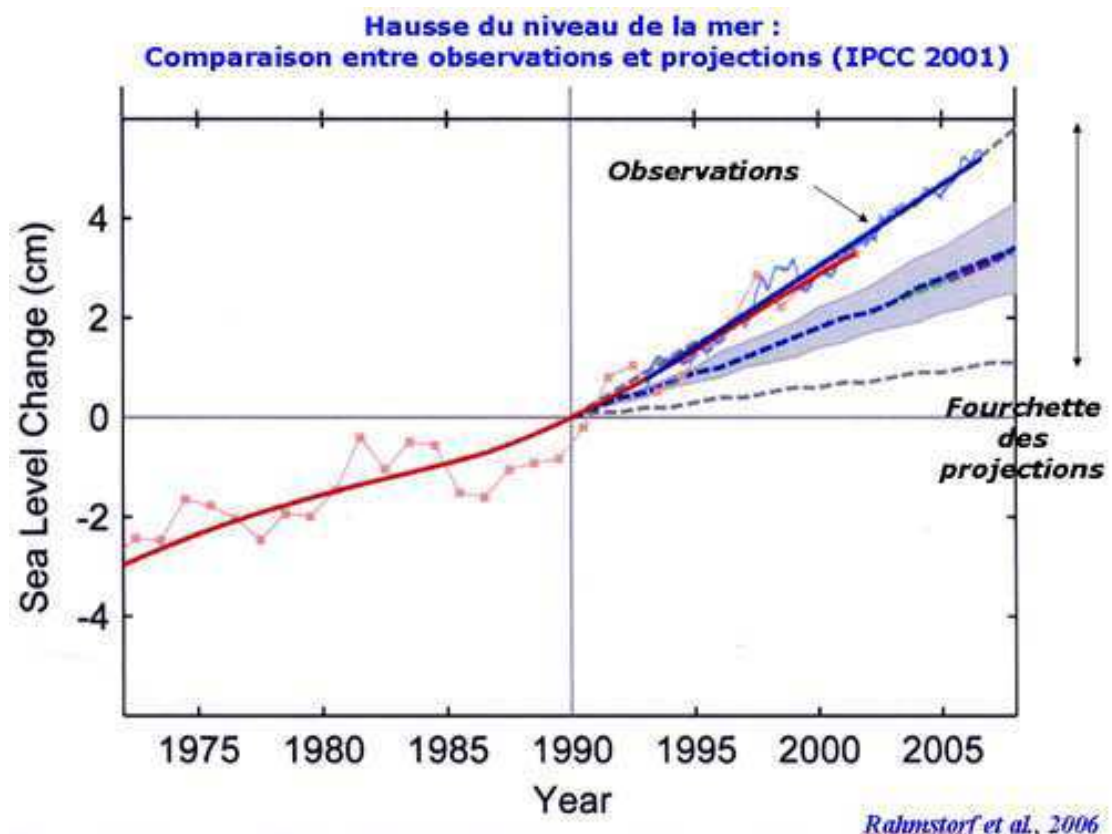
aux rythmes observés entre 1993 et 2003, **le phénomène pourrait cependant s'accélérer ou ralentir**. S'il devait augmenter linéairement avec le réchauffement moyen à la surface du globe, les valeurs maximales de l'élévation du niveau de la mer, selon les scénarios SRES, indiquées dans le Tableau 10 augmenteraient de 0,1 m à 0,2 m.

2.5.2 Données détaillées

Des prévisions de l'élévation du niveau des mers au cours des prochaines décennies peuvent être faites à partir de simulations numériques de l'évolution future du système climatique, pour différents scénarios plausibles d'émissions de gaz à effet de serre et d'expansion démographique. **Quel que soit le scénario, la hausse du niveau de la mer se poursuivra au cours des prochains siècles à une vitesse dépendant du scénario étudié, mais en général supérieur à ce que nous connaissons aujourd'hui**. Pour les prochaines décennies, la dilatation thermique de l'océan continuera d'être le facteur dominant. En effet, en raison de l'énorme capacité thermique de l'eau de mer, la chaleur accumulée dans l'océan au cours du temps causera une hausse inexorable du niveau de la mer.

Une étude récente (Rahmstorf et al., 2006) a comparé la hausse observée du niveau de la mer aux modèles de projections du GIEC (3ème rapport, 2001) (Figure 54) depuis 1990. Elle suggère que les prévisions actuelles concernant l'augmentation du niveau de la mer ont été sous estimées. Basée sur une approche semi-empirique, et sur les scénarios climatiques du GIEC, elle prévoit que, d'ici 2100, le niveau de la mer pourra augmenter de 0,5 à 1,4 mètres au-dessus des niveaux de 1993.

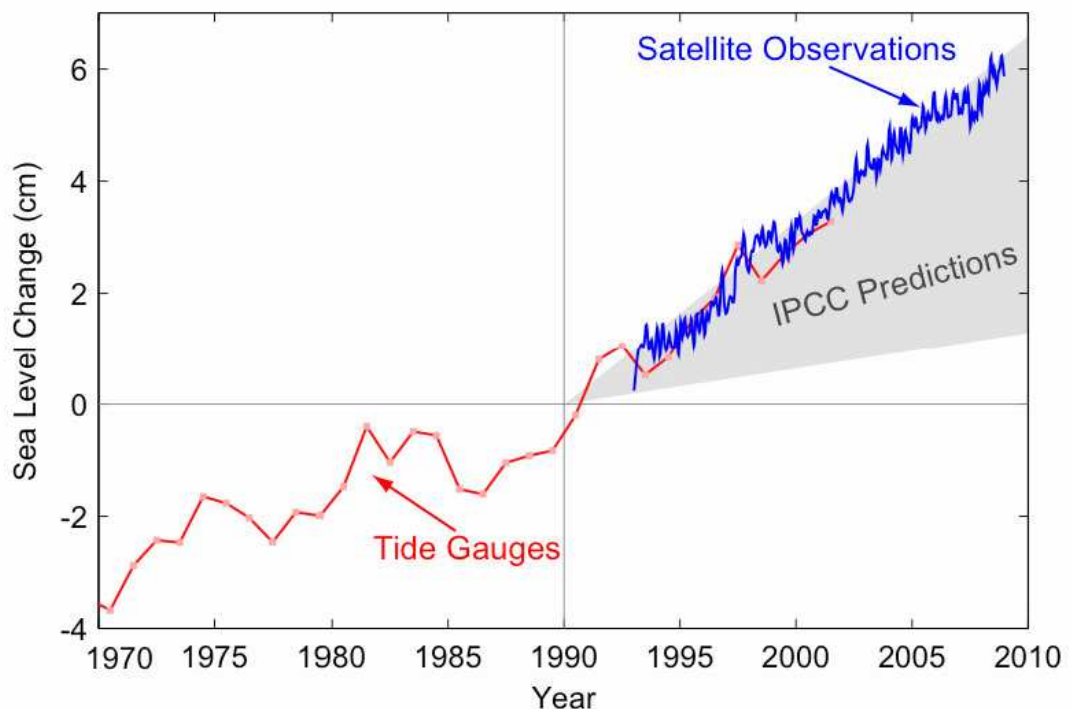
Figure 54 : Comparaison entre les observations et les projections de l'élévation du niveau la mer entre 1990 et 2006 (D'après Rafmstorf et al., 2006) <http://www.legos.obs-mip.fr>



Le document « Copenhagen diagnosis, 2009 : updating the world on the latest Climate Science » réalisé par le centre de recherche du changement climatique de l'Université de la Nouvelle Galles du Sud à Sydney (Australie) a pour but de synthétiser le plus possible d'éléments scientifiques publiés sur le changement climatique depuis le 4^{ème} rapport (AR4) du GIEC et en attendant le 5^{ème} rapport prévu pour 2013. Le rapport porte sur l'ensemble des sujets couverts par le Groupe I du GIEC, c'est-à-dire les données physiques et en particulier les données relatives aux variations du niveau des eaux.

L'élévation du niveau des eaux est une conséquence à la fois de l'augmentation de la température de l'eau de mer et des apports d'eau additionnels dus à la fonte des glaciers, des calottes glacières et des nappes de glace. Pour la période 1961-2003, l'expansion thermique des eaux expliquait environ 40% de l'élévation observée du niveau de la mer alors que la diminution d'occupation des glaciers terrestres et de la calotte glacière y contribuait pour 60% (Domingues et al, 2008¹⁵). Le niveau de la mer a cru plus que prévu d'après Rahmstorf et al (2007).

Figure 55 : Changement du niveau de la mer sur la période 1970-2010



En rouge les données issues des marégraphes et en bleu les données des satellites. En grisé, la fourchette de résultats issus des projections du 3^{ème} rapport du GIEC

Le taux moyen d'élévation du niveau de la mer pour la période 1961 – 2003 est estimé à $3,3 \pm 0,4$ mm par an à partir des mesures altimétriques (A. Cazenave, W. Llovel, 2010¹⁶.) alors que dans le troisième rapport du GIEC (2001), pour la même période la meilleure projection donnait 1,9 mm par an. Le quatrième rapport du GIEC (2007) donne également une élévation du niveau

¹⁵ Domingues C.M. et al., (2008) Improved estimates upper-ocean warming and multi-decadal sea level rise. *Nature* **453**, 1090-1093

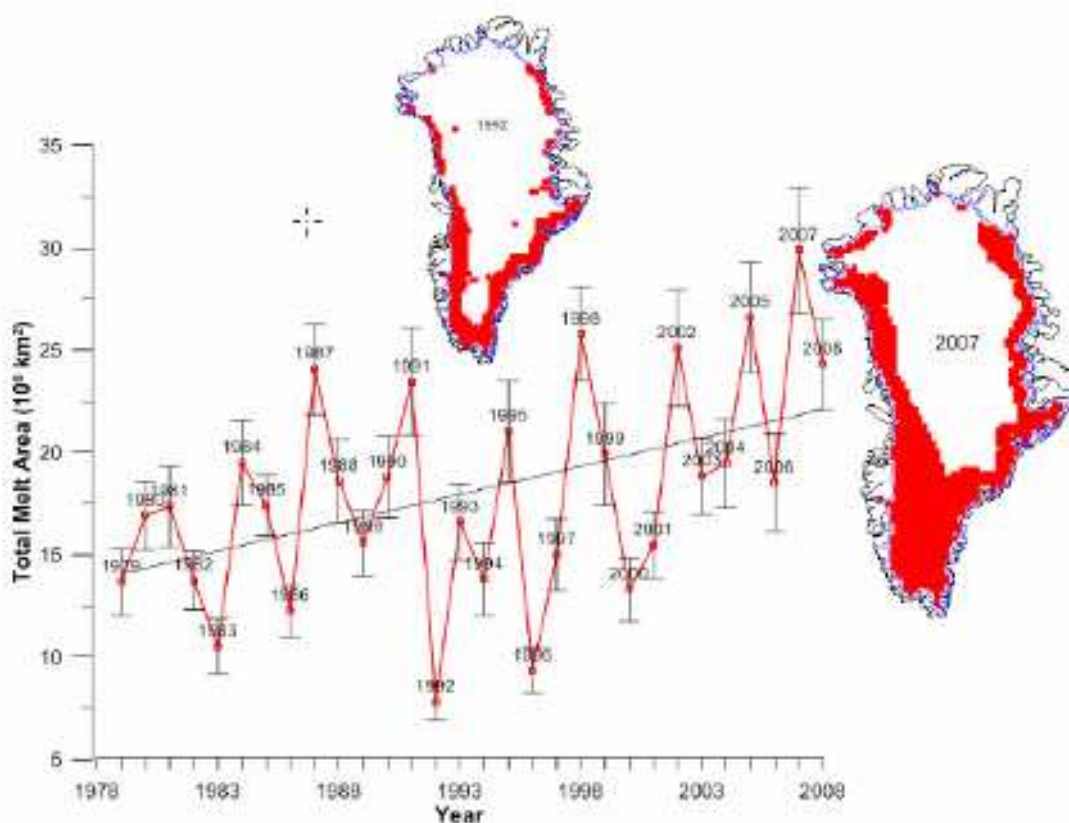
¹⁶ A. Cazenave, and W. Llovel, (2010) Contemporary Sea Level Rise. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2010. 2:239-267

de la mer du même ordre de grandeur à 10% près. Ainsi **l'élévation actuelle est nettement supérieure aux projections.**

A l'heure actuelle, il est encore difficile d'évaluer les variations dans le temps des niveaux futurs des eaux compte tenu du décalage entre les données mesurées et les projections des modèles. La raison principale est liée à la **difficulté d'évaluer l'incidence de la fonte des nappes de glace de l'Antarctique et du Groenland.**

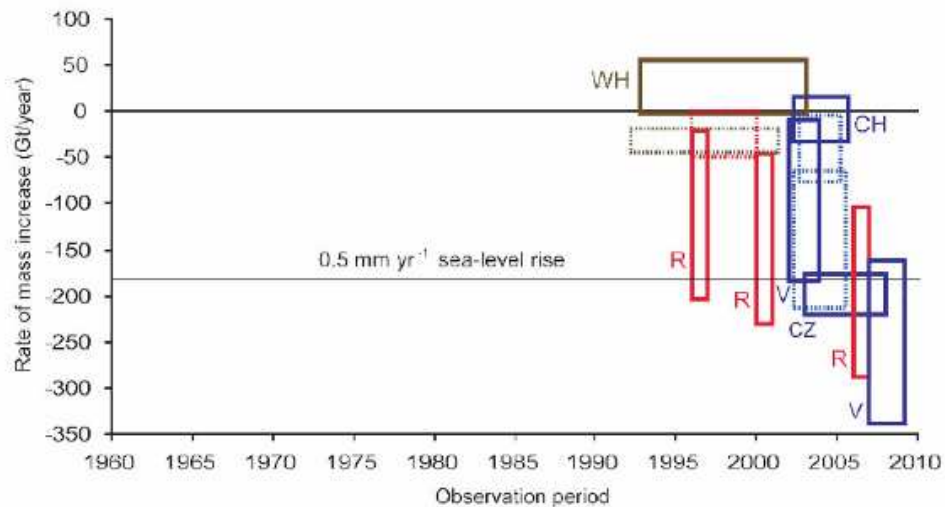
Il est plus que certain que l'élévation du niveau des eaux sera supérieure à la fourchette moyenne la plus communément citée de 18-59 cm dans le rapport du GIEC AR4 et ce d'autant que cette fourchette n'inclut pas la dynamique rapide de fonte future des banquises. Or de nouvelles données gravimétriques issues du programme satellital GRACE montre une perte globale de masse de la glace en antarctique (comme au Groenland) qui va en s'accroissant (cf. Figure 56) : 104 Gt par an pour la période 2002- 2006 à 246 Gt par an pour la, période 2006-2009 (Velicogna, 2009)¹⁷.

Figure 56 : Évolution des zones de fonte de la banquise du Groenland obtenue à partir d'observations satellitales



¹⁷ Les observations gravimétriques et altimétriques nécessitent une correction pour tenir compte des réajustements isostatiques de la croûte terrestre. Mais celle-ci n'est pas vraiment connue pour l'Antarctique

Figure 57 : Diminution de la masse de la nappe de glace Antarctique depuis 1992



Les boîtes en pointillé représentent les estimations issues du rapport AR4 du GIEC (2007). Les boîtes en trait plein sont issues d'estimations récentes : CH=Chen et al, 2006 ; WH=Wingham et al, 2006; R=Rignot et al, 2008b ; CZ=Cazenave et al, 2009; V=Velicogna, 2009

Dans son chapitre sur les océans ; le compendium « Climate change science » de septembre 2009 reprend les connaissances récentes sur l'élévation du niveau des eaux décrites ci-avant et les résume ainsi :

- jusqu'en 1990, l'expansion thermique des océans est responsable d'environ 50% de l'élévation globale du niveau des eaux alors qu'aujourd'hui, elle n'est plus responsable que de 15% de cette élévation,
- cette décroissance de l'effet de l'expansion thermique des océans est compensée par l'accroissement de la part prise par les glaciers, les calottes glaciaires et les nappes de glace du Groenland et de l'Antarctique. En 2006, les apports des glaciers et des calottes glacières contribuaient à hauteur de 32% des apports pendant que les nappes de glace du Groenland et de l'Antarctique y contribuaient à hauteur de 20%. Si la tendance actuelle se poursuit de perte de masse de la glace, les réservoirs que représentent les calottes glacières et les glaciers seront épuisés en 2200.

Tableau 11 : Les différentes composantes de l'élévation du niveau des eaux (mm/an)

Période	GIEC 2007b 1993-2003	Meier et al, 2007, 2006	Cazenave et Nerem, 2004 1993-2003	Cazenave et al, 2009, 1993-2008
Expansion thermique	1,6 ± 0,5	-	1,6 ± 0,3	0,34 ± 0,12 ³
Groenland	0,21 ± 0,07	0,5 ± 0,10	0,20 ± 0,04	0,38 ± 0,05
Antarctique	0,21 ± 0,35	0,17 ± 0,11	0,55 ± 0,06	0,56 ± 0,06
Autres glaciers et calottes glacières	0,5 ± 0,18	1,1 ± 0,24	0,8 ± 0,1	1,1 ± 0,25 ⁴
Apports continentaux				0,17 ± 0,1
Somme	2,8 ± 0,72 ²	1,8 ± 0,50 ^{1,2}	3,0 ± 0,50 ²	2,2 ± 0,28

Note :

¹ : la somme n'inclut pas l'expansion thermique,

² : la somme n'inclut pas les apports continentaux

³ : moyenne de deux estimations,

⁴ : issu de Meier et al, 2007

⁵ : la contribution hydrologique terrestre est disponible à partir des mesures de GRACE depuis seulement 2003

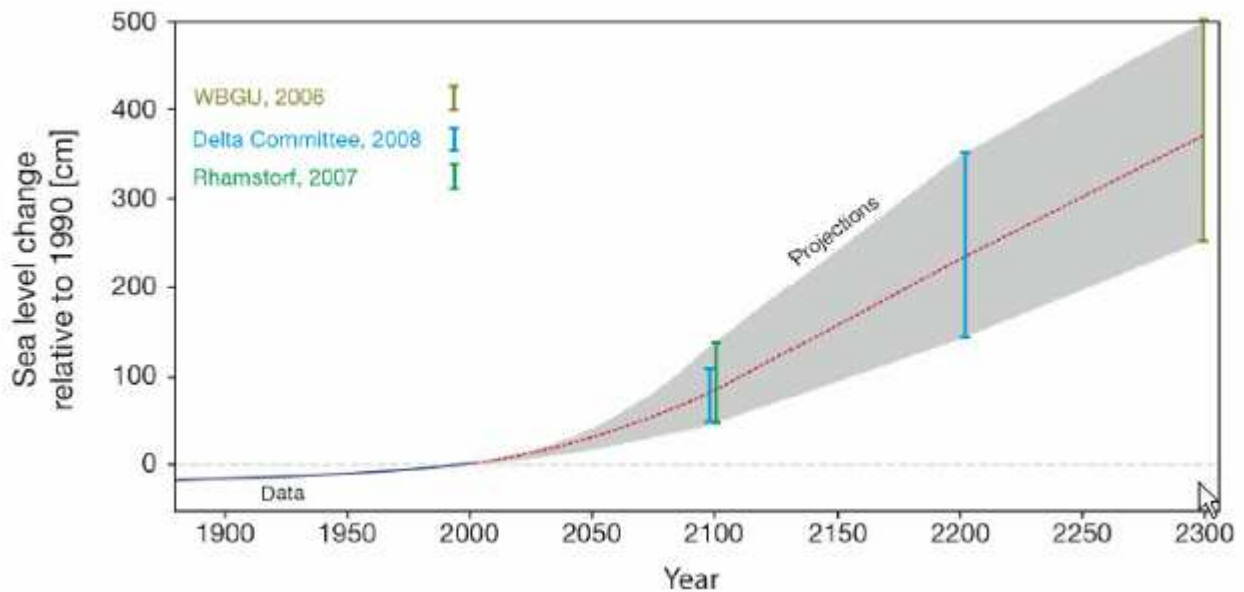
Dans le rapport de synthèse du Congrès de Copenhague de mars 2009 sur le changement climatique, il est déjà fait mention d'un **possible doublement de l'élévation globale du niveau de la mer par rapport aux projections du GIEC (2007) compte tenu des apports issus des glaciers, des calottes glacières et des nappes de glace du Groenland et de l'Antarctique** (le taux de perte du Groenland correspond à une contribution de 0,5 mm/an et pour l'Antarctique de 0,21 ± 0,17 mm/an pour la période 1993-2003): pour le prochain siècle ; les projections donne une élévation globale du niveau des eaux de 1m ± 1m.¹⁸

Durant plusieurs siècles, **le niveau des eaux continuera à monter une fois les températures stabilisées** compte tenu du temps de réponse de la masse d'eau des océans et des nappes de glace du Groenland et l'antarctique à l'élévation des températures. La Figure ci-après illustre de récentes estimations de la future élévation du niveau des eaux.

Ces projections mettent en évidence le fait que le niveau des eaux pourrait grimper de plusieurs mètres dans les siècles à venir.

¹⁸ Dahl-Jensen, D. (Lead), 2009: The Greenland Ice Sheet in a changing climate. Component 2 in SWIPA: An Arctic Council Project coordinated by AMAP-IASC-WCRP/CLIC-IPY

Figure 58 : Récente projection de l'élévation du niveau de la mer.



L'origine des données historiques est Church et White (2006), les projections futures sont de Rahmstorf (2007), WBGU (2006) et du « Delta Committee » de Vellinga et al, 2008

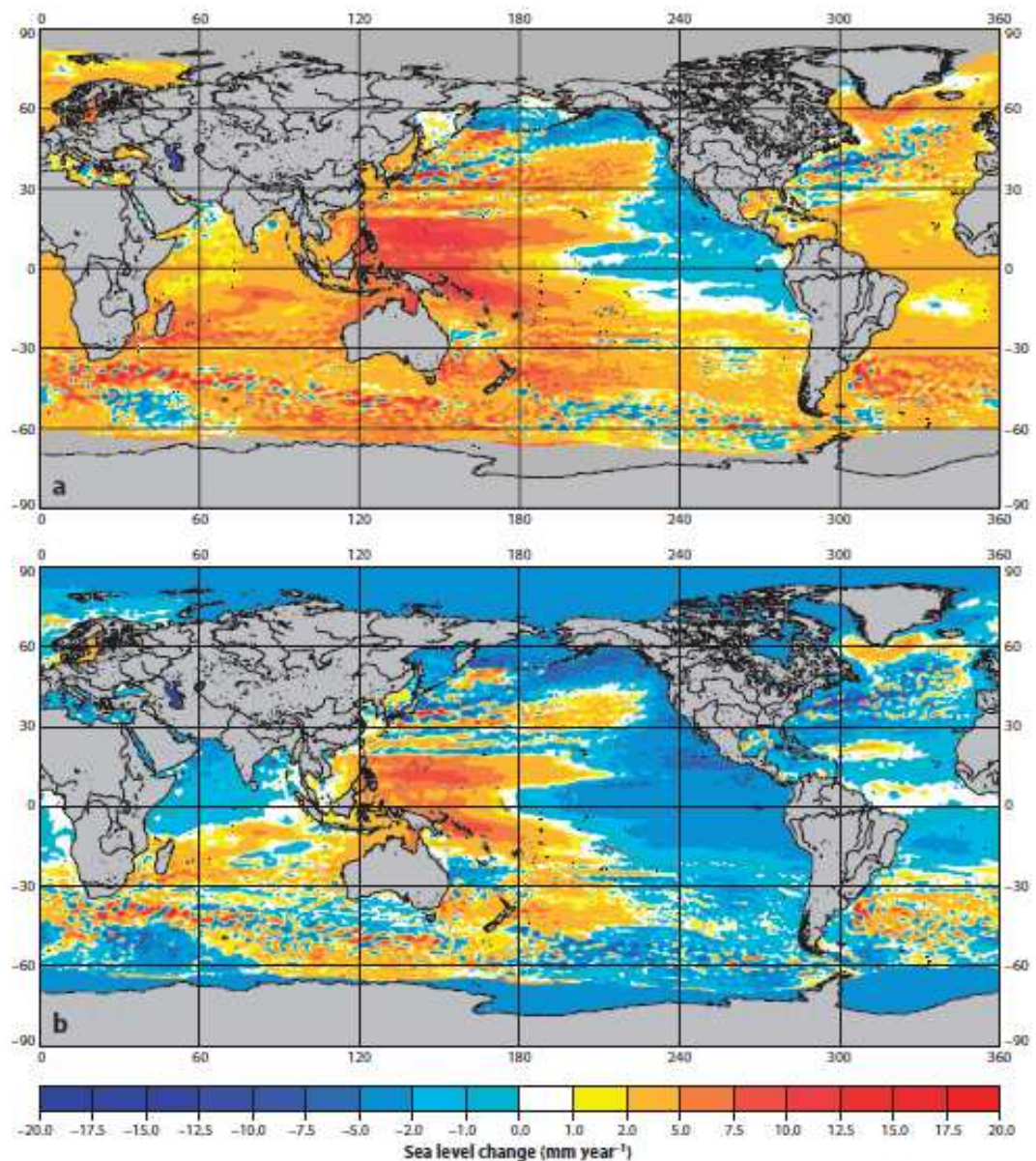
Les auteurs estiment (compendium « Climate change science » de septembre 2009) qu'à court terme – dizaines à centaines d'années – **les glaciers et les calottes glacières contribueront nettement plus rapidement à l'élévation du niveau des eaux que ne le laissaient prévoir les taux de fonte des glaces**. A long terme – centaines à milliers d'années – les nappes de glace du Groenland et de l'Ouest Antarctique pourraient entraîner une élévation du niveau des eaux respectivement de 6 mètres et de 3,3 mètres. De nombreuses données géologiques le montrent. Mais à l'heure actuelle il n'existe pas encore de méthodes « fiable » pour modéliser la dynamique future sur le niveau des eaux de l'effet de la fonte des glaciers, des calottes glacières ou des nappes de glace.

Une fourchette de valeurs a néanmoins été proposée pour le 21^{ème} siècle (Pfeffer et al, 2008)¹⁹ : l'élévation moyenne globale du niveau de la mer, incluant toutes les sources glacières et l'expansion thermique, pourrait se situer entre 0,8 m et 2,0 m en 2100 mais à l'intérieur de cette fourchette, aucune valeur ne se distingue.

Toutefois, les mesures marégraphiques et par satellites, plus récemment, ont montré la variabilité régionale de l'élévation du niveau des eaux entre 1993 et 2008 (cf. Figure 59) et dans le futur, ce sera probablement la même chose.

¹⁹ W. T. Pfeffer, J. T. Harper, S. O'Neel, Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise, Science 5, September 2008, vol 321 n05894, pp1340-1343

Figure 59 : a) carte de variabilité spatiale des niveaux d'eau entre janvier 1993 et décembre 2008. b) identique à (a) mais la tendance mondiale moyenne de 3,4 mm/an a été supprimée



2.6 Proposition de taux d'élévation du niveau global des eaux en 2030

A l'horizon de l'étude sur l'effet du changement climatique pour les villes de Casablanca, Rabat, Tunis et Alexandrie, **horizon fixé à 2030**, il est difficile de fixer une fourchette de l'élévation moyenne du niveau de la mer à partir des derniers travaux car cette date est très proche d'aujourd'hui.

Par exemple, elle se situe au démarrage des courbes des récentes projections (cf. Figure 58). Toutefois, en extrapolant les données issues des derniers travaux de Cazenave et al (cf. Figure 55), le niveau moyen des eaux s'élèverait de **13 centimètres** si l'on conserve la même pente de la courbe issue des observations des satellites, cette valeur se situant bien en partie haute de la fourchette de valeurs proposées par les projections du GIEC 2007.

Si l'on se base sur la valeur calculée par Cazenave et al (2009) de $2,2 \pm 0,28$ mm/an, déterminée entre 1993 et 2008, en 2030 (cf. Tableau 11) l'élévation du niveau moyen de la mer serait de l'ordre de **5 cm** par rapport à 2008.

Sur la base des courbes de Rahmstorf et al (cf. Figure 58) proposées par Church et White (2006), l'élévation moyenne des eaux en 2030 se situerait aux environs de **15 cm** avec un maximum de 20 cm et un minimum de 10 cm.

L'Observatoire national français sur les effets du réchauffement climatique (Service du climat de l'efficacité énergétique – Direction générale de l'énergie et du climat- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la mer) dans son document de synthèse n°2 de février 2010 propose pour les projections d'élévation du niveau de la mer les valeurs suivantes :

Tableau 12 : Hypothèses considérées par l'ONERC

Hypothèse	2030	2050	2100
Optimiste	10	17	40
Pessimiste	14	25	60
Extrême	22	41	100

L'Agence Nationale de la Recherche Française met en œuvre, pour la période 2008-2010, le **projet MISEEVA** (Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes) dont le but est d'étudier, à court et moyen terme (2020, 2050) la vulnérabilité côtière comme un concept transdisciplinaire (Drivers-pressure-state-impact-response), où l'évaluation de l'exposition à l'aléa submersion marine et celle de la vulnérabilité sociale, économique et environnementale se font dans une démarche commune et au regard de la spécificité de l'aléa. Le site d'application de ce programme se situe en Méditerranée occidentale et plus précisément dans le Golfe du Lion. Les tendances retenues d'élévation du niveau des eaux pour les modélisations climatiques ont été les suivantes :

- en 2030 : un scénario optimiste de 2cm (sur la base des données du GIEC 2007) et un scénario pessimiste avec une plus forte contribution des pôles de 7cm (basé sur Rahmstorf, 2007) associé à un régime de tempête équivalent à l'actuel,
- en 2100 : un scénario optimiste avec une élévation de 0,35 m (GIECC, 2007- moyenne selon le scénario A2) et un scénario pessimiste de 1m (Rahmstorf 2007 intégrant une forte contribution par la fonte des glaces). Ces scénarios sont associés au même régime de tempête qu'aujourd'hui mais avec une augmentation du vent.

On s'aperçoit là **de l'écart important qu'il peut y avoir en fonction des données générales prises en compte, auxquelles il faut rajouter les variabilités régionales** dont nous n'avons pas connaissance pour l'instant.

En tout état de cause, compte tenu des incertitudes actuelles sur les projections récentes effectuées, des observations satellitales nettement plus précises que les mesures marégraphiques, et des observations d'accélération de la fonte des glaces en particulier au Groenland et en Antarctique, **une valeur haute de 20 cm peut être envisagée à l'horizon 2030. C'est celle que nous retiendrons dans le cadre de cette étude.**

Chapitre 5 - Évaluation économique

I was in search of a one-armed economist, so that the guy could never make a statement and then say: "on the other hand."

Harry S Truman

1 Introduction

Les parties précédentes exposent la nature des aléas naturels ainsi que la vulnérabilité jusqu'à l'horizon 2030, en tenant compte du changement climatique (CC). Dans la continuité, ce chapitre couvre la partie 1.f des termes de références (TdR): "évaluation des coûts socio-économiques dus à l'impact du changement climatique et des risques naturels". Les TdR précisent que l'horizon de l'étude est 2030 et qu'en conséquence des hypothèses doivent être formulées quant à l'évolution de la vulnérabilité à cet horizon.

Conformément aux TdR et à la méthodologie proposée, notre démarche sera la suivante:

- identifier un scénario de référence, nommé également Business as usual ou BaU, sur lequel seront évalués des coûts afférents aux catastrophes naturelles dont l'étude traite; c'est l'objet du présent chapitre;
- identifier des actions de mitigation de ces catastrophes, et évaluer leurs coûts ainsi que la part des dommages qu'elles permettent d'éviter par rapport au scénario BaU, afin de fournir des éléments d'appréciation quant à leur efficacité économique; c'est la partie 2.e des TdR et elle sera traitée en phase II de l'étude.

Cette méthodologie, dérivée de celle des Analyses Coûts Bénéfices (ACB), a pour but d'apporter à des décideurs la composante économique des termes de choix d'aménagements complexes. A ce titre le scénario de référence doit refléter de façon crédible l'urbanisation future telle qu'envisagée actuellement. Si l'exercice est par nature prospectif et incertain, il n'en demeure pas moins nécessaire; en effet la non prise en compte du BaU, sous jacent de l'évolution de la vulnérabilité, est préjudiciable à la qualité de l'analyse mais surtout à son opportunité, puisqu'elle n'apporterait alors pas l'information réellement utile aux décideurs. La valeur ajoutée du conseil est de concourir à la bonne présentation des termes du choix suivant:

Du point de vue de la gestion des risques naturels, faut-il s'en tenir à une politique d'aménagement urbain calée sur le scénario de référence (BaU) ou bien est-il préférable d'envisager une (des) alternative(s) améliorant celui-ci, et le cas échéant laquelle (lesquelles)?

Afin de traiter cette question d'un point de vue économique, il convient dans un premier temps d'offrir aux décideurs une vision des enjeux du choix de non modification de la trajectoire effectivement engagée (BaU). C'est l'objet de ce chapitre.

D'un point de vue quantitatif, l'ACB se base généralement sur la valeur actuelle nette (VAN) ou le ratio coût/bénéfices. En finance, il s'agit de comparer la différence des gains et pertes associés à un investissement donné, en les actualisant. Le parallèle fait ici consiste à prendre pour "gains" les dommages évités dans la situation de référence, et pour lesquels un surcoût d'investissement est proposé- les "pertes", estimées alors en phase II.

Ainsi ce qui est considéré comme coût en phase I a vocation à devenir, tout ou partie, un bénéfice en phase II. Si le concept est simple, son application demande de bien s'entendre sur le scénario de référence, ainsi que le périmètre de chaque coût et bénéfice associé.

Le scénario de référence (BaU) est donc la ville de Casablanca, ainsi que la Vallée de Bouregreg, en 2030 en situation de changement climatique; la vulnérabilité et les aléas associés sont ceux décrits dans les chapitres précédents.

Les dommages considérés sont ceux des aléas pris en compte dans l'étude, qu'ils soient liés ou non au CC: les aléas géologiques (séismes et tsunamis), les inondations, les tempêtes ainsi que l'impact du CC sur la ressource en eau. Les dommages en matière de santé liés à l'évolution de la température sont traités à part dans le chapitre suivant. La méthodologie de calcul des coûts dans le scénario BaU est précisée pour partie dans la section suivante, et également en section 3 pour les spécificités propres à chaque aléa.

Quelques autres points méthodologiques resteront à aborder en phase II mais la grande majorité sont traités ici. En revanche, ici l'analyse ne peut être que partielle, alors qu'elle sera de fait plus complète et intégrée en phase II.

2 Enjeux méthodologiques et approche proposée

Avant de présenter le calcul des coûts par type d'aléa, les nombreux choix méthodologiques effectués doivent être présentés. La prise en compte de cette donnée est importante, car les options choisies ne conditionnent pas seulement les résultats (section 3) mais également la portée que l'on peut leur donner. Les principes méthodologiques généraux sont présentés dans un premier temps ; s'en suit un exposé plus détaillé des différentes choix méthodologiques effectués dans le calcul des coûts directs et indirects. La section est close par une réflexion sur les incertitudes et quelques autres limites inhérentes à ce type d'exercice et à la manière dont il est ici abordé.

2.1 Quelques aspects méthodologiques généraux

La notion de **coût du changement climatique** est de plus en plus évoquée, toutefois le périmètre de l'étude s'en distingue. Celui-ci comprend en effet des désastres qui, pour certains, peuvent être liés au changement climatique (inondations), et d'autres, comme les catastrophes géologiques qui ne le sont pas *a priori* (séismes et tsunamis, au point près que l'ENM peut amplifier le risque de ces derniers). Pour certains autres, le CC peut parfois avoir un effet amplificateur (inondations), ou encore il se peut que le lien entre le CC et un type d'aléa ne soit pas encore bien compris par les scientifiques (tempêtes). La difficulté est donc de qualifier, pour

un aléa donné, la part qui peut être imputable au CC d'un phénomène donné. L'étude se focalise donc avant tout sur les désastres en général et non le CC, même s'il est convenu d'en tenir compte. Aussi, cet exercice de ventilation des coûts n'est en principe pas requis. Les coûts déterminés répondent donc de ce cahier des charges; toutefois, lorsqu'il est possible de l'estimer de façon raisonnable, une évaluation de la part du CC dans les coûts totaux est proposée. Le périmètre des coûts associé à chaque type d'aléa est précisé plus avant dans la section suivante.

Un autre point méthodologique central concerne la **valorisation des actifs, notamment son rapport au temps**. Celle-ci est effectuée pour une année donnée (2030), alors que les aléas sont distribués dans le temps selon des lois propres. A moins de développer le formalisme à même de prendre en compte la continuité de ce phénomène, ce qui irait bien au-delà de cette étude²⁰, le choix du temps de référence a forcément quelque chose d'arbitraire. Cela n'est pas propre à cette étude: les études de risques se basent elles aussi sur une vulnérabilité de référence, correspondant le plus souvent à la situation actuelle, alors que des aléas surviendront dans un futur où la vulnérabilité - donc la valeur des actifs - aura peut être évolué significativement. L'originalité de l'étude consiste en revanche à ne pas prendre pour référence l'année 2010 mais l'année 2030. Cette contrainte engendre des difficultés méthodologiques et des incertitudes plus grandes qu'à l'accoutumée, alors que ce point est souvent déjà une problématique réelle. C'est une limite qu'il convient d'admettre. Il y a toutefois deux bonnes raisons de procéder ainsi:

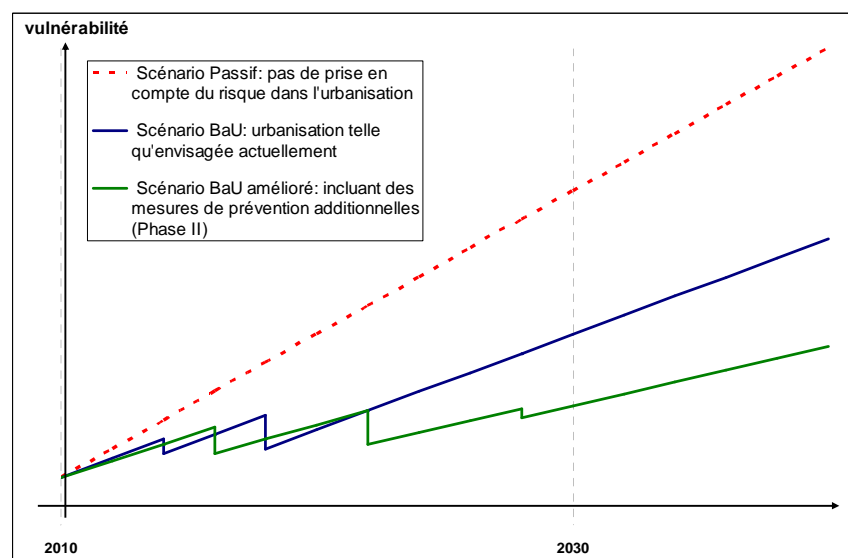
- d'une part il s'agit d'être cohérent dans l'analyse du risque: si l'on fait une projection temporelle sur les aléas, afin de rendre compte des effets du changement climatique, alors il convient de faire de même avec la vulnérabilité dans un souci de cohérence méthodologique; faute de quoi les chiffres obtenus sont difficilement interprétables.
- d'autre part il faut choisir entre deux maux: avoir de plus grandes incertitudes en projetant un ensemble complexe (le milieu urbain) à un horizon de temps lointain, ou bien rester en 2010 mais au risque de travailler sur une base de vulnérabilité tout à fait inexacte (vulnérabilité évolutive); la forte croissance des actifs sur Casablanca induites par les dynamiques de croissance de population, de densification et d'extension spatiale, milite là encore pour la méthodologie adoptée.

A défaut de pouvoir offrir une image quantitative rigoureuse des dommages au cours du temps, la projection en 2030 permet tout de même une **qualification de l'évolution du risque sur la période 2010-2030**. En effet, les facteurs diminuant la vulnérabilité sont souvent des événements discrétisables (mise en place d'un réseau de drainage de plus grande capacité ou construction de brises lames par exemple), tout du moins pour ce qui relève de la vulnérabilité structurelle. Il est vrai que l'amélioration des conditions de santé ou de la préparation au risque est en revanche plus continue. Notons que de tels impacts sur le BaU sont d'ailleurs plus subtils à estimer. En revanche, l'accroissement de la vulnérabilité est un phénomène présentant

²⁰ On pourrait imaginer de concevoir des fonctions de facteurs sous-jacents à la vulnérabilité par rapport au temps. En obtenant des tirages d'aléas dans le temps selon leurs lois respectives d'occurrence, on pourrait alors calculer un dommage représentant bien la vulnérabilité au moment de l'occurrence de l'aléa. En multipliant l'expérience avec un grand nombre de tirages, à l'aide par exemple de méthodes de type Monte Carlo, on pourrait en théorie recouvrir une image plus juste des dommages en tenant compte de l'évolution de la vulnérabilité sur un horizon donné. Toutefois le Consultant n'a pas trouvé dans la littérature d'étude suivant ce principe, qui demanderait par ailleurs un important travail de structuration et de traitement des données.

d'avantage de continuité: croissance de la population, densification de la valeur (croissance forte de l'immobilier), extension spatiale, etc.... Ainsi, l'évolution de la vulnérabilité peut globalement être considérée comme croissante, avec des seuils de forte baisse correspondants souvent à de lourds investissements structurels (les dents de scie dans l'illustration graphique ci-dessous). La pente de croissance de vulnérabilité peut décroître ou augmenter selon le degré d'intégration d'aspects plus diffus de la gestion du risque dans les politiques d'urbanisation (nouvelles normes de construction, plan d'occupation des sols, etc.), mais aussi de la croissance économique. D'un autre côté, l'aléa est globalement croissant - le CC apportant en général moins d'avantages que de déconvenues en ce qui concerne les risques -, les "pentes" prévisionnelles étant directement reliés à la fiabilité des descentes d'échelle. Ces deux tendances (aléas et vulnérabilité au cours du temps) permettent une estimation qualitative du risque sur la période 2010-2030, voire des tendances post 2030.

Figure 60 : Évolution de l'urbanisation et de la vulnérabilité



Le pendant des difficultés mentionnées est aussi à mettre en perspective avec le format de l'étude, en termes de temps et de budget notamment. Ce projet pilote doit donc à la fois reposer sur une capitalisation de l'existant méthodologique en matière d'analyse de risques, tout en innovant dans l'adaptation au format assez atypique proposé. Dans ce contexte, l'étude économique n'a pas le même sens que celle d'un projet classique.

Il ne saurait agir en effet d'un outil de décision concernant un projet précis au périmètre limité, mais plutôt d'une **simplification - non triviale - d'un phénomène complexe** - le lien entre urbanisation et les risques naturels - afin de faciliter l'appréhension de celui-ci, notamment à travers l'apport d'**éléments d'appréciation de la sensibilité de variables clef gouvernant le risque et la résilience urbaine**.

En préalable au calcul des coûts en lui-même, précisons un principe clef que nous avons choisi de suivre, parfois nommé dans le texte sous le vocable de **principe conservatif**: de façon générale nous privilégions la **sous-estimation des dommages économiques** plutôt que l'inverse. En effet les coûts de phase I représentent l'assiette de gains potentiels dans la suite de l'analyse (phase II). Or à la base, les méthodes d'aide à la décision d'investissements de

prévention, structurels ou non, reposent sur le principe de la surestimation des dépenses et la sous-estimation des gains, afin de s'assurer que la rentabilité déduite ne soit pas exagérément optimiste. De même, et nous y reviendrons (cf. 2.4), les incertitudes sont nombreuses; aussi, plutôt que de choisir une valeur tantôt dans le haut, tantôt dans le bas de la fourchette, mieux vaut garder la même tendance afin de toujours savoir qualitativement de quel côté l'erreur "penche".

Un dernier point méthodologique général important : le calcul des coûts effectué repose sur la notion de **coûts moyens annuels (CMA)** afin de tenir compte des fréquences et intensité des aléas. Pour un type de désastre donné, l'intégrale des coûts pondérés de leurs probabilités respectives donne le CMA, et correspond à un calcul d'espérance mathématique. Cette méthode donne une image juste de l'ensemble des événements possibles mais elle présente l'inconvénient d'être moins intuitive que la présentation d'un seul scénario donné (par exemple une inondation de fréquence centennale). En particulier, en tant que valeur moyenne, elle peut induire une atténuation de la prise en compte des extrêmes dans l'approche de la gestion des risques. Ainsi, dans la sous-section relative aux inondations en particulier (3.3), des calculs spécifiques de dégâts pour des événements théoriques donnés sont proposés.

Ces grands principes retenus, l'objet des sous sections 2.2 et 2.3 est d'exposer plus en détail les autres choix méthodologiques effectués. Le coût total d'un événement est calculé comme la **somme de ses coûts directs et indirects**.

2.2 Les coûts directs

Par **coûts directs** on entend l'évaluation des dommages directs. Les dommages directs sont les **dommages matériels**²¹ **directement imputables à l'évènement**, et vérifiables de façon tangible juste après l'évènement. L'évaluation des dommages économiques directs repose beaucoup sur un **travail SIG de croisement entre aléas et vulnérabilité**. Les dommages calculés résultent donc de l'étendue spatiale inhérente aux différents aléas et au vecteur de vulnérabilités de chaque type de tissu urbain affecté.

2.2.1 Bottom-up vs Top-down et fonction de dommages

Le calcul exhaustif des dommages peut en principe donner lieu à un besoin d'information quasi illimité sur la distribution spatiale de ces facteurs de concentration de la valeur afin de rendre au compte au mieux de la vulnérabilité. C'est une approche que l'on peut qualifier de **bottom up** dans la mesure où il s'agit d'agréger diverses données pour construire une image fiable des biens en jeu. A l'opposé, des méthodes de type *top down* consistent à déduire ces valeurs de données disponibles à une échelle plus grande (nationale ou régionale). Ainsi par exemple un ratio assurantiel classique est de considérer que la valeur des biens d'un site donné est comprise dans une fourchette entre 3 et 5 fois le Produit Intérieur Brut (PIB) de la zone en question, pouvant lui-même être dérivé de la densité de population.

²¹ Nous ne prenons pas en compte les pertes humaines pour deux raisons qui rentrent en conflit évident avec le principe conservatif annoncé: 1/ plus que dans le champ du strict dommage matériel, la prévision en la matière est incertaine; 2/ le débat de la valorisation de la vie ou d'une blessure est complexe et conduit à des résultats très variables; Ainsi parfois, le seul "poids" des blessés et morts vaut plus du double de la somme des coûts directs et indirects matériels (Cassale et Al, 2004).

Le PIB du grand Casablanca en 2030

La prévision du PIB d'une zone à un horizon futur est un exercice prospectif toujours délicat. Nous avons d'abord estimé le PIB national en 2030 en s'appuyant sur les prévisions du FMI jusqu'à l'année de 2014 en DH constant de 2010. Un taux d'augmentation réel du PIB par habitant de 3,5% a été appliqué à la période 2015-2030. Ce taux suit l'estimation faite par le FMI sur la période précédente et la tendance utilisé par l'OMS fournie dans le rapport *Updated projections of global mortality and burden of disease, 2002-2030* de l'OMS de 2005. Le résultat obtenu semble cohérent avec le rapport sur le Maroc de *Perspectives Economiques de l'Afrique de l'OCDE (2008)*.

Nous avons alors utilisé les perspectives démographiques du Haut Commissariat au Plan, en appliquant un facteur correcteur pour tenir compte du fait que l'intensité économique moyenne d'un habitant de la capitale est supérieure à la moyenne nationale. En l'occurrence et à l'aide des données de PIB par tête par région figurant dans les Comptes Régionaux de 2004 et 2007 du Haut Commissariat au Plan, ce coefficient a pu être estimé à 1,77.

On obtient finalement un **PIB pour le Grand Casablanca et la vallée du Bouregreg en 2030 de l'ordre de 436 milliards de DH** (436 000 MDH), exprimés en DH constants (de 2010).

En principe la collecte exhaustive de données de l'approche *bottom up* est préférable. Elle n'est toutefois que rarement possible, étant donné le coût élevé et le temps qu'elle requiert. D'ailleurs, même dans des cas de quantifications poussées, les incertitudes demeurent nombreuses. En réalité dès qu'un exercice de quantification s'applique à une certaine échelle, il est inévitable de poser des hypothèses simplificatrices dans ce domaine.

La présente étude se situe dans une **échelle intermédiaire** encore assez peu explorée, puisqu'il s'agit de traiter de plusieurs larges extensions urbaines et divers aléas, sous une réelle contrainte de temps et de budget. L'objet a donc été de construire des valeurs permettant une **approche *bottom up* adaptée selon le niveau de données accessibles**.

La comparaison avec des approches top down n'est pas toujours possible car les périmètres recouverts peuvent être distincts, mais toutefois, il nous a semblé utile de tenter des mises en correspondance lorsque possible. Notamment dans le but de valider ou d'invalider le constat que les approches bottom up fournissent des prévisions de dommages surestimées par rapport aux méthodes top down (De Perthuis et Al, 2010).

Une fois ce premier choix effectué, il existe différentes méthodes d'évaluation des dommages. L'étude offre une approche analytique avec des fonctions de productions ici en l'occurrence nommées **fonctions de dommages**. Leur construction repose sur des fonctions de vulnérabilités propres à chaque aléa et à ce titre précisée dans les parties correspondantes de la section 3. Elle se distingue des méthodes dites révélées, parmi lesquelles l'approche hédonique et les méthodes contingentes. L'approche hédonique consiste à analyser par exemple des prix unitaires de surface pour isoler l'impact d'une composante donnée, comme une pollution quelconque. Ainsi, moyennant un travail d'analyse statistique, il est possible de quantifier le dommage dû à cette pollution. Plusieurs méthodes contingentes existent, et ont

pour objet d'évaluer un consentement à payer. Notre choix s'est porté sur les fonctions de dommages pour plusieurs raisons:

- le respect du principe conservatif énoncé en début de section: les dommages calculés sont en général moindres avec cette méthode;
- la variabilité des résultats par méthodes révélées est en générale plus importante que dans les calculs de dommages directs, même si ceux-là présentent des incertitudes significatives.
- enfin les méthodes révélées demandent des études dédiées, rarement existantes et/ou accessibles.

Une fois acté le principe de la méthode *bottom up* et l'utilisation de fonction de production, encore faut-il clarifier la méthodologie de **valorisation économique des actifs dégradés**. Si par exemple une résidence est détruite par une tempête, comment quantifier le dommage? Faut-il compter par exemple le coût de reconstruction, dit encore coût de remplacement, c'est-à-dire à la valeur du neuf? Ou bien faut-il prendre en compte la durée de vie de l'habitat et évaluer le reliquat perdu et ne dédommager que partiellement, comme cela peut exister dans le domaine assurantiel? L'idée est d'évaluer ce qui devra être effectivement engagé financièrement, et non une idée de la valeur théorique perdue à cause du désastre. Cela revient à prendre en compte seulement la valeur du bâti dans la valorisation économique des actifs dégradés en estimant que la valeur du terrain ne sera pas directement impactée²².

2.2.2 La valorisation immobilière

Les coûts des désastres, et a fortiori du CC, ne peuvent être appréciés en tant que tel, mais doivent au préalable être mis en perspective vis-à-vis d'un état de vulnérabilité donné. Les coûts sont un reflet du risque et dépendent à ce titre de l'aléa, pour lequel sont pris ici en compte au mieux les effets du CC, mais aussi ceux de la vulnérabilité. La cohérence demande donc un travail sur **l'évaluation de la vulnérabilité future**. Dans le Casablanca et la vallée du Bouregreg de 2030 tel que projetés, certains facteurs conduisent à une augmentation de la vulnérabilité, d'autres à sa diminution. La densification urbaine d'une part, et son extension spatiale d'autre part, sont les principaux moteurs de la croissance de la vulnérabilité. A l'inverse, les futures infrastructures, telles la mise en œuvre d'un nouveau schéma de drainage urbain sur Casablanca ou encore le remblaiement de certaines aires du lit majeur dans la vallée du Bouregreg feront chuter la vulnérabilité.

Toutes ces hypothèses sont intégrées dans le scénario de référence. Pour chaque aléa, sont précisés les éléments du scénario BaU qui permettent de caractériser la vulnérabilité. L'exercice est par nature très prospectif et incertain, et c'est pourquoi il nous a semblé plus sensé de s'appliquer à décrire l'évolution de la vulnérabilité avec un nombre limité de facteurs, sur lesquels la projection comporte des incertitudes acceptables. Les principaux sont la valeur unitaire du bâti (en DH/m²), la densité (nombre d'habitants par hectare), l'emprise au sol (coefficient d'emprise au sol -CES ou nombre de m² habitables par hectare situés au rez-de-chaussée), et le coefficient de verticalité (nombre moyen d'étages). Ce "vecteur de vulnérabilité"

²² Voir aussi note #3 plus haut.

est défini pour chaque tissu de la typologie urbaine projetée proposée par le SDAU sur Casablanca et par les plans d'aménagement du Bouregreg dans la vallée éponyme.

Relevons ici la délicatesse du choix d'une **typologie dans un exercice multirisques** comme le nôtre. En effet idéalement à chaque aléa doit correspondre une typologie dédiée puisque celle-ci doit rendre compte des vulnérabilités et que celles-ci ne sont pas les mêmes suivant l'aléa considéré. Ainsi par exemple la typologie choisie ne permet pas de rendre compte du facteur de subsidence. Ce n'est pas là la seule raison : d'une part la nature géologique influe surtout sur la propension d'un sol à diffuser ou propager l'énergie mécanique ; il est possible de tenir compte de ce point dans l'aléa sismique (cf. rapport sur Tunis) mais cet aléa étant négligeable sur Casablanca, ce travail supplémentaire ne présentait pas de valeur ajoutée ; d'autre part le traitement en serait particulièrement complexe : comment déprécier, voire apprécier²³, un bâti en fonction de la subsidence dont le terrain fait l'objet ?

Ci-dessous, les coordonnées des différents vecteurs suivant les quatre "axes" de vulnérabilité de Casablanca. La valorisation immobilière est projetée à 2030 mais présentée en DH constant de 2010 (voir encadré ci-après, le tableau et la distribution des prix par quartiers).

Tableau 13 : Niveaux de vulnérabilité en fonction de la typologie urbaine

Typologie urbaine	axes de vulnérabilité	Valorisation unitaire Bâti (DH/m ²)	densité humaine (hab/ha)	Coefficient de verticalité	CES
espaces urbain mixtes : Dense		10 720	281,6	4	20%
espaces urbain mixtes : Intermédiaire		5 840	158,4	2	25%
espaces urbain mixtes : Faible densité		4 880	52,8	1,1	34%
espaces urbain mixtes : Très faible densité		3 920	12,3	1,1	8%
Noyau Urbain en Milieu Rural		5 840	158,4	1,1	41%
Balnéaire Dense		9 760	90,0	2,5	28%
Balnéaire Faible		9 760	30,0	1,2	17%
Parcs d'activités		480	NA	1	10%

Même si la typologie retenue n'est pas toujours très homogène par rapport à la distribution des prix observée (voir ci-dessous), il est possible de s'accorder sur des valeurs.

- Dans les zones denses la moyenne des prix au mètre carré de l'appartement dans les secteurs centraux et parfois périphériques (Hay Hassani, Ain Chock,...) bien positionnés se situent au-dessus de 10.000 DH/m² ; les valeurs de l'immobilier non résidentiel s'élèvent en moyenne à 11000 DH/m² dans des quartiers de moindre standing commercial, pour se situer entre 20.000 DH/m² et 30.000 DH/m² à Sidi Maârouf (Centre d'Affaires) et 22.000 DH/m² à 27.000 DH/m² au centre de la ville pour se situent en moyenne entre 7.000 et 12.000 DH/m² dans des quartiers de moindre standing commercial.

²³ On pense bien sûr à la tour de Pise...

- Dans les zones moyennement denses les prix des appartements se situent entre 15.000 et 18.000 DH/m². La valeur des villas varient entre 8.000 et 12.000 DH/m² selon la situation et la finition de la construction.
- Dans les zones de faible densité la moyenne du foncier des maisons individuelles varie entre 18.000 et 22.000 DH/m² à Anfa Supérieur, entre 10.000 et 12.000 DH/m² à Ain Diab, entre 8.000 et 12.000 DH/m² à Californie et entre 7.000 DH/m² et 8.000 DH/m² à Dar Bouâzza.
- Pour le foncier industriel les prix varient entre 750 DH/m² et 1.000 DH/m² en fonction de la situation de la zone et de son degré d'équipements.

Un point clef dans notre exercice est d'anticiper l'évolution de ces valeurs (voir encadré suivant), mais aussi de savoir discerner au sein de la valeur immobilière, aujourd'hui et en 2030, entre la valeur du terrain et celle du bâti (ci-après l'encadré).

L'évolution de l'immobilier urbain à Casablanca: l'immobilisation des actifs

Malgré la difficulté d'accès et de traitement de données quantitatives objectives sur le sujet, il est possible de conclure que l'**immobilier de Casablanca** est en croissance depuis plusieurs années et que cette tendance semble pérenne. Même si récemment l'indice des prix des actifs immobiliers au Maroc a accusé un net recul les prix à Casablanca présentent globalement une "force de rappel à la hausse" due au relativement faible rapport de l'offre à la demande.

Ainsi et malgré une certaine variabilité spatiale et par catégorie d'immeuble des prix au m², Casablanca, à l'instar de beaucoup de villes, se densifie : **la valeur se concentre, les actifs s'immobilisent**, aux sens propre comme figuré. La vulnérabilité s'en trouve affectée de fait.

Nous tenons compte de cette tendance en ramenant toutefois l'évolution des prix en DH constants de 2010. A prix actuel donné, cela revient à considérer une augmentation de valeur unitaire d'environ 20% par rapport à la valeur actuelle, en terme réels de 2010. Nous ne considérons en effet qu'une croissance sur 10 ans, correspondant à peu près aux cycles immobiliers observés dans des contextes comparables. Même si le ratio choisi est assez conservatif (il est tout à fait probable que l'augmentation de valeur aille bien au-delà), la sensibilité sur le résultat final est importante puisque c'est l'ensemble des aléas qui est croisé avec la vulnérabilité²⁴.

Nonobstant l'impact du changement climatique sur les aléas, l'évolution de la vulnérabilité, fruit de dynamiques humaines, affecte déjà le système urbain de façon considérable, par simple extension spatiale et densification.

C'est particulièrement le cas sur Casablanca dans la mesure où la valorisation des actifs est très élevée. En effet, le rapport de l'estimation des actifs au PIB sur la zone considérée, le tout en 2030, est particulièrement élevé, puisqu'il est de l'ordre de 9, soit entre deux et trois fois plus que les ratios usuels. Cela traduit en quelque sorte **la considérable intensité capitalistique de la zone par rapport au niveau de vie moyen**. Dans le prisme de l'analyse économique ici menée, cela révèle par une **vulnérabilité particulièrement élevée**.

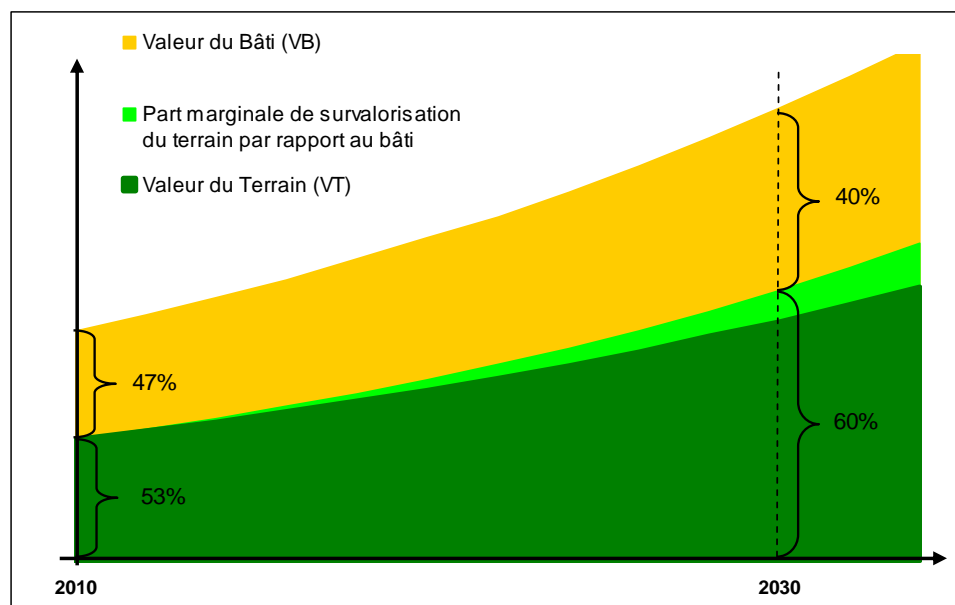
La valeur de l'immobilier (VI), correspondant au prix du marché, se compose de la valeur du terrain (VT) et de la valeur du bâti (VB). Dans le vecteur de vulnérabilité nous utilisons VB, ce qui revient à supposer que les aléas n'affectent pas VT²⁵.

Les VB sont dérivés des prix de marchés tels que projetés en 2030 (voir encadré ci-dessus). Le pourcentage de la VB dans la VI actuelle, soit le ratio $(VB/VI)_{2010}$, a été estimé pour chaque tissu urbain²⁶. Il s'agit alors de spéculer sur l'évolution de ce ratio à l'horizon 2030; il est raisonnable de formuler deux hypothèses extrêmes offrant une fourchette de valeur crédible:

1. le ratio VB/VI reste constant entre 2010 et 2030. Cela signifie que la répartition entre VB et VT de la valorisation marginale sur cette période se fait dans des termes identiques à la situation présente.
2. la VB reste constante entre 2010 et 2030: la valeur se concentre davantage dans le terrain qui capte l'intégralité de la valorisation marginale sur la période considérée.

L'intuition veut que la part marginale de VB dans VI décroisse au fur et à mesure que VI augmente. Dans le cas des tissus de Casablanca, il faut donc trouver une valeur intermédiaire entre 37% et 47%; nous prendrons finalement $VB/VI=40\%$ en 2030.

Figure 61 : Décomposition et évolution de la valeur de l'immobilier



Les études font parfois la distinction entre les fonctions des actifs impactés (logement, commerce ou industrie), le logement pouvant typiquement représenter de l'ordre de 2/3 du total. Toutefois les décalages entre les courbes de vulnérabilité étant inférieurs aux incertitudes elles-mêmes, cette distinction n'apportait pas de valeur ajoutée dans notre cas, nonobstant la difficulté d'accès à des données fiables.

2.2.3 Infrastructures collectives

Notre approche *bottom up* des coûts directs se fonde d'abord sur la valeur immobilière (voir encadré ci-dessus). Toutefois lors d'aléas d'autres actifs subissent des pertes qu'il convient d'estimer également; notamment les bâtiments et infrastructures publiques (réseaux de transport, d'énergie, d'eau et d'assainissement...) ainsi que le mobilier. Ce dernier sera directement intégré dans les fonctions de dommages propres à chaque type d'aléas. La prise en compte de la valeur de chaque type de réseau et de leurs distributions spatiales respectives est hors de portée de cette étude. En croisant des données régionales et des valeurs rencontrées dans la littérature, nous avons fixé un coefficient de 10 à 20% à ajouter à la somme des valeurs immobilières et mobilières d'une zone donnée pour recouvrir l'ensemble des dommages directs.

A moins de disposer d'un jeu de mesures particulièrement fiables, ce choix résulte nécessairement d'un compromis, car les données disponibles sont relativement éparpillées. Ainsi, dans Hallegatte et Al. (2008) un retour d'expérience de Katrina permet de disposer d'un ratio de 30%, finalement ajusté à 40% par similitude avec une étude britannique. Sur Tunis un calcul (BCEOM, 2005), aboutissait à une valeur d'environ 15% par rapport aux coûts immobiliers et mobiliers d'une inondation, dont 7,5% pour les seules infrastructures routières. Les deux chiffres sont assez différents. Deux raisons peuvent être avancées: le périmètre choisi dans l'étude sur Tunis n'est peut-être pas très extensif, et la densité d'infrastructures publiques est sans doute plus importante dans les pays les plus développés. Nous prendrons donc une valeur intermédiaire de 20%, que nous réduirons à 10% dans le cas des séismes qui certes font relativement plus de dégâts (cisaillement) mais pour lesquels la base immobilière permettant de dériver le coût des infrastructures est plus importante que dans les inondations (qui ne comptabilisent que la part immobilière du rez-de-chaussée).

2.3 Les coûts indirects

Les points évoqués ci-dessus concernent les coûts directs. Le **calcul des coûts indirects** est toujours plus délicat. D'abord pour une **question de périmètre**, qui varie plus ou moins en fonction des auteurs, ce qui complique les comparaisons et transpositions. Ensuite car les incertitudes y sont toujours très importantes et que de surcroît ces coûts représentent une part importante des coûts totaux. C'est là le principal obstacle. En cohérence avec notre approche, basée sur la préférence à la sous-estimation des coûts, afin de ne pas surestimer l'assiette des bénéfices potentiels en phase II, nous privilégions un périmètre restreint.

Une autre difficulté complexe, qui a trait à la nature particulière de l'objet considéré, mérite une mention: la ville. En effet, les pertes indirectes sont souvent évaluées comme des **pertes d'opportunités**. Par exemple, du point de vue d'un commerçant qui verrait son outil de travail endommagé, la production alors non réalisée serait comptabilisée en perte indirecte. Mais du point de vue d'un ensemble plus grand, s'il est possible de trouver des substituts locaux à ce commerçant, il n'y a pas de perte, sinon la seule "force de frottement" économique du coût de la relocalisation, simple perte d'efficacité. Se pose alors la question de ce qui est irremplaçable et ce qui ne l'est pas... la définition qualitative seule est difficile, mais elle est de toute façon insuffisante: une petite partie du bord de mer peut être perdue sans "dommage" si quelques logements sont réaffectés plus loin. En revanche, le raisonnement ne tiendra plus à partir d'un certain niveau de destruction du front de mer. Il en va de même pour le commerce, l'industrie, etc....

On perçoit bien ici la grande complexité de formalisation d'une notion finalement assez intuitive: la capacité d'absorption ou peut être encore la résilience d'un site. Si l'on poursuit qualitativement, on peut également anticiper qu'un **effet d'échelle** va intervenir: la part des coûts indirects doit croître rapidement avec les dommages directs. On pourrait même penser à définir un **indicateur de résilience** face à un aléa donné comme le point précis où les coûts directs dépassent les coûts indirects, ou plus intéressant encore, lorsque la pente de la fonction associant coût direct à coût indirect devient supérieure à l'unité...

Les tentatives de formalisation un peu élaborées²⁷ du calcul des coûts indirects ne sont pas si nombreuses. Le modèle ARIO en fait partie (voir Hallegatte, 2008). Basé sur l'étude de Katrina, il rend compte quantitativement des tendances évoquées ci-dessus. Ainsi la question du "calage" d'une estimation des coûts indirects se trouverait intimement liée à l'appréciation de la résilience de la ville. Katrina est un désastre majeur pour lequel les coûts indirects représentaient 40% des coûts directs. Toutefois, dans notre contexte, il est à craindre qu'un désastre majeur soit relativement plus marquant d'un point de vue économique.

Il est intéressant de comparer les ordres de grandeur, même si les périmètres diffèrent parfois: Dans l'étude des inondations du Grand Tunis par exemple (BCEOM, 2005), les coûts indirects d'une inondation estimée centennale sont estimés à 60% des coûts directs, basés sur une estimation des jours de travail perdus pour le Grand Tunis. Pour le séisme de Manara en Turquie (magnitude 7,4), la Banque Mondiale a estimé des coûts indirects entre 30% et 100% des coûts directs; Sur Katrina, une évaluation proposée situe la part des coûts indirects à 40% des coûts directs (Hallegatte, 2008). Dans d'autres travaux (Cassale et Al, 2004), 40% est plutôt le point bas de la fourchette. Seul un cas - théorique d'ailleurs - dans la littérature consultée aboutit à des coûts indirects presque négligeables, sur Copenhague (Hallegatte et Al, 2008).

Il est problématique d'avaliser des chiffres importants avec beaucoup d'incertitude (cf. la section suivante); nous préférons ainsi faire un **calcul estimatif des coûts indirects se voulant réaliste mais plutôt sous estimé consciemment** que de prendre une quelconque moyenne sans savoir si le résultat est plutôt à minorer ou à majorer.

Bien qu'envisageable, il nous semble peu opportun de construire et caler une quelconque correspondance entre coûts directs et indirects, à l'instar des comparaisons faites ci dessus. Outre la difficulté de calage, cela implique une simplification excessive: les coûts directs sont très sensibles aux valeurs mobilières et immobilières, alors que l'intuition rattache plutôt la **force motrice des coûts indirects au facteur humain**. Nous optons donc de rendre compte de cette dernière par l'usage de la densité de population et de son intensité économique.

Les coûts indirects associent une perte en homme-jours sur les zones touchées en fonction de l'intensité de l'aléa, ainsi qu'une perte de même nature unitairement plus faible mais sur une zone plus grande (là encore dépendant de l'aléa), afin de rendre compte de la relation de cause à effet entre un lieu touché et l'impact sur son environnement plus ou moins éloigné.

Il est intéressant d'examiner les grandes forces motrices et **sous jacents des coûts directs et indirects** ainsi modélisés: les surfaces en jeu, rendant compte de la topographie, et les densités matérielle et humaine. Rendant compte à la fois de la vulnérabilité liée à l'intensification et à l'extension, elles représentent à la fois des variables libres, ce qui est une façon de **dépasser des modèles simplistes** et de **prendre en compte la multiplicité des dynamiques urbaines**, sans pourtant être tout à fait orthogonales, manifestation de leur complexe imbrication.

2.4 Discussion sur le domaine de validité des résultats

Il est souhaitable d'envisager cet aspect dans son ensemble et pas seulement au cas par cas. En effet, les thématiques abordées sont nombreuses, et par essence les sciences naturelles imposent de savoir travailler avec des données parfois (très) approximatives. A cela se rajoute la mise en perspective temporelle (horizon 2030) et la prise en compte d'un phénomène très complexe, dont la compréhension n'est que très partielle: le CC. La prise en compte d'aspects économiques soulève elle aussi en général des interrogations sur le domaine de validité des données utilisées. Enfin, la dimension géographique étudiée est particulièrement vaste. Il résulte qu'une question simple, formulée ici dans sa forme la plus abrupte, ne doit pas être éludée: Jusqu'à quel point demeure-t-il un sens à tirer des conclusions quantitatives lorsque plusieurs niveaux d'incertitudes se cumulent tout au long du raisonnement?

Lorsqu'une étude rencontre de fortes limitations sur un caractère irréductible et fondamentalement problématique, il n'y a d'autre issue que d'en tirer les conclusions appropriées sur la fonction à laquelle l'étude peut prétendre. C'est là l'objet du questionnement sur la portée et le sens de l'analyse économique développé en 2.1. Au-delà de cette généralité, certains points méritent d'être abordés plus en détail ; nous les regroupons en trois catégories : la gestion des incertitudes, les dilemmes éthiques inhérents à la valorisation et enfin deux autres spécificités particulières que constituent la valorisation de l'effet de hub et du patrimoine.

2.4.1 La gestion des incertitudes

Un enjeu méthodologique est celui de **l'approche quantitative choisie**, afin de caractériser les incertitudes. Les méthodes employées pour la caractérisation des aléas sont pour la plupart des désastres probabilistes: à un vecteur caractérisant l'intensité de l'aléa est associée une période de retour, soit une distribution de l'intensité d'un aléa donné. En revanche le calcul des dommages pour quelques vecteurs caractéristiques est purement déterministe, même si des fourchettes d'incertitudes peuvent alors être estimées. Ainsi, dans le cas des séismes, inondations et tsunamis, le calcul des dommages est celui d'une espérance mathématique, correspondant au coût moyen annuel (CMA) des dommages. L'idéal est en réalité de pousser la probabilisation sur le module de vulnérabilité et le calcul des dommages. C'est l'objet de certaines techniques assurantielles, et du développement d'indicateurs tels que le dommage maximum probable, correspondant à une période de retour donnée. C'est notamment intéressant pour des événements rares mais très destructeurs, où une approche par la valeur moyenne peut occulter la nature réelle du risque. Si les opérations permettant de passer de l'aléa aux dommages sont simples en général, la formalisation de la probabilisation n'est pas immédiate car la loi de l'aléa n'est pas toujours simple à composer. L'usage d'outils spécifiques statistiques, hors du cadre de cette étude, peut être requis. Nous nous contenterons donc d'une

gestion tout à fait classique des incertitudes, par tests de sensibilité, et conformément à la méthodologie.

Il est légitime de s'interroger sur les incertitudes du scénario **BaU du point de vue des aléas**. Outre la spécificité de l'analyse de chacun, la particularité de l'étude est l'intégration du CC. Dans ce domaine, l'incertitude des modèles globaux se cumule avec celle des modèles régionaux. Leurs résultats ne sont pas toujours très concluants, les tendances proposées pas nettes, surtout sur les précipitations, et encore plus sur les extrêmes. Dans ce contexte le choix d'un BaU CC, correspondant à un scénario possible est délicat.

Sur les **modèles globaux**, au-delà même des débats méthodologiques de traitement des données passées ou contemporaines, se situe une première difficulté méthodologique en ce que le GIEC se refuse à associer des probabilités aux 6 familles de scénarios développés, ce qui lui est d'ailleurs souvent reproché. Le Consultant ne peut évidemment fournir cette réponse à la place d'un panel d'experts du sujet. Toutefois, il est possible de se rassurer sur ce point précis par un argument d'**inertie climatique**: l'évolution vers tel ou tel scénario se fera ressentir dans une cinquantaine d'années, et non à l'horizon de l'étude. L'enjeu d'incertitude repose donc finalement plus sur les conséquences d'émissions plus contemporaines.

Un autre enjeu est celui de **la robustesse et la bonne tenue des modèles régionaux de descente d'échelle**. Là encore, il s'agit d'un débat très spécialisé, et pour lequel le Consultant s'est appuyé sur des interlocuteurs maîtrisant l'état de l'art. Il est heureux que dans le cas du Maroc les résultats entre les différentes modélisations sont cohérents.

Nous avons vu ci-dessus qu'il n'était pas possible dans le cas de cette étude de suivre intégralement une approche probabiliste, finalement la mieux à même de caractériser l'incertitude. Puisque nous devons procéder différemment il convient de rappeler un fait simple: **il n'y a pas de trop grande incertitude en soi**. Celle-ci s'apprécie au regard de ce que l'on cherche à décider. Si l'on souhaite caractériser l'évolution d'une grandeur dans le temps et que l'on sait la mesurer avec une incertitude de l'ordre de 1%, alors il sera très difficile de parler de croissance ou de décroissance si les variations observées sont du même ordre de grandeur que l'incertitude elle-même. A l'inverse de grandes incertitudes ne sont pas forcément incompatibles avec des conclusions si les variations observées sont considérables au regard de ces incertitudes. De plus, la sensibilité des modèles employés entre les variables d'entrée et de sortie impactent fortement la notion d'incertitude. A l'exception des modèles climatiques, sur lequel le Consultant n'a pas de prise réelle, et conformément à la méthodologie, c'est l'approche par tests de sensibilité qui a été retenue. Notons que cette question ne saurait être définitivement tranchée à ce stade puisque l'ACB s'achève en phase II, et que c'est à cette étape que doit être menée globalement cette analyse, avec le fameux calcul de la VAN. L'indicateur mêlera alors en effet des facteurs de nature géologique, hydrologique, hydraulique, géographique - surtout la topographie et donc la précision du modèle numérique de terrain (MNT) - et socio-économique. Sans parler de l'éternelle question de l'actualisation. Nous tâcherons alors de présenter un travail nuancé entre l'acquis de la littérature sur ce sujet²⁸, et l'adaptation propre à notre contexte. S'il subsiste des doutes importants à ce stade de synthèse, nous pourrions ajuster les bénéfices à l'aide de *scaling factors*²⁹ en cohérence avec notre approche conservative.

Pour ce qui est de ce chapitre, une incertitude majeure concernait la valeur immobilière en 2030, et le calage des courbes de vulnérabilité propres à chaque aléa ainsi que l'évaluation des hommes-jour pour les coûts indirects, mais essentiellement pour les inondations et les séismes.

Sur ce point l'expertise de l'urbaniste et de l'hydrologue ont été clef notamment pour caractériser la densité et le type de bâti³⁰. Notons aussi que le fait de traiter une zone très grande offre la possibilité de bénéficier d'un facteur d'échelle qui joue plutôt en notre faveur, puisque l'utilisation de fonctions moyennes sur une petite zone peut conduire à des erreurs relatives plus importantes que sur une aire vaste qui aura tendance à lisser les irrégularités.

Pour autant, il conviendra de ne pas mélanger tous les débats; notamment, même si l'enjeu est le même - la fiabilité des conclusions tirées -, nous maintiendrons la distinction entre des incertitudes et les méthodologies choisies. Par exemple, la méthode de calcul des CMA, espérance mathématique de dommages annuels, est critiquable en ce sens qu'elle ne prend pas toujours en compte l'évolution de la vulnérabilité, notamment l'évolution géomorphologique d'un lit de rivière par exemple, ou encore la continuité de l'évolution climatique. Aucune méthode ne répond à toutes les exigences et contraintes, et le choix d'une méthodologie doit être distinct de la fiabilité des données, même si leur interaction n'est pas triviale: mieux vaudra prendre un modèle simple d'évolution de la vulnérabilité plutôt qu'un complexe, potentiellement plus fiable, mais dont on n'aura pas la capacité d'apports des données d'entrées (plus importantes).

Enfin une notion utile pour encadrer la **qualité variable des données** est d'introduire une **typologie sur leur fiabilité**. Le DEFRA britannique (*Department for Environment, Flood and Rural Affairs*) propose la suivante, par ordre décroissant de qualité: *Best of Breed, Data with known deficiencies, Gross Assumption, Heroic assumption*. La plupart des données utilisées relèvent des deuxième et troisième catégories. Lorsque ce n'est pas le cas, cela est mentionné.

2.4.2 Le dilemme éthique de la valorisation

Dans la méthodologie employée, basée sur la valeur immobilière pour les coûts directs et sur la valeur du travail pour les coûts indirects, toute chose égale par ailleurs **la vulnérabilité est de fait moindre dans les quartiers défavorisés, puisque la valorisation unitaire y est inférieure**. Ce choix est **discutable d'un point de vue éthique**. D'autant que la capacité de résilience est souvent moindre lorsqu'on est déjà fragilisé économiquement. En effet l'utilité marginale de la richesse absolue est décroissante; mieux (ou pire), le résultat est aussi vrai sur la richesse relative: non seulement un DT perdu à moins de valeur suivant qu'on en ait beaucoup ou peu, mais même une perte de x% de son capital est plus ou moins déstabilisante suivant la valeur absolue de ce capital. Une catastrophe peut avoir l'effet de discontinuité qui fait basculer un individu dans la spirale de la pauvreté critique, ce qui a moins de chance d'être le cas sur un individu présentant une plus grande capacité de résilience économique.

La littérature propose *a priori* deux façons de rendre compte formellement de cette contrainte éthique dans notre approche. On peut tout d'abord tenir compte de l'incidence sur la mortalité et la santé des désastres. La valorisation de la vie ne dépendant en général pas du statut social³¹, et les quartiers défavorisés présentant en général une plus grande densité, c'est par la valorisation de la vie que l'on peut rééquilibrer l'équation. Cela pose toutefois deux problèmes majeurs: l'évaluation de la mortalité, très hasardeuse, et surtout la valorisation de la vie, toujours très discutable. Le problème de cette méthode est que la gamme de choix des chiffres permet en fait d'arriver à peu près à n'importe quel résultat souhaité. Cette grande variabilité et incertitude n'est manifestement pas compatible avec le principe conservatif retenu dans notre approche. La deuxième solution est d'affecter des coefficients correcteurs pour effectuer un rééquilibrage; on peut ainsi par exemple pondérer les dommages par catégories sociales (en divisant la population par quintile de revenus) à l'aide du rapport entre le revenu moyen global

et le revenu moyen du quintile de chaque catégorie en question. Là encore le problème est double. D'abord, le choix du coefficient est finalement aussi très arbitraire, et si l'on suit l'exemple d'un découpage par revenus, dépend de beaucoup de la finesse de ce découpage³². Une difficulté supplémentaire tient au fait que les statistiques rendront mal compte de populations très défavorisées en ce qu'elles ne sont souvent pas ou peu partie prenante de l'économie formelle. Mais plus fondamentalement, sachant que **la base de la méthode consiste en une intégration de surface sur la zone endommagée de caractérisations unitaires de la valeur**, il est en quelque sorte **antinomique de redresser artificiellement les résultats** si l'on constate que certaines zones sont sous valorisées.

La troisième voie proposée consistera donc à ne pas essayer à tout prix de rendre compte de tout de façon quantitative afin de décider uniquement sur ces bases, mais bien au contraire **d'assumer le caractère partiel de l'analyse économique dans les termes du choix de l'aménagement futur**. Il est illusoire, voire dangereux, de considérer qu'une vision urbaine peut être dérivée d'un chiffre qui capturerait à lui seul l'ensemble des dynamiques de risques en jeu, tout en intégrant des dimensions éthiques difficiles à quantifier. Si la complexité et le caractère transversal des thématiques de risques demandent l'association d'imagination et de rigueur pour conserver la valeur ajoutée d'une approche rationnelle et quantitative, il relève aussi du devoir de conseil de **savoir fixer une limite au périmètre à intégrer et à la complexité à gérer, au-delà de laquelle la quantification perd de son sens**. C'est aussi une opportunité de (re)consacrer le caractère humain et politique au centre des politiques d'urbanisation face à la tentation possible de tout réduire aux ingénieries et à leurs lots d'optimisations. Face d'une part aux incertitudes en jeu, mais surtout au caractère éthique et fondamentalement politique de certains choix, des équilibres et complémentarités opportunes sont à rechercher entre conseillers techniques et responsables politiques et administratifs de l'aménagement. La condition *sine qua non* à cette complémentarité est le devoir de transparence de l'ingénieur sur ses hypothèses de travail, et sur ce qu'il peut ou non prévoir, et avec quelle degré de certitude.

2.4.3 Prise en compte d'autres spécificités locales: effet de hub et patrimoine

Le chiffrage des coûts indirects ne rend pas compte du statut particulier de Casablanca en tant que capitale, en ce qu'elle concentre une part significative des activités économiques et des fonctions politiques et administratives à l'échelle du pays, voire de la région. Lorsque celles-ci sont perturbées au-delà d'une certaine amplitude, ce n'est bien évidemment pas uniquement Casablanca qui en pâtit. Malgré les difficultés certaines que pose ici la formalisation de l'intuition, l'idée que **Casablanca et la vallée du Bouregreg constitueront en 2030 un point nodal** particulièrement structurant, sorte de hub, dans l'ensemble **des flux matériels et immatériels** marocains et même méditerranéens ne doit pas pour autant être ignorée dans les processus de gestion de l'agglomération.

Il serait incomplet d'achever la discussion de la méthodologie retenue sans évoquer la notion de **valeur patrimoniale**. La méthodologie proposée en rend implicitement compte de façon très partielle, dans la mesure où certains prix peuvent traduire cette caractéristique (davantage au travers de la valorisation du terrain que par la valorisation du bâti, mais pas exclusivement). De façon plus générale, la valeur du patrimoine demeure une notion est particulièrement subjective. Quoiqu'il en soit, il s'agit là encore d'une limite de l'étude, dont le format ne permet pas de rendre compte de façon satisfaisante de ce point très particulier, ayant trait à une très forte concentration de valeur – musée, site historique, etc.... Cette limite est acceptable et cohérente avec l'approche conservatrice dans la mesure où l'on néglige plutôt des survalorisations que

des sous-valorisations par rapport au marché. Comme pour tous les aspects dont la quantification est complexe, il ne s'agit pas de ne pas considérer cet aspect dans les processus décisionnels d'aménagement, mais simplement de le faire de façon qualitative à défaut de données quantitatives.

3 Évaluation des coûts socio économiques de l'impact du changement climatique et des catastrophes naturelles

3.1 Séismes

L'aléa de sismicité est jugé très faible, il en va donc de même pour les coûts afférents à cet aléa.

3.2 Tsunamis

L'aléa de tsunami est jugé faible, il en va donc de même pour les coûts afférents à cet aléa. Comme le cas du tsunami est un peu moins évident que le cas du séisme sur la zone, il est possible de se rassurer quant à la conclusion tirée.

Une première précision d'impose: si une part du trait de côte devait être affecté, ce serait sur Casablanca uniquement (le BaU du Bouregreg comportant une digue circulaire de protection, Rabat et Salé ne font pas partie de la zone d'étude).

La question de l'impact a trait aux conditions de génération de la vague, de nature sismique, ainsi que à la transformation de la vague au voisinage du rivage d'une part, puis sur le rivage (calcul du run up). Tous ces paramètres demandent des calculs très localisés, il est donc relativement délicat de traiter une côte dans son ensemble dans le format de la présente étude. Toutefois, en échantillonnant le profil de plage actuel, en ayant en tête l'urbanisation projetée au voisinage de la côte, on peut émettre l'hypothèse qu'un faible pourcentage du trait de côte (1km), serait susceptible d'être en danger sur un évènement centennal. En faisant aussi des hypothèses de pénétration (run up de 20m), on peut estimer un ordre de grandeur de surface inondée (200 ha). En prenant une submersion de entre 50 cm et 1 m (l'estimation est assez conservatrice, afin de compenser le fait de ne pas tenir compte explicitement de l'aspect dynamique du phénomène), on obtient un **CMA de 15 MDH environ, soit 0,003% du PIB** de la zone considérée. De façon analogue à la discussion sur les ressources en eau (voir plus bas), l'idée n'est pas de débattre tant sur le bien fondé du chiffre ou son incertitude mais de démontrer que l'ordre de grandeur en jeu est négligeable au regard de l'objet *in fine* considéré. C'est bien le cas ici et nous ne comptabilisons donc pas ce coût.

3.3 Inondations

Le risque inondation est difficile à qualifier. Contrairement au risque sismique par exemple, qui peut être estimé de façon relativement homogène sur la zone d'étude, il est très différencié suivant la distance au réseau de drainage et la topographie locale. L'approche idéale de modélisation urbaine systématique est exclue, étant donnée l'aire considérée et le format temps / budget de l'étude.

Notre **BaU** en matière de risque inondations est basé sur le schéma directeur de drainage de Casablanca, actuellement en cours de mise en place par la LYDEC, qui prévoit une protection pour des évènements décennaux. La question de l'extension urbaine, qui affecte (augmente) certains coefficients de ruissellement et donc des débits entrants ne pose pas de problème réel d'approche, puisque le schéma prévoit que la périphérie doit se mettre en conformité de façon très restrictive - débit spécifique de 1 l/s/ha. Reste le cas particulier des Oueds, notamment le Bouskoura, avec le projet de collecteur Ouest qui doit absorber un évènement de période de retour de 20 ans. Ce cas de figure n'est pas trivial, notamment car la question du phasage entre le débordement de l'oued et la saturation des collecteurs urbains se pose. En effet, le bassin du Bouskoura est très localisé, donc *a priori* il s'agit d'une configuration où il convient de considérer le cas défavorable de la corrélation positive (simultanéité) des évènements débordants.

Nous n'avons pu obtenir de données de réseau quantitatives permettant de modéliser Casablanca, même en partie, à la différence de ce qui est proposé dans le rapport sur Tunis. Vu la complexité de la discipline, il était possible de s'arrêter à de pures descriptions qualitatives. Nous proposons toutefois une estimation, avec de plus grandes incertitudes, qu'il convient d'apprécier en tant que telle. C'est ce qui est développé ci-dessous.

Quant à la **vallée du Bouregreg**, la documentation disponible indique un dimensionnement résistant aux évènements centennaux, ce qui conduit à des **CMA négligeables** sur cette zone. Savoir si les dimensionnements prévus ou en prévision (remblais, digues, régulation du barrage, évolution hydrogéomorphologique du lit, etc.) permettent ou non à cette propriété d'être vérifiée ne relève pas du cadre de cette étude.

Pour **Casablanca** il s'agit d'appliquer une **méthodologie de type fonctions de dommages** où la qualification du risque d'inondation repose sur des surfaces inondées associées à une classe de hauteur d'eau (de 0 à 2 m avec des classes de 50 cm). Comme dans la plupart des études nous ne représentons pas les aspects dynamiques de l'aléa (vélocité de l'eau et durée d'inondation). A partir d'une courbe de vulnérabilité associant un ratio de dommage à une hauteur de submersion donnée, nous croisons l'aléa pour chaque période de retour supérieure à la crue de débordement.

La difficulté consiste à établir la relation entre période de retour et répartition des surfaces inondées par classes de hauteurs. L'approche développée propose une adaptation et une capitalisation des efforts de modélisation effectués à Tunis, en profitant des similitudes avec le site de Casablanca (échelle, morphologie) et bien sûr en tenant compte de leur spécificités respectives (hydrologie, hydraulique, densité immobilière et humaine, intensité économique). Une fourchette de valeur est proposée pour le CMA directement sur l'échelle du pourcentage de PIB de Casablanca.

Fonction de dommages

La fonction de dommages (vulnérabilité) est construite à partir de données locales et plus générales, soit disponibles dans la littérature, soit propriété du Consultant. Les critères et données suivantes en sont un échantillon représentatif, en plus du principe d'approche conservative (cf. 2.2):

- La forme théorique d'une courbe de vulnérabilité aux inondations est convexe au voisinage de 0, afin de rendre compte de la notion de seuil d'habitation (surélévation), en dessous duquel les dégâts sont très faibles; cette convexité est d'autant à nuancer que le milieu fait un usage intensif de ses sous sols (garages et autres parties vulnérables en dessous de ce niveau). Une fois le seuil initial passé la courbe est au contraire plutôt de forme concave.
- Les ratios de dégâts maximum s'échelonnent le plus souvent entre 10 et 40% (de la valeur de l'actif). Dans l'Orb en France, (Erdlenbruch et Al. 2008), le ratio se situe autour de 10%; sur Nîmes, centre urbain plus important, il est compris entre 20 et 25% (Egis Eau, 2008). Sur la centennale de Tunis (BCEOM, 2005), la valeur est d'environ 20%, mais le périmètre pris en compte semble assez conservatif. Des ratios du même ordre figurent dans (Blin et Al, 2005)
- Notons que la littérature n'est que rarement exploitable utilement: les méthodes proposées font souvent appel à des données assez précises, obtenues dans des études d'un format tout autre (moins d'extension géographique et/ou plus de moyens), soit le contexte permet un accès à des données précises de façon assez centralisée; c'est par exemple le cas des méthodes standardisées de (USACE, 1995).
- Notons également que les fonctions de vulnérabilité rendent compte de situations non homogènes. En effet, sur certains bâtis, la destruction du gros œuvre demandera une réhabilitation presque totale, ce qui conduirait à un effet de seuil dans la courbe de vulnérabilité. Bien que ce taux soit en principe faible - 3% est un ordre de grandeur raisonnable³³ - son intégration dans la courbe de vulnérabilité à un impact sur cette dernière. Nous avons fait le choix de l'intégrer directement dans la fonction de vulnérabilité.
- Il a été mentionné que nous ne prenions pas en compte analytiquement les vitesses et les débris, ce qui incite à "durcir" la fonction de vulnérabilité; ce point doit tout de même être nuancé car la hauteur est souvent corrélée positivement à ces deux facteurs, donc implicitement et partiellement comptabilisée.
- La méthode proposée repose sur la valeur estimée du bâti et non la valeur immobilière (cf. section précédente).

L'hypothèse forte faite ici, que l'on peut qualifier de « *gross assumption* », voire de « *heroic assumption* », consiste à considérer que les morphologies des zones basses de Tunis et de Casablanca sont similaires (pente douce), en ce sens que leurs fonctions respectives « de remplissage » hauteur d'eau tombée → surface et hauteur inondée → volume sont proches. Cela permet bien de déterminer comment, à partir d'un évènement pluvieux de période de retour donnée, les surfaces inondées se distribuent entre les différentes classes de hauteurs d'eau.

Ce point réglé, le plus dur reste à faire : estimer le pourcentage de la surface inondée de la ville ($S_{Casa}^{\%}$) pour chaque période de retour, afin de pouvoir utiliser la fonction de dommage évoquée ci-dessus. Cela revient à caractériser la fonction $w: T \mapsto \%S_{Casa}$, avec T correspondant aux périodes de retour, $S_{Casa}^{\%}$ au pourcentage de Casablanca inondé.

La relation est décomposée par $T \xrightarrow{f} Q \xrightarrow{g} S_{ZB}^{\%} \xrightarrow{h} S_{Casa}^{\%}$, étant alors $w = h \circ g \circ f$.

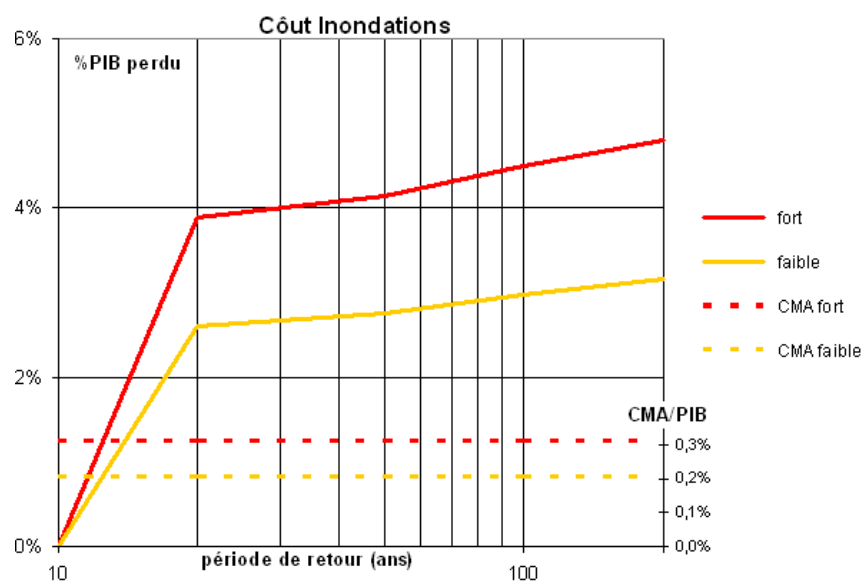
- La fonction $f : T \mapsto Q$ fournit les couples périodes de retours – débits pour la ville de Casablanca. Ces données sont fournies par l'expertise hydrologique en prenant en compte les scénarios hydrométéorologiques futurs et ainsi les débits de pointe à période de retour donnée.
- La fonction $g : Q \mapsto S_{ZB}^{\%}$ établit, à partir des données obtenues à travers la modélisation hydrologique et SIG des inondations des bassins versants des zones basses de Tunis, une relation entre débits et pourcentages de surface inondée. Cette relation est faite pour des bassins présentant une fourchette d'estimations large.
- Finalement, la fonction $h : S_{ZB}^{\%} \mapsto S_{Casa}^{\%}$ reprend l'hypothèse morphologique susmentionnée et ajuste certaines particularités de la ville de Casablanca par rapport aux zones basses de Tunis afin de fournir le pourcentage surfacique inondé sur Casablanca. Ces particularités concernent notamment le fait que le BaU de Casablanca en 2030 suppose un réseau de drainage urbain résistant aux évènements décennaux, alors que sur la plupart des zones de Tunis, la valeur est de 5 ans seulement.

Le résultat ne peut être que global et non pas par quartier, vu la méthode utilisée. La taille du site joue en notre faveur (effet d'échelle lissant les irrégularités locales et offrant aux estimations moyennes davantage de légitimité).

Notons que la sensibilité des coûts aux surfaces est très importante, ce qui indique une robustesse assez faible du modèle choisi (choisi par défaut, les éléments nécessaires à la modélisation plus fine étant indisponibles et hors du cadre de cette étude).

Les incertitudes sont importantes, intrinsèques à la méthode et amplifiées par l'importante intensité capitalistique du site (immobilisation de la valeur, cf. 2.2.2). Nous proposons finalement une fourchette de valeurs, haute et basse:

Figure 62 : Hypothèses de valorisation du coût des inondations



On peut donc retenir que l'estimation propose une fourchette de CMA associé aux inondations entre 0,2% et 0,31% du PIB de la zone concernée.

Cela semble assez/très élevé, notamment si l'on compare avec Tunis, qui est une zone où les pluies extrêmes sont supérieures à l'heure actuelle et où l'écart s'accroît encore davantage en 2030. Deux autres facteurs peuvent expliquer ces chiffres:

- la topographie d'une part: Casablanca est une ville en pente douce, alors que Tunis connaît des zones plus contrastées, les dommages se concentrant naturellement en zone basse;
- mais surtout, l'intensité capitalistique de Casablanca est considérable. Le rapport assiette de biens privés et publics ramené au PIB de la même zone est estimé à 9, ce qui est considérable. Cette vulnérabilité redresse mécaniquement les CMA.

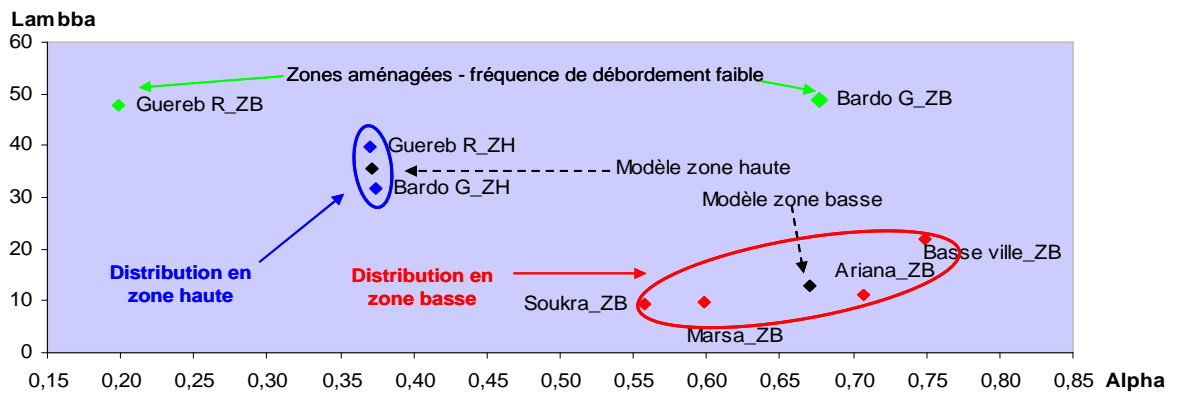
L'exercice est difficile, et l'intuition pas toujours évidente ni fiable. Aussi, une **méthode de recouplement** des résultats a-t-elle été recherchée. Nous avons alors fait appel au modèle économique développé sur les zones de Tunis que nous n'avions pas pu explicitement modéliser d'un point de vue hydraulique. Ce travail a en effet permis de déterminer des couples (α ; λ) caractéristiques par type de zones. D'un point de vue morphologique, Casablanca s'identifie au couple utilisé pour les zones basses de Tunis. Pour mémoire, nous rappelons la méthodologie de construction du modèle et la distribution des paramètres de calages ci-après.

Modèle technico-économique d'inondations urbaines

Il s'agit d'un modèle hyperbolique de la période de retour à deux paramètres α et λ . Le facteur d'échelle de la fonction, symbolisant la valeur exposée ou les dommages théoriques maximums, D_{∞}^{34} , est calé sur la surface urbanisée de l'entité géographique considérée, élevée à la puissance α ; ce facteur d'échelle s'applique à une exponentielle d'exposant le quotient $-\lambda/T$, où T est la période de retour de l'évènement considéré. Le couple (α ; λ) capture ainsi une combinaison élaborée entre le vecteur de vulnérabilité, le terrain, les aménagements, et l'aléa (le débit à fréquence donnée); Le choix du modèle, et de son niveau de complexité, répond aux contraintes suivantes, par ordre décroissant de priorité:

- un nombre de variables limité, afin de pouvoir effectuer un calage de qualité;
- un nombre de variables suffisant, afin de ne pas avoir un modèle trivial / simpliste et rendre compte de dynamiques multiples;
- sans aboutir à une modélisation totalement descriptive, hors de portée de l'étude (le modèle est empirique), parvenir à un modèle en correspondance avec les sous-jacents intuitifs de la vulnérabilité et de l'aléa; l'écriture du facteur d'échelle répond notamment de cet objectif;
- obtenir une expression analytiquement intégrable pour faciliter le calcul final et les tests de sensibilité.

Distribution des paramètres du modèle hyperbolique de calcul des coûts annuels d'inondations urbaines



transposition du modèle doivent être pris en compte :

- Le calcul de CMA total pour les bassins de Tunis est surestimé de 48% par rapport à Casablanca à cause de la fréquence de débordement qui est de 5 et 10 ans respectivement ;
- Le facteur déterminant de la vulnérabilité pour les CD est la valeur immobilière. Ainsi, les CD_{ZB_Tunis} sont corrigés par le ratio des valeurs immobilières moyennes (ρ^{Immo}) des deux villes.
- Les facteurs déterminants de la vulnérabilité pour les CI sont le facteur humain (densité humaine) et l'intensité économique (PIB par personne). Ainsi, les CI_{ZB_Tunis} sont corrigés par le ratio des densités humaines moyennes ($\rho^{Humaine}$) des deux villes et ratio des PIB par personne sur les zones considérées.

On obtient finalement :

$$CT_{Casa} = CD_{Casa} + CI_{Casa} = (1 - \beta_{fd}) * \left[CD_{ZB_Tunis} \cdot \frac{\rho_{Casa}^{Immo}}{\rho_{Tunis}^{Immo}} + CI_{ZB_Tunis} \cdot \frac{\rho_{Casa}^{Humaine}}{\rho_{Tunis}^{Humaine}} \cdot \frac{PIB / hab_{2030}^{Casa}}{PIB / hab_{2030}^{Tunis}} \right]$$

Ce coût d'une unité de surface est ensuite multiplié par la surface considéré afin d'obtenir le CMA pour tout Casablanca.

Le résultat abouti à 0,43% du PIB de la ville, soit environ 40% de plus que l'estimation haute de la première méthode. Toutefois, la méthode ne rend pas compte de la différence de pluviométrie entre les deux sites ; la transposition se concentrant davantage sur les aspects de vulnérabilité socio-économique. Il faut admettre que la gestion de l'aléa est moins simple ici : plus en amont, une variation donnée sur le facteur d'aléa (pluies extrêmes) est plus difficile à traduire tout en aval (impact et coûts). Néanmoins, la tendance est rassurante : les 0,43% doivent être « débités » d'une part afin de rendre compte d'une part d'une pluviométrie inférieure sur Casablanca aujourd'hui, mais également du fait que la pluviométrie à Casablanca évolue peu, alors que ce n'est le cas à Tunis (+28% selon le BaU choisi).

Sur Tunis, la part du CC dans les coûts d'inondation a été estimée entre 30% et 60%. Si l'on prend ici 30% (la partie basse de la fourchette semble une estimation plus fiable), nous passerions déjà de 0,43% à 0,30% ; il faut encore retrancher une part afin de tenir compte du différentiel de pluies extrêmes actuel ; la relation est non linéaire et difficile à estimer. Mais en tous cas, cela nous rapprocherait encore un peu plus des 0,26% obtenus à l'aide de la première méthode.

Les méthodes utilisées ici n'ont pas été identifiées dans la littérature et sont des constructions *ad hoc* avec lesquelles il convient de rester prudent. Toutefois, la cohérence des chiffres obtenus par différentes approches nous autorise un optimisme modéré quant aux estimations proposées.

Ainsi, nous retiendrons la valeur trouvée à l'aide de la première méthode – **0,26% du PIB** – assorti d'une **importante incertitude (de 0,1 à 0,4 % du PIB)**, soit en valeur absolue un **CMA d'inondation de 1090 MDH**. La part des **coûts indirects** y est de **218 MDH** soit environ **20% des coûts totaux et 26% des coûts directs**. Cela est d'une part dû à l'approche méthodologique proposée, ainsi qu'à la valorisation relativement élevée des actifs par rapport à « l'intensité économique »³⁵.

Domages d'évènements ponctuels : un changement de perspective

La gestion des risques se fait en général en croisant une évaluation du coût moyen annuel, qui informe sur les montants que l'on est prêt à consacrer à la réduction du risque correspondant, ainsi qu'à une évaluation du coût d'un événement rare (par exemple la décennale ou la centennale). Si les conséquences d'un événement décennal ou centennal sont considérées comme inacceptables (en raison de leur montant agrégé ou de conséquences sur certains groupes, quartiers, ou catégories sociales), alors des investissements supplémentaires peuvent être jugés acceptables (c'est par exemple l'approche choisie par les hollandais pour la gestion des inondations pour des temps de retour allant jusqu'à 10.000 ans).

L'information sur les conséquences d'un événement rare est également utile pour un travail par scénario, où l'on peut évaluer les investissements nécessaires dans les moyens de secours et d'urgence, ainsi que les stratégies de mobilisation des ressources financières nécessaires (sur ce dernier point on se référera avec intérêt à l'approche « *Funding gap analysis* » proposée dans Ghesquière et Al, 2010).

Selon la première méthode proposée (cf. plus haut), le calcul du **coût d'un évènement centennal est estimé entre 3% et 4,5% du PIB** de la zone considérée en 2030, **soit de l'ordre de 15 000 MDH**. Rappelons qu'il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur.

Malgré l'incertitude, la donnée est intéressante à considérer et permet d'**appréhender le risque sur une base scénarisée**, peut-être davantage intuitive.

3.4 Tempêtes

L'aléa de tempête induit **deux types de risques: la submersion marine** d'une partie de la ville et **l'érosion côtière**. La submersion marine requiert une intensité importante de l'aléa, dépendant de la houle, ainsi que du profil de côte et de la bathymétrie locale, de l'ENM, et bien sûr des aménagements côtiers. L'érosion côtière est en revanche un phénomène plus continu, ou l'effet de seuil est moins marqué que pour la submersion marine, mais qui est d'autant plus marqué que l'intensité de la tempête est élevée.

Il s'agit là d'un domaine assez complexe: en premier lieu, la maîtrise du lien entre CC et tempêtes en est encore à ses balbutiements. L'impact du CC est en revanche assez explicite avec l'élévation du niveau marin, qui reste toutefois limité dans notre cas. Nonobstant le CC, les modèles pour les tempêtes demandent beaucoup de données non disponibles ici. Le travail statistique se base souvent une distribution de Pareto généralisée (voir par exemple Hallegatte et Al, 2008), mais il semble que beaucoup de discussions aient cours sur les lois les plus pertinentes, comme d'ailleurs dans l'ensemble des domaines ayant recours à la théorie des lois de valeurs extrêmes.

Pour la **Vallée de Bouregreg**, le **BaU prend en compte le projet d'aménagement d'une digue circulaire** qui protégera la vallée des tempêtes et donc de la submersion marine. **Les coûts liés à cet aléa sont donc négligeables.**

Pour **Casablanca**, l'expertise côtière propose une évaluation des zones submergées par des tempêtes de période de retour 50 ans. La superficie de terrain urbanisé ainsi submergée en 2030 pour un niveau d'eau à 3 m NGT a été estimée à environ 700 ha, principalement concentrés dans la zone de Mohammedia³⁶. La méthodologie appliquée aux aléas d'inondations permet, à l'aide d'un vecteur de vulnérabilité moyen, d'estimer les coûts engendrés par cet évènement: 1 555 MDH. Pour passer du coût de cet évènement aux coûts moyen annuels (CMA) de l'ensemble des évènements débordants, un ratio calculé sur Tunis a été appliqué: **les CMA sont de 59 MDH pour la submersion marine.**

En ce qui concerne **l'érosion dans la Vallée de Bouregreg**, la zone qui pourrait effectivement être concernée est hors zone d'étude. Même si la seule plage comprise dans la zone d'étude est également touchée par le phénomène, **ses conséquences et amplitude restent négligeables**, notamment à coté des aménagements portuaires prévus aux environs.

Nonobstant, la région du **Grand Casablanca** présente une grande extension de plages, étant naturellement plus sensible à l'aléa l'érosion côtière et ces coûts associés.

Dans le cas de **l'érosion**, la difficulté majeure ici est que celle-ci dépend en fait de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, que celles-ci inondent ou non la ville. C'est ici que la difficulté de caractérisation des tempêtes pose réellement problème. Si des hypothèses sont alors formulées, il convient de rester à un niveau assez qualitatif. Difficulté supplémentaire, à aléa égal, l'érosion effective est en réalité très sensible à des données très locales - le profil de côte et la bathymétrie en particulier. Une évaluation quantitative tenant compte en détail de ces facteurs n'a pas été possible. Nous avons donc travaillé à l'aide de valeurs crédibles, fournies sur l'avis de l'expert concerné, après examen et croisement avec les données locales disponibles.

Mais avant tout, il s'est agit de décliner le **BaU sur l'environnement côtier**. A l'instar de l'approche utilisée pour les inondations, nous nous basons sur l'urbanisation projetée 2030 du SDAU. A notre connaissance, il n'est pas planifié à coup sûr d'ouvrage visant à réduire l'érosion (brise lames, épis, etc...). Ainsi de ce point de vue notre BaU est calé sur la situation actuelle.

Dans notre méthodologie, notre problématique est de connaître les coûts afférents à l'érosion côtière dans le BaU envisagé. Dans cette optique, on peut envisager *a priori* **deux sous variantes** dans notre BaU: celle de la **passivité** et celle de la **réactivité**. Dans la variante passive, aucune réaction n'est adoptée et le trait de côte recule mécaniquement lorsque la côte, urbanisée et soumise à l'érosion, n'est pas protégée. Le coût est alors celui de la perte de territoire urbain. La variante réactive consiste à supposer que dans un tel cas, les dispositions seront prises pour au moins compenser les pertes par simples opérations d'ensablement. Cette seconde option nous apparaît préférable. Il est en effet peu crédible de considérer que des zones aménagées seront laissées à l'abandon par les acteurs concernés.

Nous nous plaçons donc dans un BaU de réactivité face à l'érosion dans des zones urbanisées, et estimons les coûts d'ensablement supplémentaires qu'il sera alors nécessaire de mobiliser pour conserver le trait de côte dans des zones déjà habitées ou qui le seraient à l'horizon 2030.

La variante **proactive**, qui consisterait à anticiper cet ensablement et à aménager en conséquence fera l'objet de considérations en **phase II** de l'étude.

Dans notre cas, les coûts à estimer ont donc trait au rechargement périodique des zones littorales. Cela dépend de la longueur de la côte à considérer, du prix unitaire du sable (amené sur site) et de la fréquence de rechargement. Ce dernier facteur varie bien évidemment suivant que l'on ait ou non des ouvrages protecteurs (brises lames, protections longitudinales, épis, remblais...); ce n'est pas notre cas. Comme nous raisonnons en coûts annuels, nous sommes amenés à définir un facteur moyen x défini comme le prix annuel du rechargement d'un mètre linéaire de côte sans aménagement de protection à l'érosion.

L'estimation de x est faite à partir du prix moyen actualisé du m³ de sable dérivé d'autres projets et études similaires au Maroc³⁷ et du volume moyen annuel de sable perdu à cause de l'érosion, obtenu à partir d'un profil de plage moyen dans la zone concernée. Nous prenons deux niveaux d'érosion, « fort » et « moyen », comme défini précédemment dans le chapitre correspondant.

Notre coût annuel s'écrit donc $C = L_{\text{fort}} \cdot x_{\text{fort}} + L_{\text{moyen}} \cdot x_{\text{moyen}}$, où L représente les mètres côtiers urbanisés en 2030 présentant une érosion forte ou moyenne à cet horizon.

Les valeurs suivantes sont finalement retenues:

Tableau 14 : Coût moyen annuel des dommages liés à l'érosion marine

L_{fort} (m)	x_{fort} (DH/m)	L_{moyen} (m)	x_{moyen} (DH/m)	C (MDH)
12462	317,0	40204	221,9	12,9

Les coûts moyens annuels totaux des tempêtes, en termes d'érosion, sont donc évalués à 13 MDH. Pour un phénomène relativement continu, il était possible d'espérer un coût négligeable associé à l'érosion côtière. Ce n'est pas vraiment le cas, et le **coût moyen annuel calculé est finalement non négligeable en valeur absolue.**

Toutefois, relativement aux inondations, et même aux autres aléas, **l'érosion reste un phénomène très secondaire représentant seulement 0,003% du PIB de Casablanca.** Pour autant, la complexité de prévision n'en est pas moindre et les enjeux méthodologiques afférents significatifs.

Sachant que des ouvrages adéquats peuvent considérablement réduire le taux de rechargement des plages (de l'ordre d'un facteur 2), il existe visiblement des opportunités d'économies relatives à cet aléa élevées. Ce sera le propos de la phase II, où l'une des questions sera d'évaluer la rentabilité d'infrastructures supplémentaires.

Il convient malgré tout de ne pas dériver une vision simpliste de ces quelques chiffres, qui masquent une importante variabilité spatiale, produit complexe de la nature des courants marins locaux, des tempêtes et de la bathymétrie côtière.

Les coûts moyens annuels totaux des tempêtes sont donc évalués à 72 MDH.

L'évaluation de la **part imputable au CC dans le coût des tempêtes** est particulièrement délicate. La contribution du CC au risque **d'érosion** côtière est certaine, toutefois **nous la considérons nulle** faute de pouvoir établir avec clarté l'amplitude de sa contribution. Ce n'est pas très satisfaisant d'un point de vue méthodologique, mais la faible variation dont il est ici question nous rassure quant à l'impact d'un tel choix. Dans le cas de la submersion marine, les conditions d'élévation du niveau de la mer sont équivalentes entre Tunis et Casablanca (3m dont 20 cm de SLR). Le calcul de la part imputable au CC effectué sur Tunis - par différence d'intégrales - est donc valable également sur Casablanca. **Ainsi la part imputable au CC dans les coûts de la submersion marine due aux tempêtes est estimée à 30%.** Finalement, par simple pondération, **24% des coûts totaux des tempêtes (érosion et submersion) sont considérés comme imputables au CC.**

La contribution du CC au risque **d'érosion** côtière est certaine, toutefois **nous la considérons nulle** faute de pouvoir établir avec clarté l'amplitude de sa contribution. Ce n'est pas très satisfaisant d'un point de vue méthodologique, mais la faible variation dont il est ici question nous rassure quant à l'impact d'un tel choix.

3.5 Ressources en Eau

Le CC est en interaction complexe avec la ressource en eau. Si quelques tendances sont estimées à l'échelle mondiale, il est difficile de se prononcer hors quelques généralités qualitatives sur un pays ou pire une ville donnée (Cf. par exemple Bates et Al. 2008).

Quelles que soient les dynamiques en jeu, il est raisonnable de faire l'hypothèse que **l'eau restera une priorité, aussi bien pour le Grand Casablanca que pour la Vallée du Bouregreg.** Ainsi, et similairement à l'étude de Tunis, le **BaU** sur cette thématique ne présente pas de différence majeure par rapport à la situation actuelle. Ceci ne veut bien évidemment pas dire que la ressource en eau ne sera pas affectée dans le futur, par le CC ou autre. Nous signifions simplement que dans les arbitrages qui auront lieu dans la gestion de cette thématique, les zones urbaines, cœur économiques et sociaux, seront privilégiées de fait.

Savoir comment les surcoûts éventuels seront ventilés au niveau national, et quelle part de ce surcoût serait à assumer par les zones étudiées, est un exercice allant bien au-delà de la présente étude. A ce stade nous ne considérerons donc pas que l'eau urbaine est affectée, d'autant que les coûts de santé "provisionnent" déjà des coûts liés à des maladies en lien avec l'environnement sanitaire, dont l'eau fait partie.

Toutefois, il est peu satisfaisant de négliger une variable sans savoir son impact potentiel sur les risques. Faisons donc l'**hypothèse que le CC induise un surcoût de 10% sur le prix de l'eau urbaine** (en termes réels en 2030). Dans notre typologie sur les données (cf. 2.3 du présent chapitre), ce ratio, bien que réaliste, est à classer dans la catégorie "*heroic assumptions*". L'idée est simplement d'observer des ordres de grandeurs et la sensibilité de certaines variables en matière de risques.

Le prix de l'eau dépend du volume consommé et s'échelonne entre 2,6 et 14,8 DH par m³³⁸ à Casablanca. Retenons une valeur moyenne de 7,12 DH/m³ pour le Grand Casablanca et la Vallée de Bouregreg. Pour une consommation annuelle par personne d'environ 52 m³, la population du Grand Casablanca en 2030 consommera 240 M m³ d'eau, ce qui engendrerait un surcoût annuel de 171 M DH. Avec les mêmes hypothèses et prenant la population projetée, ce coût annuel pour la Vallée de Bouregreg est de l'ordre de 5,1 M DH. **Au total donc, le surcoût serait de 176 MDH.** Cela représenterait alors une part réduite dans le mix global des risques étudiés ici.

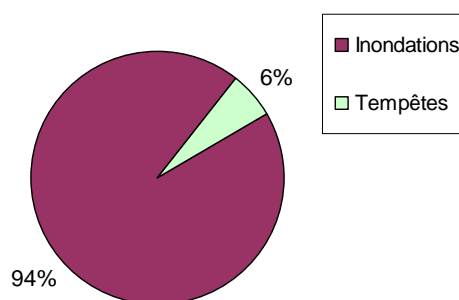
Nous ne comptabilisons pas ce coût par la suite par manque de fiabilité des données et toujours pour respecter le principe conservatif de notre approche (cf. 2.2), mais le calcul effectué présente l'avantage de nous rassurer quant au fait de ne pas ainsi commettre une erreur d'appréciation majeure, 176 MDH ne représentant qu'une faible part des CMA totaux.

4 Analyse des résultats

Nous ne reviendrons pas dans cette partie sur les incertitudes et la signification des éléments quantitatifs ici fournis, points importants déjà traités aux sections 2 et 3.

La totalité des **coûts annuels** afférents aux désastres considérés par l'étude, en tenant compte du CC, est estimée à **1 162 MDH à l'horizon 2030**, exprimé en DH actuels. Cela représente 222 DH/pers/an, soit 0,26% du PIB de Casablanca et la vallée de Bouregreg à ce même horizon (2030). L'incertitude **est forte** et estimée de l'ordre de 0,3% du PIB, soit une **fourchette entre 0,1% et 0,4% du PIB**. Ce chiffre n'inclus que les coûts mentionnés dans ce chapitre, et donc pas ceux afférents à la santé³⁹.

Figure 63 : Décomposition du coût des désastres naturels par type de risque



Les coûts indirects représentent environ 20% des coûts totaux. Cela est en grande partie un reflet des choix méthodologiques effectués mais aussi de la très forte valorisation des actifs immobiliers par rapport à un indice de production individuelle (intensité économique).

La **grande majorité des coûts est due aux inondations**. Par ailleurs, la **part imputable au CC est négligeable**. L'exercice reste difficile, retenons simplement que le CC ne présente pas de manifestation significative autres sur le périmètre des désastres considérés dans ce chapitre.

Les valeurs fournies ici correspondent à des valeurs annuelles pour un BaU que l'on estime à l'horizon 2030. Il ne s'agit donc pas d'un calcul intégral sur une période. Un tel calcul est théoriquement possible mais complexe, puisqu'il demanderait de multiplier le travail par autant de BaU différents entre aujourd'hui et l'horizon le plus lointain considéré. Pour autant, l'évaluation plus globale et donc tenant compte du temps est importante pour les décideurs. Nous en proposons une évaluation, résumée dans l'encadré ci-après.

Calcul de la valeur présente des coûts cumulés des désastres

Les grands arbitrages d'une telle évaluation concernent l'horizon considéré (base de l'intégrale), l'actualisation des flux (nous apprécions ceux-là en termes de 2010) et l'évolution des flux.

Ces débats pourront être menés plus avant en phase 2. Pour l'heure, prenons quelques hypothèses simples afin de dégager un premier ordre de grandeur sur la période d'aujourd'hui à 2030 (horizon fixé à 20 ans). Nous proposons ci-dessous 5 scénarios d'actualisation constante dans une gamme de taux usuelle pour ce type d'exercice (les taux les plus bas sont en général recommandés dans la littérature). Concernant l'évolution des flux, nous les avons supposés variant au même taux que le PIB de Casablanca, en termes constants de 2010.

Les chiffres sont donnés en MDT actuels (2010) sur la période 2010-2030 :

Actualisation	1%	2%	3%	4%	5%
VAN (MDH)	13 743	12 660	10 996	10 292	8 947
% du PIB de 2010	8,2%	7,5%	6,5%	6,1%	5,3%

Pour simplifier, nous dirons que la **valeur actuelle nette des désastres considérés sur la période 2010-2030 est de l'ordre de 11 milliards de DH**, en termes constants de 2010, ce qui représente aussi **environ 7% du PIB du grand Casablanca (actuel)**.

On peut aussi évaluer **le prix que l'on serait prêt à payer aujourd'hui pour annuler définitivement l'ensemble des risques naturels dans la zone** du Grand Casablanca. Ce calcul aboutit à des résultats **entre 24 000 et 117 000 MDH**, selon les valeurs des paramètres, soit entre **15% et 70% du PIB actuel** de la région (ou encore entre 6% et 27% du PIB de 2030). Cette valeur est une estimation de la valeur nette présente des pertes liées aux catastrophes naturelles dans la région⁴⁰, et de la somme que l'on serait prêt à déboursier pour annuler tous ces risques.

De tels montants ne s'apprécient pas uniquement sur leur valeur, mais dépendent grandement du système de financement à prévoir, et notamment des mécanismes de solidarité, intra Casablanca/Bouregreg ou de la Nation marocaine à la zone Casablanca/Bouregreg, et bien sûr en fonction de l'état général des finances publiques, ici et là.

Le coût ramené à l'individu et sans présager d'une quelconque clef de financement semble finalement assez raisonnable, aussi bien en valeur absolue que relativement aux coûts globaux des assurances par exemple.

Cela est principalement dû à la relative faiblesse des aléas sur la zone d'étude. Dans une moindre mesure cela traduit une exposition limitée en matière de vulnérabilité; dans ce domaine, c'est le BaU qui y est pour beaucoup: nous sommes loin d'une courbe de "laisser aller" en matière de gestion de risque, notamment dans la vallée du Bouregreg et sa protection centennale.

Notons en revanche que la très forte valeur actuelle de l'immobilier désavantage la ville actuellement. Toutefois, et comparativement à Tunis, la ville de Casablanca est en avance de phase, puisque sa valorisation future est plus lente qu'à Tunis; elle a déjà fait le plus grand chemin de la densification de la valeur, contrairement à Tunis.

Un des enjeux est peut être donc pour Casablanca de parvenir à compenser ou au moins mitiger la croissance du risque concomitante à la croissance de valeur des actifs par des mesures adaptatives adéquates. C'est là un des chemins critique du développement: la croissance engendre une concentration de la valeur, soit une tendance à l'accroissement de la vulnérabilité, donc des risques. Pour autant, lorsque cette croissance s'accompagne d'une prise de conscience de ce phénomène, elle a tendance à contenir le risque, voire à le faire décroître, en provisionnant opportunément à cet effet une part de la richesse créée. En dégageant des profits, la croissance et le développement permettent de sortir de l'ornière du court-termisme critique en matière de planification et ainsi compenser, à l'aide de mesures adaptatives, la croissance de la vulnérabilité naturellement concomitante à la croissance de l'exposition aux aléas.

Il est donc particulièrement apparent que les **sous-jacents de la vulnérabilité** constituent des facteurs **très structurants des coûts** afférents au scénario d'urbanisation actuel (BaU) pour Casablanca et la vallée du Bouregreg, **bien davantage que le changement climatique** en lui-même, au stade actuel de notre compréhension de ce phénomène.

Toutefois, il subsiste probablement une marge d'optimisation supplémentaire par rapport au scénario d'urbanisation envisagé actuellement (BaU), en jouant notamment sur des options adaptatives, qu'elles soient structurelles ou non. L'opportunité de telles mesures sera considérée en phase II, où seront introduits les bénéfices associés à une possible inflexion par rapport au BaU, qui eux aussi méritent d'être appréciés au cours du temps.

Le pendant du présent chapitre correspondra à la partie 2.g des TdR et proposera des éléments d'appréciation économiques sur cette problématique complexe, où il s'agit de trouver un optimum entre de nombreuses contraintes.

Nous concluons par une digression qui a retenu notre attention: la comparaison du CMA total ainsi agrégé aux résultats de méthodes *top down* évoquées en 2.2. Il s'agit simplement de comparer des ordres de grandeur, presque uniquement par curiosité. En effet, l'on mesure des choses différentes dans chaque cas, donc la comparaison n'a qu'un sens très limité. D'ailleurs, ce qui est mesuré dans les approches *top down* n'est pas toujours très clair, pas plus que les hypothèses sous-jacentes. Comme le dit bien Tol, les auteurs "*ne détaillent pas la myriade d'hypothèses nécessaires pour aboutir à leur estimations à partir de la littérature des impacts*"⁴¹. Les modèles d'évaluation intégrée (PAGE, ICAM, DICE, FUND, MERGE...) s'apparentent parfois encore à des "boîtes noires", même s'il semblerait que la tendance soit à davantage de transparence.

Dans le célèbre modèle DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*) de Nordhaus (Nordhaus 1991, 1994a, 1994b), une des principales équations relie l'augmentation de la température globale à la perte de richesse mondiale. Dans sa première version celle-ci s'écrivait comme une simple forme quadratique:

$$\% \text{ of global output} = 0.013(\Delta T/3)^2 = 0.00144\Delta T^2$$

L'application de cette formule au cas marocain donnerait une perte comprise entre 0,052% et 0,32% du PIB⁴² soit entre 226 MDH et 1413 MDH pour Casablanca, soit la partie basse de la fourchette proposée par la méthode d'agrégation ici employée. Des travaux plus récents, entrepris dans le cadre de l'étude AdaptCost (2009) financé par le PNUE, se concentrent sur des modèles d'évaluation intégrée pour l'Afrique. Les coûts économiques du CC en Afrique y seraient estimés de 1,5 à 3% du PIB, soit plus que 10 fois plus que l'estimation de Nordhaus en moyenne. L'estimation proposée ici, bien inférieure à ce modèle global, est bien compatible avec la tendance identifiée par De Perthuis à ce sujet (De Perthuis et Al, 2010).

Une autre méthode d'estimation rapide, à mi-chemin entre la formule purement *top down* et le *bottom up* consiste à dériver la valeur des biens d'une zone donnée à partir de son PIB. Le coefficient à utiliser varie entre 3 et 5 selon les méthodes assurantielles. Si l'on appliquait cela à la zone de Casablanca, nous aurions eu une assiette de dommages directs comprise entre 1 300 000 et 2 200 000 MDH. Or notre construction plus analytique aboutit à 3 900 000 MDH, soit un coefficient de 9. La valeur est élevée, et traduit l'intensité capitaliste de la croissance urbaine, ainsi que l'immobilisation des actifs, caractéristiques de Casablanca. Le fort dynamisme des économies en transition nous rappelle qu'il faut employer avec parcimonie et critique des méthodes développées dans d'autres contextes, plus stables. Ces comparaisons sont intéressantes en ce sens qu'elles permettent de mieux percevoir les difficultés cachées dans les évaluations grossières, qui sont parfois les seules disponibles. Il est donc important de bien comprendre leurs ressorts afin d'en faire bon usage ou d'être capable de faire des pronostics crédibles en la matière. Référence y est également faite dans les cas de la Tunisie et de l'Égypte.

Chapitre 6 - Évaluation sanitaire

1 Introduction

Le quatrième rapport du GIEC conclut que le "*changement climatique a déjà commencé à impacter négativement la santé humaine, et que les scénarios futurs vont augmenter les risques liés aux maladies sensibles aux évolutions du climat. Les conséquences du changement climatique sur certaines maladies comme la malnutrition, la malaria et les maladies diarrhéiques constitueront des risques importants pour les populations futures, particulièrement dans les pays à faible revenus dans les régions tropicales et subtropicales*"⁴³.

La question du surcoût engendré par la nature et l'ampleur des impacts du CC sur la santé est complexe. Il est toutefois souhaitable de disposer au moins d'un ordre de grandeur en la matière.

L'Organisation Mondiale de Santé (OMS) a récemment développé une approche d'évaluation comparative des risques (*comparative risk assessment*) utilisée pour estimer et comparer la charge de morbidité (*burden of disease*) actuelle et future de 25 facteurs de risques, dont le CC (cf. Ebi, 2008). La méthode est basée sur des estimations du nombre d'années de vie corrigée du facteur d'invalidité (*Disease Adjusted Life Year* ou DALY), mesure synthétique la plus couramment utilisée en matière de santé. La méthode attribue pour chaque type de risque un coefficient d'ajustement des invalidités attendues "*disease outcomes*" en fonction d'un scénario climatique déterminé, et par rapport à une année de base (la situation actuelle). Cet indicateur est donc bien une tentative de métrique du risque relatif imputable au CC.

Notre approche consiste dans un premier temps en l'**adaptation de la méthode de l'OMS sur les zones du grand Casablanca et de la Vallée du Bouregreg**. Il s'agit ensuite d'en effectuer la quantification économique. Cette approche détermine les **coûts directs** rattachés au secteur de la santé et supposés proportionnels à l'accroissement des DALY imputables au CC. Un calcul de **coûts indirects** est également proposé, quantifiant la non-production de richesse engendrée par ces mêmes DALY.

Le **choix du périmètre** des impacts imputables au CC en matière de santé n'a rien d'évident⁴⁴. L'approche de l'OMS, sur laquelle nous nous calons ici, s'attache à rendre compte des dépenses liées aux maladies corrélées au CC. Il est important de relever qu'il s'agit là d'une approche conservatrice de l'estimation de la gamme complète d'impacts que le CC peut avoir sur la santé (Campbell-Lendrum and Woodruff, 2007). En particulier, **la méthode ici employée ne rend pas compte d'évènements ponctuels extrêmes telles les vagues de chaleur**, qui peuvent se révéler dévastatrices⁴⁵.

2 Changement climatique et santé

Les impacts sanitaires du changement climatique sont nombreux. La météorologie et le climat comptent parmi les principaux facteurs qui déterminent la distribution géographique et l'incidence de plusieurs causes majeures de risques sanitaires :

- dont la malnutrition, qui affecte 17% de la population mondiale, essentiellement localisée dans les pays en développement (FAO, 2005) ;
- les maladies diarrhéiques et autres maladies hydriques, liées à la mauvaise qualité des eaux d'alimentation et au manque de soins de base, qui causent annuellement 2 millions de morts, essentiellement chez les enfants en bas âge (Kosek M. et al, 2003) ;
- et le paludisme, qui est la cause de plus d'un millions de décès annuels chez les enfants (OMS, 2004).

Le tableau suivant présente l'incidence annuelle des maladies diarrhéiques, de la malnutrition et du paludisme par grande région de l'OMS en 2002. Les chiffres correspondant à la malnutrition comprennent seulement les problèmes de croissance et de dépérissement, et non l'ensemble des impacts sanitaires, notamment les déficiences en micronutriments tels que zinc et vitamine A, qui ont également des conséquences sanitaires importantes.

Tableau 15 : Incidence annuelle des maladies diarrhéiques, de la malnutrition et du paludisme par grande région de l'OMS, 2002

Sous-région	Population (000s)	Maladies diarrhéiques (000s)	Malnutrition (000s)	Paludisme (000s)	Total (000s)
Afr-D	301 878	389 842	5 033	180 368	575 243
Afr-E	353 598	449 192	5 912	176 651	631 755
Amr-A	328 176	77 578	137	0	77 715
Amr-B	437 142	390 590	1 124	2 866	394 580
Amr-D	72 649	73 271	603	718	74 592
Emr-B	141 835	96 324	585	363	97 272
Emr-D	351 256	345 605	4 523	16 898	367 026
Eur-A	412 512	79 219	134	0	79 353
Eur-B	219 983	78 509	649	0	79 158
Eur-C	241 683	47 886	262	0	47 912
Sear-B	297 525	179 213	2 251	6 951	188 415
Sear-D	1 262 285	1 051 538	18 040	21 568	1 091 146

Sous-région	Population (000s)	Maladies diarrhéiques (000s)	Malnutrition (000s)	Paludisme (000s)	Total (000s)
Wpr-A	154 919	30 026	64	6	30 096
Wpr-B	1 546 770	1 225 188	7 035	1 838	1 234 061
Monde	6 122 211	4 513 981	46 352	408 227	4 968 560

Source: <http://www.who.int/healthinfo/bodestimates/en/index.html>

Le Maroc est classé dans la sous-région Méditerranée Orientale (Emr-D), parmi d'autres pays émergents à forte mortalité.

Le quatrième rapport du GIEC (2007) conclut que le changement climatique a commencé à affecter négativement la santé humaine, et que **les changements climatiques attendus vont augmenter les risques à l'égard des maladies sensibles aux conditions climatiques**. Il est probable que les conséquences du changement climatique sur la malnutrition, les maladies diarrhéiques et le paludisme vont poser des problèmes importants dans les décennies à venir, notamment pour les pays de faible revenu en zone tropicale et subtropicale.

3 Éléments de calculs

Le **BaU⁴⁶ en matière de santé** est très problématique à évaluer: quels seront les investissements et l'amélioration relative des conditions de santé sur un horizon de 20 ans et plus? Le système de santé marocain connaît de profondes mutations sur le plan épidémiologique, démographique et socioéconomique (Kherbach, 2007). La tendance des principaux indicateurs de santé révèle qu'entre 1960 et 2002, le Maroc a enregistré d'importants progrès dans le développement de ses infrastructures sanitaires et a amélioré le niveau de santé de sa population. Néanmoins, le pays est toujours confronté à de sérieuses difficultés : le taux de mortalité infantile reste élevé, les problèmes de nutrition sont importants, les écarts entre milieu urbain et rural sont importants (HCP, 2005).

Pourtant, il est ici délicat de retranscrire quantitativement des hypothèses. Nous considérons donc un BaU similaire à la situation actuelle, faute d'être en mesure de proposer des alternatives crédibles et justifiées. Cela revient peut être à sous estimer les progrès relatifs potentiels dans ce secteur donc à être trop pessimiste; toutefois, outre le CC à l'échelle régionale, nous n'appliquons pas de facteur aggravant dû à l'îlot de chaleur urbain. Celui-ci peut être assez important (de 1 à 9°C environ selon les circonstances et les sources) mais reste encore complexe à évaluer (le Hadley Center a un prototype).

On s'intéresse ici à estimer l'augmentation dans les dépenses de santé totales de la ville de Casablanca et de la Vallée du Bouregreg (public et privé) engendrée par le CC à l'horizon

2030 ($D_{Casablanca\ 2030}^{CC}$; $D_{Bouregreg\ 2030}^{CC}$) représentées comme un pourcentage de la dépense totale en santé en 2030.

$$\text{On a: } D_{Casablanca\ 2030}^{CC} = \beta_{2030}^{CC} \times D_{Casablanca\ 2030}^{Total_sansCC}$$

$$\text{et } D_{Bouregreg\ 2030}^{CC} = \beta_{2030}^{CC} \times D_{Bouregreg\ 2030}^{Total_sansCC}$$

On prend l'hypothèse que les dépenses totales de santé sont proportionnelles au nombre total de DALY d'une région donnée⁴⁷. Le DALY est l'une des différents mesures synthétiques de l'état de santé d'une population, qui comptabilise non seulement les années de vie perdues pour cause de décès prématuré, mais aussi les années équivalentes de vie en bonne santé perdues du fait d'une mauvaise santé ou d'une invalidité (Mc Michael et Al, OMS, 2003). Le facteur β^{CC} correspond alors à l'augmentation en pourcentage des DALY engendrés par les risques liés au CC. Son estimation repose sur l'identification de quatre enjeux sanitaires sensibles au CC: maladies diarrhéiques, malaria, malnutrition, et maladies cardiovasculaires.

Les facteurs de Risques Relatifs (RR)

Le calcul proposé prend en compte les mêmes maladies que dans McMichael (2003a)⁴⁸. La quantification est faite à partir des DALY de 2002 par le Global Burden of Disease (GBD) de l'OMS:

Maladies	DALYs '000 (2002) Maroc
maladies diarrhéiques	231,99
Malaria	0,8040
Malnutrition	194,62
maladies cardiovasculaires	555,15

Source: Global Burden of Disease - 2004

Afin d'estimer quel sera l'impact du CC à l'horizon 2030, le GBD a mené une étude qui a permis la quantification des **Risques Relatifs (RR)** pour différentes maladies sensibles au CC pour différents scénarios. Celui s'approchant le plus de nos hypothèses de travail est le "*unmitigated*". On obtient ainsi une fourchette de RR par région de l'OMS. Nous avons opté pour des valeurs moyennes, à l'exception des maladies cardiovasculaires où nous retenons la valeur la plus élevée (voir tableau).

Les maladies cardiovasculaires (CVD) sont celles qui présentent "l'assiette" de DALY la plus importante au Maroc. Le rapport du GIEC sur la santé humaine conclut également que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur augmente le nombre de décès et de maladies graves. On constate une tendance vers l'émergence des CVD au Maroc (Maazouzi et al ; 2005). Les maladies diarrhéiques et les problèmes de nutrition ont également un poids important au Maroc, notamment si on les compare à des pays de même niveau de développement socio-économique, en cohérence avec les conclusions du HCP (2005).

RR / Zone Méditerranée Orientale - Scénario CC " <i>unmitigated</i> "			
Maladies	min	max	retenu
maladies diarrhéiques	0,98	1,16	1,070
Malaria	1,00	1,43	1,215
Malnutrition	1,00	1,12	1,060
maladies cardiovasculaires ⁴⁹	1,00	1,007	1,004

L'augmentation de ces maladies dans un environnement avec CC se détermine avec la relation suivante (Ebi, 2008): $DALY_i^{avecCC} = DALY_i^{sansCC} \times RR_i^{CC}$ avec:

- $DALY_i^{avecCC}$: nombre de DALYs de la maladie i dans un environnement avec CC ;
- $DALY_i^{sansCC}$: nombre de DALYs de la maladie i dans un environnement sans CC ;
- RR_i^{CC} : risque relatif, soit le rapport du risque de la maladie i dans la population exposée au CC sur celui de la population non exposée.
- i : index sur l'ensemble des enjeux sanitaires sensibles au CC identifiés: maladies diarrhéiques, malaria, malnutrition et maladies cardiovasculaires.

L'augmentation relative de ces maladies par rapport à toutes les maladies s'écrit alors:

$$\alpha_i^{CC} = \frac{\Delta DALY_i^{CC}}{DALY_{TOTAL}^{sansCC}} = \frac{DALY_i^{avecCC} - DALY_i^{sansCC}}{DALY_{TOTAL}^{sansCC}}$$

$$\text{Enfin: } \beta^{CC} = \sum_i \alpha_i^{CC}$$

Afin d'estimer β pour 2030, les risques relatifs (RR) pour le CC en 2030 estimés par le *Global Burden of Disease* (GBD) de l'OMS ont été multipliés par le nombre de cas actuels (données de 2002 pour le Maroc du GBD de 2004), en supposant que la répartition annuelle des maladies dans le pays sera identique en 2030 dans un scénario sans CC⁵⁰. Ce qui est équivalent à:

$$\beta^{CC} = \beta_{2030}^{CC}$$

Afin d'estimer $D_{Casablanca\ 2030}^{TOTAL}$ et $D_{Bouregreg\ 2030}^{TOTAL}$, on pose alors que la distribution des dépenses en santé au sein du pays est proportionnelle à la distribution de la population dans le territoire⁵¹. Cette hypothèse a été validée avec les Comptes Régionaux du Haut Commissariat au Plan qui montrent que la structure du PIB nationale pour éducation, la santé et la sécurité sociale en 2007 est de 14,2% pour Casablanca, ce qui est cohérent avec l'approche par population ici utilisé qui nous fournit 13,4%.

La projection de la dépense totale en santé au Maroc en 2030 est réalisée à partir de la projection du PIB du Maroc en 2030⁵², sur lequel la part des dépenses totales de santé est extraite. Ce rapport est en effet passé de 2,5% en 1990 à 5% en 2001 et reste inférieure à celle des pays au développement économique similaire (Maazouzi, 2005). Sur ce plan, la dépense globale de santé est appelée à croître significativement, sous l'effet de la croissance de la demande en soins de plus en plus coûteux, en liaison avec le vieillissement et le changement déjà amorcé de la structure de la morbidité (HCP, 2007). Cela nous permet d'estimer une légère augmentation de ce ratio à 5,78%⁵³ en 2030, tout en restant cohérent avec notre principe conservatif.

4 Résultats

Les résultats du calcul des coûts directs sont les suivants:

Tableau 16 : Évaluation économique du risque sanitaire (coûts directs)

Maladies (i)	$DALY_i^{sansCC}$ ('000)	RR_i^{CC}	$DALY_i^{avecCC}$ ('000)	$\Delta DALY_i^{CC}$ ('000)	α_i^{CC}
maladies diarrhéiques	231,99	1,07	248,23	16,24	0,312%
Malaria	0,8040	1,215	0,98	0,17	0,003%
Malnutrition	194,62	1,06	206,29	11,68	0,225%
mal. cardiovasculaires	555,15	1,004	557,10	1,94	0,037%
Toutes les maladies	5198,04			$\beta^{CC} = \beta_{2030}^{CC} =$	0,578%

PIB/hab (base) en 2010 (DH)	croissance PIB/hab (%)		PIB/hab (projection) en 2030 (DH)	Population en 2030	PIB_{2030}^{Maroc} (MDH)
	2010-2014	2015-2030			
24 407	FMI projections	3,5%	48 414	37 994 000	1 839 443

PIB_{2030}^{Maroc} (MDH)	Ratio= (Dépenses totales de santé)/PIB	$D_{Maroc\ 2030}^{Total_sansCC}$ (MDH)	$\frac{pop_{2030}^{Casablanca}}{pop_{2030}^{Maroc}}$	$D_{Casablanca\ 2030}^{Total_sansCC}$ (MDH)
1 839 443	5,78%	106 319	13,42%	14 271
			$\frac{pop_{2030}^{Bouregreg}}{pop_{2030}^{Maroc}}$	$D_{Bouregreg\ 2030}^{Total_sansCC}$ (MDH)
			0,36%	383

$D_{Casablanca\ 2030}^{Total_sansCC}$ (MDH)	β_{2030}^{CC}	$D_{Casablanca\ 2030}^{CC}$ (MDH)
14 271	0,578%	82,46
$D_{Bouregreg\ 2030}^{Total_sansCC}$ (MDH)	β_{2030}^{CC}	$D_{Bouregreg\ 2030}^{CC}$ (MDH)
383	0,578%	2,21

Le surcoût direct lié au CC dans le BaU envisagé à l'horizon 2030 est estimé à 84,67 MDH.

Dans le rapport de 2001, *Macroeconomics and Health: investing in health for economic development*, the Commission on Macroeconomics and Health de l'OMS, la commission a pris note des coûts économiques élevés de maladies évitables et a souligné la diminution des revenus annuels de la société et des individus, et du potentiel de croissance future, notamment dans les pays les plus pauvres. Dans notre approche cela revient à caractériser les **coûts indirects** du CC sur la santé à Casablanca et dans la Vallée du Bouregreg. La conversion des pertes de bien-être induites par des maladies en termes économiques est réalisée en valorisant

les années de vie perdues à cause de la maladie, comme le DALY⁵⁴, à l'aide par exemple du PIB par personne annuel (OMS, 2001).

Nonobstant, le PIB par personne n'est pas homogène dans tout le territoire. En prenant l'hypothèse que la distribution régionale du PIB par personne au Maroc restera inchangée à l'horizon de l'étude, le ratio de 1,77⁵⁵ entre le PIB de Casablanca et la moyenne nationale est appliqué au PIB par personne projeté. Dans le cas de Bouregreg, la moyenne nationale est utilisée.

Hypothèse est faite que le nombre de total de DALY du Maroc et des zones étudiées augmenteront au prorata de la population entre la période 2002 et 2030⁵⁶, et que rapport entre les différentes maladies restera inchangé dans un scénario sans CC⁵⁷. Cela nous permet d'appliquer les RR pour 2030 à chaque DALY_i prévu pour 2030 afin d'obtenir l'augmentation de maladies sensibles au CC en 2030.

Les résultats ci-dessous mettent en évidence le poids des maladies diarrhéiques avec 16240 années additionnelles par année ainsi que la malnutrition avec 11680 années⁵⁸. Le cas de la malaria est négligeable dans cette région.

Tableau 17 : Évaluation économique du risque sanitaire (coûts directs)

$\Delta DALY_{2030}^{CC}$ (‘000)	$\frac{pop_{2030}^{Casablanca}}{pop_{2030}^{Maroc}}$	$\Delta DALY_{Casablanca_{2030}i}^{CC}$ (‘000)	$PIB / hab_{2030}^{Casablanca}$ (MDH)	Coûts indirects Casablanca (MDH)
38,24	13,42%	5,13	85 414	439
	$\frac{pop_{2030}^{Bouregreg}}{pop_{2030}^{Maroc}}$	$\Delta DALY_{Bouregreg_{2030}i}^{CC}$ (‘000)	PIB / hab_{2030}^{Maroc} (MDH)	Coûts indirects Bouregreg (MDH)
	0,36%	0,14	48 414,06	6,68

Il y a donc une augmentation annuelle totale de 38240 DALYs en 2030 due au CC et 5130 à l'échelle de Casablanca et 140 à l'échelle de la Vallée de Bouregreg. **Les coûts indirects s'élèvent à 439 MDH par an pour Casablanca et 6,68 MDH pour la Vallée de Bouregreg, soit 445, 7 MDH au total.**

Les CMA totaux sont donc d'environ 521 MDH pour Casablanca et 8,9 MDH pour la vallée du Bouregreg, représentant autour de 0,12% du PIB total de la zone.

Les questions de santé ont un impact non négligeable dans le mix global des coûts des différents risques considérés. L'explication tient sans doute pour partie dans la **nature diffuse de la menace sanitaire**. Toutefois, la difficulté de tenir compte précisément du progrès en matière de santé sous évalué probablement la capacité de la ville à faire décroître ce ratio, en augmentant ses coûts directs pour faire chuter ses coûts indirects. La sensibilité entre les deux variables est très forte, surtout dans le cas de maladies infantiles.

Plus que pour d'autres risques, l'évaluation du coût du CC sur la santé reste un exercice réellement délicat.

Chapitre 7 - Évaluation institutionnelle

1 Introduction

Cette section couvre la partie 1.g des termes de références pour le Maroc, intitulée "Évaluer le rôle et les activités des institutions nationales et locales impliquées dans la gestion de l'espace urbain et de ses infrastructures et la préparation aux catastrophes". Cette section comporte trois objectifs spécifiques vis-à-vis des acteurs institutionnels:

- a) l'établissement de leur périmètre, et l'identification de recouvrements ou de vide de responsabilités éventuels;
- b) l'évaluation de leur taux d'intégration, ou de leur capacité à intégrer les aspects liés aux risques naturels à impact rapide ou lent, et l'état de préparation.
- c) l'identification des rôles que ces entités seront amenées à jouer dans la conception et la gestion de l'aménagement territorial d'ici à 2030;

Pour chacune d'entre eux, une mise en correspondance avec les différents points de la tâche 1.g est proposée. Dans le temps imparti à cette partie institutionnelle, il a été veillé à maintenir un juste équilibre entre la charge de travail afférente au recueil de l'information et à son analyse, de même qu'entre les questions de planification, de préparation et gestion des catastrophes, et de changement climatique. En particulier, le modèle adopté a été basé sur trois niveaux d'activité, à savoir:

- activités s'inscrivant dans le domaine de la « prévention », soit au niveau de la détermination et de la cartographie de l'aléa, soit au niveau de la réduction de la vulnérabilité territoriale (bâtiments, infrastructures, réseaux vitaux - tels électricité, gaz, eau potable, assainissement ;
- activités s'inscrivant dans le domaine de la « réponse » opérationnelle aux risques majeurs;
- activités s'inscrivant dans le domaine de la « prévention » et de la « préparation » aux changements climatiques.

Les risques majeurs pouvant frapper le territoire marocain en général, et les deux sites cible de l'étude en particulier, comprennent tremblements de terre et tsunamis apparentés, et les extrêmes météorologiques et inondations associées.

Le principal séisme des temps récents est celui d'Al Hoceima de 2004 (Magnitude ML=6.1 et 629 victimes recensées officiellement), faisant état d'une énorme vulnérabilité du bâti comme l'avait prouvé 44 ans auparavant le séisme d'Agadir de 1960 (de Magnitude même plus modeste, mais totalisant un minimum de 12 000 victimes). Il n'y a par contre pas de tsunamis connus en temps récents, le dernier et plus fameux ayant frappé les cotes marocaines étant celui dit de Lisbonne en 1755, dont l'épicentre se situait au niveau du Banc de Goringe (Banco de Carrincho).

Les inondations sont le risque naturel le plus fréquent, affectant aussi plus de personnes que tout autre risque. L'événement le plus important des derniers cinquante ans a été sans doute l'inondation de Marrakech en août 1995, causant 730 morts et détruisant une centaine de bâtiments. En termes d'importance décroissante, nous décomptons aussi les inondations de

novembre 2002 près de Casablanca (80 morts et des dégâts économiques considérables dans la zone pétrolière de Mohammedia) et plus récemment – en octobre 2008 – des pluies intenses dans le Maroc septentrional qui ont provoquées des inondations étendues, emportant plus de 30 vies humaines et générant à nouveau des pertes économiques majeures, cette fois-ci dans le Tangérois.

Le tableau ci-dessous présente l'impact économique des principaux évènements ayant touché le Maroc ces dernières années, par ordre de coût décroissant.

Tableau 18 : Dommages économiques des désastres naturels au Maroc (source : PreventionWeb)

Désastre	Date	Coût (US\$ x 1000)	Coût (DH x 1000)
Sécheresse	1999	900 000	7 560 000
Séisme	2004	400 000	3 360 000
Inondation	2002	200 000	1 680 000
Inondation	1996	55 000	462 000
Inondation	1995	9 000	75 600
Inondation	2001	2 200	18 480
Vague de chaleur	2000	809	6 796
Tempête	2005	50	420

Dans le passé, ces risques naturels et technologiques ont été gérés sporadiquement par un grand nombre d'entités, au niveau central et/ou décentralisé, vers des niveaux institutionnels inférieurs (régionaux, provinciaux, communaux et locaux), dont les qualités techniques peuvent toutefois varier considérablement. On peut anticiper que la tendance observée lors de la réalisation de cette étude, est celle d'une convergence assez marquée vers une réorganisation avec : (a) moins d'éparpillement des compétences et donc (b) moins d'acteurs, dotés (c) de plus fortes prérogatives sur le plan technique ou sur celui de la décision.

Ceci est valable soit pour les risques majeurs à évolution rapide, dont on a fait état ci-dessus, soit pour les grandes questions des changements climatiques et/ou du réchauffement global. A l'instar du cadre mondial, on retrouve au Maroc aussi une lente mais constante affirmation des bases légales, des données et des modèles concernant ces derniers, bénéficiant aussi d'une simplification exécutive du cadre institutionnel de référence où le Secrétariat d'état à l'Eau et l'Environnement a la titularité prévalente d'une action politique et technique incontestable.

L'étude est complétée par l'analyse du retour d'expérience en termes de fonctionnement du système institutionnel – sous les profils techniques et organisationnel – lors des pluies torrentielles ayant touché sévèrement le Pays entre fin décembre 2009 et mars 2010.

Ce cas d'étude a été choisi parce que - en comparaison qualitative avec le dernier séisme important ayant touché le pays (Al'Hoceima, 2004) - les résultats obtenus en termes de sauvegarde de vies et de biens ont indiqué une amélioration à la fois de la coordination et de l'organisation générale, ainsi que du taux de réussite conséquent des opérations techniques de terrain.

Comme prévu dans la méthodologie et le rapport d'établissement, l'approche proposée pour répondre aux termes de références est basée sur l'élaboration d'une cartographie institutionnelle. Celle-ci et la collecte d'information associée sont supportées par un mémento de questions clef (voir encadré ci-dessous). La cartographie institutionnelle, commentée afin de mettre en lumière les recouvrements et vides éventuels, répond au point a de la tâche 1.g. La poursuite de l'analyse de cette cartographie relève des points b et c, en ce sens qu'elle revêt un caractère prospectif à partir de la situation existante.

Tableau 19 : Questions guide de l'évaluation institutionnelle

Les questions-guide supportant le recueil d'information et son analyse	En lien avec *	Thème **
Quels ministères et unités sont impliqués en cas de catastrophes et à quel niveau ?	a	PGC
Quels sont leurs mandats respectifs et quelles sont leurs structures de commandement ?	a	PU,PGC
Quels sont les organismes qui gèrent le planning urbain en vue de la prévention des risques majeurs, naturels, à impact rapide, moyen et lent ?	a	PU
Dans quelle mesure ces organismes, dans leur réflexion, intègrent-ils les risques liés aux changements climatiques, et les risques naturels tout-court ?	c	CC,PU
Comment sont retranscrites dans le planning, la construction et la gestion des infrastructures les contraintes associées aux risques naturels d'ici à l'horizon de 2030, y inclus le changement climatique ?	b,c	CC,PU
Organigramme des ministères concernés par la gestion des désastres, des infrastructures et du planning urbain, et information sur leurs capacités en termes de moyens humains, techniques et financiers ?	a	PU,PGC
Quelle sont les implications et le rôles pour les Wilayas et les Municipalités sur ces thématiques ?	a	PU,PGC
Quelle organisation et quel mandat pour la Protection Civile vis-à-vis de ses homologues des pays méditerranéens ?	c	PGC
Quels sont les mécanismes de coordination prévus entre les différents acteurs en cas de crise aux niveaux national ?	c	PGC
Qu'est ce qui est prévu pour faire interface avec l'aide internationale en cas de désastre majeur ?	c	PGC
Quels sont les indicateurs afférents à la gestion de crise utilisés par les différentes parties prenantes ?	c	PGC
Réglementations en matière de plans d'urgence auxquelles sont soumises les opérateurs publics, semi-public, privés qui gèrent les infrastructures et les réseaux vitaux ?	a,c	PGC
Exercices de préparation de réponse aux désastres : quelle fréquence, quelle échelle et quelle modalité de préparation pour les scénarios d'impact ?	a,c	PGC
Quels moyens techniques et d'information pour la création des scénarios, y compris les simulations d'ordinateur ?	a,c	PGC
Étude de cas récent(s)	c	PGC

* partie 1.g des termes de référence, objectifs a, b ou c ci-dessus

** PU : Planification Urbaine ; CC : Changement Climatique ; PGC : Préparation et Gestion de Crise

Les points b et c sont intimement liés: à l'horizon de 2030, en effet, le rôle qu'une entité donnée sera amenée à jouer dans la planification urbaine dépendra de sa capacité à intégrer les contraintes liées aux changements climatiques, alors que – à plus court terme – la tenue des structures (matérielles et institutionnelles) face à l'impact des désastres naturels conditionnera sans doute la capacité de faire face aux challenges de très long terme tels les changements climatiques.

Nous présentons donc d'abord la cartographie institutionnelle, résultat d'un travail de synthèse de la collecte d'information et de revue de littérature (1.g.a), avant d'en faire une analyse adaptée aux buts du projet (1.g.b et 1.g.c).

Le recueil de documents et les entretiens ont permis, moyennant un travail d'interprétation et de synthèse, une compréhension des aspects institutionnels conforme à ce qui est attendu dans le cadre de cette étude.

2 Cartographie institutionnelle

La cartographie présentée résulte d'une revue documentaire et des entretiens dont la liste est présentée en fin de chapitre.

Les schémas institutionnels du Royaume du Maroc gardant une bonne cohérence temporelle, hormis le réaménagement des compétences ministérielles apporté par le 29^{ème} Gouvernement depuis son entrée en charge en septembre 2007, l'éventail des principaux interlocuteurs institutionnels n'a pas subi de bouleversements dans la dernière décennie. Le contenu des tâches et des actions est révélateur d'une constante mise à jour, ainsi que d'une compatibilité interministérielle entre Directions et Services, dans un cadre institutionnel relativement clair, tel qu'il ressort du tableau suivant.

Dans ce dernier – conformément à la méthodologie adoptée – les entités sont notre point focal et figurent en colonne centrale. Les deux autres colonnes sont: "Relevant de..." et "Rôles / Mandat / Réalisations". La première, donne le niveau de rattachement supérieur pertinent de l'entité proposée: en général le niveau immédiatement supérieur, mais pas systématiquement. Afin de garder un bon compromis entre exhaustivité et lisibilité de l'information, nous avons évité la représentation de tous les niveaux, ou encore l'inclusion des entités dont le rôle est devenu ou est en train de devenir marginal dans le cadre des compétences institutionnelles.

Il en va de même pour la 3^{ème} colonne. Il eut été possible de distinguer différents niveaux d'informations, en particulier entre mandat et réalisation, mais là encore un compromis a été pris afin d'optimiser l'acquisition de l'information essentielle, tout en maintenant un niveau de discernement suffisant. Cette cartographie vise essentiellement à supporter l'analyse proposée ci après, et ne permet pas de tirer des conclusions immédiates.

Tableau 20 : Synthèse de la cartographie institutionnelle

Relevant de...	Entité	Rôles / Mandats / Réalisations
Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement		<ul style="list-style-type: none"> vision stratégique et prospective, gestion et développement du patrimoine énergétique et minier garantir la sécurité des approvisionnements énergétiques, généraliser l'accès aux services énergétiques commerciaux et assurer la sûreté des personnes et des installations énergétiques assurer en permanence les conditions du développement des filières des secteurs énergétique, minier et géologique organiser et assurer le bon fonctionnement des marchés électrique, gazier et pétrolier animer et scruter les actions visant le renforcement des échanges et la concertation avec l'ensemble des administrations, organismes et partenaires établir les bases de données et recueillir les informations nécessaires à l'élaboration des analyses à caractère économique et stratégique et des études d'impact
Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE) auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de L'Eau et de l'Environnement		<ul style="list-style-type: none"> Recherche, évaluation, mobilisation et transfert des ressources en eau Planification du développement, gestion des ressources en eau et sauvegarde du patrimoine hydraulique Surveillance, prévision et alerte météorologiques et climatologiques Recherche et Développement dans les domaines du climat et de l'eau
Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE) auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de L'Eau et de l'Environnement	Département de l'Environnement	<ul style="list-style-type: none"> Point focal de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) Point focal de la Stratégie Internationale de la réduction d'impacte des changements climatiques et du réchauffement global Mise en place des Unités de Changement Climatique, chargées de la coordination et suivi des engagements du Maroc vis-à-vis de la CCNUCC Création d'un Comité National des Changements Climatiques (CNCC) qui évalue la vulnérabilité du Maroc face au CC Création d'un Centre d'Information sur l'Énergie Durable et l'Environnement (CIEDE) Création d'un Comité National Scientifique et Technique sur le CC (CNST-CC) à l'image du GIEC
Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE) auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de L'Eau et de l'Environnement	Direction Centrale de la Surveillance et de la Prévention des Risques (DSPR)	<ul style="list-style-type: none"> Élaboration et mise en application de la législation et de la réglementation relative au contrôle technique et à la sécurité dans les infrastructures Contrôle des équipements relatifs aux hydrocarbures, gaz, électricité, et aux appareils à pression
Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE) auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines,	Direction de la Météorologie Nationale	<ul style="list-style-type: none"> Assure les activités relatives aux informations et prévisions météorologiques et climatologiques Effectue des études et recherches atmosphériques, de météorologie et de climatologie théoriques, expérimentales et appliquées ainsi que les études et les recherches en rapport avec sa mission Assure le rôle de référence en matière de mesure et

Relevant de...	Entité	Rôles / Mandats / Réalisations
de L'Eau et de l'Environnement		<p>d'observation des paramètres météorologiques, climatologiques et environnementaux en accord avec les normes et standards internationaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • assure la coopération bilatérale et multilatérale et participe à la préparation des accords internationaux en liaison avec les administrations intéressées dans les domaines de la météorologie et la climatologie, les échanges internationaux de données en application des accords ratifiés par le Royaume du Maroc • agit en Point Focal du GIEC et de l'OMM
<p>Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE)</p> <p>auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de L'Eau et de l'Environnement</p>	Agences de Bassin Hydraulique (ABH)	<ul style="list-style-type: none"> • Prise de mesure réglementaire et contribution à la réalisation des infrastructures de lutte contre les inondations • Élabore le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE) et veiller à son application • Délivre les autorisations et les concessions d'utilisation du domaine public hydraulique, tenant un registre des droits d'eau reconnus • Fournit aides financières, prestations de services et assistance technique pour prévenir la pollution ou la réalisation d'un aménagement hydraulique • Réalise des mesures, études hydrologiques et hydrogéologiques de qualité en cas de pénurie d'eau déclarée ou pour prévenir les risques d'inondation
	Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC)	<ul style="list-style-type: none"> • Gestion et planification de l'eau; politiques de l'eau (conception et application) • A été impliqué dans la loi sur les inondations • Examine et fournit son avis sur: <ul style="list-style-type: none"> ○ La stratégie nationale d'amélioration de la connaissance du climat et de la maîtrise des impacts sur les ressources en eau; ○ Le plan national de l'eau et les plans de développement intégré des ressources en eau des bassins hydrauliques ○ La répartition de l'eau entre les différents secteurs usagers et les différentes régions du pays ou d'un même bassin, ainsi que les disposition de valorisation, de protection et de conservation des ressources en eau
	Comité interministériel de l'Eau	<ul style="list-style-type: none"> • présidé par le Premier Ministre, il est chargé de veiller à la mise en application des mesures recommandées par le CSEC
	Conseil National de l'Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Il s'agit d'un organe à représentation interministérielle articulé sur cinq commissions spécialisées. Il adopte la stratégie Nationale pour la Protection de l'Environnement et le Développement Durable
Ministère de l'Intérieur	Direction Générale de la Protection Civile (DGPC)	<ul style="list-style-type: none"> • Organise et coordonne les secours aux biens et aux personnes lors de catastrophes; • Assure protection et sauvegarde des personnes et du patrimoine national lors de situation relevant de la défense civile; • Promeut la prévention des risques, en particulier des incendies; • Organise et assure la gestion administrative et technique des services de secours et de lutte contre les incendies • Prépare et entreprend toute action de lutte antiacridienne • Assure la formation technique en protection civile

Relevant de...	Entité	Rôles / Mandats / Réalisations
Ministère de l'Intérieur	Centre de Veille et de Coordination (CVC)	<ul style="list-style-type: none"> Coordination interministérielle et inter-agence des situations de crise Déclenchement des plans ORSEC
Ministère de l'Intérieur	Préfectures Provinces Conseils Régionaux Agence urbaines	<ul style="list-style-type: none"> Gestion et planification du territoire et de l'espace urbain Administration, mobilisation et protection des populations Gestion de crise locale et/ou participation à la gestion locale des crises nationales ou internationales proches
Ministère de l'Équipement et des Transports	Division des Situations à Haut Risque	<ul style="list-style-type: none"> Surveillance et alerte du réseau routier Résilience et réduction de la vulnérabilité des bâtiments hospitaliers et des installations techniques hospitalières
Ministère de l'Équipement et des Transports	Direction des Ports et Domaine Public Maritime	<ul style="list-style-type: none"> Calcul et publication des marées Travaux d'aménagement des infrastructures portuaires (mais gestion déléguée à l'Agence Nationale des Ports)
Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Aménagement de l'Espace	Secrétariat d'État à l'Habitat	<ul style="list-style-type: none"> Règlement de construction parasismique RPS 2000 (structures béton armé ou acier) Responsabilité engagée des Architectes Sanction pour non-conformité au RPS
	Comité Supérieur pour l'Aménagement du Territoire (CSAT)	<ul style="list-style-type: none"> propose les grandes orientations en matière d'aménagement du territoire donne son avis sur les projets de textes législatifs et réglementaires donne son avis sur les propositions d'aménagement soumises par le gouvernement contribue à dresser le bilan des actions d'aménagement du territoire
Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Aménagement de l'Espace	Délégation / Inspection régionales de l'Aménagement, de l'Habitat	<ul style="list-style-type: none"> Gestion et planification de l'espace urbain
Ministère de la Santé		<ul style="list-style-type: none"> Contribue à développer les moyens logistiques susceptibles de faire face à une catastrophe Assistance médicalisée des victimes ; triage des victimes dans le cas de catastrophe Résilience et réduction de la vulnérabilité des bâtiments hospitaliers et des installations techniques hospitalières Surveillance épidémiologique (prévention des épidémies après-catastrophe)
	CRTS - Centre Royal de Télédétection Spatiale	<ul style="list-style-type: none"> A la responsabilité de l'utilisation, de la promotion et du développement de la télédétection spatiale au Maroc. Coordonne et gère les programmes nationaux de télédétection spatiale en partenariat avec les ministères, les universités et les opérateurs privés.
	ONEP (Office National de l'Eau Potable)	<ul style="list-style-type: none"> gestion et planification de l'eau; politiques de l'eau (conception et application) a été impliqué dans la loi sur les inondations
	Commissions Préfectorales et Provinciales de l'Eau	<ul style="list-style-type: none"> gestion et planification de l'eau; politiques de l'eau (conception et application) sont impliquées dans la loi sur les inondations
	ORMVA (Offices Régionaux de Mise en Valeur de l'Agriculture)	<ul style="list-style-type: none"> Gestion et planification de l'eau; politiques de l'eau (conception et application) Ont été impliqués dans la loi sur les inondations

Par le schéma synthétique ci-dessus, nous pouvons conclure préliminairement que deux entités centrales – le Ministère de l'Intérieur et le Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement – sont titulaires de la majorité des tâches. En matière de risques naturels « géophysiques », c'est le Ministère de l'Intérieur qui assure la coordination avec, d'un côté, la Direction Générale d'une Protection Civile réformée et renforcée par les derniers décrets de 2009 et, de l'autre, le Centre de Veille et de Coordination (CVC) pour la gestion de crise.

Sans négliger les aspects de sécurité, la gestion dynamique des mesures de réduction de l'impact des risques en question se fait aujourd'hui avec le concours substantiel du Ministère de l'Équipement et des Transports (notamment en ce qui concerne les axes routiers et les ports) et du Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (en ce qui concerne la gestion des problématiques tactiques ou stratégiques liées à l'eau), ainsi que du Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme.

3 Approfondissements de la cartographie institutionnelle

3.1 Le Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE) auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement

Le SEEE réalise ses missions à l'aide de deux Directions Générale (Environnement, Hydraulique), trois Directions centrales (Aménagements Hydrauliques, Recherche et Planification en Eau, Affaires Générales et Techniques), une Direction autonome (Maroc Météo ou Météorologie Nationale, qui sera traitée séparément par la suite) et un réseau de neuf Agences de Bassin Hydrauliques autonomes. Cette structure vaste et articulée permet de gérer :

- 110 grands barrages (capacité de stockage > 15 milliards de m³) et un réseau associé de digues et canaux, permettant de : contribuer à la production énergétique du pays ; irriguer un million d'hectares environs ; assurer la protection contre les inondations de plaines et de villes ; satisfaire les besoins en eau potable des populations des villes ainsi qu'une bonne partie (>60%) des besoins en eau des populations rurales.
- Un réseau de télémesure d'annonce de crues et de contrôle de la qualité de l'eau, couvrant l'ensemble des 19 bassins versants (Tangérois, Côtiers méditerranéens, Loukkos, Moulouya, Sebou, Côtiers d'El Jadida-Safi, Tensift, Ksob-Iquezoulane, Souss-Massa, Tiznit-Ifni, Ziz-Rhéis, Maider, Draa, Gulemim, Sahara, Our Er Rbia, Guir-Bouanane, Côtiers atlantiques, Bouregreg-Chaouia).
- Au mois d'avril 2010, le réseau télémétré comptait 380 points de mesures pluviométriques multiparamétriques, 240 stations hydrographiques et 45 stations météo, auxquels il faut rajouter 370 stations thermo-pluviométriques appartenant à des organismes tiers. Des mesures piézométriques, et des analyses de qualité de l'eau sont aussi effectuées avec une fréquence moyenne mensuelle sur la totalité du territoire d'intérêt.
- Un service météorologique articulé sur quatre régions Météo-Climatologiques, possédant un système d'observation spatial et terrestre, une infrastructure de traitement et de transmission des données météorologiques aux normes et standards requis au niveau international. Dans le même système, les programmes de recherche météorologique développés et mis en œuvre couvrent la prévision numérique à différentes échéances, l'agrométéorologie, l'hydrométéorologie, la biométéorologie, parmi d'autres.

3.2 Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC)

Ayant pour base légale la loi 10-95 sur l'eau, le CSEC est un organisme de concertation dans le secteur de l'eau, composé à 50% des représentants de l'État et des établissements publics intervenant dans le secteur de l'eau (potable, d'irrigation et hydroélectricité) et pour l'autre 50% des représentants des usagers, des assemblées préfectorales ou provinciales, des établissements d'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, de l'ingénierie et des associations professionnelles.

Le CSEC est chargé d'orienter la stratégie nationale en matière de climat en examinant son impact sur les ressources en eau, le plan national de l'eau et les plans d'aménagement intégré des ressources en eau. Il accorde une importance particulière à la répartition de l'eau entre les secteurs usagers, aux transferts d'eau et aux dispositions de valorisation et de protection des ressources en eau. Les plans directeurs de développement des ressources en eau des grandes régions hydrauliques sont donc élaborés et approuvés par le CSEC, avant d'être pris en compte dans le plan national de l'eau.

Commentaire

Le législateur a laissé au Gouvernement la possibilité de soumettre à l'avis du CSEC tout sujet relatif à la politique nationale de l'eau. La loi 10-95 a laissé au Conseil la possibilité de faire participer à ses réunions, en cas de besoin, toute personne dont les compétences dans le secteur de l'eau sont considérées utiles ou nécessaires. Le Conseil ne se réunit pas de manière régulière : par exemple, il ne s'est réuni que neuf fois entre 1981 et 2001.

3.3 La Météorologie Nationale (Maroc Météo)

D'après le décret d'établissement du 21 novembre 1994, Maroc Météo, la Météorologie Nationale, assure ses fonctions de service dans le domaine de :

- la prévision à courte, moyenne et longue échéances pour le système global Atmosphère-Mer (à l'échelle nationale et de la région Est-Atlantique /Ouest-Méditerranée);
- la météorologie sectorielle orientée à l'Agriculture, l'Hydrologie et l'Environnement, sur le plan national avec fourniture de produits à valeur ajoutée à l'échelle des Régions ;
- la surveillance de la qualité de l'air (à l'échelle locale de la Wilaya du Grand Casablanca) pour la meilleure compréhension et à la gestion des problèmes de pollution de l'air ;

Bien que sa Direction relève toujours du Secrétariat d'État à l'Eau et à l'Environnement, la transformation de Maroc Météo en Service d'État Géré de Manière Autonome (SEGMA) permet maintenant la fourniture de services spécialistes sur une base compétitive. Cette transformation a alimenté des besoins croissants en puissance de calcul, poussant à un enrichissement important en technologies lourdes, avec l'installation entre autres de supercalculateurs, ainsi qu'à une amélioration générale des moyens d'Observation de la Terre et de télécommunication.

En ce qui concerne les aspects liés aux changements climatiques, Maroc Météo participe, en tant que point focal, aux travaux du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC). Elle a mis en œuvre, plusieurs programmes et projets axés sur les changements climatiques. Les travaux et recherches menés dans le domaine des changements climatiques s'articulent autour de différents axes principaux:

- Suivi-détection-attribution qui consiste à repérer, quantifier, suivre et attribuer (en termes d'origine, liaisons et causes) les évolutions et changements éventuels pouvant intéresser

le climat du Maroc. Plusieurs types d'indices de changements climatiques relatifs aux paramètres pluviométriques et thermiques pour différentes échelles temporelles (année, saison, mois) et spatiales (nationale, régionale, station) ont été élaborés. Ces indices sont calculés, étudiés et analysés en termes de variations, tendances et significativité dans un objectif d'assurer une continuité dans le temps du suivi des changements climatiques au Maroc.

- Modélisation et scénarios de changements climatiques qui consiste en (a) la réalisation de simulations de scénarios de changements climatiques à haute résolution avec les modèles dynamiques de climat ; (b) l'analyse et l'étude des scénarios de changements climatiques pouvant concerner notre pays dans le futur (climat moyen, phénomènes extrêmes, indices de changements climatiques). Et enfin (c) l'analyse, l'étude et l'interprétation des scénarios de changements climatiques pouvant concerner notre pays dans le futur. Les changements futurs sont considérés à la fois en termes de moyennes et d'événements extrêmes.

La participation aux études d'impacts en collaborations avec différents organismes et institutions représentant des secteurs socio-économiques vulnérables aux changements climatiques. Cette participation consiste en la fourniture par Maroc Météo de projections futures de changements climatiques à haute résolution après leur élaboration, post-traitement et adaptation aux besoins de l'utilisateur. Ces scénarios sont ensuite intégrés par les modèles d'impacts en tant que donnée d'entrée principale.

Commentaire

Comme dans d'autres pays, l'ensemble des tâches institutionnelles, le caractère obligatoire des activités - régies par la participation aux tâches de prévision et suivi international étalonnées dans le cadre de l'Organisation Météorologique Mondiale - et de ressources déployées pour la surveillance et la prévision, permettent de reconnaître dans Maroc Météo un centre d'excellence dont la haute qualité du produit prévisionnel a permis de gérer de manière appropriée l'impact des pluies exceptionnelles de l'hiver 2010.

3.4 Agences de Bassin Hydraulique

C'est incontestablement la décision de lancement du programme national d'irrigation d'un million d'hectares qui a induit la prise en compte de la notion de gestion de l'eau à l'échelle du Bassin Versant. La nécessité de disposer d'importantes quantités d'eau de surface pour l'irrigation a d'emblée imposé une vision d'aménagement à l'échelle du bassin versant hydrologique.

D'une planification du développement des ressources en eau par projet, fut ainsi adoptée une planification de l'aménagement des eaux de surface à l'échelle du bassin versant. Par la suite, et avec le développement du parc en infrastructures hydrauliques, les préoccupations d'organisation de la gestion quantitative de l'eau se sont fait jour, particulièrement à l'occasion de l'occurrence d'épisodes de sécheresse où les problèmes de répartition de l'eau commençaient à se poser avec plus d'acuité.

Avec la croissance rapide de la demande en eau, l'émergence de problèmes de pollution dus à la pression humaine et la limitation des ressources financières, s'est imposée la nécessité d'une vision globale, plus cohérente où la ressource en eau est considérée à la fois dans ses aspects

quantitatifs et qualitatifs unique et où les usages sont appréhendés ensemble selon une priorité conforme à l'intérêt général de la collectivité nationale.

Ce constat a amené les pouvoirs publics à introduire dès 1982 dans la pratique administrative le concept de gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants hydrologiques. Cela s'est traduit, au sein du Département de l'Équipement, chargé de la conduite de la politique nationale de l'eau, par la mise en place des structures administratives (DRH) ayant une compétence territoriale, correspondant à un ou plusieurs bassins hydrologiques, chargées d'animer la gestion de l'eau.

Avec la loi n° 10-95 dite « de l'Eau » les principes directeurs de la gestion de l'eau étaient précisés en adoptant des concepts ayant prouvé leur bien fondé en de nombreux pays. En particulier, c'est le critère de « concertation à tous les niveaux » qui l'emporte dans la gestion de la ressource-Eau, avec deux dispositions d'importance cruciale :

- Création du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, forum permettant à tous les acteurs nationaux concernés par l'eau de débattre de la politique nationale et des orientations fondamentales en matière de gestion des ressources en eau,
- Création de 9 Agences de Bassins Hydrauliques (ABH) permettant la véritable décentralisation de la gestion de l'Eau, sous le profil de l'alimentation en eau et de la protection hydraulique du territoire.

Comme le tableau ci-dessous le prouve, les ABH ont un contrôle opérationnel, financier et d'exploitation complet sur le bassin de compétence.

Tableau 21 : Liste des opérations sous contrôle des Agences de Bassin

Opérations soumises à « autorisation »	Opérations soumises à « concession »
• Déversement et Réutilisation des eaux usées	• Prise d'eau en vue de la production d'électricité
• Extraction des matériaux du DPH et correction des cours d'eau	• Prélèvements des eaux souterraines
• Creusement puits ou Forage et travaux de captage des eaux	• Établissement d'ouvrage sur le DPH pour une durée > à 5 ans
• Exploitation des bacs ou passages	• Aménagement et exploitation des sources thermales
• Établissement d'ouvrage durée <5ans	• Prélèvement d'eau souterraine ou superficielle dépassant un seuil fixe
• Prise d'eau établie sur cours d'eau	• Aménagement des lacs, étangs et marées

Commentaire

Les ABH sont tenues d'agir pour faire face à toute situation exceptionnelle (entre autres : pénuries d'eau, inondations, dégradations spontanées de la qualité de l'eau). Par leur rôle et par leur taille, elles intègrent parfaitement la souplesse et l'efficacité nécessaires à la gestion de toute problématique de dégradation ou d'excès des volumes, des débits et des qualités hydriques.

3.5 Ministère de l'Intérieur - Direction Générale de la Protection Civile

La création de la Protection Civile marocaine remonte à peu après au séisme meurtrier d'Agadir quand (en 1964) une Commission Supérieure et une Inspection de Protection Civile furent établies auprès du Premier Ministre.

Le Premier Ministre a toujours gardé la pleine responsabilité de la définition de la politique générale de protection civile, alors que la mise en œuvre de ladite politique relève du ministère de l'Intérieur, agissant par le moyen de la Protection Civile Nationale (Sapeurs-Pompiers de protection), un corps d'autorité non armé, ayant un pouvoir de police.

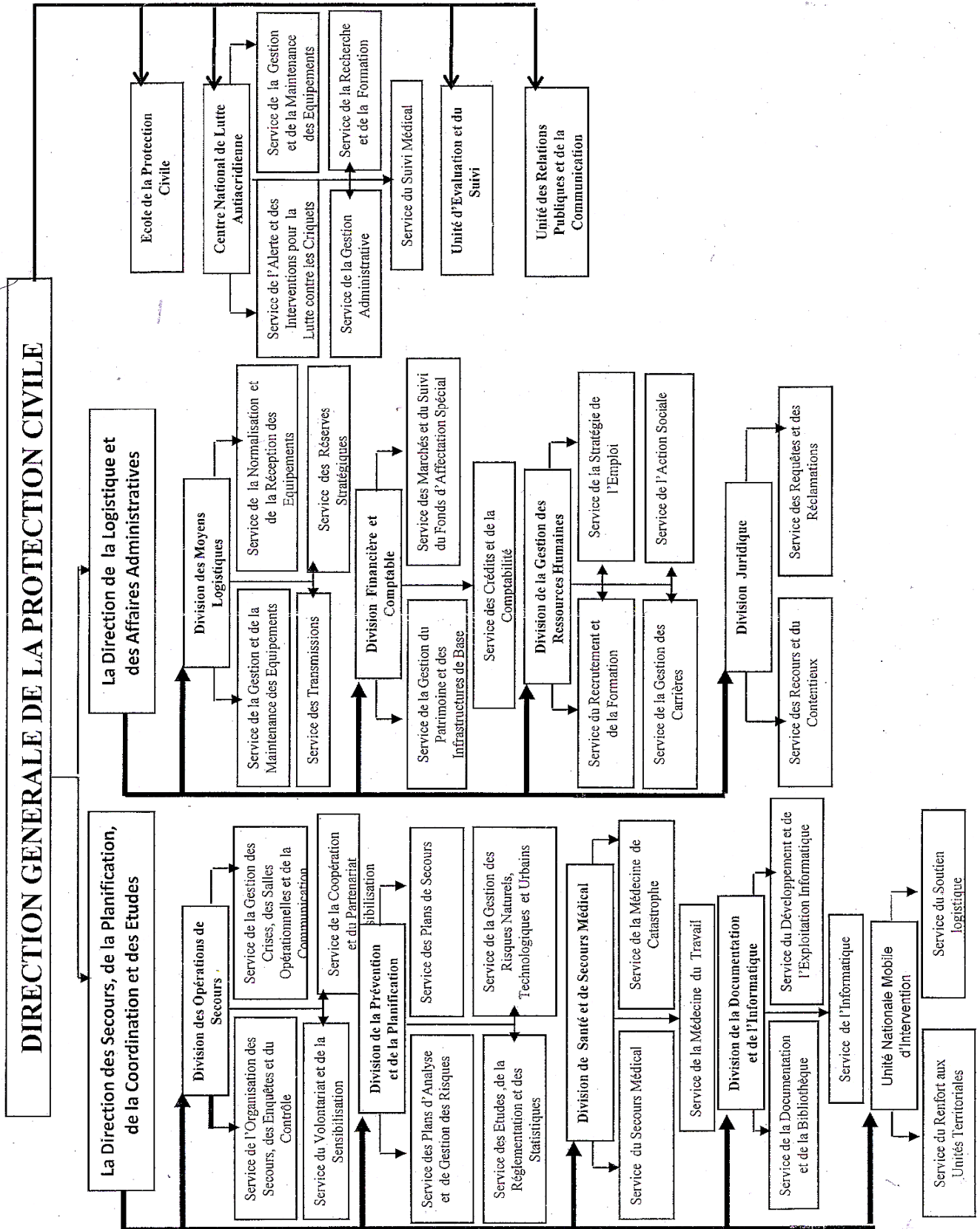
En 1997, l'Inspection de la Protection Civile était hissée au rang de Direction au sein du Ministère de l'Intérieur. Par la suite, les inondations depuis 1998, et surtout le lourd bilan du séisme d'Al Hoceima du 24 février 2004, ont mis à découvert plusieurs faiblesses intrinsèquement liées à la vulnérabilité du tissu socio-économique et infrastructurel, ainsi qu'aux insuffisances sur le plan institutionnel, technique, et organisationnel, pour faire face à des catastrophes d'une telle ampleur.

Ces données ont été prises en compte dans le travail de réaménagement et de modernisation entamé par le Gouvernement Marocain, notamment à partir de 2007 : la Protection Civile a été réorganisée (voir organigramme à la page suivante) depuis mars 2009 en lui donnant clairement la responsabilité d'un nombre accru de tâches techniques et institutionnelles, quoique dans la logique de « missions partagées » prévoyant l'intégration des compétences propres aux différentes entités institutionnelles (Ministères, Agences, Centres) sur le plan national. La nouvelle structure de la Protection Civile compte désormais :

- une Direction Générale ;
- deux Directions, une à caractère technique et une à caractère administratif ;
- sept Divisions, dont quatre techniques et trois administratives ;
- deux Centres Nationaux: l'École de Protection Civile et le Centre de Lutte Antiacridienne ;
- deux Unités externes : Évaluation et Communications.

Ces dernières ont été volontairement confiées plutôt aux organismes à caractère technique et scientifique, notamment à la Météorologie Nationale et à l'Institut National de Géophysique en ce qui concerne le risques météorologique et sismique respectivement, et aux Agences de Bassin Hydraulique pour la gestion cohérente du risque hydraulique.

Figure 64 : Organisation fonctionnelle (après 2009) de la Direction Générale de la Protection Civile



La réorganisation a apporté une importante augmentation de l'étendue des tâches en matière de protection des personnes et des biens menacés par les risques naturels et technologiques, la DG couvrant désormais les activités de:

- intervention pour la protection et le sauvetage des personnes et des biens menacés
- prévention des risques industriels et technologiques, concours à la prévention des risques urbains
- organisation et encadrement des actions bénévoles et des partenariats
- contribution à l'élaboration des textes de loi concernant la gestion des risques
- réflexion, recherche, étude et formation
- actions de sensibilisation des habitants
- conseil, dans les domaines de compétence
- lutte antiacridienne

En ce qui concerne la gestion de crise, le choix gouvernemental a été d'alléger de toute responsabilité politique la Protection Civile, en confiant la coordination des situation d'urgence d'importance suprarégionale a un Comité National de Veille et de Coordination – rassemblant les Ministères et les Centres techniques et scientifiques compétents sous le haut patronage du Ministre de l'Intérieur, et d'un Gouverneur le représentant.

Commentaire

Le rôle de la Protection civile est désormais bien mis en avant dans les mandats. Comme nous l'avons vu, il a été défini dans le temps, constamment ancré aux volets d'action technique et de relation stricte avec le territoire, en proposant l'amélioration continue des aspects de « Préparation » par rapport à ceux de « Prévention » et de « Prévision ».

Le choix de confier la gestion de crise à un organisme de coordination n'est pas étonnant même s'il peut apparaître peu conforme par exemple, à quelques systèmes homologues existants dans l'Union Européenne.

Toutefois – comme en atteste la réponse générale satisfaisante du système lors des inondations de fin-2009 à début-2010 (voir le cas d'étude) – une bonne préparation combinée à une bonne coordination du Comité et du système de communication qui en découle, semble permettre une gestion efficace par le Centre de Crises, avec un vaste impact sur le territoire national.

Ceci pose bien sûr la question de la qualité de la coordination et de l'étendue des moyens préparés préventivement et distribués sur le territoire en utilisant l'arborescence Régionale dont la Direction Générale de Protection Civile a été dotée par les derniers décrets de 2009. Toutefois - compte tenu du caractère assez linéaire du schéma d'organisation et de « réponse », ainsi que de la structure assez verticale de l'État – l'on peut penser qu'il n'y aurait pas de conflits de compétence à prévoir, sous conditions d'une bonne qualité de la coordination centrale. Ce qui – de l'avis général – semble avoir été le cas, tout au moins durant la dernière année.

3.6 Ministère de l'Intérieur – Centre de Veille et de Coordination (CVC)

Le CVC a pour mission le pilotage des processus relatifs à la gestion des situations d'urgence. Sous la coordination d'un Gouverneur, il coordonne les interventions au niveau national mais il est doté de l'autorité nécessaire à déclencher des plans d'action relayés par les Centres de Veille Locaux (sous l'autorité des Walis) et Provinciaux (sous l'autorité des Gouverneurs).

L'étendue des activités du CVC ne couvre pas du tout les activités de prévision, ni les activités de prévention et préparation à effectuer par « temps de calme ». Par contre, il est supposé gérer la dynamique de re-planification des ressources suivant les modifications de risques et menaces par « temps de crise », ainsi que la coordination des intervenants jusqu'à la déclaration de retour à la situation normale. La Salle de Crises, au sein du CVC, est vouée à la coordination, à l'appui et au soutien central, national et international aux efforts déployés sur le terrain.

3.7 Ministère de l'Intérieur – Gestion des Risques et de Crise à l'échelle locale

Le rôle interministériel du Ministère de l'Intérieur en matière de gestion des risques trouve sa pleine expression en la personne du Gouverneur de Province qui - sous la responsabilité du Gouvernement - coordonne l'action de ses partenaires locaux, publics ou privés.

Le cadre juridique régissant l'action du Ministère de l'Intérieur dans ses diverses facettes à l'échelle locale, fait référence :

- à l'adoption de la charte communale avec décret du 23 juin 1960
- à la loi du 12 septembre 1963 créant les assemblées préfectorales et provinciales
- à la loi du 15 février 1977, relative aux attributions du Gouverneur
- à la loi 47.96 relative à l'organisation et à la réglementation des Régions, approuvée par décret du 2 avril 1997, fixant également les attributions du ministère de l'Intérieur dans ce nouveau cadre de référence
- à la loi 79.00 relative à la charte communale et à la réglementation des provinces et préfectures, approuvée par décret du 3 octobre 2002
- au décret 2.97.176 du 15 décembre 1997, relatif aux attributions et statut du Ministère de l'Intérieur.

Le schéma général, régissant le fonctionnement des entités locales en cas d'événements majeurs, fonctionne donc à une échelle et avec une géométrie variables, soit de manière autonome (après évaluation concertée et autorisation par le CVC), soit encadrée par le même CVC en cas de scénarios de risque de grande étendue spatiale.

3.8 Conseil Supérieur de l'Aménagement du Territoire (CSAT)

La mise en place du Conseil Supérieur d'Aménagement du Territoire, établie par décret le 13 décembre 2001, avait pour but de créer « un espace de réflexion, d'échange et de concertation sur les grandes questions et préoccupations des territoires du Maroc » en confiant au CSAT les missions de :

- proposer les grandes orientations en matière d'aménagement du territoire et de développement durable, donnant son avis sur les schémas, les projets de textes législatifs et les différents documents en matière de aménagement du Territoire qui lui sont soumis par le Gouvernement ;
- veiller à l'harmonisation des différentes options et grands projets sectoriels et ce, conformément aux principes et aux orientations de la politique de l'aménagement du territoire, contribuant à l'évaluation du bilan des actions menées dans ce dernier domaine.

3.9 CNRST – Institut National de Géophysique (Réseau Séismique National)

L'Institut National de Géophysique (ING) du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique, est chargé de la surveillance sismique de la totalité du territoire marocain, ainsi que du contrôle et des alertes liées aux situation extrêmes comportant des risques majeurs (tsunamis) sur les côtes du pays.

L'ING gère le Réseau Sismique National, un réseau d'écoute sismologique classique composé de 40 stations à courte période. Les stations sont toutes télémétrées, ce qui rend le réseau adapté à la collecte d'information sismologique en temps réel, et à la circulation des informations essentielles après une phase préliminaire de traitement spécialisé de données.

À présent, l'ING a acquis et est en train d'installer 20 nouvelles stations à large bande et 11 stations trois-composantes à courte période, télémétrées avec une technologie de communications satellitaires dénommée V-SAT (Very-Small Aperture communication Technology) et constituant dans l'ensemble un réseau « à l'état de l'Art ». Les stations sismiques en question, seront couplées à des récepteurs GPS afin de faire coïncider les géométries de localisation avec celles de détermination des situations sur base journalière, pour les nécessités d'analyse de type « strong motion » ainsi que pour la vérification de la tenue des infrastructures principales, et notamment digues et barrages.

Dans le temps, l'ING-RSN a installé également 50 accélérographes qui ne sont pas (pour l'instant) télémétrés et n'interviennent donc pas dans la gestion éventuelle des crises sismiques.

Pour une approche instrumentale rigoureuse à la gestion du risque-tsunami, l'ING développe depuis peu l'installation de stations marégraphiques de précision, télémétrées, pour des opérations en temps-réel.

Une première station numérique télémétrée – dotée de micro-Radar altimétrique – a été installée au port de Casablanca. Pour des raisons structurelles, cette station devra fonctionner en réseau avec les autres stations en Atlantique (principalement espagnoles et portugaises). En ce qui concerne les (12) marégraphes restants, en majorité (10) appartenant à la Direction des Ports et Domaine Public Maritime, n'étant pas télémétrés, ils ne semblent pas pouvoir être convertis à des fonctions de surveillance.

Commentaire

La dotation technique et l'étendue du réseau sismique de l'ING apparaissent tout à fait adéquates à la tâche de monitoring quantitatif-général typique des réseaux à caractère sismologique. La densité spatiale d'appareils est comparable à celle de la majorité des réseaux de bonne, voir très bonne qualité.

La transition aux appareillages large-bande en réseau, permettra d'améliorer l'analyse scientifique. Toutefois, une amélioration de l'opérationnalité n'est pas à prévoir : elle demanderait plutôt le recours massif à une surveillance accélérométrique, visant les grands et moyens séismes de la région. Sur le plan du risque-tsunami, bien que l'aléa soit difficilement définissable, l'initiative technique est à considérer tout à fait conforme à « l'état de l'Art ».

3.10 Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS)

Créé par décret en décembre 1989, le CRTS a reçu le mandat de promouvoir l'exploitation et le développement de l'Observation de la Terre au Maroc. Le CRTS coordonne et réalise le programme national de télédétection en collaboration avec les départements ministériels, les opérateurs privés et les universités marocaines. Le CRTS est responsable de l'acquisition, l'archivage et la diffusion des données et images, de l'observation de la Terre, de la réalisation des projets et du développement de méthodologies en Télédétection et Systèmes d'Information Géographique et domaines connexes. Il est chargé de représenter le Maroc dans les enceintes internationales de compétence, par exemple la IAF - International Astronautical Federation ou la IAA – International Academy of Astronautics, et auprès des agences spatiales ou des fédérations d'agences spatiales (telle l'Agence Spatiale Européenne)

Depuis sa création, le CRTS a mis en œuvre plusieurs projets intégrant la télédétection et les SIG pour répondre aux besoins nationaux en matière d'inventaire et de gestion des ressources naturelles, de protection de l'environnement et d'aménagement du territoire. Les applications développées concernent plusieurs domaines, notamment :

- l'Agriculture, le support à la gestion intégrée des Ressources en Eau, avec la rédaction des cartes d'occupation des sols, le support à la mise en œuvre de techniques d'agriculture de précision (precision farming), l'évaluation de l'impacte sur le territoire de phénomènes lents (tels l'urbanisation des terres agricoles ou la désertification) ou rapides (risques majeurs) ;
- le patrimoine Forestier, pour localiser et quantifier les différents peuplements forestiers à l'échelle nationale, régionale ou locale, suivre et cartographier les changements, détecter et cartographier les feux de forêt – un risque assez important compte tenu de l'exigüité du patrimoine forestier, ne dépassant pas dix millions d'hectares sur la totalité du territoire national ;
- l'aménagement du Territoire, avec un accent particulier sur la cartographie urbaine et son évolution, y compris le suivi de l'habitat insalubre, et la gestion des zones aménagées sous l'angle de la réduction des Risques Naturels, avec quelques cas d'application.

Commentaire

Avec quelques exceptions, les moyens du CRTS ne sont pas déployés pour le support tactique aux besoins de cartographie d'urgence (gestion de crise). Les outils dont le centre est doté, et les typologies des sources d'information spatiale visées (surtout des plateformes en orbite basse) apparaissent plutôt adéquats au suivi thématique des modifications du territoire avec des fréquences de mise à jour stratégiques (de annuelles à pluriannuelles).

Sous l'angle technique nous remarquerons également une prédominance de produits issus des technologies électro-optiques au détriment de ceux obtenus par télédétection Radar satellite.

4 Remarques

Le rôle de l'analyse institutionnelle tel que retranscrit en introduction appelle une précision méthodologique supplémentaire: les termes de références, dans leur objectif, ne correspondent pas *stricto sensu* à une analyse institutionnelle pure. La poursuite des objectifs des termes de références demande en réalité de déborder du pur champ institutionnel vers des thématiques connexes, telles le réglementaire, juridique ou encore la gestion de finances publiques.

Afin de mettre en lumière des points saillants dans l'analyse et ainsi parvenir à l'objectif souhaité, le Consultant a pris la liberté de s'affranchir du strict périmètre institutionnel. Toutefois, il n'y a pas là de velléités de mener une analyse rigoureuse et approfondie de ces autres aspects, qui sont clairement hors champs des termes de références.

En particulier, la mise en œuvre de recommandations d'adaptation au changement climatiques, issue d'une analyse de besoins, plutôt à caractère technique devra, si elle a prétention à être réellement mise en application, trouver une transcription en terme de financement, communal ou autre.

La première conclusion importante de l'analyse de la matrice institutionnelle est qu'elle ne met pas à jour de risques que l'on ne puisse pas rattacher au mandat d'une des entités figurant dans la cartographie présentée. C'est évidemment une bonne chose, condition nécessaire - mais non suffisante en soit - pour garantir une couverture appropriée des risques dont il est ici question.

4.1 L'Eau

On observe que la structure institutionnelle est particulièrement réactive autour des risques liés à l'eau, occupants une place tout à fait prépondérante par rapport aux autres risques. C'est là aussi positif de mettre davantage l'accent sur une thématique lorsqu'elle se révèle particulièrement sensible, toutefois ce n'est pas sans risque non plus: il y a là, entre les différents ministères, entités, directions, comités et commissions impliqués un risque réel de perte de vision, de direction, et d'autorité.

On peut en effet suspecter une ambiguïté possible sur le recouvrement de certaines fonctions par différents périmètres d'autorités. Cela n'a rien de propre d'ailleurs aux risques, le terreau est en l'occurrence relativement fertile à cet égard au Maroc, où l'on rapporte des tensions récurrentes entre DAH et ORMVA par exemple.

La thématique de la Sécheresse est couverte conjointement par le Secrétariat d'État à l'Eau et à l'Environnement, et la Protection Civile pour les incendies (au travers des Sapeurs-Pompiers).

4.2 Les Séismes

La prévention en matière de tremblements de terre ou de tsunamis, est forcément à centrer sur l'amélioration sismique des structures bâties et semble être distribuée entre quatre Ministères : le Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement ; le Ministère de l'Équipement et des Transports ; le Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Aménagement de l'Espace ; et enfin le Ministère de l'Intérieur. Il est à considérer que – pour l'instant – les retours d'expérience sur la séquence d'évènements sismiques d'Al Hoceima 1994-2003-2004 sont peu connus et peu évidents.

Nous noterons par contre que la structure gérant le suivi sismologique (ING) est unique et bien organisée dans l'ensemble : malheureusement, on ne réduit pas le risque sismique avec la sismologie mais avec l'ingénierie du bâtiment – et avec les ressources financières nécessaires.

Nous noterons par ailleurs que l'investissement dans l'amélioration des structures bâties existantes étant démesuré par rapport aux ressources disponibles, la question a été abandonnée même par des pays jouissant d'un PIB plus important, tels l'Italie. En conclusion, les normes parasismiques seront dorénavant réservées aux bâtiments neufs, ce qui compte pour un petit 7-9% du parc immobilier et déjà au départ de meilleure qualité.

4.3 L'Urbain

L'urbanisme n'est pas en reste, avec plusieurs structures clef, telles le Secrétariat d'État à l'Habitation, les agences urbaines, les Délégations et inspections régionales de l'Aménagement, de l'Habitat, le Comité Interministériel pour L'Aménagement du Territoire ou le Conseil supérieur de l'Aménagement du Territoire.

Ce n'est pas surprenant de trouver des structures dédiées ici, car la thématique de la croissance urbaine est trop cruciale pour être malmenée, tout du moins du strict point de vue institutionnel. Dans la continuité de cette note, on trouve une série d'actualisation de normes de constructions (RPS 200), ainsi que le développement de contraintes réglementaires et une distribution des responsabilités engageant l'expertise en architecture.

Ainsi, strictement vu sous l'angle institutionnel, l'urbanisme présente des garanties de cohérence et de gestion idoines. Toutefois, il est connu qu'il s'agit là d'un domaine où il n'est pas simple de distinguer les différents niveaux de responsabilités formelles, ni la part laissée à la politique locale sur ces aspects.

On notera également que la résilience des infrastructures de santé, critique en cas de désastre, est à la charge du ministère homonyme. Un autre aspect clef des infrastructures urbaines concerne les réseaux, ceux d'énergie en particulier, mais aussi ceux de transport. Les contraintes en la matière relèvent du Ministère de l'Équipement et des Transports, qui a à sa charge l'élaboration de plans de continuité d'activités.

4.4 Les Changements Climatiques

La notion de changement climatique a elle aussi été bien intégrée semble-t-il du point de vue institutionnel, puisque plusieurs entités s'y rapportent directement: Centre Météorologique, Département de l'Environnement, point focal de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC), Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat.

Il est satisfaisant de constater la mise en place d'outils dédiés au Changement Climatique. Toutefois, et c'est moins facile à mesurer, il est tout aussi vital que ces cercles particuliers parviennent à diffuser dans d'autres sphères les conclusions qu'elles partagent. Le syndrome du "comité d'expert" peut paradoxalement desservir une thématique si le lien n'est pas convenablement entretenu avec les autres instances concernées. Ici, le choix des membres, ainsi que la réelle volonté politique sous-jacente sont cruciaux. Nous prenons également acte que cela dépasse le strict cadre de l'ingénierie institutionnelle.

Au centre de l'intégration transversale des différents risques, afin de cultiver une véritable culture de la résilience, se trouve la notion cruciale de coordination. Au sein du SEEE et plus particulièrement du Département de l'Environnement, celle-ci se doit d'être assurée par la Direction de la Surveillance et de la Prévention des Risques, qui assure également le point focal pour l'ISDR (Stratégie Internationale de Réduction des Risques, initiative des Nations Unies). La localisation de cette Direction illustre une fois encore le rôle tout à fait prépondérant du SEEE en matière de sécurité environnementale au sens très élargi du terme.

4.5 Questions transversales

Enfin en matière d'application, on constate avec satisfaction qu'il existe des structures dédiées (comme le Comité interministériel de l'Eau ou le Ministre chargé auprès du premier ministre) pour faire appliquer ou créer un cadre réglementaire contraignant afin que des actions tangibles soient issues des différentes entités chargées d'analyser les faits et de proposer des actions. Ainsi, au-delà des compétences spécifiques requises, une difficulté institutionnelle majeure dans le domaine de la prévention est celle du cheminement assez aléatoire de l'information sur les risques sans qu'il y ait une définition préliminaire des vulnérabilités. Nous remarquerons, en effet, que dans tous scénarios d'impact lent ou rapide, l'évidence impose que les premières vulnérabilités soient celles de réseaux vitaux (« lifelines ») qui – comme prouvé par la majorité des désastres naturels – peuvent aisément fonctionner en multiplicateurs d'impact. Il apparaît donc opportun de prévoir :

- d'abord une fonction transversale de qualification et quantification du changement climatique;
- puis un travail spécifique d'exploitation de cette information pour chaque risque séparément (le changement climatique est transversal aux risques, et pour chacun d'entre eux il ne constitue qu'une variable parmi d'autres),
- enfin l'intégration des analyses de risque (intégrant les contraintes du changement climatique mais pas seulement) sous une forme exploitable pour des structures administratives en vue d'une programmation technique et budgétaire cohérente.

Le changement de format requiert un travail spécifique (par exemple, intégrer sur un réseau de drainage le risque d'augmentation de la pluviométrie mais aussi des tremblements de terre).

5 Étude de cas

5.1 Introduction

L'objet de ce travail additionnel n'est pas une analyse exhaustive d'une catastrophe, hors de portée de cette section. Il s'agit par contre de mettre en lumière la réalité du vécu en phase de préparation, d'alerte et de réponse sur le terrain lors d'un événement naturel de portée majeure.

Nous avons évoqué en début de cette étude l'importance du risque hydraulique et – mis à part la crue éclair meurtrière de Marrakech en 1995 – il est intéressant de rappeler les pluies intenses de 2008 dans le Nord, qui offrent une étude de cas intéressante. En effet, des discussions avec les autorités de l'ABH du Loukkos, responsables de la cartographie et de la gestion des inondations pour le Nord-Ouest du Maroc y compris Tanger, ont indiqué qu'ils avaient cartographié la zone industrielle de Tanger, ainsi qu'une zone industrielle similaire à l'Ouest de Tanger (Oued Souani), les caractérisant comme des zones équivalentes à haut risque d'inondation et en informant les Directions respectives. La zone industrielle de l'Oued Souani avait alors choisi d'améliorer sa protection contre les inondations, alors que la zone industrielle de Tanger ne l'avait pas fait : en octobre 2008 - les deux zones subissant la même intensité de pluie - la zone industrielle de Tanger était inondée avec des pertes économiques majeures, alors que la zone industrielle de l'Oued Souani n'avait pas subi de dégâts.

Ceci dit, seule une fraction du Maroc (approximativement 400 localités) est couverte par une cartographie définissant les risques d'inondation, dont la qualité n'a pu être évaluée au cours de la mission sur le terrain. Des discussions avec les Directions compétentes (et en particulier DG Hydraulique et DRPE) du Secrétariat d'État chargé de l'Eau indiquent ainsi que la quantification du potentiel d'inondations catastrophiques au Maroc n'est pas achevée. Pour l'instant donc, les effets du changement climatique sur le risque d'inondation est difficile à évaluer.

5.2 Les inondations de l'hiver 2009-2010

La diffusion d'une importante alerte météo le 17 décembre 2009 amena le Ministère de l'Intérieur à activer le Comité de Veille et de Coordination (CVC). Le CVC fut activé par le Gouverneur Coordinateur central du CVC, M. Khalid Zerouali, afin de « coordonner les actions d'intervention à l'échelle nationale et faire face aux conséquences de ces intempéries ».

Les intempéries ont provoqué l'intervention de la protection civile notamment sur les routes du sud, du centre et du nord du Maroc, où forcément la circulation a été très perturbée. Furent particulièrement touchées au nord du Maroc, les régions de Chaouen, Tétouan et Larache. Des conséquences sur les transports ont été rapportées, particulièrement à Tanger où la circulation des trains a été interrompue. Au sud, les problèmes se sont portés sur Essaouira et Agadir. Au centre, les bassins versant du Bouregreg et de la Chaouia ont été in situation d'alerte. Le niveau d'eau dans le bassin artificiel du Sidi Med Ben Abdellah (presque un milliard de m³) en amont de la Vallée du Bouregreg, a été critique par moments, demandant plusieurs manœuvres de déversement.

Le Ministère procéda également à la réactivation de Comités Locaux et Provinciaux - sous la présidence respective des Walis et des Gouverneurs - afin de « mettre en œuvre les plans opérationnels visant la protection des populations et des biens, ainsi que l'assistance aux personnes menacées ou, le cas échéant, sinistrées ».

De haute source ministérielle il était précisé que depuis les inondations de 2008, dont il a été fait état plus haut, « il a été décidé de procéder à un certain nombre d'actions de prévention, notamment la construction d'ouvrages d'art, pour protéger les zones inondables, et une campagne de curage des réseaux d'assainissement et des oueds afin d'éviter les inondations ». En outre, « ...les moyens humains et matériels d'intervention ont été renforcés permettant de contenir les effets de ces perturbations... » et « ...toutes les équipes resteront mobilisées afin de faire face aux éventuelles conséquences de ces perturbations climatiques... ».

En conclusion d'une série trimestrielle de situations d'urgence – se répétant avec fréquence quasi-hebdomadaire de mi-décembre 2009 à mi-mars 2010, laissant le CVC continuellement opérationnel – et malgré la quantité de pluie, approchant cycliquement les 50mm dans le bassin analysé, toutes les sources d'information se rallient aujourd'hui sur une excellente réussite de la gestion de crise, en termes soit de Commandement et Contrôle, soit de Préparation, soit de qualité et rapidité de la prévision hydrométéorologique.

Il est à noter quelques différences importantes par rapport aux pluies torrentielles de l'année précédente (moins intenses et durant moins longtemps) :

- «...on ne déplore aucune perte de vies humaines..», alors qu'en 2008 il y avait eu 30 victimes.
- «...Les coupures de route ont été momentanées et cela se débloque rapidement... », alors qu'en 2008 quelques localités sont restées sans électricité pendant plusieurs jours.

Ces affirmations du Gouverneur coordinateur du CVC accompagnaient l'évaluation conjointe destinée à la presse, précisant que « ...les travaux effectués ces derniers mois – la construction de digues de protection, le nettoyage des réseaux d'évacuation d'eau entre autres – ont permis pour l'instant de limiter les conséquences de ces inondations au Maroc... ».

Ce cas de figure a été donc choisi parce que – face à des événements sismiques ou pluviométriques n'ayant jamais été proprement maîtrisés auparavant, ni sous l'angle organisationnel ni de façon technique – le franc succès de 2009-2010 s'inscrit dans un contexte où la qualité de l'organisation a été sérieusement améliorée sur la totalité de la chaîne de décision/commandement. En particulier, nous remarquerons que :

- la qualité de la prévision fournie par Maroc Météo a été très élevée et – en particulier - est restée constamment élevée dans le temps, permettant aux différents opérateurs impliqués dans l'urgence de planifier sans biais à court et moyen terme. Probablement, la donnée météorologique et pluviométrique a été le premier discriminant de qualité face aux événements des années précédentes.
- Les systèmes de surveillance des différentes Agences de Bassin Hydraulique télémétrant la pluviométrie et la limnimétrie (tracés bleus et rouges, respectivement ; voir à la page suivante) ont parfaitement fonctionné. En termes de technologie et de modernité, ils apparaissent plus qu'adéquats aux besoins, permettant aux responsables d'effectuer la liaison en temps réel entre la prévision météorologique et le niveau d'eau dans les barrages et/ou dans les lits des cours d'eau.
- Une amélioration importante à apporter au système tel que nous l'avons vu, est celle du développement d'un outil scientifique de conversion de la pluie en débit hydraulique. Ceci pourrait permettre une gestion technique encore plus pointue et efficace, mais devrait être développé bassin par bassin et cours d'eau par cours d'eau.
- Nous mettrons en évidence la célérité avec laquelle le Comité national de Veille et de Coordination a mis en œuvre, à partir du premier bulletin d'alerte aux intempéries émis

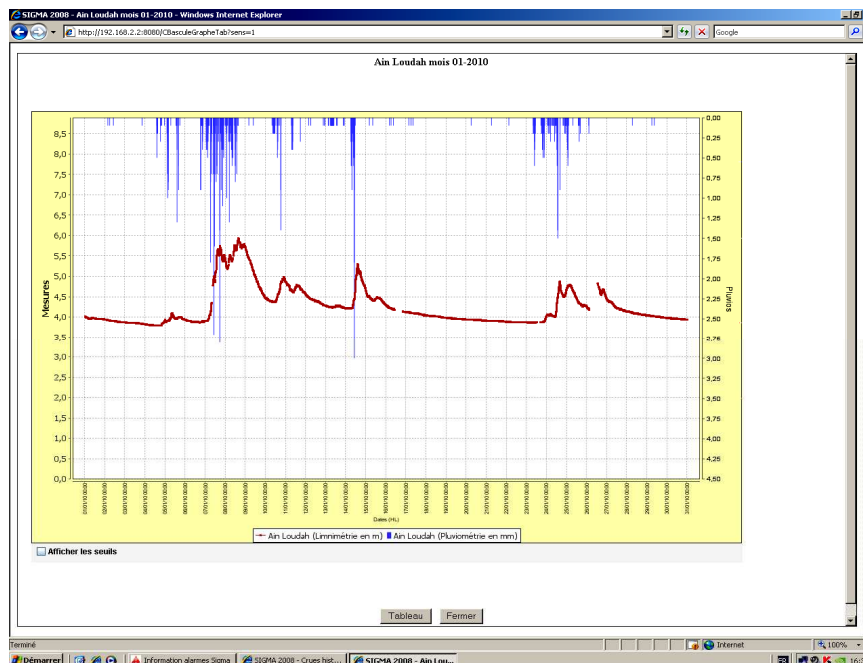
par Maroc Météo, un plan d'opérations de prévention, d'anticipation et de coordination entre les différents départements ministériels concernés.

- Il en va de même pour les actions menées localement par les Directions Régionales de la Protection Civile, en cohérence avec celles des Comités locaux placés sous la tutelle des Walis et des Gouverneurs.

Figure 65 : Réseau de stations limnimétriques télémétrées (points verts)



Figure 66 : Relevés pluviométriques (bleu) et limnimétriques (rouge) à la station d'Ain Loudah, au mois de janvier 2010



6 Conclusions

La valeur ajoutée de la démarche institutionnelle dans le domaine de la gestion de catastrophes et de l'adaptation aux changements climatiques est de valider un équilibre et une bonne coordination dans le jeu des responsabilités de chaque entité concernée tout au long du cycle de gestion, mais également les ressorts institutionnels de la mise en œuvre. En appréhendant la problématique par le prisme de la législation, cela revient à s'enquérir d'une part de la mise en place, la modification ou l'actualisation d'un canevas réglementaire adéquat, et d'autre part de la bonne application du cadre dont il est question.

Sans en faire ici l'inventaire, la revue de littérature a permis de constater que le Maroc s'est clairement soucié d'adapter son corpus réglementaire à ses objectifs. Il n'y a donc pas de ce point de vue strict de facteur limitant évident. En revanche, en ce qui concerne l'application, et même avant, la diffusion et la compréhension de ces évolutions, notamment à une échelle diffuse, la revue documentaire ne permet pas de conclure de façon significative.

Nous noterons tout d'abord que, suivant la restructuration réglementaire de la Direction Générale de la Protection Civile survenue entre février et mars 2009, la gestion des situations d'urgence a changé en accord avec l'élargissement des compétences de celle-ci. Dans toutes les enceintes visitées, une franche satisfaction générale a été exprimée vis-à-vis de l'efficacité de la nouvelle structure de protection, mise en place par le Gouvernement en 2009, et en particulier du fonctionnement du Comité de Veille et de Coordination. Cette satisfaction est amplement justifiée par les résultats prometteurs obtenus en termes de préparation (stockage décentralisé aux soins de la Protection Civile), prévision (alertes quantitatives météorologiques issues par Maroc Météo) et réponse organisée aux pluies torrentielles et inondations conséquentes ayant eu lieu de décembre 2009 jusqu'en Mars 2010. Nous ferons également état d'un effort important fait en matière d'amélioration, modernisation et fonctionnement des réseaux de surveillance et d'alerte.

En outre, nous noterons qu'il y a eu un effort important de suppression des recouvrements interministériels des compétences au niveau national, laissant le cadre relativement simplifié dont il a été fait état dans la cartographie institutionnelle.

Le schéma de coordination hérite d'une approche composite - similaire à la fois à celle de la Sécurité Civile Française et à celle du « Arab Office for Civil Protection and Rescue » (dont le Maroc représente à présent le Secrétariat Général). Il est centré sur l'organisation à caractère paramilitaire de Sapeurs-Pompiers : il s'agit d'un schéma assez expérimenté, qui présente l'avantage de séparer les fonctions d'État Major – assurant la structure de Communication-Commande-Contrôle – de celles plus proprement techniques des Sapeurs-Pompiers.

Le consultant, ayant eu l'opportunité de voir évoluer ce système de protection civile sur une décennie, a été en mesure de constater une amélioration dont le gradient pourrait être considéré comparable au taux de croissance économique du pays.

Il y a au moins un aléa objectif qui pourrait pénaliser cette évolution organisationnelle. Il est lié à la persistance de vulnérabilité du bâti exposé à l'activité de la faille de Nékor, dans le nord du pays, ayant donné lieu dans à Al Hoceima à trois séismes entre magnitude 4.8 et 6.1 en dix ans. La qualité du bâti laisse imaginer une vulnérabilité persistante sur le court terme, avec un niveau de risque toujours élevé, mais sans possibilité de prévision.

7 Sources d'information

Lors de la mission à Rabat et Casablanca du 20 au 23 avril 2010, nous avons eu la possibilité de rencontrer de nombreux Directeurs Généraux, Directeurs, Conseillers et Responsables de Services - au niveau de Ministères, Instituts et Agences Nationales considérés d'importance particulière pour les finalités de l'analyse - dont la liste est fournie dans le tableau suivant.

Nous tenons à remercier toutes les personnes rencontrées de leur disponibilité et des documents qui nous ont été transmis ou mis à disposition lors des rencontres.

Tableau 22 : Liste des personnes rencontrées dans le cadre de l'analyse institutionnelle

ENTITÉ CENTRALE	SERVICE	PERSONNES RENCONTRÉES	FONCTIONS
Ministère de l'Intérieur	Direction Générale de la Protection Civile	Gen.Div. A. EL YAAGOUBI	Inspecteur
	Direction des Secours, de la Planification et des Etudes	Col. M. BENZIANE	Directeur
	Arab Office for Civil Protection and Rescue		Secrétaire Général
Ministère de l'Équipement et des Transports	Direction des Affaires Techniques - Division des Situations à Haut Risque	Mme Z. BENHABIBA	Chef de Division
	Direction des Ports et Domaine Public Maritime	Mme A. DIOURI	Directeur adjoint
Agence d'Aménagement du Bouregreg		M. R. SMIDI	Conseiller
Institut National de Géophysique (Centre National de la Recherche Scientifique et Technique)	Direction de l'ING	Prof. A. IBEN BRAHIM	Directeur
	Service Prévention Sismique et Coopération	Prof. A. EL MOURAOUAH	Directeur du Service
Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement)	Direction des Etudes, de la Planification et de la Prospective (DEPP)	M. M. NBOU	Directeur
	Direction de Recherches et Planification en Eau (DRPE)	M. A. EDDIANI	Directeur
	Direction de la Météorologie Nationale (Maroc Météo)	M. A. MOKSSIT	Directeur
	Service d'Etudes Climatiques	Mme F. DRIOUECH	Responsable
Agence de Bassin Hydraulique du Bouregreg		M. A. ZEROUALI	Directeur

Chapitre 8 - Références bibliographiques

Sismologie et Tsunamis

- LPEE (2002) Aménagement de la vallée de Bouregreg - Étude du sol – mission 2. Laboratoire Public d'essais et d'études, Centre expérimental des sols. (2002) Rapport n° 03.604.088.044
- El Mrabet Azeroual T. (2005) The great earthquakes in the Maghreb region and their consequences on man and environment, Rabat, CNRST-LAG-RABAT-MOROCCO, 2005
- Guidoboni E., Comastri A., Traina G. (1994) Catalogue of ancient earthquakes in the Méditerranéean area up to the 10th century, INGV-SGA (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)
- Guidoboni E., Comastri A. (2005) Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th century, INGV-SGA (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)
- Hussein H. M., Abou Elenean K. M., Marzouk I. A., Peresan Æ A., Korrat M., Abu El-Nader E., Panza G. F., El-Gabry M. N. - Nat Hazards (2008) Integration and magnitude homogenization of the Egyptian earthquake catalogue, 47:525–546 DOI 10.1007/s11069-008-9237-3
- Medina F. (2008) Catalogue of focal mechanism of Moroccan earthquakes for the period 1959-2007. Doc. Institut Scient., Rabat, n°23
- NGDC-NOAA The Significant Earthquake Database contains information on destructive earthquakes from 2150 B.C. to the present
- USGS/NEIC (catalogue PDE), séisme de 1973 – Present
- Buforn E., Sanz de Galdean C., Udias A. (1995) Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region. Tectonophysics, 248, 247-261
- Casado C.L., Molina S., Giner J.J., Delagado J. (2000) Magnitude - Intensity Relationships in the Ibero-Magrebhian Region. Natural Hazards, 22, 271-297
- Jimenez M.J., Garcia Fernandez M. (1999)- Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region. Annali di Geofisica, vol 42, n°6, 1 057 à 1065
- Jimenez M.J., Giardini D., Grünthal G., & SESAME Working Group (2001) Unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region. Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol.42, n°1-2, 3-18
- Arsovski M., Jancevski J., Domurdzanov N., Had zievski D., Hfaiedh M., Kheriddine A., Chedi M. (1991) Investigation for elaboration of seismotectonic map and draft seismic design code of Tunisia. Vol. 1&2, National Institute of Meteorology, Tunis, Tunisia, Institut of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Univ. "Kiril and Metodij", Skopje, Yugoslavia. Rapport et cartes inédits

- Benouar D., Molas G.L., Yamazaki F. (1998) Mapping seismic hazard in the Maghreb countries: Algeria, Morocco, Tunisia. 11th European Conference on Earthquake Engineering.
- Negredo A.M., Bird P., Sanz de Galdeano C., Buforn E. (2002) Neotectonic modeling of the Ibero-Maghrebian region. *J. of Geophys. Research*, vol. 107, n°B11, 2292
- Paradise T.R. (2005) Perception of earthquake risk in Agadir, Morocco: A case study from a Muslim community. *Environnemental Hazards*, 6, 167-180.
- Hoepffner C., Houari M. R., Bouabdelli M. (2006) Tectonics of the North African Variscides (Morocco, western Algeria): an outline. *C.R. Geoscience* 338, 25-40
- Vilanova S.P., Fonseca J. (2004) Seismic hazard impact of the Lower Tagus Valley Fault Zone (SW Iberia). *J. of Seismology*, 8, 331-345
- NGDC-NOAA Tsunami Event Database, 2000 B.C. - to the present
- Soloviev, S.L., Solovieva, O.N., Go, C.N., Kim, K.S., Shchetnikov, N.A. (2000) Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D. Series: Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol. 13, 260 p., Hardcover ISBN: 978-0-7923-6548-8
- Gerassimos A. Papadopoulos and Anna Fokaefs (2005) STRONG TSUNAMIS IN THE MEDITERRANEAN SEA: A RE-EVALUATION, *ISSET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 463, Vol. 42, No. 4, December 2005, pp. 159-170
- INGV-SGA (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Méditerranéan area from the 11th to the 15th century
- Kaabouben F., Baptista A., Iben Brahim A., El Mouraouah A., Toto A. (2009) On the moroccan tsunami catalogue, *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 9, 1227-1236
- Barkan, R., Brink, U. T. & Lin, J. (2008), 'Far field tsunami simulations of the 1755 Lisbon earthquake: Implications for tsunami hazard to the U.S. East Coast and the Caribbean', *Marine Geology*.
- Baptista M.A., Miranda J.M. (2009) Evaluation of the 1755 Earthquake Source Using Tsunami Modeling. In *The 1755 Lisbon Earthquake: revisited. Geotechnical, geological and Earthquake Engineering*, Springer Ed., 425-432
- Blanc P.L. (2009) Earthquakes and tsunami in November 1755 in Morocco: a different reading of contemporaneous documentary sources. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 725-738
- Gutscher, M. A., Baptista, M. A. & Miranda, J. M. (2006) The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 2): Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modeling and seismic intensity, *Tectonophysics* 426, 153–166.
- Mader, C. L. (2001), 'Modeling the 1755 Lisbon tsunami', *Science of Tsunami Hazards* 19, 93–98.
- Omira R., Baptista M.A., Matias L., Miranda J.M., Catita C., Carrilho F., Toto E. (2009) Design of a Sea-Level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 9, 1327-1338

- Omira R., Baptista M.A., Miranda J.M., Toto E., Catita C., Catalao J. Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Nat. Hazards*, DOI 10.1007/s11069-009-9454-4
- Santos A., Koshimura S. & Imamura F. (2009) The 1755 Lisbon Tsunami: Tsunami Source Determination and its Validation. *J. of Disaster Research*, vol 4, n°1, 41
- Thiebot E., Gutscher M.A. (2006) The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 1): Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by seismic data, gravity and thermal modeling. *Tectonophysics* 426, 135-152
- Zitellini, N.; Chierici, F.; Sartori, R. & Torelli, L. (1999), 'The tectonic source of the 1755 Lisbon
- Cherkaoui Maknassi M.E. (1991) – Contribution à l'étude de l'aléa sismique du Maroc, Thèse Univ. J. Fourier de Grenoble
- El Alami S.O., Tadili B.A., Cherkaoui T.E., Ramdani M. (2004) – L'aléa sismique et l'aménagement du territoire des provinces du nord du Maroc. *Publi. Aménagement du territoire*, P48-53
- Mezcua, J., and J. M. Martínez Solares (1983). Sismicidad del área Ibero- Magrebí. *Publicación 203*. Instituto Geográfico Nacional. Madrid, 299 pps.
- Buforn E. (2009) – Seismotectonics of the Azores-Tunisa Region, In *The 1755 Lisbon Earthquake: revisited*. Geotechnical, geological and Earthquake Engineering, Springer Ed., 397-410
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A., 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions.
- *Geophys. J. Int.* 155, 126–138
- Borges J.F. (2003), *Fonte sísmica en Portugal. Algumas implicações na Geodinâmica Açores-Gibraltar*, Ph. D. Univ. of Evora, 307pp.
- Buforn, E., Bezzeghoud, M., Udias, A. and Pro, C. 2004. Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications. *Pure Appl. Geophys.*, 161(3): 623-646.
- Stich D., Serpelloni E., de Lis Mancilla F., Morales J. (2006) - Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations, *Tectonophysics*, 426, p295-317
- Reiter L. (1990). *Earthquake hazard analysis : issues and insights*. Columbia University Press, New York, 253 pp.
- Aït Brahim L., Tadili B., Nkcha C., Mouayn I., Ramdani M., Limouri M., El Qadi A., Sossey Alaoui F. & Benhalima M. (2004) Using Active Faults and Seismicity for the Strong Motion Modeling in the Eastern Rif (Northern Morocco), *Pure appl. geophys.* 161 (2004) 1081–1091, 0033 – 4553/04/061081 – 11, DOI 10.1007/s00024-003-2487-9
- Mhammdi N., Medina F., Kelletat D., Ahmamou M'F, Aloussi L. (2008) – Large boulders along the Rabat coast (Morocco); possible emplacement by the november, 1st, 1755 A.D. tsunami, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 27, No. 1, page 17
- Ribeiro A., Mendes-Victor L.A., Matias L., Terrinha P., Cabral J. & Zitellini N. (2009) – The 1755 Lisbon Earthquake : A review and the Proposal for a tsunami Early Warning System in

the Gulf of Cadiz, In *The 1755 Lisbon Earthquake: revisited. Geotechnical, geological and Earthquake Engineering*, Springer Ed., 411-423

Climat et évènements climatiques exceptionnels

- Beltrando G., Chémery C. (1995) Dictionnaire du Climat. Larousse-Références.
- Berrisford, P., D. Dee, K. Fielding, M. Fuentes, P. Kallberg, S. Kobayashi and S. Uppala: The ERA-Interim archive, 2009
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cubasch U, Waszkewitz J, Hegerl G, Perlwitz J (1995) Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Clim Change* 31: 273-304
- Déqué M, Piedelievre JPh (1995) High resolution climate simulation over Europe. *Clim Dyn* 11: 321-339
- Déqué M (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* 57:16-26
- Driouech F, Déqué M, Sánchez-Gómez E (2009) Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. Submitted to *Global and Planetary change*
- Giorgi F (1990) Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J Climate* 3: 941-96
- Giorgi, F., B. Hewitson, J. Christensen, M. Hulme, H. von Storch, P. Whetton, R. Jones, L. Mearns and C. Fu, 2001. Regional climate information – evaluation and projections. In: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (eds.). pp. 583–638. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press
- Goodess C (2003) Statistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions: STARDEX. *European Geophysical Union Information Newsletter* 6, available on line at <http://www.the-eggs.org/articles.php?id=3>
- Hewitson, B.C. and R.G. Crane (1996). Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7:85–95
- IPCC, 2007a: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, 2007b: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Jones R. G., Murphy JM, Noguier M (1995) Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I. Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Q J R Meteorol Soc* 121: 1413-1449
 - Johns, T.C., Gregory, J.M., Ingram, W.J., Johnson, C.E., Jones, A., Lowe, J.A., Mitchell, J.F.B., Roberts, D.L., Sexton, D.M.H., Stevenson, D.S., Tett und, S.F.B., Woodage, M.J., 2003. Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. *Clim. Dyn.* 20, 583–612.
 - Knippertz P, Christoph M, Speth P (2003) Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys* 83: 67–88
 - McGregor JL (1996) Semi-Lagrangian advection on conformal-cubic grids. *Mon Wea Rev* 124: 1311-1322
 - Overeem, A., T. A. Buishand, and I. Holleman (2009), Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar, *Water Resour. Res.*, 45, W10424
 - Rummukainen M, Räisänen J, Bringfelt B, Ullerstig A, Omstedt A, Willén U, Hansson U, Jones C (2001) A regional climate model for northern Europe: model description and results from the downscaling of two GCM control simulations. *Clim Dyn* 17: 339-359.
 - Solman, S. A., Nuñez, M.N., 1999. Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. *International Journal of Climatology*, 19 (8): 835-861.
 - Terray L., Braconnot P. (ss dir.), 2008. Livre blanc Escrime : étude des simulations climatiques. IPSL-Météo-France, 52 p.
 - SWITCH Project: Managing Water for the City of the Future, 2007: "Climate change and water management Alexandria" – Briefing note School of Engineering, University of Guelph, Guelph, Ontario
 - Ward MN, Lamb PJ, Portis DH, El Hamly M, Sebbari R (1999) Climate Variability in Northern Africa: Understanding Droughts in the Sahel and the Maghreb. In: Navarra A (ed) *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Springer Verlag, Berlin, pp 119-140
 - Wilby RL, Wigley TML, Conway D, Jones PD, Hewitson BC, Main J, Wilks DS (1998) Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research* 34: 2995-3008
 - Wilby RL, Dawson CW, Barrow EM (2002) SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental and Modelling Software* 17: 145-157

Évaluation économique

- Etude de vulnérabilité et adaptation du Maroc face aux Changements Climatiques : Mission II : Vulnérabilité socioéconomique. Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau et de l'Environnement – Maroc ; 2006.
- Frédéric Grelot et al, 2008, Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice, Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations.
- Haut Commissariat au Plan - Royaume du Maroc. Les sources de la croissance économique au Maroc ; Septembre 2005.
- Haut Commissariat au Plan - Royaume du Maroc. Croissance économique et développement humain - Eléments pour une planification stratégique 2007-2015 ; Juin 2007.
- Etude du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, Agence du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, INGEMA, SCET-SCOM, 2006/2007.
- UNEP, 2007, Evaluation de l'Impact et de l'Adaptation des Zones Côtières Marocaines face aux Changements Climatiques.
- Ricardo Cassale, Claudio Margottini, 2004, Natural disaster and sustainable development, Berlin, Springer-Verlag, xix, 397 p.
- Ghesquiere et al, 2005, Earthquake vulnerability reduction program in Columbia, a probabilistic cost-benefit analysis, World Bank.
- Ghesquiere et Mahul, September 2010, Financial protection of the states against natural disasters, a primer; Policy research working paper # 5429, The World Bank, Latin American and the Caribbean region, Finance and private sector development, Sustainable development network.
- Mertz et al, 2008, Estimation de l'incertitude de dommages monétaires directs aux bâtiments.
- Etude de protection contre les inondations du Grand Tunis, BCEOM, 2005.
- Hallegatte, S et al., 2008, Assessing Climate Change impacts, sea level rise and storm surge risk in Port cities: a case study on Copenhagen, OECD Environment working papers, N°3, OECD publishing, OECD.
- Hallegatte, 2008, An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina, Risk analysis.
- Edmund Penning-Rowsell et al., 2005, The benefit of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques, Middlesex university press
- Frédéric Grelot et al, 2008, Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice, Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations.
- Katrin Erdlenbruch et al. 2008, Une ACB spatialisée de la protection contre les inondations, Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb;
- Egis Eau, 2008, Programme d'action et de prévention des inondations, Ville de Nîmes, évaluation socio-économique des vulnérabilités;

- Blin et al, 2005, Cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondation pour les résidences unifamiliales du Québec.
- Procedural guidelines for estimating residential and business structure value for use in flood damage estimation, US Army Corps of Engineers, Institute for Water resources, report 95-R-9, 1995.
- Bates, BC, ZW Kundzewicz, S Wu and JP Palutikof, Eds, 2008: Climate Change and Water, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- De Perthuis et al, 2010; Économie de l'adaptation au changement climatique. Conseil économique pour le développement durable, Paris.
- OCDE, Perspectives Economiques de l'Afrique de l'OCDE (2008)
- Nick Hanley, Edward B Barbier, 2009, Pricing Nature, Cost Benefit Analysis and Environmental policy, EE.
- Stern review, Economics of Climate Change, Londres: HM Treasury, 2006.- XXVII-579 p., tabl., graph., bibliogr.
- Tol, R.S.J. (2002), 'New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates', *Environmental and Resource Economics*, 21 (1), 47-73.
- Tol, R. S. J. (1995), 'The Damage Costs of Climate Change – Towards More Comprehensive Calculations', *Environmental and Resources Economics* 5, 353–374.
- Cline, W. R. (1992), *The Economics of Global Warming*. Washington, D.C.: Institute for International Economics.
- Fankhauser, S. (1994a), 'The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions: An Expected Value Approach', *The Energy Journal* 15, 157–184.
- Fankhauser, S. (1994b), 'The Economic Costs of Global Warming Damage: A Survey', *Global Environmental Change* 4(4), 301–309.
- Fankhauser, S. (1995), *Valuing Climate Change – The Economics of the Greenhouse*. London: EarthScan.
- Nordhaus, W. D. (1991), 'To Slow or Not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effect', *Economic Journal* 101, 920–937.
- Nordhaus, W. D. (1994a), *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge: The MIT Press.
- Nordhaus, W. D. (1994b), 'Expert Opinion on Climate Change', *American Scientist*, 45–51.
- Titus, J. G. (1992), 'The Costs of Climate Change to the United States', in S. K. Majumdar, L.S. Kalkstein, B. M. Yarnal, E. W. Miller and L. M. Rosenfeld, eds., *Global Climate Change: Implications, Challenges and Mitigation Measures*. Easton: Pennsylvania Academy of Science, pp. 384–409

Evaluation sanitaire

- Kherbach F. et El Alami El Fellouosse, L.A. Etude sur le financement des soins de santé au Maroc. OMS ; Novembre 2007.
- Maazouzi, W. et al. Groupe thématique « Système de Santé et Qualité de Vie » du Rapport “50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025”. Cinquantenaire de l’Indépendance du Royaume du Maroc.
- Ebi, K.L., 2008, Adaptation Costs for Climate Change-Related Cases of Diarrhoeal Disease, Malnutrition, and Malaria in 2030. Global Health ;
- Confalonieri U, Menne B, Akhtar R, Ebi KL, Hauengue M, Kovats RS, Revich B, Woodward A: Human Health. In Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2007:391-431.
- McMichael A, Campbell-Lendrum DH, Corvalán C, Ebi K, Githeko A, Scheraga J, et al., eds. Climate Change and Health: Risks and Responses. Geneva: OMS; 2003.
- OMS 2001, Commission on Macroeconomics and Health. Report of the Commission on Macroeconomics and Health: macroeconomics and health: investing in health for economic development, Geneva;
- Campbell-Lendrum D. and R. Woodruff, 2006, Comparative Risk Assessment of the Burden of Disease from Climate Change in “Climate Change and Human Health: National Assessments of Impacts and Adaptation. Environmental Health Perspectives - Vol. 114 No.12; December 2006.
- OCDE, Perspectives Economiques de l’Afrique de l’OCDE (2008)

Chapitre 7: Évaluation institutionnelle

- Cherkaoui, T., E. (1991) « Contribution à l'étude de l'aléa sismique du Maroc », Thèse de Doctorat, Université 'Joseph Fourier', Grenoble, pp. 247.
- Cherkaoui, T., E., Harnafi, M. (2004) « Le séisme d'Al Hoceima du 24 février 2004 », Rapport préliminaire de mission, Université 'Mohammed V', Dept. De Physique du Globe - Agdal, pp. 14.
- El Alami S.O., Tadili B.-A., Cherkaoui T.-E., Medina F., Ramdani M., Aït Brahim L., Harnafi M. (1998) «The Al Hoceima earthquake of May 26, 1994 and its aftershocks: a seismotectonic study». *Annali di Geofisica*, v. 41, n°4, 519-537.
- Jabour, N., Iben Brahim, A., Kasmi, M., El Mouraouah, A., Birouk, A. (1995) «The Al Hoceima earthquake may 26 1994 ground motion records». 6^{ème} Séminaire Maghrébin de Génie Parasismique. Hammamet, 7-9 décembre 1995, Tunisia.
- Jabour, N., Iben Brahim, A., Kasmi, M., El Mouraouah, A., Birouk A. (1995) «The Al Hoceima earthquake may 26 1994 Monitoring the Al Hoceima seismic crisis». 6^{ème} Séminaire Maghrébin de Génie Parasismique. Hammamet, 7-9 décembre 1995, Tunisia.
- Loi n°10-95 sur l'Eau, Bulletin Officiel du 20 septembre 1995, 627-663.
- Loi n° 11-03 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement, Bulletin Officiel du 19 juin 2003
- Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau - Direction Générale de l'Hydraulique (2007). « Les Bassins versants du Maroc». Publ. N.01/2007, pp. 412.
- Décret 13 décembre 2001 portant création du Conseil Supérieur de l'Aménagement du Territoire, Bulletin Officiel du 31 décembre 2001
- Décret portant modifications dans l'organisation de la Direction Générale de la Protection Civile, Bulletin Officiel du 9 février 2009
- Décret portant modifications dans l'organisation de la Direction Générale de la Protection Civile, Bulletin Officiel du 2 mars 2009
- Agence pour l'Aménagement du Bouregreg. « Bouregreg News 2010 ». éditions Okad-Pole Marketing, Communications et Etudes Prospectives de l'Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg. pp.64
- Commission on Climate Change and Development (2009) « Closing the Gaps: Disaster risk reduction and adaptation to climate change in developing countries». ISBN: 978-91-633-4720-7. Ministry for Foreign Affairs Sweden, SE-103 39 Stockholm, pp.107.
- Groupement Paratronic-Asconit-Corail, Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia. Séminaire de Restitution des Acquis du « Projet de Modernisation du dispositif d'alerte de Crues de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia » ; Rabat, 22/12/2009 ; pp. 22.