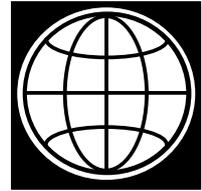




République Arabe d'Égypte
Royaume du Maroc
République Tunisienne

BANQUE
MONDIALE



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



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

LES VILLES COTIERES D'AFRIQUE DU NORD

confrontent les désastres
naturels et le changement
climatique



L'adaptation au changement climatique et la
résilience aux désastres naturels dans les villes
côtières d'Afrique du nord

Sommaire de l'étude régionale
Juin 2011



BANQUE MONDIALE



CENTRE de MARSEILLE
pour l'INTÉGRATION en MÉDITERRANÉE

UNE ETUDE ISSUE DE MULTIPLES PARTENARIATS

L'étude a été dirigée par Anthony G. Bigio, Urbaniste senior, Auteur collaborateur du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), avec une équipe composée par Stéphane Hallegatte, expert principal en changement climatique, Salim Rouhana, expert associé junior, Asmita Tiwari et Osama Hamad, consultants en gestion de risques et de catastrophes et Tim Carrington, consultant en communications.

Elle a bénéficié des remarques d'experts de la Banque Mondiale et du Dispositif mondial pour la réduction des risques de catastrophes et la reconstruction (GFDRR) : Alex Bakalian, Henrike Brecht, Isabelle Forge, Jaafar Friaa, Francis Ghesquière, Philippe Huc, Alex Kremer, Michel Matera et Edward Tschan. Anna Bjerde, responsable sectorielle du développement urbain et social pour la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord à la Banque mondiale a fourni le cadre d'orientation générale du travail.

Un groupement de sociétés de conseil françaises, piloté par **Egis-BCEOM International**, dirigé par Denis Carra et comprenant **IAU-RIF** et **BRGM**, a été responsable de la réalisation de l'étude. L'équipe du projet sous la direction d'Yves Ennesser était composée de Michel Albientz, François Beauchain, François Bertone, Ion Bestelciu, Dominique Cataliotti, Jean-Michel Cathala, Guillaume Dulac, Fabrizio Ferrucci, Eric Huybrechts, Azzedine Motia, Mirelle Raymond, Victor Said, Monique Terrier, Mohsen Tounsi, Nadra Tounsi, Terry Winter, et Franck Zangelmi. **Météo Maroc**, l'agence nationale de météorologie du Maroc, a préparé les modèles climatiques de descente d'échelle en consultation avec les agences de météorologie de la Tunisie et d'Egypte.

L'étude a à été cofinancée par le **Dispositif mondial pour la réduction des risques de catastrophes et**

la reconstruction (GFDRR), le **Fonds norvégien pour le secteur privé et l'infrastructure (NTF-PSI)** et le **Fonds pour le développement écologique et socialement durable (TFESSD)**, administrés par la Banque Mondiale.

Les partenaires suivants ont généreusement contribué à l'étude : l'**Agence spatiale européenne**, avec ses services observation satellitaire via les sociétés de services Altamira et TRE ; l'**Académie arabe des sciences, des technologies et du transport maritime** a participé à l'évaluation des risques urbains d'Alexandrie ; et le **Centre de Marseille pour l'Intégration en Méditerranée (CMI)**, plate-forme régionale dédiée au partage des connaissances, a organisé les ateliers nationaux et régionaux pour la divulgation de l'étude.

L'appui institutionnel et technique dans les trois pays ayant participé à l'étude a été capital pour le bon déroulement de la recherche et pour définir les mesures et actions qui permettront de faire face aux risques identifiés :

En **Egypte** – l'Agence des affaires environnementales (Département de gestion des zones côtières), avec le Gouvernorat d'Alexandrie.

Au **Maroc** – le Secrétariat d'Etat pour l'Eau et l'Environnement, la Wilaya (autorité déconcentrée) du Grand Casablanca et l'Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg.

En **Tunisie** – le Ministère de l'environnement et du développement durable (Département de l'environnement et de qualité de vie), le Ministère du développement et de la coopération internationale (Département d'infrastructures) et la Municipalité de Tunis.

ABREGÉ: LES RISQUES COTIERS URBAINS EN AUGMENTATION

La position géographique des villes côtières d'Afrique du Nord, qui a longtemps facilité leur accès au commerce et à la culture, les rend également vulnérables aux risques naturels et aux phénomènes climatiques extrêmes auxquels les régions plus éloignées des côtes sont rarement confrontées. Ces villes à forte croissance démographique font face à des risques concrets qui s'intensifieront au cours des prochaines décennies à mesure que les conséquences du changement climatique se feront sentir davantage.

Afin de mieux comprendre les risques que ces villes devront affronter à l'horizon 2030 et de contribuer à préparer les mesures d'adaptation nécessaires, la Banque Mondiale a mené une étude régionale axée sur trois villes : Alexandrie, Casablanca et Tunis. L'étude a concerné également la vallée du Bouregreg au Maroc, située entre les villes de Rabat et de Salé, qui fait l'objet d'un projet de développement urbain à grande échelle.

L'étude sur « **l'adaptation au changement climatique et la résilience aux désastres naturels dans les villes côtières d'Afrique du Nord** » a analysé le degré d'exposition des quatre sites aux désastres naturels,

notamment les inondations et les ondes de tempêtes, les séismes et les tsunamis, ainsi qu'aux phénomènes climatiques extrêmes de plus en plus fréquents liés au changement climatique. Le projet s'est déroulé de juin 2009 à juin 2011 et a fourni les outils nécessaires pour évaluer les risques et les coûts des pertes potentielles, et pour s'orienter vers des réformes et des investissements pour permettre aux villes de s'adapter au changement climatique et d'augmenter leur résilience face aux désastres naturels.

Les désastres naturels en augmentation : une évidence

À ce jour, la rive sud de la Méditerranée et le Moyen-Orient ont connu une amplification significative des désastres naturels. La moyenne annuelle de 3 catastrophes naturelles en 1980 a augmenté régulièrement jusqu'à plus de 15 en 2006. Au total, sur une période de 25 ans, la région a été touchée par 276 désastres naturels, dont 120 pendant les cinq dernières années. Tout indique une augmentation des risques associés aux catastrophes naturelles, en raison également de l'exposition accrue de la population et des infrastructures.

Les risques urbains augmentent dans toutes les localités urbaines examinées

Risques	Alexandrie		Tunis		Casablanca		Vallée du Bouregreg	
	Actuel	2030	Actuel	2030	Actuel	2030	Actuel	2030
Séismes/instabilité des sols	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
Tsunamis/submersion marine	Moyen	Élevé	Moyen	Élevé	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé
Érosion côtière	Moyen	Élevé	Élevé	Très élevé	Élevé	Élevé	Moyen	Moyen
Inondations	Moyen	Moyen	Élevé	Très élevé	Élevé	Élevé	Moyen	Très élevé
Pénurie d'eau	Moyen	Élevé	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen

■ Très élevé ■ Élevé ■ Moyen ■ Faible □ Très faible

Phénomènes climatiques extrêmes récents

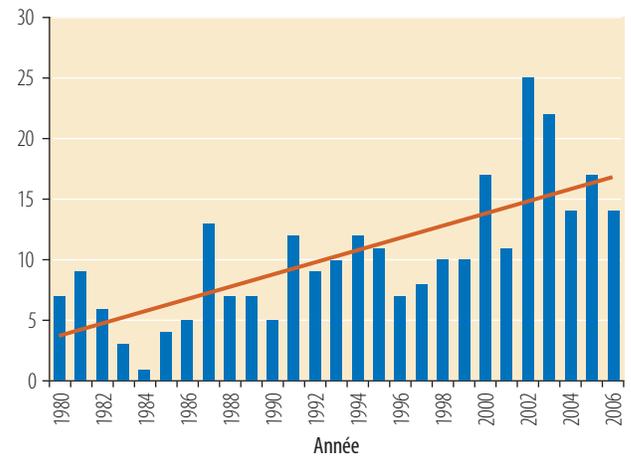
Le 30 novembre 2010, les pluies qui se sont abattues sur **Casablanca** ont atteint un niveau record de 18 centimètres en une seule nuit, l'équivalent de six mois de précipitations en temps normal. Les inondations ont forcé la fermeture de l'aéroport international et de plusieurs entreprises et écoles à travers toute la ville. Maintes entreprises ont perdu leurs stocks de marchandises. Les rues sont devenues des rivières tourbillonnantes avec des voitures submergées et des piétons dans l'eau jusqu'à la taille qui tentaient de se mettre à l'abri. Différentes infrastructures publiques ont dû héberger plus de 2 500 familles.

Du 10 au 12 décembre 2010, 28 immeubles se sont effondrés à **Alexandrie** après de fortes pluies accompagnées d'ondes de tempête et de fortes rafales de vent qui ont causé la mort de 18 personnes et laissé des dizaines de blessés. Les rues étaient inondées, et toutes les activités portuaires ont été suspendues. Une usine s'est effondrée sur un groupe d'ouvriers, suite aux dommages causés par la pluie à la structure du bâtiment.

Quant aux habitants de **Tunis**, ils ont pu mesurer l'ampleur des risques associés aux désastres naturels en septembre 2003 lorsqu'une tempête particulièrement forte a balayé la ville. En 24 heures, Tunis a reçu l'équivalent de cinq fois le niveau de précipitations normalement prévu pour tout le mois de septembre. La catastrophe a endommagé des bâtiments, causé des morts et submergé le système de drainage de la ville qui s'est avéré inadéquat. Après le désastre, les autorités tunisiennes ont évalué les faiblesses des structures urbaines et ont entrepris des études et des investissements pour aider la ville à faire face à des désastres similaires dans le futur.

Risques susceptibles d'augmenter au cours du temps

Deux tendances confirment la vulnérabilité croissante des villes aux inondations et autres désastres naturels pendant les deux prochaines décennies :



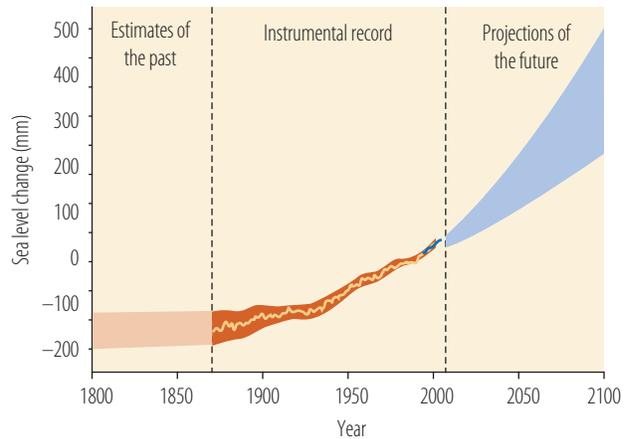
Les désastres naturels concernant les pays de l'Afrique du nord et du Moyen orient ont augmenté sensiblement depuis 1980. (Source: EMDAT)

- Le **changement climatique**, dont l'ampleur et les impacts futurs restent incertains, contribue à augmenter la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes, ce qui rend les statistiques climatiques du passé inutilisables comme indicateurs de risques climatiques futurs. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'Afrique du Nord est considérée comme la deuxième zone la plus vulnérable aux risques climatiques à l'échelle mondiale.
- La **croissance accélérée des populations urbaines** dans les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord redouble les enjeux en augmentant les pertes potentielles dues aux désastres naturels et aux phénomènes climatiques. En 2010, les villes côtières de la région accueillent une population d'environ 60 millions d'habitants mais ce chiffre devrait atteindre les 100 millions en 2030, exposant ainsi au risque un bien plus grand nombre de personnes, d'activités économiques et de structures urbaines. Alexandrie, Casablanca et Tunis, dont les populations totalisaient environ 10 millions d'habitants en 2010, auront une population cumulée d'environ 15 millions en 2030.

Evaluation des risques urbains

S'appuyant sur les prévisions climatiques et l'évolution de l'urbanisation et de la démographie, l'équipe du projet a étudié les zones côtières, les infrastructures et les zones résidentielles qui devront faire face aux risques accrus. En examinant les risques spécifiques, notamment les inondations ou l'érosion du littoral, l'équipe a constaté que la plupart des risques augmentent pendant la période 2010–2030. L'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique, qui est un risque critique pour les villes côtières, est une inconnue significative qui a été estimée dans l'étude à 20 cm à l'horizon 2030. Le niveau plus élevé de la mer aggraverait les ondes de tempête amplifiant les risques de submersion marine et d'érosion du littoral.

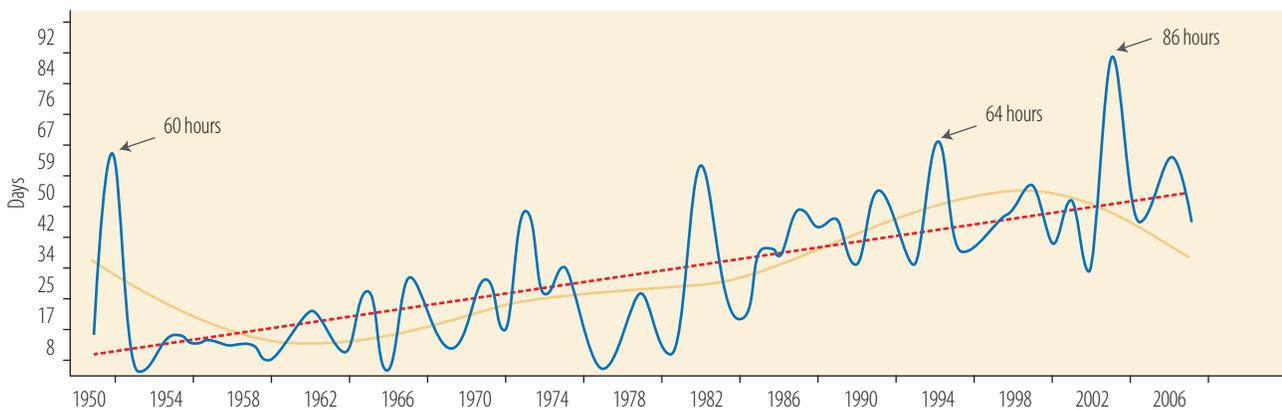
Le rapport a identifié des risques spécifiques dans chacune des zones urbaines et proposé des mesures d'adaptation qui pourraient atténuer les dommages et pertes potentiels. Les risques ont été quantifiés, de même que le coût des mesures de résilience et d'adaptation au climat, afin que les planificateurs puissent calculer les coûts et les bénéfices associés à chaque recommandation. L'étude porte sur quatre sites spécifiques, mais le processus analytique utilisé pourrait s'appliquer à beaucoup d'autres villes côtières de la région.



Les projections pour le 21ème siècle sont incertaines, mais même selon les plus conservatrices l'augmentation du niveau de la mer aggraverait les risques pour les villes côtières d'Afrique du nord. (Source: WRI)

Evaluations économiques

Selon les observations de l'étude, pendant la période 2010–2030, chacune des trois villes devra faire face à des pertes bien au-dessus d'1 milliard de dollars liées aux risques identifiés, notamment les inondations, les séismes, l'érosion côtière, l'instabilité des sols, les submersions marines, les tsunamis et la pénurie d'eau. En même temps, le programme d'aménagement de la vallée du Bouregreg au Maroc pourrait mettre en danger des communautés, des résidences



Comme dans le cas de Tunis, les vagues de chaleur augmentent en durée avec des pics plus élevées de température, avec des impacts croissants sur la santé publique, y compris les maladies respiratoires.

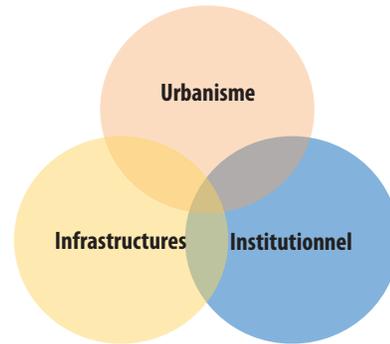
et des industries à moins d'adopter une stratégie de développement climatiquement adaptée.

La plupart de ces risques sont liés aux désastres naturels auxquels les villes côtières sont d'ores et déjà vulnérables, mais d'ici 2030 les impacts du changement climatique seraient à l'origine d'environ 20% des pertes potentielles. Toutes les données scientifiques pointent vers une augmentation significative des conséquences du changement climatique pour 2050 et au-delà. Par conséquent, il est tout à fait possible que le pourcentage relatif des pertes causées par le changement climatique soit beaucoup plus élevé pour les scénarios de 2050 ou 2070.

Agir pour la résilience et l'adaptation des villes au changement climatique

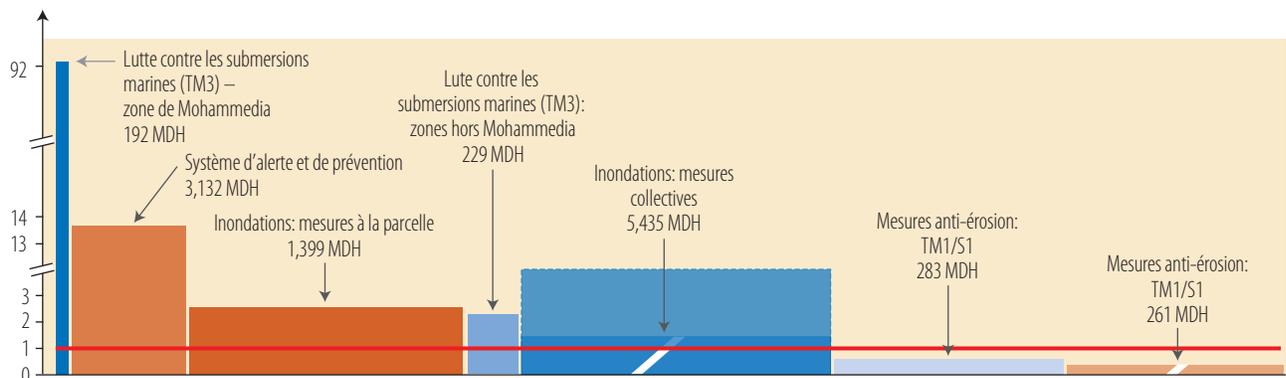
Pendant la première phase de l'étude, l'équipe s'est concentrée sur les prévisions climatiques, les analyses probabilistes du risque, les mesures des aléas et des vulnérabilités, nécessaires à l'élaboration des évaluations de risques urbains actuels et futurs. Lors de la deuxième phase, des Plans d'action d'adaptation et de résilience ont été formulés pour permettre aux trois villes et à la vallée du Bouregreg de mieux résister aux désastres naturels et de s'adapter au changement climatique.

Réduction des risques : Domaines d'action convergents



La réduction des risques nécessite d'actions dans trois domaines convergents qui doivent être gérés et mis en œuvre simultanément :

- **Les plans d'urbanisme** doivent tenir compte des risques liés à l'implantation de communautés ou d'entreprises dans des zones de faible élévation ou sujettes à risques, et proposer des solutions adaptées au climat pour les projets futurs d'aménagement urbain.
- **Les institutions** devront évoluer vers plus d'efficacité et une meilleure coordination afin de prévenir et réduire les dommages à l'aide de systèmes d'alerte rapide et de communications plus



Les courbes des coûts d'adaptation, comme celle de Casablanca, permettent aux villes d'évaluer les bénéfices des mesures proposées par les plans d'action. La colonne verticale présente le ratio bénéfices-coûts pour des investissements ponctuels, mesures institutionnelles et infrastructures. La ligne rouge montre le point d'équilibre, au-dessus duquel les bénéfices dépassent les coûts.

efficaces et avec des responsabilités clairement définies.

- **Les infrastructures urbaines**, telles que les ouvrages de protection du littoral et les réseaux de drainage, devront être améliorées et renforcées.

Les plans d'action formulés conjointement avec les autorités locales des trois pays ont posé les bases pour définir les actions et les investissements visant à réduire la vulnérabilité des villes aujourd'hui et dans le futur. Les analyses économiques peuvent aider les décideurs à évaluer le rapport coûts-bénéfices de certaines actions préventives en tenant compte des pertes potentielles qu'entraînerait l'inaction.

Outils pour réduire l'incertitude

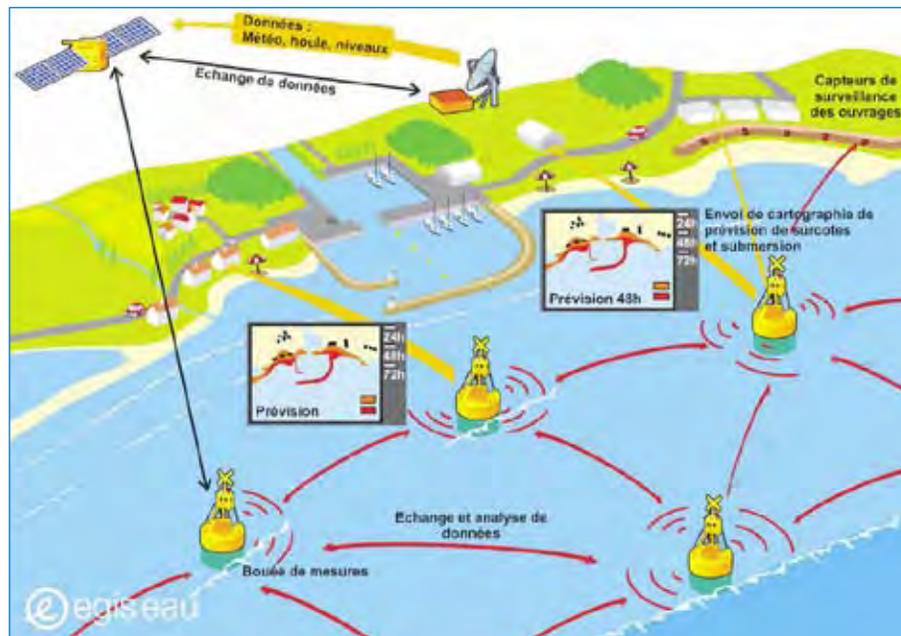
Sur ces bases, des « courbes de coûts d'adaptation » ont été élaborées, évaluant les mesures proposées en fonction de leur rapport coût-efficacité. La plupart de ces mesures sont efficaces d'un point de vue économique et devraient donner de très bons résultats en termes de réduction de risques. En particulier les mesures dites « douces », comme l'aménagement urbain et un meilleur niveau de préparation de la part des institutions, s'avèrent très rentables par rapport aux investissements. Le coût de certaines mesures proposées pour les infrastructures s'est avéré plus élevé que celui des dommages qu'elles auraient dû compenser. Cependant, elles peuvent pourtant se justifier, par exemple, en termes de la valeur du patrimoine situé dans les zones concernées.

L'étude permet de réduire les incertitudes auxquelles sont confrontés les décideurs en matière de risques futurs

urbains et climatiques, mais elle ne peut pas les supprimer complètement, puisque l'impact local du changement climatique dépendra considérablement de l'ampleur des mesures globales d'atténuation visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre pendant les deux prochaines décennies. Par conséquent, les réponses les plus efficaces sont les mesures dites « sans regret » qui sont raisonnables et qui conservent un bon rapport coût-efficacité dans différents scénarios climatiques futurs. Bien évidemment, les Plans d'action d'adaptation et résilience devront être mis à jour régulièrement pour tenir compte de nouvelles données et de l'évolution des scénarios.

Vers la mise en œuvre

L'étude terminée, il s'agit maintenant de créer un consensus politique et de mobiliser des ressources financières pour les initiatives et investissements stratégiques les plus urgents, afin que ces villes dont le rôle historique a été essentiel pour forger l'identité de la région puissent être mieux préparées à affronter les défis de l'avenir.



Les systèmes d'alerte précoce permettent aux villes côtières de réduire les pertes potentielles dues aux tempêtes, surcotes et tsunamis. Un système de « bouées intelligentes » comme celui qui est proposé pour Alexandrie permet une surveillance en temps réel et une plus grande préparation.



ORIENTER L'EXPANSION URBAINE LOIN DES ZONES A RISQUES

La ville historique d'Alexandrie a actuellement une population de 4,1 millions d'habitants, qui selon les prévisions atteindra 6,8 millions d'habitants en 2030 — une croissance exponentielle de 65%. Tout au long des siècles, la ville fondée par Alexandre le Grand en 331 av. J.-C. a connu un développement considérable avec des expansions urbaines ininterrompues sur son front de mer. Depuis le village côtier d'Abu Quir au nord-est jusqu'au village d'El-Deir au sud-est, l'agglomération d'Alexandrie consiste surtout de zones densément peuplées le long d'un contrefort côtier partiellement surélevé, derrière lequel se trouvent des lacs et des marais dans un milieu rural de faible élévation. La plupart de ces zones se trouvent au-dessous du niveau de la mer et sont aussi très vulnérables aux inondations, contrôlées par des stations de pompage qui déversent les eaux dans la mer Méditerranée.

Les risques urbains augmentent dans toutes les localités urbaines examinées

Risques	Alexandrie	
	Actuel	2030
Séismes/instabilité des sols	Moyen	Élevé
Tsunamis/submersion marine	Moyen	Élevé
Érosion côtière	Moyen	Élevé
Inondations	Moyen	Élevé
Pénurie d'eau	Moyen	Élevé

■ Élevé ■ Moyen ■ Faible

Tendances de la croissance urbaine

Il est prévu que l'expansion urbaine d'Alexandrie se poursuive vers l'Ouest, le long du lac El-Bouhayra, avec d'autres extensions vers le Sud. Les communautés plus pauvres pourraient se développer le long de certaines zones côtières dans la dépression d'Abu Quir et près du lac Maryut. Par ailleurs, des implantations futures pourraient également se produire dans des zones de faible élévation sujettes au phénomène de subsidence et exposées à des risques climatiques accrus. L'expansion au Sud d'Al Montaza et du quartier de Sharq augmentera probablement le nombre de personnes et la valeur des infrastructures exposées aux risques de séismes et d'inondations.

La reconstruction récente de la route de la Corniche qui a été élargie à dix voies le long de la côte a intensifié les phénomènes déjà existants d'érosion côtière et d'ondes de tempête en accentuant la pente du fond marin. En fonction de la montée future du niveau de la mer, ces phénomènes auront probablement plus d'impact sur les constructions du front de mer augmentant l'extension des zones à risques.

Risques principaux

L'habitat informel est l'un des facteurs qui expliquent l'exposition critique d'Alexandrie aux risques. Ces implantations abritent actuellement un tiers de la

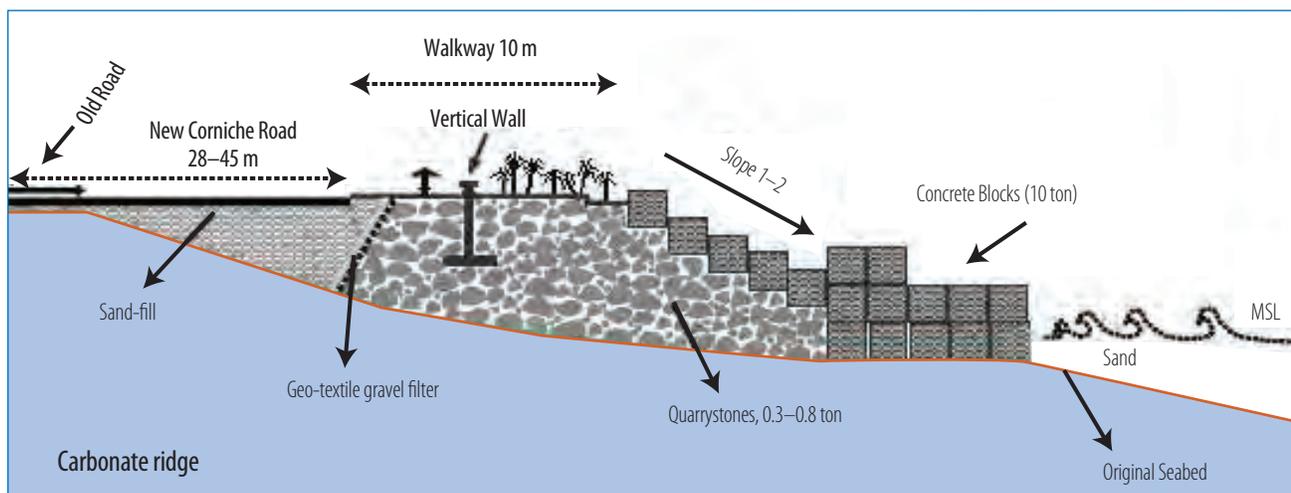
population de la ville et il est probable qu'elles augmenteront encore avec la croissance de la population urbaine. Une plus grande concentration est prévue dans les constructions dégradées des vieux quartiers de la ville, tandis que d'autres habitants pourraient s'installer dans les marais environnants ou autres zones de basses terres vulnérables. L'urbanisation accrue aura pour conséquence d'accroître l'imperméabilisation du terrain, aggravant ainsi les problèmes de ruissellement et de drainage.

Les images satellitaires fournies par l'Agence spatiale européenne montrent un tassement significatif dans 9% des points mesurés dans l'agglomération d'Alexandrie. Le phénomène qui s'observe particulièrement le long de la rive Nord du Lac Maryut et entre le quartier de Gharb et Abu Quir, rend ces zones plus vulnérables à l'instabilité des sols.

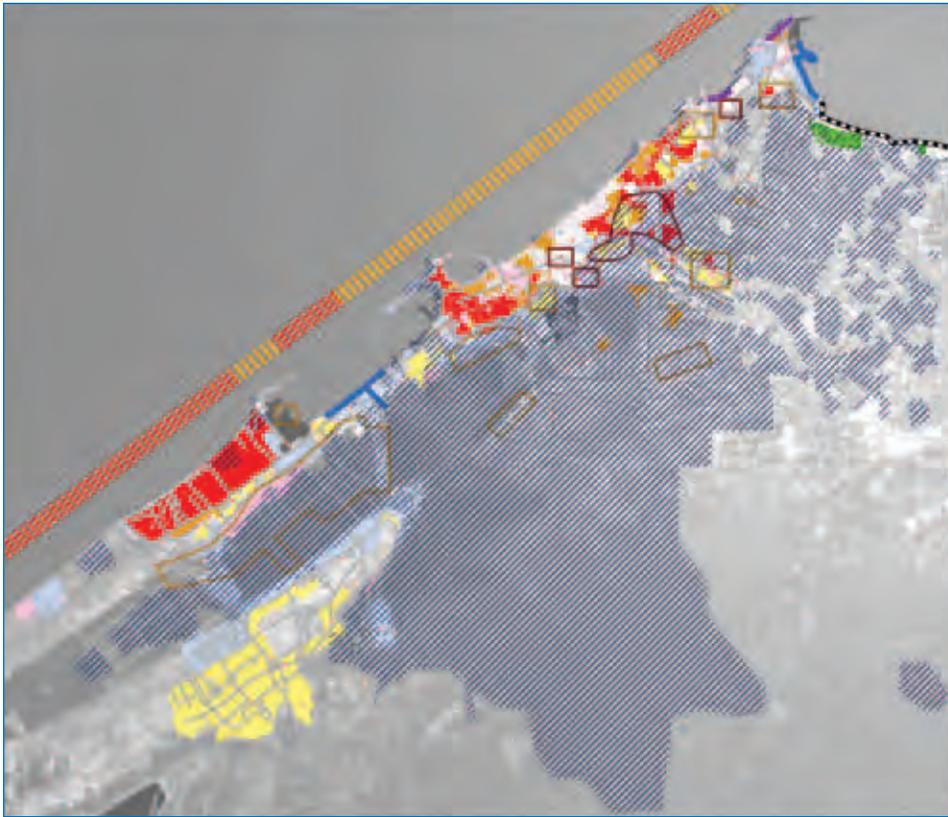
Selon les données météorologiques des trente dernières années, on constate une tendance à l'augmentation des vagues de chaleur et des pluies torrentielles. La catastrophe de décembre 2010 a clairement démontré que les ondes de tempête submergent non seulement les bandes côtières, mais qu'elles peuvent aussi atteindre les zones de faible élévation situées bien à l'intérieur.

Depuis les années 1990, divers organismes centraux de coordination sont en charge de la gestion des risques et d'alerte précoce en Egypte. Une structure allant jusqu'à la Primature a été mise en place pour permettre des interactions avec les ministères clés. Cette approche permet des responsabilités claires ainsi que la distribution des tâches entre les différents organismes responsables.

Le Centre d'information et d'appui aux décisions joue un rôle clé dans la coordination, alors qu'un service de Gestion des crises et de situations d'urgence créé en 2000 garantit une structure de commandement central en cas de catastrophes. Néanmoins, l'étude souligne que ce système privilégie les aspects de commandement et de contrôle en cas de catastrophes et accorde moins d'importance aux communications et aux capacités d'alerte précoce, ainsi qu'à la capacité de réaction décentralisée. Par exemple, l'épisode de crues éclair en 2010 dans le Sinaï a mis en évidence les défaillances des systèmes de prévisions et d'alerte précoce en Egypte, particulièrement vulnérables lorsqu'une série de phénomènes climatiques se succèdent dans un court laps de temps.



La corniche d'Alexandrie, récemment reconstruite en remblayant sur la mer, reste vulnérable aux surcotes et aux ondes de tempête à cause de la pente plus accentuée du fond marin, et ceci malgré la construction de défenses au large, parallèles à la côte. (Source: Frihy et al.)



Cette carte multirisque d'Alexandrie présente les vulnérabilités les plus critiques. La partie hachurée représente les zones basses, susceptibles aux inondations ; le rouge correspond aux zones résidentielles à haute densité ; le jaune à l'habitat informel et aux bidonvilles ; le bleu aux zones les plus à risque de submersion marine. La ligne diagonale parallèle à la côte présente différents degrés de risque d'érosion côtière.

Evaluation des risques urbains

Le rapport a établi les évaluations suivantes des risques urbains spécifiques pour la ville d'Alexandrie tels qu'ils ont été mesurés en 2010 et prévus pour 2030 :

- Inondations** : Vulnérabilités évidentes dans les zones d'urbanisation récente situées au-dessous du niveau de la mer, notamment la zone entre l'hydrodome et Abu Quir, à la limite de l'ancienne lagune d'Abu Quir et dans les quartiers de Sharq et Al-Montaza. En l'absence d'une planification attentive de l'utilisation des sols au-dessous du niveau de la mer, l'habitat informel va se développer et avec l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes, les inondations considérées comme un risque faible en 2010 deviendront un risque moyen en 2030.
- Séismes et instabilité des sols** : Le Nord de l'Egypte est exposé à un risque modéré de séismes et tremblements de terre. Cependant, le phénomène de subsidence associé à la propagation de l'habitat informel augmente les pertes potentielles dues aux dommages structurels. Par conséquent ce risque, considéré faible en 2010, devient un risque moyen en 2030.
- Tsunami et submersion marine** : Les constructions en bord de mer le long d'une côte lourdement urbanisée sont exposées aux dommages structurels, tandis que les zones de faible élévation s'exposent à la submersion marine. Les zones côtières proches d'Abu Quir sont directement menacées par la submersion marine. La digue de Mohammed Ali, datant du 19^{ème} siècle, inquiète particulièrement car elle pourrait céder lors d'un tremblement de terre majeur ou d'un tsunami et les zones sous le niveau de la

mer seraient menacées de submersion. Avec la progression des implantations en bord de mer et l'éventuel développement d'autres quartiers résidentiels dans les zones naturelles, le risque passe de moyen en 2010 à élevé en 2030.

- **Erosion côtière :** Au cours du temps, les plages d'Alexandrie sont en train de disparaître, ce qui entraîne un risque accru de dommages structurels aux constructions sur la côte. Il y a des risques significatifs d'érosion entre le port d'El Dekhiela et le port ouest d'Alexandrie, et à Abu Quir. En raison de la hausse du niveau de la mer liée au changement climatique, il est probable que l'érosion côtière et la disparition des plages vont s'accélérer. L'érosion devient ainsi un risque élevé en 2030, par rapport à 2010 où elle est cataloguée comme risque moyen.
- **Pénurie d'eau :** La forte progression de la population en Egypte et une demande indus-

Pour la ville d'Alexandrie, la valeur actuelle nette des dommages potentiels attribués aux désastres naturels et aux effets du changement climatique est estimée à 1,72 milliards de dollars pour la période 2010–2030, dont 18% attribuable à l'impact du changement climatique uniquement.

trielle toujours croissante des ressources en eau du Nil, entraîneront probablement une pénurie d'eau. Ces dix dernières années, on a observé une hausse de 50% de la demande. Sachant que quasiment la moitié de l'activité industrielle d'Egypte est située à Alexandrie, la demande urbaine de ressources en eau déjà limitées ne peut qu'augmenter. En même temps, les aquifères locaux s'épuisent et se salinisent. L'absence d'accords sur la répartition des ressources du Nil avec les pays en amont pourrait exacerber la pé-

Le parc d'habitations d'Alexandrie consiste surtout de structures anciennes et de mauvaise qualité, vulnérables aux désastres naturels, représentées par le rouge et le violet dans cette carte. Les hauts niveaux de densité d'occupation de ces zones multiplient leurs vulnérabilité. (Source: GOPP)



nurie. Ainsi, en 2030, l'approvisionnement actuel de la ville par le Nil pourrait être insuffisant et le risque de pénurie d'eau serait élevé par rapport au risque actuel considéré comme faible.

Mesures d'adaptation et de résilience

Les décideurs disposent de multiples façons d'agir pour protéger le bien-être des populations urbaines et pour réduire les dommages potentiels à l'économie que pourraient être provoqués par les désastres naturels et le changement climatique. D'une manière générale, l'étude encourage les décideurs égyptiens à modifier leur approche pour se concentrer sur les actions préventives qui réduiraient les dommages potentiels des désastres naturels, ainsi qu'à se préparer aux effets graduels du changement climatique, au lieu de réagir aux désastres naturels et phénomènes climatiques une fois qu'ils ont frappé. De même, l'étude propose des outils pour évaluer le coût de différents types d'action et compare les coûts aux dommages qui se produiraient si aucune mesure d'adaptation n'est prise.

Planification urbaine

Il paraît essentiel de disposer de politiques adéquates d'aménagement urbain et d'utilisation des sols pour réduire l'exposition de la ville d'Alexandrie aux risques, dommages et pertes potentiels. Le schéma directeur du Grand Alexandrie à l'horizon 2030, en cours de préparation, est une excellente opportunité pour intégrer les conclusions de l'étude d'évaluation des risques urbains et pour réorienter l'expansion urbaine loin des zones vulnérables aux risques les plus élevés. Le schéma directeur devrait également orienter l'expansion urbaine future, fixer les limites de la ville et élaborer un programme d'occupation du sol avec un ensemble de règles

définissant la densité, la hauteur des immeubles et la proportion d'espaces verts, en fonction des scénarios climatiques futurs.

Préparation institutionnelle

L'amélioration des systèmes d'alerte précoce pour tous types de désastre apparaît comme un investissement particulièrement judicieux. De même qu'il est fondamental d'améliorer la gestion des zones côtières. Par exemple, un système de « bouées intelligentes » le long de la côte pourrait générer des informations en temps réel pour protéger les personnes et les installations des tempêtes côtières. Par ailleurs, une meilleure communication entre les organismes impliqués dans la prévention et les réactions aux désastres pourraient renforcer la coordination et aboutir à des réactions plus opportunes et efficaces.

Investissements en infrastructures

Les défenses côtières pourraient bénéficier d'investissements pour rendre les ouvrages existants plus résistants. Certaines infrastructures urbaines et bâtiments stratégiques, ainsi que les systèmes d'approvisionnement d'eau et de drainage, pourraient être renforcés et rendus plus résistants aux dommages éventuels provoqués par des tempêtes similaires à celle qui a frappé Alexandrie en 2010. La ville d'Alexandrie, ainsi que d'autres villes, peut réduire les risques associés aux inondations en adoptant des mesures pour un meilleur contrôle des eaux de ruissellement et d'écoulement et en veillant à une maintenance régulière du réseau d'assainissement. De plus, les choix de localisation des zones désignées pour le développement sont déterminants pour minimiser leur vulnérabilité. Enfin, investir dans un équipement spécifique comme les pompes hydrauliques mobiles peut s'avérer utile pour amoindrir les problèmes de drainage en cas d'inondations.



FAIRE FACE AUX INONDATIONS, A L'EROSION COTIERE ET A LA SUBMERSION MARINE

La ville de Casablanca a une population de 3,3 millions d'habitants, auxquels s'ajoutent 300 000 habitants des zones rurales environnantes. Dans la période de 1994–2004, sa population a augmenté de plus d'un demi-million d'habitants. Selon les projections basées sur des données historiques, le Grand Casablanca abritera une population de 5,1 millions d'habitants à l'horizon 2030, une hausse de 55%.

Tendances de la croissance urbaine

La croissance économique et démographique propulsera le nombre de ménages qui selon les prévisions se traduira par une expansion urbaine annuelle de près de 1 000 hectares. On prévoit également un développement urbain significatif le long du front de mer de Casablanca et dans les zones de faible élévation qui sont vulnérables aux ondes de tempête et aux inondations.

Risques principaux

Casablanca est particulièrement vulnérable aux inondations, à l'érosion côtière et à la submersion marine et est soumise actuellement à des fortes pressions liées à l'accélération de la croissance urbaine. D'autre part, la ville abrite beaucoup de structures précaires : certaines sont anciennes et mal entretenues tandis

que d'autres sont de construction récente de mauvaise qualité. Les bidonvilles et des quartiers densément peuplés sont situés dans les secteurs à faible élévation et empiètent sur des zones protégées par la loi pour l'épanchement des eaux.

Ces dernières années, le climat du Maroc a évolué vers une hausse des températures et une baisse du cumul annuel des précipitations. Les projections pour 2030 décrivent un réchauffement de 1,3°C pour la ville de Casablanca et des baisses de 6% à 20% des cumuls pluviométriques annuels. Cependant, il est également envisagé que les températures plus chaudes et les pluies faibles seront accompagnées d'épisodes plus

Les risques urbains augmentent dans toutes les localités urbaines examinées

Risques	Casablanca	
	Actuel	2030
Séismes/instabilité des sols	Très faible	Très faible
Tsunamis/submersion marine	Moyen	Moyen
Érosion côtière	Élevé	Élevé
Inondations	Élevé	Élevé
Pénurie d'eau	Moyen	Moyen

■ Élevé ■ Moyen ■ Faible ■ Très faible

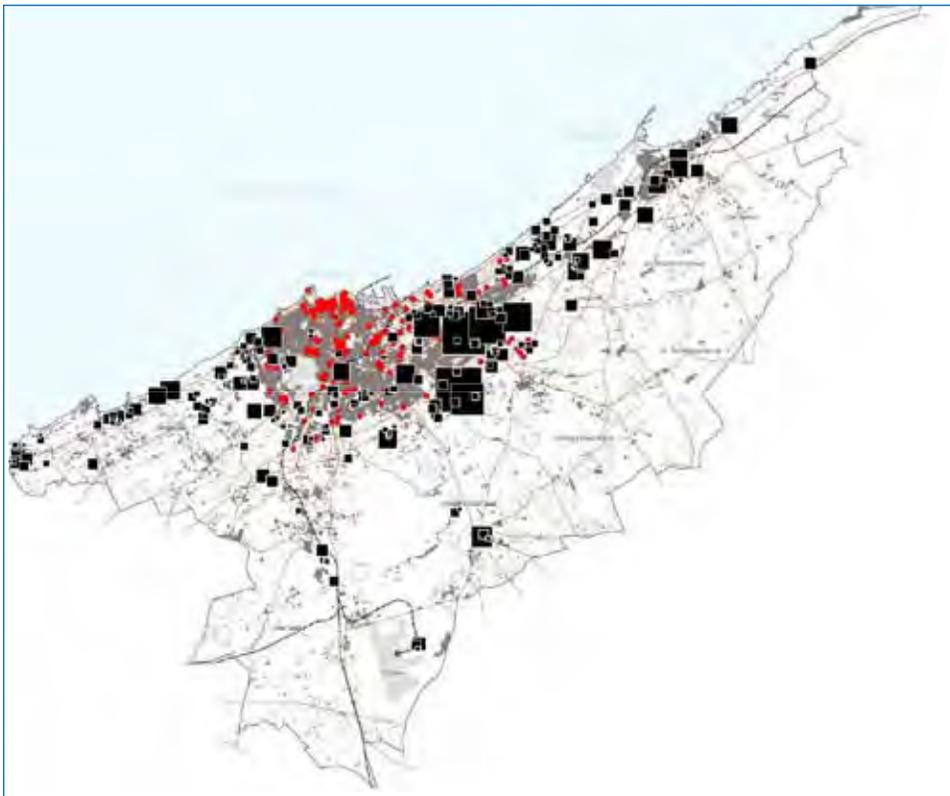
fréquents et intenses de précipitations extrêmes, apportant une surcharge supplémentaire qui accentuera la pression déjà subie par les systèmes de drainage urbains. La ville de Mohammedia, qui a subi des inondations dévastatrices en 2002, mérite une attention particulière. L'analyse des vulnérabilités et des structures fragiles a souligné la nécessité d'améliorer les systèmes de drainage et de renforcer les systèmes de protection contre les ondes de tempête.

L'efficacité de la Gestion des risques des catastrophes du Maroc s'est améliorée considérablement depuis 2009. La restructuration de la Direction Générale de la Protection Civile et le nouveau Comité de Veille et de Coordination ont été favorablement accueillis par différentes parties prenantes. Une meilleure préparation aux catastrophes et une plus grande précision dans les alertes fournies par le Département de Météorologie ont permis au Maroc de réagir de manière beaucoup plus efficace aux pluies torrentielles et aux inondations survenues de décembre 2009 à mars 2010.

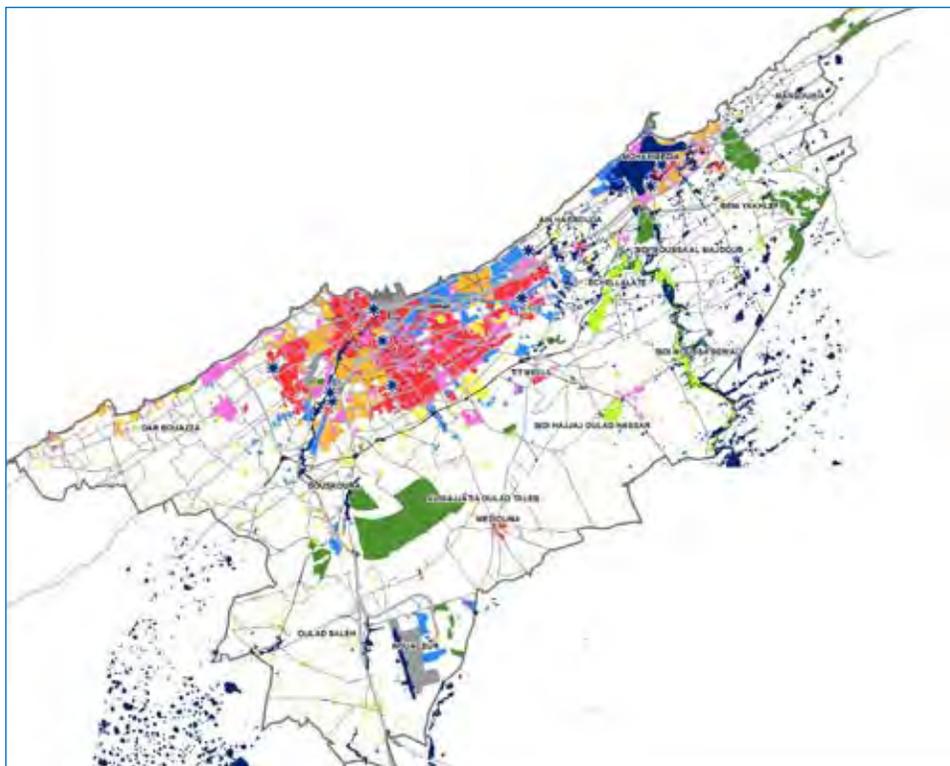
Evaluation des risques urbains

Les conclusions principales de l'étude concernant les évaluations de risques pour la ville de Casablanca en 2010 et les prévisions pour 2030 sont les suivantes :

- **Inondations :** La ville de Casablanca a subi régulièrement des perturbations dues aux inondations, en rapport avec son niveau de protection qui est limité à une période de retour de cinq ans. Ceci en raison des systèmes de drainage insuffisants dans toute la ville et de l'urbanisation informelle dans les bassins versants. L'étude a permis d'identifier les zones spécifiques du Grand Casablanca particulièrement vulnérables aux inondations périodiques : les bidonvilles et les structures bâties avec des matériaux de mauvaise qualité sont source d'inquiétude. Les inondations sont considérées comme un risque élevé en 2010 et dans le scénario 2030.



L'habitat insalubre, indiqué en rouge, représente 28% du parc d'habitations, dont 11% consiste de bidonvilles. Ceux-ci se trouvent dans l'ensemble de l'air métropolitain, mais sont concentrés dans la banlieue nord-est. Les carrés noirs (pas à l'échelle) représentent la taille des bidonvilles.



Les zones inondables, indiquées en bleu, sont parsemées parmi les parties résidentielles, industrielles et mixtes du Grand Casablanca. Les zones plus exposées sont la ville de Mohammedia et le cours de l'Oued Bouskoura qui traverse la ville jusqu'au port. Des ouvrages déjà planifiés devraient réduire leur vulnérabilité aux inondations.

- **Tsunami et submersion marine :** Les risques de tsunamis et de submersion marine ont été estimés à un niveau moyen en 2010. Après analyse des événements historiques relativement récents concernant les tsunamis, le risque est maintenu au niveau moyen pour 2030. Certaines parties du littoral sont exposées à des risques importants de submersion marine, en particulier Mohammedia, où les ondes de tempête peuvent faire pénétrer l'eau de mer à l'intérieur de la ville avec des graves conséquences pour les secteurs productifs et administratifs. Il y a des fortes chances pour que les tempêtes, aggravées par l'élévation du niveau de la mer, causent des dommages au front de mer, ce qui propagerait le risque de submersion marine à d'autres zones. Les zones basses près des débouchés des oueds principaux, Mehla et Nfifich, sont exposées à des risques particuliers.
- **Erosion côtière :** Une bande côtière de dix kilomètres allant de l'extrémité orientale de

Casablanca jusqu'à la centrale électrique de Mohammedia fait face actuellement à un risque important d'érosion ; à ceci s'ajoutent d'autres segments de côte de trente à quarante kilomètres considérés également comme à fort risque. L'élévation prévue du niveau de la mer augmente la vulnérabilité pour les années à venir. Le risque d'érosion côtière se verra inten-

Pour la période 2010–2030 on estime la valeur actuelle nette de pertes économiques potentielles attribuables aux désastres naturels et à l'impact du changement climatique pour Casablanca à un montant de 1,39 milliards de dollars, dont la plupart seraient associés aux inondations. Ces pertes représentent 7% du PIB actuel du Grand Casablanca. Les pertes économiques potentielles dues aux effets du changement climatique sont estimées à 18% du total.



Tout le long de la zone côtière de Casablanca les zones basses, comme la ville de Mohammedia, sont sujettes à des risques élevés de submersion marine. Les zones en bleu représentent les risques actuels, et les zones rouges les vulnérabilités supplémentaires à l'horizon 2030.

sifié avec le retrait prévu des plages qui pourrait atteindre 15 mètres d'ici 2030. L'érosion est cataloguée comme risque élevé en 2010 et dans le scénario 2030.

- **Pénurie d'eau :** Un risque faible en 2010, la pénurie d'eau pourrait devenir un risque moyen d'ici 2030 basé sur les estimations actuelles de croissance démographique et industrielle. Ceci est lié à la baisse globale du niveau de précipitations prévu pour le Maroc et à la diminution de ressources en eau qui en résulterait, accompagnée d'une plus forte pression sur la répartition entre usages urbain et rural.

Mesures d'adaptation et de résilience

L'étude recommande une approche intégrée des politiques d'urbanisation et d'utilisation des sols en vue d'harmoniser croissance démographique et activité économique de Casablanca avec des considérations environnementales. C'est l'approche qui a d'ores et

déjà été adoptée par le Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme 2030, récemment approuvé, et qui devra être appliquée plus en détail dans l'élaboration en cours des plans de zonage.

Planification urbaine

Les autorités locales doivent tenir compte des risques associés au climat et aux catastrophes naturelles lorsqu'elles examinent les différentes possibilités d'utilisation des terrains à bâtir ou bien pour identifier les zones à urbaniser. Il faudrait écarter les zones exposées aux risques d'inondation pour éviter d'empirer la situation actuelle des problèmes de drainage.

L'étude suggère également la création d'écoquartiers afin de démontrer qu'une approche écologiquement viable, avec des constructions conçues pour favoriser la résilience au changement climatique, pourrait servir de modèle pour le développement futur de Casablanca et au-delà. En même temps, les zones qui subissent des inondations répétées feraient l'objet d'une planifi-

cation rigoureuse visant à protéger les structures et les bâtiments stratégiques. Le réaménagement des bidonvilles est prévu dans le cadre du programme national de réhabilitation de l'habitat insalubre, de même que la rénovation d'autres zones surpeuplées.

Préparation institutionnelle

Les institutions marocaines sont en mesure d'entreprendre des actions spécifiques pour améliorer leur réactivité aux désastres naturels. Les facteurs de risque ont déjà été intégrés dans le cadre organisationnel et réglementaire, mais le Maroc gagnerait à prendre des mesures supplémentaires pour éviter les recouvrements ministériels, simplifier les opérations et séparer les fonctions de protection civile de l'Etat de celles des autorités locales.

Par ailleurs, Casablanca a besoin de renouveler ses systèmes d'information, notamment à l'aide de méthodes plus efficaces pour alerter la population et les entreprises en cas de changement abrupt de conditions météorologiques et de plans pour protéger les biens et les personnes. L'étude recommande vivement d'améliorer les systèmes de surveillance et d'alerte précoce en développant l'utilisation d'images satellitaires et par le suivi régulier du phénomène de subsidence et de l'évolution des températures et du niveau de la mer.

Investissements en infrastructures

Selon les conclusions de l'étude, il y a urgence à agir pour remédier aux vulnérabilités constatées le

long de la côte, en particulier dans la bande d'environ 40 Km qui est déjà exposée à l'érosion et aux ondes de tempête. Il conviendrait de renforcer les barrières naturelles et de veiller à la suppression contrôlée d'une partie de l'habitat illégal dans la zone côtière à risque entre Mohammedia et Casablanca où les dunes protectrices sont particulièrement fragiles.

En outre, la ville devrait améliorer son système d'assainissement de manière à le rendre viable pendant les périodes critiques d'inondation et renforcer parallèlement l'infrastructure pour le ruissellement et le drainage. La ville dispose déjà de plans chiffrés pour la construction d'un nouveau canal de drainage appelé le Super Collecteur Ouest. Il s'agit d'un projet crucial pour la prévention d'inondations qui augmenterait le niveau de protection de Casablanca à une période de retour de 20 ans. Cette infrastructure recevrait les eaux de divers bassins qui ont tendance à déborder en cas de fortes précipitations, ainsi que les eaux de la partie ouest de la ville.

De nouvelles digues sont nécessaires pour garantir la protection à long terme des biens et des personnes contre la mer. Casablanca devrait également développer davantage les programmes déjà en cours visant à réduire les pertes sur les réseaux hydrauliques et à promouvoir la conservation des eaux de façon à créer un système intégré de réservoirs qui permettrait notamment d'utiliser les eaux de pluie pour l'arrosage des espaces verts.



FAIRE FACE AUX RISQUES MULTIPLES ET A L'INTENSIFICATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les résidents de Tunis s'attendent à des étés chauds et secs suivis d'hivers doux et pluvieux. Mais ils doivent également anticiper des phénomènes extrêmes. Après les dommages occasionnés par une série de tempêtes sur une période de trente ans, Tunis a subi une tempête dévastatrice en 2003 qui a causé des inondations majeures à travers la ville et des centaines de millions de dollars en pertes. La même année, la cité a connu l'une des plus intenses vagues de chaleur jamais enregistrée. Tunis a élaboré des plans de réaction aux catastrophes et a entrepris l'amélioration de ses infrastructures. Cependant, avec le changement climatique, on s'attend à une fréquence plus accrue des épisodes extrêmes sem-

blables à ceux de 2003 d'où la nécessité de réévaluer le niveau de préparation de la ville.

Tendances de la croissance urbaine

La croissance démographique de Tunis est moins prononcée que dans d'autres villes de la région, mais constitue néanmoins un facteur majeur dans l'évaluation des risques. Il est prévu que d'ici 2030 la population urbaine actuelle de 2,25 millions d'habitants augmentera de 33% pour atteindre 3 millions. Par ailleurs, la tectonique des sols et les terrains où se trouve la ville elle-même posent des défis majeurs. Dans le centre ville de Tunis, la subsidence des sols est à l'origine de l'inclinaison dangereuse de certains immeubles et les risques sismiques sont considérables. Le front de mer est gravement menacé par l'érosion et nécessite des défenses renforcées des plages. Le littoral lui-même est en constante évolution malgré les travaux d'aménagement de nouvelles protections et de remblayage des plages réalisés régulièrement.

Risques principaux

Les données topographiques montrent que les zones urbanisées et industrielles de la Basse Ville, Ezzahra et Hammam Lif Ouest, sont vulnérables à

Les risques urbains augmentent dans toutes les localités urbaines examinées

Risques	Tunis	
	Actuel	2030
Séismes/instabilité des sols	Moyen	Élevé
Tsunamis/submersion marine	Moyen	Élevé
Érosion côtière	Élevé	Très élevé
Inondations	Élevé	Très élevé
Pénurie d'eau	Moyen	Moyen

■ Très élevé ■ Élevé ■ Moyen ■ Faible

la submersion marine en certaines conditions de tempête. Selon les scénarios généralement admis du changement climatique, les précipitations extrêmes pourraient augmenter de 25% à l'horizon 2030. Tunis pourrait donc faire face à des événements climatiques avec une période de retour de 50 ans alors qu'ils se produisaient précédemment qu'une fois tous les cent ans. De même, la période de récurrence de pluies torrentielles qui était de 50 ans serait réduite à 20 ans dans l'avenir proche. Une réduction similaire de la période de retour serait à prévoir pour des épisodes climatiques moins violents.

Le renforcement institutionnel pourrait se traduire par une meilleure gestion de risques. L'Office National de la Protection Civil dirige divers organismes de prévention et de gestion des catastrophes, mais la structure de cette branche du gouvernement n'a guère changé depuis des décennies. Les catastrophes naturelles survenues dans le passé n'ont pas fait l'objet d'évaluations et n'ont pas été suivies d'améliorations du cadre réglementaire ou opérationnel. L'information cartographique et les bases de données géographiques sont largement inexistantes et il n'y a pas de dispositions concernant les différents types de risque.

Evaluation des risques urbains

Les conclusions principales de l'étude concernant les évaluations de risques pour la ville de Tunis en 2010 et les prévisions pour 2030 sont les suivantes :

- **Inondations** : Un problème récent mais néanmoins majeur, les inondations vont vraisemblablement s'intensifier malgré la réalisation des travaux en cours pour améliorer le système de drainage. Ceci en raison de l'augmentation fort probable de précipitations extrêmes (estimée à 25%) capables de causer des inondations de plus d'un mètre de hauteur dans certains secteurs de la ville. Certains bassins versants seront exposés à de forts risques d'inondation aggravés par des systèmes de drainage inefficaces et un taux élevé d'urbanisation. Le risque déjà **élevé en 2010 deviendrait très élevé en 2030**. En même



La subsidence des terrains, en rouge, accompagne les risques d'inondation dans la basse ville de Tunis, économiquement important, multipliant les impacts potentiels. Les orages plus puissants dépassant la capacité du système de drainage du centre-ville, rues et bâtiments en sont inondés.

temps, à moins d'adopter une approche de planification adaptée au climat, le développement de la ville et de nouvelles constructions sur les collines et sur des zones à risques d'inondation entraîneraient une augmentation du volume de ruissellement et des dommages associés.

- **Erosion côtière** : L'érosion, un risque élevé le long du littoral de Tunis en 2010, est considérée comme risque très élevé à l'horizon 2030. Le recul du littoral dans le golfe de Tunis est un phénomène constant depuis un demi-siècle, en dépit de travaux de protection de la côte qui at-

ténuent cette évolution. Dans certains secteurs, la ligne de côte peut reculer jusqu'à 10 mètres par an. D'ici 2030, 27 Km du littoral urbanisé seront considérés à haut risque d'érosion, par rapport à 16 Km en 2010. L'élévation du niveau de la mer à cause du changement climatique ferait progresser l'érosion côtière, entraînant un recul des plages pouvant atteindre 15 mètres d'ici 2030. Finalement, il faut envisager une érosion majeure du littoral entre Kalaat Landalous et la plage de Raoued à l'horizon 2030.

- **Tsunami et submersion marine :** L'étude s'est basée sur l'hypothèse d'une élévation de 20 cm du niveau de la mer d'ici 2030 qui pourrait endommager davantage les barrières protégeant le littoral et augmenter le risque de submersion marine pour la ville. Il est estimé qu'une bande plus importante du littoral sera exposée à un risque élevé de submersion **à l'horizon 2030**. Cumulés, ces risques passent de moyens en 2010 à élevés en 2030.

La valeur actuelle nette du cumul des pertes économiques potentielles, englobant tous les risques, est estimée à 1,05 milliards de dollars, soit 8% de la production économique de la capitale de la Tunisie. Environ 59% des pertes potentielles sont liées aux risques de submersion, tandis que 26% sont dues aux risques sismiques et 14% aux tempêtes. On estime à 25% les pertes potentielles d'ici 2030 qui seront attribuables au changement climatique, dont la plupart seraient associées aux inondations.

- **Séismes et instabilité des sols :** Tunis doit faire face à un risque modéré de tremblement de terre. Toutefois, en raison de la mauvaise qualité géotechnique des sols de la ville, les risques de dommages pourraient augmenter considérablement. Le phénomène de subsidence dans le centre ville pose des défis spécifiques pour les quartiers construits sur les terres gagnées sur le lac de Tunis pendant la colonisation française,



A l'horizon 2030, tenant compte du changement climatique et de l'augmentation du niveau de la mer, des portions importantes de la zone côtière du Grand Tunis, indiquées en bleu, pourraient être submergées pendant des tempêtes exceptionnelles de retour centennal.

dont la richesse architecturale fait partie du patrimoine culturel de la ville. Selon l'étude, ces risques vont évoluer d'un niveau moyen actuel à un niveau élevé en 2030.

- **Pénurie d'eau :** Le besoin en eau de Tunis continuera d'augmenter en raison de la progression de la population et de son niveau de vie d'ici 2030. En même temps, on prévoit une baisse significative du niveau moyen de précipitations sur l'ensemble du pays. Malgré une excellente gestion de ressources en eau au niveau national, la demande urbaine exercera une plus forte pression sur les ressources en eau. Par conséquent, le risque de pénurie d'eau considéré comme faible en 2010 devient un risque moyen en 2030.

Mesures d'adaptation et de résilience

D'une façon générale, il est indispensable d'adopter une approche visant à la résilience au changement climatique en matière de planification urbaine afin de gérer les risques causés par les catastrophes naturelles et le changement climatique. Il faudra améliorer les systèmes de drainage dans les zones basses de la ville exposées aux inondations avant de permettre de nouveaux développements. D'autre part, il faut contenir la progression de l'habitat illégal dans la périphérie urbaine conformément aux recommandations du schéma directeur. Un zonage judicieux, avec des zones

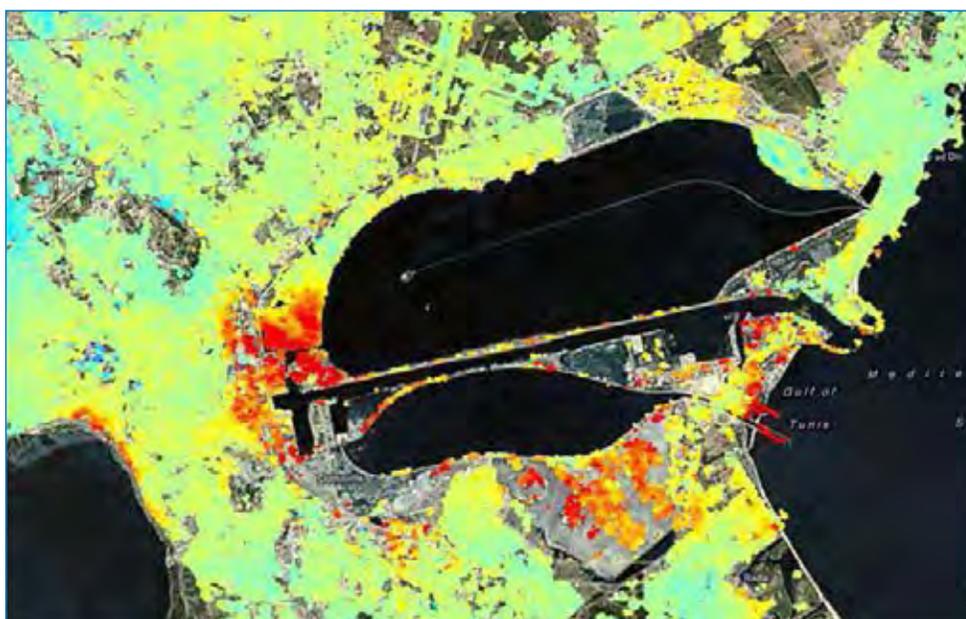
réservées aux espaces verts, ainsi que le respect strict des réglementations s'avèrent essentiels.

Planification urbaine

Les décisions de zonage tiendraient aussi compte des phénomènes de subsidence qui réduisent la capacité de Tunis à résister aux tempêtes, aux risques sismiques et aux extrêmes climatiques. Les extensions urbaines futures devraient être conçues de manière à minimiser la charge supplémentaire de ruissellement et pourraient prévoir, par exemple, des toitures vertes et des réservoirs pour absorber les eaux de pluie, ou bien d'autres dispositifs écologiques.

Préparation institutionnelle

En raison des dommages potentiels dus aux tremblements de terre, aux ondes de tempête et aux tsunamis, l'étude recommande la mise en place d'un système de surveillance et d'alerte précoce, accompagné de plans de communication pour alerter les populations et les entreprises. Pour les zones les plus exposées, des sirènes ou d'autres systèmes d'alerte seraient nécessaires. En même temps, la ville devrait évaluer avec précision la vulnérabilité des bâtiments



La basse ville de Tunis, des zones industrielles anciennes et actuelles sur les bords du Lac sud, ainsi que le port de Radès ont connu une importante subsidence des terrains, telle que mesurée par les observations satellitaires, ce qui augmente leur niveau de risque. (Source: ESA)

existants aux différents risques, de façon à adopter des mesures adéquates pour renforcer leur résilience. Une stratégie de requalification urbaine sera probablement nécessaire dans certaines zones.

La ville de Tunis a aussi besoin d'un système de surveillance pour évaluer le recul des plages et les risques qui peuvent affecter les barrières de protection du littoral. Des techniques modernes de surveillance aérienne peuvent être d'une aide précieuse. La ville aura besoin d'un plan spécifique pour pallier l'érosion constatée à proximité de Radès et dans d'autres secteurs. L'étude propose une série de recommandations spécifiques pour d'autres zones du littoral qui se sont dégradées au cours des tempêtes et des modifications du linéaire côtier. Dans l'ensemble, il serait souhaitable de disposer d'un meilleur cadre juridique pour la gestion de zones côtières de Tunis.

Investissements en infrastructures

Le renforcement des infrastructures sera vital dans certaines zones. Il faudra optimiser les systèmes d'assainissement et de drainage de Tunis dans le cadre d'un schéma directeur global. La ville a besoin de matériel plus performant pour gérer le niveau des eaux du lac et du port et, dans certaines zones, il faudra construire des digues. Des investissements seront nécessaires pour renforcer les systèmes d'assainissement et de drainage afin de garantir leur capacité à gérer des épisodes climatiques extrêmes de plus en plus fréquents. Enfin, la pression supplémentaire exercée sur les ressources en eau rend indispensable la mise en place d'un système pour optimiser les usages de l'eau et pour mieux gérer sa consommation, notamment par le biais d'une révision des politiques tarifaires.

ATTENUER LES RISQUES DANS LA PHASE DE PLANIFICATION

La planification durable sur le plan climatique revêt une importance particulière dans le cas de la vallée du Bouregreg. En effet, il est possible d'atténuer beaucoup les risques avant la construction d'infrastructures et de bâtiments sur le site. Etant donné qu'il s'agit d'un projet d'aménagement haut de gamme dans un site pratiquement vierge, on peut espérer qu'un haut niveau de protection sera intégré aux plans dès le départ. L'aménagement envisagé concernerait environ 140 000 habitants et 90 000 nouveaux emplois, tous situés dans une zone vulnérable aux désastres naturels et aux risques climatiques. Le projet se situe à l'embouchure du fleuve Bouregreg avec un important barrage en amont, la mer en face, et des versants abrupts de chaque côté.

Des implantations sont prévues sur l'embouchure du Bouregreg ainsi que d'autres secteurs constructibles dans des zones actuellement vulnérables aux inondations et aux glissements de terrain. Le projet pourrait donc finir par augmenter la quantité de biens et de personnes exposés aux risques. Cependant, la possibilité d'adopter des politiques d'occupation des sols et de conception du bâti tenant compte du changement climatique permettrait d'atténuer ces risques pendant le processus de planification.

Evaluation des risques urbains

Les conclusions principales de l'étude concernant les évaluations des risques pour la vallée du Bouregreg, avant la réalisation du projet d'aménagement, et les prévisions pour le scénario 2030 sont les suivantes :

- **Inondations** : Depuis des temps immémoriaux, la vallée du Bouregreg a été exposée aux inondations, ce qui explique qu'elle soit restée encore pratiquement inexploitée. La construction du barrage Sidi Moulay Ben Abdellah a permis de réguler et de maîtriser l'écoulement de l'eau, y compris lorsque le barrage atteint sa capacité maximale et qu'il faut déverser d'importants volumes d'eau en aval. Actuellement, cela n'affecte pas trop la population ni les infrastructures, mais pourrait devenir un problème majeur d'une part par l'augmentation attendue de la fréquence et

Les risques urbains augmentent dans toutes les localités urbaines examinées

Risques	Vallée du Bouregreg	
	Actuel	2030
Séismes/instabilité des sols	Moyen	Moyen
Tsunamis/submersion marine	Moyen	Élevé
Érosion côtière	Moyen	Moyen
Inondations	Moyen	Très élevé
Pénurie d'eau	Moyen	Moyen

■ Très élevé ■ Élevé ■ Moyen ■ Faible



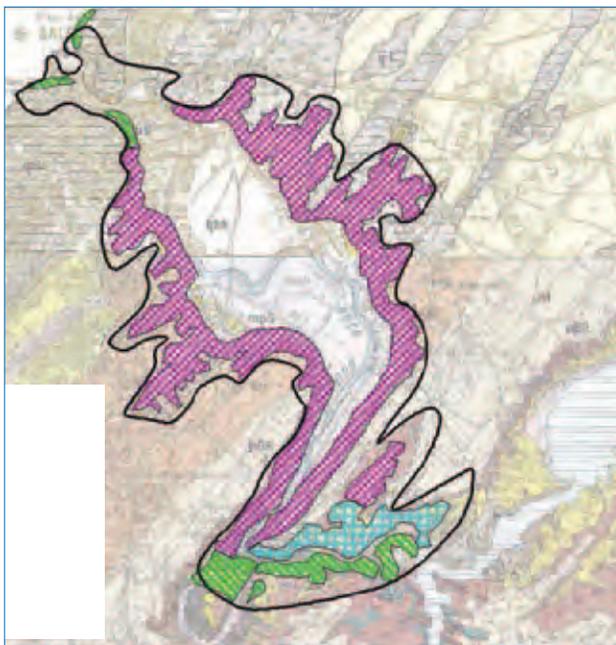
Le projet de la vallée du Bouregreg, tel qu'illustré dans cette carte, est parmi les plus importants développements en cours en Afrique du nord, qui localisera 140.000 habitants et 90.000 nouveaux emplois dans un site exposé à des risques naturels importants.

l'intensité de phénomènes climatiques extrêmes, et de l'autre par les projets d'occupation des sols et de construction dans la vallée. Le risque passerait de faible actuellement à très élevé pour le scénario 2030.

- **Tsunami et submersion marine :** La côte marocaine a connu des tsunamis dans des périodes relativement récentes. Cependant, le risque est actuellement considéré comme

moyen en raison de la faible densité de biens et de personnes dans la vallée. Le constat est le même en ce qui concerne la submersion marine et les ondes de tempête. Ses risques deviennent élevés en 2030 à cause de la réalisation du projet d'aménagement.

- **Erosion côtière :** Actuellement un risque moyen, le risque d'érosion côtière baisserait à faible en 2030 grâce aux mesures déjà incor-



La vallée est entourée par des falaises importantes, sujettes à des glissements de terrains et de blocs. Ceux-ci menaceraient les constructions prévues dans le cadre du projet. Les risques pourraient augmenter avec le changement climatique et les pluies torrentielles plus fréquentes.

porées au plan d'aménagement, notamment la construction de structures de défense maritime et contre l'érosion côtière.

- Séismes et instabilité des sols :** Deux facteurs sont significatifs dans la vallée du Bouregreg : d'une part, la mauvaise qualité géologique des sols avec des risques de liquéfaction qui aggravent le risque sismique relativement faible, et de l'autre, le risque de glissements de terrains sur les versants escarpés de la vallée. **Étant donné la densité** limitée de la population et des installations dans la vallée, ces risques sont évalués en 2010 à un niveau faible, mais sont catalogués comme risques moyens dans le scénario 2030.
- Pénurie d'eau :** Les ressources en eau sont soumises à une pression faible aujourd'hui, mais la pénurie d'eau est considérée comme risque moyen en 2030 basé sur les estimations de croissance démographique et industrielle future. Le développement de la vallée du Bouregreg en soi pourrait exercer une pression



D'ici 2030, les risques de submersion marine liés à une tempête exceptionnelle de retour centennal s'étendraient au delà des zones actuellement vulnérables, indiquées en bleu, pour inclure des zones supplémentaires, indiquées en rouge.

considérable sur les ressources en eau limitées de la côte marocaine.

Mesures d'adaptation et de résilience

À l'aide de données recueillies sur les zones basses, les responsables de l'aménagement peuvent veiller à ne pas situer biens et personnes dans les lots inondables en cas de pluies torrentielles ou d'événements extrêmes. Pour d'autres zones, on pourrait envisager des structures résistantes aux pressions prévues. Il est également possible de situer, d'adapter et de renforcer les constructions de manière à réduire les dommages liés aux désastres naturels et aux conditions climatiques extrêmes.

Planification climatiquement adaptée

Ces évaluations reflètent le caractère dynamique des différents risques. Par exemple, en aval du pont Moulay Hassan, il y a des risques considérables d'inondations dues aux phénomènes climatiques traditionnellement de fréquence centennale. Or, bien qu'il n'y ait pas d'ajustements spécifiques, la plupart de scénarios de changement climatique envisagent une augmentation de la fréquence d'épisodes climatiques extrêmes,

de sorte qu'un événement centennal pourrait se produire tous les cinquante ans. La planification de nouvelles infrastructures et constructions dans la vallée du Bouregreg devrait tenir compte de cette évolution et des prévisions de l'élévation du niveau de la mer estimée à 20 cm d'ici 2030 et qui devrait se poursuivre au-delà.

Il est essentiel que les plans d'aménagement prennent en considération l'écoulement des eaux, d'absorption par le sol et le drainage dans les zones les plus à risques d'inondation. Certains aspects du plan d'aménagement actuel sont source d'inquiétude. Par exemple, les plans pour le secteur Kasbat Abu Raqraq envisagent la construction d'habitations dans une zone inondable, ce qui exposerait potentiellement jusqu'à 50 000 personnes aux risques d'inondation.

Dans l'ensemble, l'examen et la révision des plans de zonage, des constructions et des infrastructures de la vallée du Bouregreg permettrait d'apporter des modifications au projet afin de réduire efficacement les vulnérabilités envisagées. Des investissements dans une planification intelligente sur le plan climatique à ce stade — avant que les structures soient mises en place — se traduiraient sûrement par des économies considérables au cours du temps.

Pour en savoir plus sur l'étude, télécharger les rapports complets et voir les autres matériaux, visitez les sites suivants :



CENTRE de MARSEILLE
pour l'INTÉGRATION en MÉDITERRANÉE

www.cmimarseille.org

Le Centre de Marseille pour l'Intégration en Méditerranée (CMI) a pour objectif d'améliorer la convergence des politiques de développement durable par le biais d'une plate-forme d'échange de connaissances et d'apprentissage collectif.



BANQUE MONDIALE

<http://arabworld.worldbank.org>

L'Initiative pour le monde arabe (AWI) est un partenariat du Groupe de la Banque mondiale avec les Pays du monde arabe, censé promouvoir une coopération et une collaboration efficaces dans l'intérêt de l'intégration économique et du partage des connaissances.

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 vallée du Bouregreg
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	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 Tschan, 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. Lemghari Essaki, 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'Intérieur, Direction Générale de la Protection Civile, Direction des Secours, de la Planification et des Études
- Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia
- Office National de l'Eau Potable
- 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	13
Chapitre 2 - Introduction.....	23
1 Les objectifs de l'étude.....	23
2 Le contenu du rapport	24
3 Présentation du site	25
Chapitre 3 - Évaluation des aléas en situation actuelle	27
1 Climat et évènements climatiques exceptionnels.....	27
1.1 Principales caractéristiques climatiques et tendances évolutives	27
1.2 Évènements météorologiques exceptionnels	28
1.2.1 Précipitations et crues	28
1.2.2 Périodes de sécheresse.....	28
2 Stabilité des terrains naturels	29
2.1 Données de base utilisées.....	29
2.2 Contexte topographique et morphologique.....	29
2.3 Contexte géologique	31
2.4 Instabilités des terrains	33
3 Sismologie et tsunamis	34
3.1 Risque sismique.....	34
3.2 Risque de tsunami	35
4 Érosion côtière et submersion marine.....	36
4.1 Contexte géomorphologique.....	36
4.1.1 Présentation générale	36
4.1.2 La géomorphologie littorale	36
4.2 Contexte hydrographique.....	39
4.3 La topo-bathymétrie	39
4.3.1 La bathymétrie générale.....	39
4.3.2 La topo-bathymétrie de la frange littorale	40
4.4 Le milieu sédimentaire	41
4.4.1 Caractéristiques du recouvrement sédimentaire en bordure du littoral de Rabat.....	41
4.4.2 Le régime sédimentaire du littoral de Rabat.....	41
4.4.3 Les apports sédimentaires	41
4.5 Occupation et usages du littoral.....	41
4.5.1 Caractéristiques générales de la bordure littorale	41
4.5.2 Les infrastructures portuaires	44
4.5.3 Les infrastructures et travaux de protection du littoral	45
4.6 Diagnostic de l'évolution du littoral.....	46
4.6.1 Analyse diachronique de l'évolution du trait de côte.....	46
4.6.2 Analyse du littoral d'aujourd'hui	48
4.7 Impacts des tempêtes sur l'évolution du littoral	49
4.8 Cartographie des risques en situation actuelle	49
4.8.1 Détermination des niveaux de risque	49
4.8.2 Évaluation du risque.....	50

5	Hydrologie et inondations	61
5.1	Études de référence	61
5.1.1	Projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg : Étude hydraulique générale – volets I à IV – Royaume du Maroc – SABR Aménagement – CID (avril 2002 à février 2003)	61
5.1.2	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)	61
5.2	Méthodologie.....	61
5.3	Analyse de la situation actuelle.....	63
5.4	Conclusion	67
6	Ressources et besoins en eau	68
6.1	Analyse de la situation actuelle au regard des besoins.....	68
6.1.1	Eau potable	68
6.1.2	Agriculture	68
6.2	Adéquation besoins-ressources.....	68
Chapitre 4 - Évaluation des aléas à l'horizon 2030.....		69
1	Climat et évènements climatiques exceptionnels.....	69
1.1	Projections futures de changement climatique pour Rabat	69
1.2	Développement spécifique concernant les évènements extrêmes de fortes précipitations	72
1.3	Fonction de distribution cumulative.....	77
1.4	Élargissement de la réflexion au bassin du Bouregreg	78
1.5	Limites de l'analyse.....	82
1.6	Conclusion	82
2	Risques géologiques et sismiques	83
3	Érosion côtière et submersion marine.....	83
3.1	Évolution des conditions océanographiques et sédimentologiques	83
3.1.1	Effet sur la marée	83
3.1.2	Effet sur les houles.....	83
3.1.3	Effets sur la sédimentologie marine	84
3.2	Projets d'aménagement du littoral	84
3.3	Impacts prévisibles sur l'érosion côtière	90
3.3.1	Détermination de l'effet de l'élévation du niveau des eaux.....	90
3.3.2	Effet de l'élévation du niveau des eaux sur l'érosion.....	92
3.4	Impacts prévisibles sur la submersion marine	94
3.4.1	Rappel sur les surcotes à considérer	94
3.4.2	Les effets de la submersion marine.....	94
3.5	Cartographie des risques à l'horizon 2030	97
3.5.1	Le risque érosion	97
3.5.2	Le risque submersion	97
3.6	Conclusion	97
4	Hydrologie et inondations	100
4.1	Données et méthodologie utilisées	100
4.2	Évolution des conditions hydrologiques.....	100
4.2.1	Pluies et débits de projet pour l'oued Bouregreg.....	100
4.2.2	Évolution du niveau marin	101
4.3	Projets de protection contre les crues.....	101
4.4	Impacts prévisibles sur les inondations	103
4.4.1	Laminage de la crue centennale dans le barrage SMBA	103
4.4.2	Conditions d'écoulement en aval du barrage	105

4.5 Conclusion	106
5 Ressources et besoins en eau	107
5.1 Données et méthodologie utilisées	107
5.2 Évolution des ressources en eau.....	107
5.2.1 Impacts prévisibles du changement climatique	107
5.2.2 Projets d'amélioration de la gestion des ressources	113
5.3 Évolution prévisible des usages.....	114
5.3.1 Eau potable	114
5.3.2 Agriculture	114
5.4 Conclusion	114
Chapitre 5 - Identification des vulnérabilités urbaines	115
1 Analyse de l'occupation des sols en l'état actuel	115
1.1 Séquence 1 - Bab Al Bahr	115
1.2 Séquence 2 - Al Saha Al Kabira (La grande place)	116
1.3 Séquence 3 - Kasbat Abi Raqraq	117
1.4 Séquence 4 - Sahrij El Oued	117
1.5 Séquence 5 - Al Menzah al Kabir	118
1.6 Séquence 6 - Les Belvédères de H'ssaine.....	118
2 Analyse de l'occupation des sols à l'horizon 2030	118
2.1 Séquence 1 - Bab Al Bahr (La porte de la mer).....	122
2.2 Séquence 2 - Al Saha Al Kabira (La grande place)	123
2.3 Séquence 3 - Kasbat Abi Raqraq	124
2.4 Séquence 4 - Sahrij El Oued	125
2.5 Séquence 5 - Al Menzah al Kabir	125
2.6 Séquence 6 - Les Belvédères de H'ssaine.....	125
3 Analyse des risques à l'horizon 2030	127
Chapitre 6 - Références bibliographiques.....	133

Liste des figures

Figure 1 : Périmètre et parti d'aménagement du site du Bouregreg	26
Figure 2 : Évolution des cumuls pluviométriques annuels à Rabat entre 1961 et 2008.....	27
Figure 3 : Modèle numérique de terrain (MNT, valeurs en mètres) de la vallée de Bouregreg et carte des pentes (valeurs en degré) sur fond de carte géologique	30
Figure 4 : Extrait de la carte géotechnique de Rabat à 1/50 000 (Service Géologique du Maroc, 1970).....	32
Figure 5 : Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la vallée de Bouregreg, superposée à la carte géologique	33
Figure 6 : Table de correspondance PGA (PGV) et intensité sismique de l'USGS (utilisée pour le calcul des ShakeMaps)	34
Figure 7 : carte bathymétrique russe de 1976	40
Figure 8 : Projet d'aménagement de l'embouchure du Bouregreg	45
Figure 9 : Aléa érosion à l'embouchure de la vallée du Bouregreg en situation actuelle.....	53
Figure 10 : Aléa submersion à l'embouchure de la vallée du Bouregreg en situation actuelle	54
Figure 11 : Zones submergées à l'embouchure de la vallée du Bouregreg en situation actuelle et à l'horizon 2030.....	55
Figure12 : Zones impactées de la vallée du Bouregreg par une surcote marine exceptionnelle en situation actuelle et à l'horizon 2030	56
Figure 13 : Carte des enjeux littoraux de l'embouchure de la vallée du Bouregreg	58
Figure 14 : Carte du risque érosion littoral de l'embouchure de la vallée du Bouregreg.....	59
Figure 15 : Carte du risque submersion littorale de l'embouchure de la vallée du Bouregreg	60
Figure 16 : Carte de la zone hydrographique du Bouregreg et de la Chaouia.....	62
Figure 17 : Carte des hauteurs d'eau en situation actuelle pour la crue centennale	66
Figure 18 : Changements projetés, selon les différents modèles-scénarios, pour les températures moyennes saisonnières et annuelles (gauche, °C) et pour le nombre de jours de vagues de chaleur estivales et ceux des vagues de froid hivernales (droite).	69
Figure 19 : Changements projetés, selon les différents modèles-scénarios, pour les précipitations moyennes saisonnières et annuelles (%).	70
Figure 20 : Changements projetés, selon les différents modèles-scénarios, pour la période maximale (pxcdd) et moyenne (pdsav) de sécheresse pour les quatre saisons et pour l'année (jour).....	71
Figure 21 : Changements projetés (%), selon les différents modèles-scénarios, pour le nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90) et pour le 90ème centile (pq90).	71
Figure 22 : Changements projetés pour les cumuls pluviométriques par les différents modèles-scénarios au niveau des quatre villes de la zone d'étude pour le 90ème centile de la saison d'été (%).	72
Figure 23 : Précipitations quotidiennes extrêmes (mm) en fonction des périodes de retour (an) pour l'observation (courbe noire) et pour le climat actuel (courbes claires) et futur (courbes foncées) issues des différents modèles-scenarios, pour Rabat.....	75
Figure 24 : Exemple de courbes de CDF, pour une distribution discontinue quelconque (bleu) et pour une distribution normale (vert)	77
Figure 25 : Découpage de la zone hydrographique concernée par l'étude en mailles de 50km de côté	79
Figure 26 : Principaux ouvrages hydrauliques de la section aval du Bouregreg.....	85
Figure 27 : Effet de la remontée du niveau des eaux en l'absence d'obstacles sur le haut de page	90

Figure 28 : Effet de la remontée du niveau des eaux en présence d'obstacles sur le haut de plage ²⁷	91
Figure 29 : Réponse de la ligne de rivage à une élévation du niveau des eaux d'après la règle de Bruun	92
Figure 30 : L'aléa érosion à l'embouchure de l'oued Bouregreg	93
Figure 31 : L'aléa submersion littorale à l'embouchure de la vallée du Bouregreg à l'horizon 2030	96
Figure 32 : Carte du risque érosion à l'horizon 2030 à l'embouchure de la vallée du Bouregreg	98
Figure 33 : Le risque de submersion littorale à l'embouchure de la vallée du Bouregreg à l'horizon 2030	99
Figure 34 : Lignes d'eau calculées pour les scénarios 1 et 2 de l'aménagement de la séquence 3 ((Étude CID-Sogreah – mai 2007).....	103
Figure 35 : Calcul de laminage de la crue centennale par le barrage SMBA, pour la période actuelle et la période future (horizon 2030)	104
Figure 36 : Parti d'aménagement du site du Bouregreg	119
Figure 37 : Plan d'Aménagement Spécial de la Vallée du Bouregreg	120
Figure 38 : L'occupation des sols actuelle et à l'horizon 2030 dans la vallée du Bouregreg	129
Figure 39 : Les sensibilités actuelles et à l'horizon 2030 dans la vallée du Bouregreg.....	130
Figure 40 : Les vulnérabilités et risques naturels en situation actuelle et à l'horizon 2030 dans la vallée du Bouregreg	131

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tendances climatiques observées à Rabat sur la période 1961-2008	28
Tableau 2 : Déficits en apports d'eau pour trois périodes d'années sèches (source DPRE)	28
Tableau 3 : Volume de sédiments dragués dans l'oued Bouregreg.....	47
Tableau 4 : Valeurs "théoriques" du risque en fonction des aléas « érosion » et « submersion »	49
Tableau 5 : Caractéristiques des niveaux d'eau	51
Tableau 6 : Débit de pointe en sortie du barrage SMBA pour la crue centennale pour différentes hypothèses d'ouverture des vannes	63
Tableau 7 : Débits et volumes de crue caractéristiques pour l'oued Bouregreg.....	64
Tableau 8 : Vallée du Bouregreg - Superficies des zones inondées pour la crue centennale en situation actuelle	65
Tableau 9 : Qualité de l'ajustement de l'échantillon de Rabat avec les tests de Kolmogorov Smirnov et Anderson Darling	73
Tableau 10 : Précipitations quotidiennes extrêmes observées (mm) à Rabat pour différentes périodes de retour.....	73
Tableau 11 : Précipitations quotidiennes extrêmes (mm) en fonction des périodes de retour (an) 10, 20, 50 et 100 ans, estimées avec la loi GEV, avec l'intervalle de confiance correspondant à 95%.....	74
Tableau 12 : Changement, en pourcentage, des précipitations quotidiennes extrêmes entre le présent (1961-2000) et le futur (2021-2050) correspondant aux différents modèles-scénarios et à différentes périodes de retour.	76
Tableau 13 : Écart-types d'extrêmes quotidiens de précipitation (mm) pour le présent (1961-2000) et le futur (2021-2050) selon les 6 modèles-scénarios.....	76
Tableau 14 : Pourcentage de chance de dépasser les seuils de 300, 500 et 800 mm en cumul annuel selon les différents-modèles scénarios, pour le présent (1961-200) et le futur (2021-2050).....	78
Tableau 15 : Évolution des extrêmes des pluies maximales journalières annuelles sur le bassin du Bouregreg, entre la période actuelle et la période future (horizon 2030), pour différents modèles régionaux (scénario A1B).....	80
Tableau 16 : Évolution des extrêmes des pluies maximales annuelles de durée 2 jours sur le bassin du Bouregreg, entre la période actuelle et la période future (horizon 2030), pour différents modèles régionaux (scénario A1B)	80
Tableau 17 : Caractéristiques des niveaux d'eau.....	84
Tableau 18 : Niveau d'eau en situation actuelle et future (2030) sans évènement exceptionnel sur Rabat	94
Tableau 19 : Caractéristiques des niveaux d'eau en tenant compte d'un évènement exceptionnel.....	94
Tableau 20 : Estimation des volumes et débits de crue de période de retour 50 et 100 ans sur le bassin du Bouregreg (amont du barrage SMBA), avec prise en compte des hypothèses du changement climatique (horizon 2030)	101
Tableau 21 : Variation annuelle de la pluviométrie dans le bassin hydrographique du Bouregreg et de la Chaouia pour les différents modèles-scénarios	108
Tableau 22 : Variation saisonnière de la pluviométrie dans le bassin hydrographique du Bouregreg et de la Chaouia pour les différents modèles-scénarios.....	110
Tableau 23 : Caractérisation de l'occupation des sols dans le cadre du projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg.....	127

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 à 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'évalent 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.

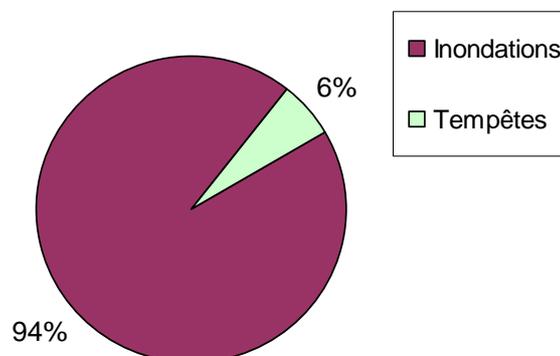
Des dommages qui peuvent être évalués

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

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 du site de Bouregreg Dans cette **première phase d'étude**, il présente l'évaluation des aléas et des risques liés aux désastres naturels et au changement climatique. Il est complété par deux autres rapports, l'un présentant des informations similaires sur le site de Casablanca, l'autre présentant 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. 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 de Bouregreg, qui fait l'objet du présent volume, se compose des parties suivantes :

Chapitre 1 - Résumé exécutif

Chapitre 2 - Introduction

Chapitre 3 - Evaluation des aléas en situation actuelle

Chapitre 4 - Evaluation des aléas à l'horizon 2030

Chapitre 5 - Identification des vulnérabilités urbaines

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 du site

Le présent volet de l'étude concerne le site de 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 Hssaine.

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.

La carte présentée en page suivante montre l'occupation future des sols au niveau de la vallée du Bouregreg.

Figure 1 : Périmètre et parti d'aménagement du site du Bouregreg



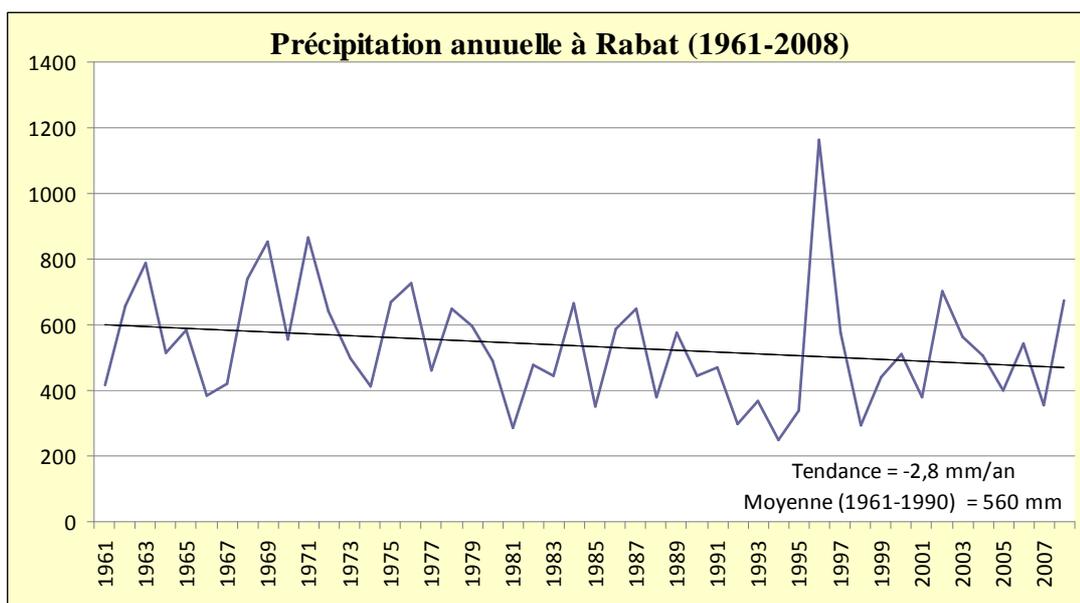
Chapitre 3 - Évaluation des aléas en situation actuelle

1 Climat et évènements climatiques exceptionnels

1.1 Principales caractéristiques climatiques et tendances évolutives

La ville de Rabat se situe dans la même région climatique que Casablanca. Les normales des températures moyennes de Rabat varient de 12.6°C en hiver à 22°C en été. Les cumuls pluviométriques annuels ont une normale de 560 mm. Ils se caractérisent par une forte variabilité interannuelle (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En année sèche les cumuls peuvent descendre en dessous de 300 mm, en année humide ils peuvent dépasser les 800 mm. Entre 1961 et 2008, les cumuls pluviométriques au niveau de Rabat ont connu une tendance à la baisse, statistiquement significative, d'environ -2.8 mm/an.

Figure 2: Évolution des cumuls pluviométriques annuels à Rabat entre 1961 et 2008



Le site de Rabat a migré durant la période 1961-2008 d'un climat à caractère semi-humide, selon l'indice d'aridité de De Martonne (Beltrando et Chémery, 1995), vers un climat semi-aride (F. Driouech et R. Sebbari, 2008 ; communication personnelle). Rappelons que l'indice (I) de De Martonne se calcule en fonction de la température moyenne annuelle (T) exprimée en °C et du cumul des précipitations annuelles (P) en mm à l'aide de la formule : $I = P / (T + 10)$. Plus l'indice est élevé, plus le climat est humide et plus il est faible plus le climat est aride.

Le tableau suivant montre les tendances observées à Rabat sur la période 1961-2008 pour la température moyenne, le nombre maximal et moyen de jours consécutifs secs et le nombre d'évènements de fortes précipitations. Le réchauffement concerne les quatre saisons de

l'année. Les tendances sont statistiquement significatives pour le printemps, l'été et à l'échelle annuelle. La sécheresse semble augmenter en hiver et au printemps (deux saisons importantes pour l'agriculture nationale) mais diminuer en automne. Notons que le nombre de jours de fortes précipitations ne montre pas de tendances importantes malgré un signe positif en début de saison des pluies.

Tableau 1 : Tendances climatiques observées à Rabat sur la période 1961-2008

Rabat	Hiver	Printemps	Été	Automne	Année
Tav	0.1	<u>0.2</u>	<u>0.2</u>	0.2	<u>0.2</u>
pxcdd	0.21	0.07	-0.05	-0.13	-0.11
pdsav	0.05	0.05	-0.3	-0.01	0.04
Pnl90	-0.02	-0.03	-0.01	0.03	-0.01

Tendances observées sur la période 1961-2008 pour la température moyenne (tav, °C/décennie), le nombre maximal (pxcdd) et moyen (pdsav) de jours consécutifs secs (j/an) et le nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90). Les tendances statistiquement significatives (à 95%) sont soulignées.

1.2 Évènements météorologiques exceptionnels

1.2.1 Précipitations et crues

L'événement pluviométrique exceptionnel mentionné dans les différentes études, et qui constitue l'événement de référence, est la crue historique de 1963: son débit de pointe en aval est estimé à 4600 m³/s, soit une période de retour comprise entre 50 et 100 ans.

1.2.2 Périodes de sécheresse

Des sécheresses prolongées affectent régulièrement le Maroc. Plusieurs sécheresses ont concerné la majeure partie du pays : 1944-1945, 1980-1985, 1990-1995 et 1998-2000. Certaines sécheresses ont duré jusqu'à cinq années successives.

Ces sécheresses ont aggravé les déficits en réduisant de moitié les apports en eaux de surface. Les déficits en apport d'eau pour trois périodes sèches sont fournis dans le Tableau 2 pour les régions hydrographiques qui nous intéressent.

Tableau 2 : Déficit en apports d'eau pour trois périodes d'années sèches (source DPRE)

Bassin versant	Période sèche		
	1980-1985	1991-1995	1998-2001
Bouregreg	-70%	-70%	-74%
Oum Er Rabia	-46%	-51%	-60%

Une analyse de la pluviométrie a été effectuée par l'agence de bassin du Bouregreg et de la Chaouia sur l'ensemble de son bassin hydrographique (PDAIRE – mission 1.2), afin d'identifier les comportements en période de sécheresse. L'une des conclusions est qu'une tendance à la baisse est bien présente depuis les années 1980 environ. Cependant, les courtes durées d'observations disponibles et l'occurrence de 3 années humides en 1995, 1996 et 1997 ne permettent pas de confirmer si cette tendance est temporaire ou persistante. Les sécheresses affectent généralement l'ensemble de la zone.

2 Stabilité des terrains naturels

Le contexte géologique général est présenté dans le rapport commun aux sites de Casablanca et du Bouregreg.

2.1 Données de base utilisées

En 2002, dans le cadre du projet d'aménagement de la vallée de Bouregreg, le **Laboratoire public d'essais et d'études** (LPEE) a réalisé pour le compte de SABR Aménagement, une étude géotechnique spécifique de la vallée.

Le travail du LPEE (2002) présente une étude des sols sur la base de la compilation des études géotechniques antérieures, de reconnaissances *in situ* des sols et la réalisation de sondages complémentaires. Outre les recommandations géotechniques par rapport au projet d'aménagement de la vallée, *in fine*, le LPEE (2002) présente une carte de la susceptibilité des sols aux mouvements de terrain.

Par ailleurs, dans le cadre de ce présent travail, il est aussi fait référence à la **carte géotechnique de Rabat** à 1/50 000 (Service Géologique du Maroc, 1970) ainsi qu'au MNT a priori réalisé à partir des photographies aériennes de 2003 avec un point d'information en (x, y, z) tous les 10m.

2.2 Contexte topographique et morphologique

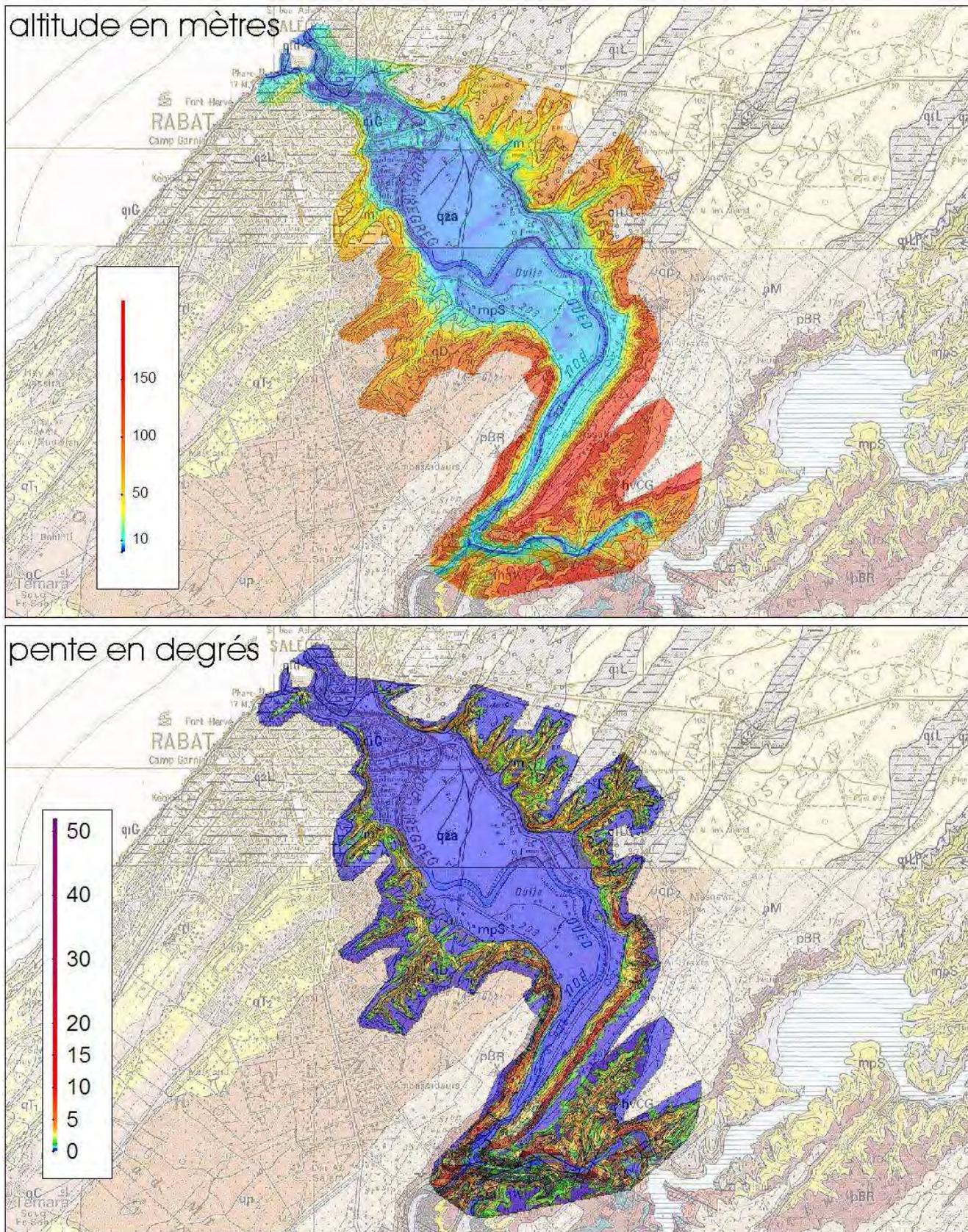
La zone du projet s'étend depuis le barrage de SMBA jusqu'à l'embouchure du fleuve de Bouregreg, située au Nord-Ouest, à environ 18 km en aval. Ses limites correspondent en gros aux limites des versants qui surplombent la vallée.

La vallée du Bouregreg est relativement encaissée et les versants présentent certains risques d'instabilité. 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 Sidi Mohammed Ben Abdellah (SMBA) est construit à la sortie des gorges.

La vallée correspond à une plaine alluviale de topographie peu marquée, et de largeur entre 0,3 km à 3 km. C'est au niveau de la Kasbat Abi Raqraq, que cette largeur atteint son maximum.

Ce sont les versants, dont la pente est généralement raide qui marquent l'essentiel du relief. Leur hauteur atteint environ **160 m de hauteur au niveau du barrage de SMBA**, et une vingtaine de mètres à l'aval près de l'embouchure. Les versants sont par ailleurs incisés par des cours d'eau saisonniers qui se déversent dans la vallée.

Figure 3 : Modèle numérique de terrain (MNT, valeurs en mètres) de la vallée de Bouregreg et carte des pentes (valeurs en degré) sur fond de carte géologique



2.3 Contexte géologique

Les données relatives au contexte géologique régional sont décrits dans le rapport commun. La présente section se concentre sur la présentation du contexte géologique à l'échelle locale du site de Bouregreg.

Le site du Bouregreg se trouve à une cinquantaine de kilomètres du front des nappes rifaines. Il s'inscrit dans la dépression sud rifaine, à remplissage néogène.

Le socle correspond à des schistes argileux siluro-ordovicien (Paléozoïque). Les formations néogènes sont constituées par:

- des marnes et molasses du Miocène moyen à Pliocène,
- des limons et sables plus ou moins consolidés du Quaternaire inférieur et moyen, des sables,
- alluvions et limons du Quaternaires récent à Actuel.

Concernant **les formations de la plaine alluviale**, il s'agit :

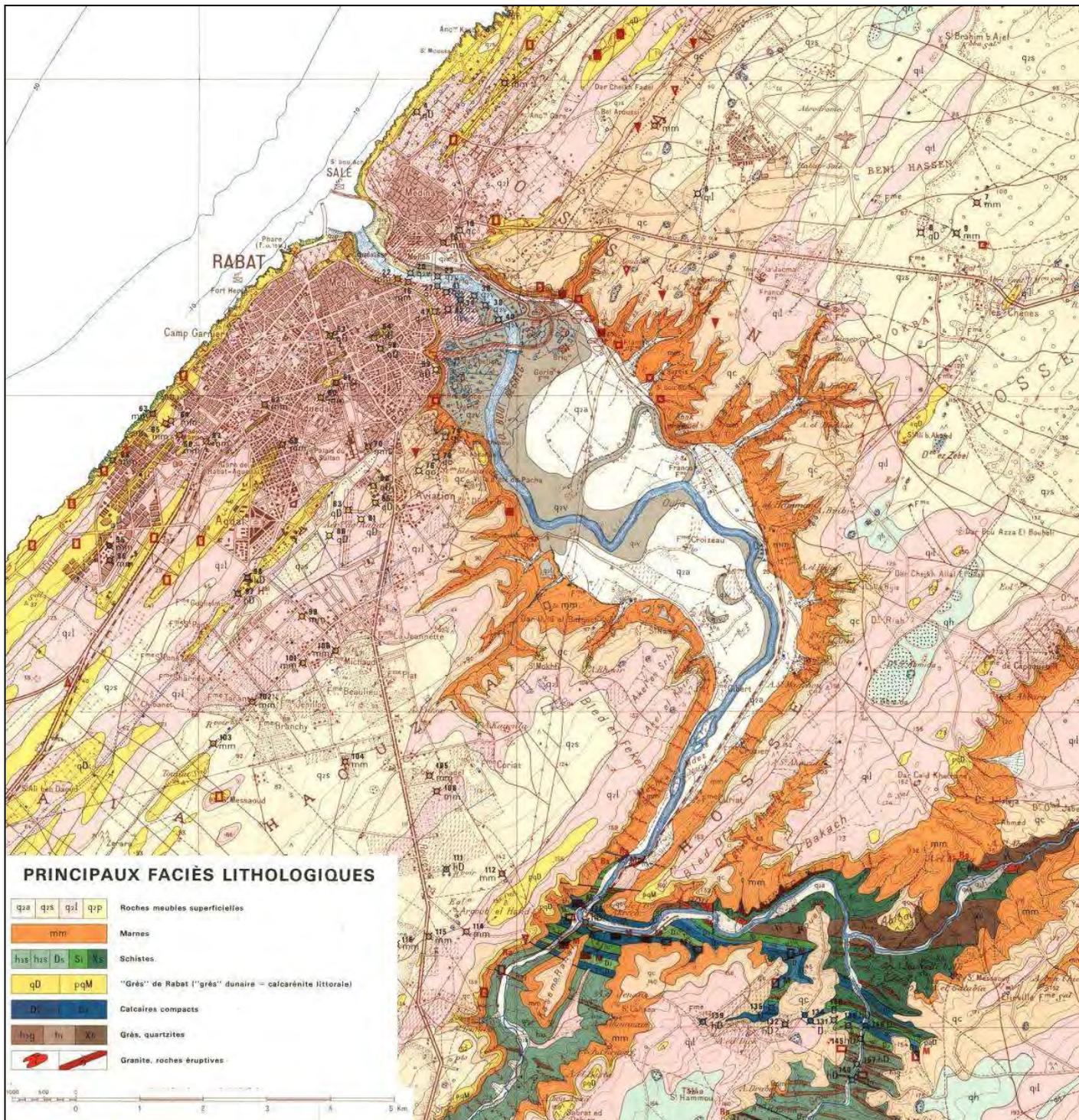
- de formations sableuses affleurantes à l'embouchure du fleuve, à proximité du littoral,
- de limons avec intercalations de passées sableuses qui constituent l'essentiel des formations alluviales
- de vases ou vase sableuses, épaisses de quelques mètres à plus d'une dizaine de mètres par endroits ; elles constituent très souvent des zones marécageuses ou souvent inondées. Il s'agit de formations fortement compressibles.

La vallée correspond à une incision du fleuve Bouregreg au niveau du plateau néogène. A proximité du littoral, **les falaises** sont constituées de grés calcaires (ou calcarénites) miocènes. Au niveau des versants bordant la plaine alluviale, il s'agit de formations miocènes, avec :

- à la base des marnes ou marnes sableuses, jusqu'à environ la cote 100m,
- surmontées de conglomérats à matrice calcaire, d'épaisseur variable, entre 5 et 20 m.
- coiffés par les alluvions conglomératiques du Quaternaire ancien à matrice argileuse rougeâtre.

En amont, au niveau du coude à 45° environ du fleuve, ou à la zone de confluence avec l'Oued Akrech, le socle paléozoïque affleure. Il s'agit de schistes ou de calcaires dolomitiques. A cet endroit, la vallée forme des **gorges très étroites**.

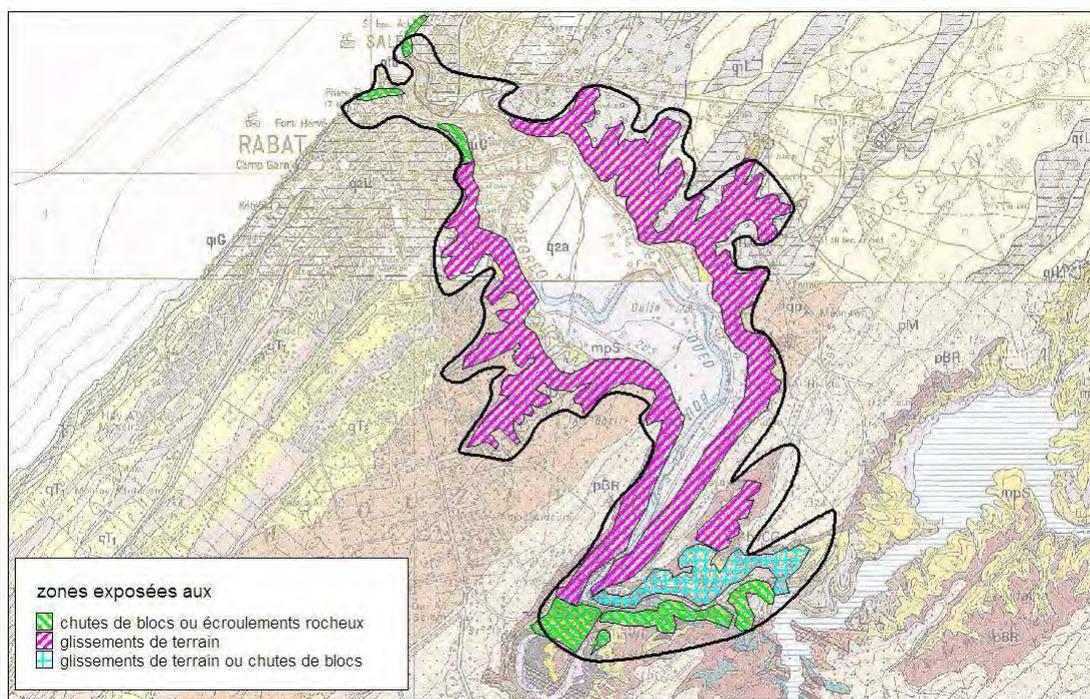
Figure 4 : Extrait de la carte géotechnique de Rabat à 1/50 000 (Service Géologique du Maroc, 1970)



2.4 Instabilités des terrains

Les informations sur l'instabilité des terrains au niveau du site de Bouregreg sont extraites de l'étude du LPEE (2002). En aval, à proximité du littoral, les falaises de grès calcaires présentent des **risques de chutes de blocs**, notamment le long du littoral (susceptible d'être attaqué par la mer) et au niveau de la falaise Mellah (rive gauche).

Figure 5 : Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la vallée de Bouregreg, superposée à la carte géologique



Le risque de chutes de pierres existe aussi en rebord du plateau, au sommet des falaises constituant les versants, c'est-à-dire au niveau des formations conglomeratiques miocènes ou du Quaternaire ancien.

Concernant les formations marneuses constituant les versants de la plaine alluviale, en plusieurs endroits le LPEE a relevé des traces de glissements de terrain superficiels. Ces formations représentent un risque important aux **glissements de terrain superficiels**.

Dans les zones constituées de vases (généralement associées à des marécages) ou de remblais de mauvaise qualité, les terrains sont particulièrement exposés au phénomène de **tassement**.

La susceptibilité des terrains à la **liquéfaction** (perte de cohésion sous agitation mécanique) en cas de séisme concerne plus particulièrement les formations sableuses affleurantes en aval de la vallée. Toutefois ce risque n'est pas exclu au niveau des formations sableuses localisées par endroit au sein des formations limoneuses ou vaseuses de la plaine alluviale.

3 Sismologie et tsunamis

Les informations relatives au contexte sismotectonique, à la méthodologie employée et à l'évaluation de l'aléa sismique régional, ainsi que les éléments d'évaluation de l'aléa tsunami à l'échelle régionale sont décrits dans le rapport commun. La présente section se concentre sur la présentation du risque sismique et de tsunami à l'échelle locale du site du Bouregreg.

3.1 Risque sismique

1) La carte d'intensité centennale calculée en outre par Cherkaoui Maknassi (1991) indique des valeurs de l'ordre de **V-VI à VI** au niveau du site du Bouregreg, soit une probabilité d'environ 20% de chances de survenance dans une période de 20 ans, ou 40 % dans une période de 50 ans.

2) Dans le cadre de GSHAP et de SESAME, concernant les cartes de PGA calculées pour une période de retour de 475 ans (ce qui correspond à une probabilité de survenance de 10% en 50 ans ou bien, moins de 5% en 20 ans), au niveau des deux sites, les valeurs trouvées sont comprises **entre 0,04g et 0,08g** (soit inférieur à 9%g).

Or si l'on se réfère à la table de correspondance PGA (et PGV) retenue par l'USGS pour le calcul des cartes de sismicité lors de la survenance de séisme majeur, *Figure 6*, pour un PGA inférieur à 9%g, **le site du Bouregreg auraient une intensité de l'ordre de V, ce qui correspond à un niveau de dommage modéré**. A noter néanmoins qu'il s'agit d'une estimation d'intensité pour une valeur de PGA considérée au rocher, c'est-à-dire **sans prise en compte des effets de conditions géologiques ou topographiques locales** qui pourraient amplifier le mouvement sismique. Dans le cas contraire, en l'absence de microzonage sismique, il faudrait, de façon empirique, ajouter 1 ($\pm 1/2$) degré d'intensité à la valeur de PGA au rocher. Cette valeur empirique s'appuie sur le « Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards TC-4, revised version (1999) » ou encore sur les travaux de Mouroux et al. (2004) ou de Faccioli (2006) acquis dans le cadre du projet européen Risk-UE.

Figure 6 : Table de correspondance PGA (PGV) et intensité sismique de l'USGS (utilisée pour le calcul des ShakeMaps)

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.1	0.1-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X

Les valeurs indiquées dans le cadre de ces 2 programmes sont cohérentes avec les résultats de Benouar et al. (1998), ainsi que les travaux plus récents de Aït Brahim et al. (2004) sur le nord du Maroc.

3) La valeur d'accélération maximale retenue dans le cadre du zonage sismique du MAROC adopté par la RPS2000 est de 0,08g au niveau du site de Bouregreg. Elle est donc cohérente avec les évaluations présentées par GSHAP et SESAME.

Les valeurs d'intensité centennales calculées par Cherkaoui Maknassi (1991) sont supérieures non seulement à celles de GSHAP ou SESAME, mais aussi à celles retenues par le RPS2000.

Les travaux les plus récents indiquent pour une période de 475 ans, une valeur de PGA proche de 0,08g, soit une intensité sismique au rocher proche de V à V-VI (si l'on se réfère à la table de correspondance USGS). Ce qui permet d'envisager **pour une période de 50 ans, une intensité sismique au rocher inférieure à V, vraisemblablement entre IV à IV-V au niveau de chacun des deux sites.**

Les études historiques sur les séismes ressentis au Maroc indiquent que des dommages (en particulier aux constructions traditionnelles) peuvent apparaître dès les magnitudes proches de 4,5 (Alami et al., 1994). Si l'on se réfère aux lois de conversion proposées par Cherkaoui Maknassi (1991) ou Lopez Casado et al. (2000), cela correspond à des valeurs d'intensité entre VI et VI-VII.

Concernant le scénario à 50 ans, il n'est pas exclu que des intensités de l'ordre de VI puissent être atteintes. Néanmoins ces intensités resteraient localisées aux **zones soumises à des effets de site** (buttes topographiques, terrains sédimentaires non consolidés). Cela pourrait concerner plus spécialement le site de Bouregreg caractérisé par une couverture sédimentaire quaternaire plus importante.

3.2 Risque de tsunami

L'analyse des événements historiques et du contexte sismotectonique indique une **exposition relativement importante de la cote ouest marocaine** au risque de tsunami.

Pour un **événement type 1755**, la période de retour évaluée est de 1000 à 2000 ans. Ce type d'évènement produirait des hauteurs de vagues au maximum de 2m au niveau de la cote ouest du Maroc.

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 est estimée inférieure à 1m.

Concernant la probabilité de survenance d'un tsunami dans les 20 ans à venir au niveau de Bouregreg à retenir dans le cadre de cette présente étude, **le scénario le plus vraisemblable est donc un évènement type 1969**. On note néanmoins que la probabilité de survenance d'un scénario de tsunami type 1969, correspond à 10 % environ de chances de survenir dans les 20 ans à venir, et 22% dans les 50 ans à venir.

En outre, concernant la cartographie précise de l'inondation générée par ce type de tsunami, il serait nécessaire de disposer non seulement d'une cartographie des infrastructures (localisation, géométrie), mais aussi du modèle numérique de terrain de très bonne précision au niveau de Bouregreg (précision en z d'ordre décimétrique) entre les altitudes -10m à +10m, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

A défaut, sur la base des observations historiques, on retiendra une **hauteur d'inondation au rivage de 1m**, hauteur observée à Casablanca lors de l'évènement de 1969.

4 Érosion côtière et submersion marine

Les données relatives aux conditions océanographiques et au milieu sédimentaire à l'échelle régionale sont présentées dans le rapport commun. Le rapport commun présente également les notions générales relatives à la définition des risques en situation actuelle.

La présente section se concentre sur les informations relatives à l'érosion côtière et à la submersion marine en situation actuelle pour le site de Bouregreg.

4.1 Contexte géomorphologique

4.1.1 Présentation générale

La vallée du Bouregreg se situe à la **partie septentrionale de la Méséta centrale**. Elle se caractérise par des affleurements primaires en amont plissé et arasé jusqu'à pénéplanation et au-dessus duquel se sont déposés, plus à l'aval, des couches subhorizontales des formations d'âge tertiaire et quaternaire.

Le lit majeur de l'Oued Bouregreg (cf. SABR AMENAGEMENT-PROJET D'AMENAGEMENT DE LA VALLEE DU BOUREGREG, Étude hydraulique générale, CID avril 2002) est comblé par des **dépôts alluviaux quaternaires** constitués d'une alternance de quatre types de matériaux et de leurs faciès intermédiaires : des argiles et vases, des limons sableux, des sables grossiers et des alluvions grossières. Les sondages les plus profonds réalisés dans ce lit sans atteindre le substratum, montrent que l'épaisseur de ces dépôts est supérieure à 35 m. Les termes les plus grossiers (alluvions grossières) n'apparaissent généralement qu'au-delà de 10 m de profondeur.

Actuellement, ces dépôts naturels sont masqués, sur de larges superficies, par des **remblais constituant des terrasses artificielles**. Les versants dominant le large fond de vallée du Bouregreg, sont constitués par des marnes (tertiaire) coiffées au sommet par une barre de calcarénite (grès coquiller du quaternaire ancien marin) selon un contact plongeant doucement vers la mer. Les marnes disparaissent ainsi progressivement et le versant gauche se présente, à l'approche du rivage, en falaise entièrement constituée par la calcarénite. Un aspect lié à cette morphologie, est à souligner: il s'agit des **nombreuses instabilités de pans rocheux** de la calcarénite, particulièrement au contact avec les marnes, donnant lieu à des détachements de blocs de dimensions importantes (zone au pied de la Tour Hassan et aux environs du rond-point Marjane).

4.1.2 La géomorphologie littorale

Les deux rives sablonneuses de Rabat et Salé sont contrastées, avec une côte très basse côté Salé constituée d'un platier rocheux et d'une vaste plage, et un promontoire rocheux côté Rabat supportant les anciennes villes fortifiées de la Casbah des Oudayas et de la médina.

L'exutoire en mer du Bouregreg est limité par **deux grandes digues** (cf. photo aérienne ci-après), construites entre 1924 et 1926 de 550 m et 520 m, destinées à créer en raison de leur tracé divergeant depuis leurs musoirs jusqu'à leurs enracinement, une zone d'amortissement pour la houle et limiter l'ensablement de l'embouchure en mer. A la même période deux digues basses de longueurs respectives de 110 m et 120 m, destinées à canaliser le chenal dans la

zone où il changeait de cours, ont également été construites. Rapidement la digue basse sud a été ensablée et a disparu sous le sable. Et la digue nord s'aperçoit encore.



La photo aérienne de mars 2005 montre que, des deux digues basses construites à l'intérieur de la zone, seule la digue basse nord apparait encore). La digue sud est complètement ensablée. (source Google).



Les plages au débouché du Bouregreg aujourd'hui. Les nouvelles digues au débouché du Bouregreg (construites en 2006) apparaissent nettement (source : Google)



La plage rive gauche de Rabat à l'exutoire du Bouregreg



La plage rive droite de Salé à l'exutoire du Bouregreg

4.2 Contexte hydrographique

L'oued Bouregreg a un bassin versant de l'ordre de 9 800 km². Son régime est contrôlé depuis la construction du barrage réservoir Sidi Mohammed Ben Abdallah (SMBA) en 1974. Parmi les affluents seul l'oued Akreuch est situé à l'aval du barrage en rive gauche.

Le lit actuel de l'oued a été beaucoup modifié au niveau de l'embouchure tant du côté de Rabat que de Salé. L'eau arrivait au pied des remparts comme en témoigne la falaise creusée à sa base le long du quai Al Marsa à Rabat, les portes de la mer à Rabat (Bab el Bahr) et du côté du petit port à Salé (Bab el Mrissa). Entre 192- et 1940, le port de Rabat, en aval du pont Moulay Hassan, a connu une forte activité commerciale. Ensuite, l'absence d'entretien des fonds ne permettait plus aux navires d'accoster.

4.3 La topo-bathymétrie

4.3.1 La bathymétrie générale

La carte bathymétrique russe 31042 au 1/500 000 de 1976 ainsi qu'une carte levée en 1954 permettent de caractériser la bathymétrie générale des fonds au droit du littoral de Rabat.

4.4 Le milieu sédimentaire

4.4.1 Caractéristiques du recouvrement sédimentaire en bordure du littoral de Rabat

Nous ne disposons pas de données sur les caractéristiques sédimentaires des fonds le long du littoral de Rabat-Salé. Par contre, des données sont disponibles sur la partie du littoral comprise entre les deux digues marines qui délimitent l'embouchure de l'oued Bouregreg. Ces données sont présentées dans le chapitre suivant.

4.4.2 Le régime sédimentaire du littoral de Rabat

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

Les fonds marins dans **l'embouchure de l'oued du Bouregreg** seraient sableux avec un diamètre médian (D_{50}) de l'ordre de 0,3mm car ils sont essentiellement d'origine marine car depuis la construction du barrage SMBA, l'action de l'oued a été réduite et l'ensablement de l'estuaire se trouve plutôt contrôlé par l'action de la houle et de la marée.

4.4.3 Les apports sédimentaires

Pour l'embouchure de l'oued Bouregreg à Rabat Salé, des estimations ont été réalisées dans le cadre de l'étude hydraulique générale par le CID en avril 2002. L'examen de la capacité de transport du Bouregreg à l'état actuel a montré que les problèmes de charriage continuent à avoir une certaine importance qui est cependant beaucoup plus faible qu'avant la construction du barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah. Un processus d'envasement de la partie aval de l'estuaire, de la région du port et de l'embouchure, avait été observé avant cette construction. On doit s'attendre qu'avec la diminution de l'apport solide de l'amont cet envasement soit sensiblement retardé ou même enrayé.

4.5 Occupation et usages du littoral

4.5.1 Caractéristiques générales de la bordure littorale

La photographie satellite Google permet de visualiser l'agencement des espaces au débouché de l'oued Bouregreg aujourd'hui.



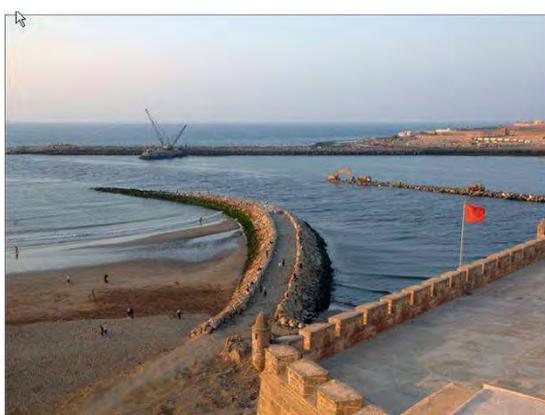
Vue de l'embouchure de l'oued Bouregreg à Rabat Salé (source : Google)



La plage de Rabat en 2005 avant les travaux (source : www.bouregreg.com)



La plage de Rabat après le rechargement en 2006 (source : [www. bouregreg.com](http://www.bouregreg.com))



Les travaux de création/renforcement de la digue sud et de la digue nord et le dragage à l'embouchure du Bouregreg en 2007 (source : [www. bouregreg.com](http://www.bouregreg.com))



L'opération de renforcement des digues d'encloture marines de l'embouchure du Bouregreg (source : www.bouregreg.com)

4.5.2 Les infrastructures portuaires

Grâce au Bouregreg, Rabat disposait du **plus grand port fluvial du Maroc au début du XX^{ème} siècle**. L'activité du port de Rabat était intense au début du siècle et les navires de commerce n'hésitaient pas à remonter le Bouregreg. A partir de 1940, le port subit la concurrence de celui de Casablanca, plus grand et plus facile d'accès et le manque d'entretien des fonds entraîna le déclin du port. Par ailleurs la liaison ferroviaire avec Rabat accélèrera le déclin du port de Rabat car elle facilite les échanges.

Aujourd'hui il a été créé, dans le cadre de l'aménagement de la vallée du Bouregreg, un **port de plaisance** de 350 places en rive droite de l'oued entre le pont Moulay El Hassan et l'embouchure du cours d'eau. La Marina port s'étend sur une superficie de 8 hectares, dont 4 ha pour son plan d'eau. Il pourra accueillir des bateaux de plaisance d'un tirant d'eau de 2 à 4 mètres d'une longueur allant jusqu'à 20 mètres. La marina sera bordée d'espaces de restauration, d'animation et de loisirs ainsi que d'un front résidentiel et hôtelier adossé à la cité des arts et des métiers.

Dès la mise en service du nouveau pont Moulay El Hassan en 2010, une extension de ce port sera réalisée sur une superficie de 3 hectares, dont 1.6 pour son plan d'eau.



Vue oblique de la Marina (source : [www/bouregreg.com](http://www.bouregreg.com))



Les aménagements intérieurs du plan d'eau de la Marina permettent déjà l'amarrage de petites unités (source : [www/bouregreg.com](http://www.bouregreg.com))



Des pontons d'accostage en rive gauche pour de petites embarcations sont en place à l'embouchure du Bouregreg (source : Egis)



Un ponton flottant en bordure rive gauche de l'oued pour l'amarrage de petites unités (source : Egis)

4.5.3 Les infrastructures et travaux de protection du littoral

Depuis le lancement officiel du Projet Bouregreg le 7 janvier 2006, **les travaux d'aménagement ont d'abord porté sur la Séquence I, dénommée Bab Al Bahr**, et la Séquence II, Amwaj, dont les échéances de finalisation et de développement sont prévues pour 2012. Le Projet Bouregreg compte néanmoins 4 autres séquences appelées à connaître le même traitement dans le cadre d'une démarche globale et intégrée; certaines de ces séquences sont au stade d'étude relativement avancée.

La séquence qui intéresse particulièrement l'embouchure du Bouregreg correspond à la séquence Bab Al Bahr illustrée ci-après dont une partie des travaux a déjà été réalisée.

Figure 8 : Projet d'aménagement de l'embouchure du Bouregreg



Pour assurer une parfaite navigabilité du fleuve pour atteindre la Marina et les quais et débarcadères aménagés le long des berges (1,5 km), des travaux de dragage du chenal ont eu lieu au cours de l'été 2006. Ils permettent d'assurer un tirant d'eau maximum de 3 mètres. Ces profondeurs seront maintenues grâce à la réalisation de deux petites digues de calibrage à l'embouchure du Bouregreg et au confortement des digues d'embouchures existantes.

La plage de Rabat a vu le réaménagement en 2006 de sa plate forme d'accès et la construction d'une petite digue en contrebas des Oudayas appelée à stabiliser et à protéger le rivage. Le dragage de l'embouchure du fleuve a également permis le rechargement de la plage de Rabat avec plus de 50.000 m³ de sable de qualité.

4.6 Diagnostic de l'évolution du littoral

4.6.1 Analyse diachronique de l'évolution du trait de côte

Dans un estuaire à marée, trois facteurs interviennent pour faire évoluer les profondeurs et même le tracé en plan du lit de la rivière² :

- l'écoulement de la rivière,
- la propagation de la marée,
- la houle.

Dans leur étude de 2002, CID a examiné :

- le levé bathymétrique de 1906 sur lequel la commission des ports du Maroc avait esquissé en 1913 un projet d'endiguement et de dragage d'un cheval;
- le levé bathymétrique de 1945;
- le levé bathymétrique de 1955 au 1/2000;
- le levé bathymétrique de 1976 au 1/2000, couvrant l'embouchure de l'oued jusqu'au pont Moulay Hassan.

La comparaison de ces études a permis à CID de tirer les conclusions suivantes : « L'ensemble de la partie large de l'embouchure s'est fortement ensablé. La digue basse sud construite autour de 1926 a complètement disparu sous le sable; la courbe (0,00) est maintenant continue entre les deux digues extérieures. Si une petite fosse s'est maintenue à l'extrémité de la digue intérieure Nord, le chenal naturel est limité par un seuil à + 0,50 ».

Au cours de la période consécutive à la construction des jetées extérieures et intérieures pendant laquelle le port de Rabat a eu un certain essor (de 1926 à 1940), les ouvrages réalisés n'ont pas suffi à permettre la navigation et les profondeurs étaient maintenues par des dragages.

L'arrêt des dragages a provoqué un ensablement qui, dans la zone comprise entre l'embouchure et les quais du port, est principalement d'origine marine. La barre s'est surélevée et agrandie, les profondeurs dans le chenal et devant les quais ont diminué. Les berges de part et d'autre de celui-ci se sont surélevées sous l'influence non seulement des apports de sable mais également des apports de vase lors des crues de l'Oued. Ces **crues de l'Oued** avaient en effet plusieurs effets opposés. D'une part l'augmentation des vitesses de l'écoulement provoquait un approfondissement momentané du chenal ce qui était bénéfique, mais aussi un déplacement de celui-ci à travers la barre. Ce phénomène avait été surtout gênant pour la navigation avant la construction des digues, car il se traduisait par d'importants mouvements de sable dans l'embouchure. Mais d'autre part, comme les crues s'accompagnaient d'un important transport solide, des dépôts de vase et de sable fin d'origine fluviale devaient se produire dans les zones de faible vitesse, et spécialement sur les berges immergées pendant ces crues.

² Projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg – Etude hydraulique générale – Mission I – Collecte et analyse des données – CID- avril 2002

La construction du barrage en 1974, à environ 23 km à l'amont de l'embouchure, a réduit fortement les apports solides de l'Oued, donc les risques de dépôts signalés ci-dessus. Par contre, la diminution très importante du débit liquide et le laminage des crues provoqué par le barrage ont réduit l'effet bénéfique sur l'approfondissement du chenal que provoquaient ces crues.

Pour analyser le processus d'ensablement et déterminer l'origine des matériaux d'apport, des examens ont été effectués sur 9 puis 16 prélèvements effectués entre l'embouchure et légèrement en amont du pont Moulay Hassan entre 1974 et 1977. L'examen des résultats de ces analyses a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Tous les échantillons sont sableux, à l'exception de ceux prélevés au profil au droit du pont Hassan II;
- Le diamètre moyen D50 est compris pour les échantillons sableux entre 120µm et 300µm sauf pour un échantillon qui est plus grossier ;
- Un certain nombre d'échantillons sableux présentent une proportion non négligeable d'éléments plus grossiers, en général calcaire;
- Les courbes des échantillons sableux sont limitées vers les fines qui ont été éliminées en tamis de maille 50µm. Mais le pourcentage ainsi éliminé a été toujours inférieur à 3%

Ces analyses granulométriques semblent permettre de conclure que **le matériau constituant les fonds entre l'embouchure et le chenal devant les Oudayas est surtout d'origine marine.**

L'étude réalisée en 1977 sur l'aménagement de l'Oued Bouregreg par SOGREAH pour le compte de l'Arrondissement de Rabat du Ministère des Travaux Publics et des Communications signalait que **d'importants dragages d'entretien étaient effectués**. Le port disposait de deux dragues permanentes : une à godets, l'autre suceuse automotrice et de chalands à clapets. Malgré ces dragages importants le port n'était pas accessible toute l'année car la barre ne pouvait pas être draguée facilement lors du mauvais temps. La moyenne annuelle du nombre de jours de barre impraticable était de 97 jours pendant la décade 1919-1929 et a atteint 131 jours en 1929. L'activité du port s'était maintenue jusqu'en 1940. Mais depuis cette date, l'arrêt des dragages a provoqué un développement de la barre et un ensablement du chenal. Le dépouillement des plans bathymétriques récents montre que le niveau de la barre atteint la cote +0.80/ZH. Des campagnes de dragages d'entretien ont repris à partir de 1986. Les données collectées auprès de la Direction des Ports et du Domaine Public Maritime concernant ces nouvelles séries de dragage sont récapitulées ci-après :

Tableau 3 : Volume de sédiments dragués dans l'oued Bouregreg

Période	Volume global (m ³)	Volume moyen annuel (m ³)	Dragage au niveau barre (m ³)	Dragage au niveau chenal (m ³)	Cote de la barre / ZH (m)
1986-1989	820000	205000			
1996-1997	150000	75000			+0,50
1998-1999	234000	117000	100000	134000	+0,40
2000-2001	200000	100000			+0,80
2002	200000	223000	223000		0,00

D'après ce tableau 100.000 m³ ont été dragués en 1998-1999 au niveau de la barre. Ce volume a été comblé l'année suivante et même dépassé puisque la cote de la barre est remontée à +0,8 mZH. Il faudrait s'attendre à des **dragages supérieurs à 100.000 m³ pour l'entretien annuel des profondeurs au niveau du chenal.**

4.6.2 Analyse du littoral d'aujourd'hui

Le chenal creusé à -3.00m pour permettre l'accès à la Marina pourra être maintenu par des opérations de dragages d'entretien. Toutefois, **les volumes à draguer seront réduits** par l'aménagement des petites digues réalisées immédiatement au débouché de l'oued car elles vont permettre d'accroître les vitesses localement et réduire la pénétration de la houle dans l'embouchure. La cote d'arase suffisamment élevée de ces ouvrages devrait permettre également d'éviter leur franchissement par le sable de la plage de Rabat.

Ces aménagements ont été réalisés après test dans le modèle mathématique de l'estuaire afin d'examiner leur influence sur le franchissement de la barre d'embouchure. Les résultats des calculs effectués sur modèle mathématique confirment que la réalisation de deux digues insubmersibles permettrait, en canalisant le lit de l'oued, d'accroître les vitesses dans le chenal dragué à travers la barre et de maintenir un passage à travers celle-ci. Par ailleurs, il apparaît également que **le prolongement de la digue extérieure nord permettra de réduire les mouvements de sable provoqués par la houle sur la barre.**

On peut en conclure que les remaniements de fonds nécessitant des dragages d'entretien se produiront surtout pendant les marées de vives eaux et ne devraient pas se traduire par des évolutions brutales d'une section à l'autre. Cette étude a montré que l'ensemble des aménagements proposés entre le pont Hassan II et l'embouchure, n'aurait **pas d'influence défavorable sur les plages de Rabat et Salé :**

- En allongeant la digue extérieure nord, la houle se présentera sur la plage de Salé avec une énergie réduite et de ce fait les évolutions de cette plage devraient être nettement moins importantes. Il devrait même se produire un élargissement de l'estran, c'est-à-dire de la zone comprise entre la laisse de basse mer et le rivage, ceci par remontée vers cette zone des fonds constituant actuellement la barre.
- La surélévation de la digue intérieure nord évitera les échanges de matériau entre la plage de Salé et le lit de l'oued sous l'effet des courants de marée. Ceux-ci, à marée montante, étaient susceptibles en effet d'entraîner du sable dans le chenal. A marée descendante, en revanche, le sable transporté par le jusant pouvait se déposer en partie sur la plage et ces mouvements alternés provoquaient d'importantes évolutions de la plage. Après surélévation de la jetée intérieure nord, on devrait observer une certaine stabilisation de celle-ci.

4.7 Impacts des tempêtes sur l'évolution du littoral

Le phénomène d'origine météorologique le plus dangereux en bordure du littoral, et qui a un impact fort sur celui-ci, est principalement la marée de tempête. Strictement parlant, la marée de tempête est une montée exceptionnelle du niveau de la mer due à une « onde de tempête » s'ajoutant à la marée astronomique normale. **L'onde de tempête** (ou storm surge), également appelée « surcote », est une surélévation du niveau de la mer résultant de l'action conjuguée du vent et des basses pressions. A cette surcote se rajoute au rivage le « set up » qui correspond à la surélévation du niveau moyen du au déferlement des vagues puis le « run up » qui correspond à la montée de la vague le long de la plage et/ou des ouvrages, murs etc.

Les marégraphes implantés dans les ports marocains sont très récents, il n'est donc pas possible de disposer d'enregistrements de niveau d'eau associés à un phénomène tempétueux et donc encore moins de disposer d'une valeur de surcote pour différentes périodes de retour.

En bibliographie, **il est fait mention de surcote de 1m le long du rivage de Casablanca.**

4.8 Cartographie des risques en situation actuelle

4.8.1 Détermination des niveaux de risque

L'ultime étape de l'étude des risques consiste à déterminer le niveau de risque en croisant d'une part **l'aléa érosion et les sensibilités (enjeux)** et d'autre part **l'aléa submersion et les sensibilités (enjeux)**. Les résultats sont présentés sur les cartes ci-après.

Au niveau des aléas, devant un même enjeu, une seconde hiérarchisation a été considérée : l'effet de l'érosion augmentera le risque, plus que la submersion.

Avant de cartographier les zones à risque, **la valeur du risque** en fonction de l'aléa et des enjeux a été estimée. Le tableau ainsi réalisé donne des valeurs « théoriques » qu'il faut moduler et adapter au littoral de l'embouchure du Bouregreg. Comme cela a été mentionné précédemment, cette valeur du risque a été majorée pour l'aléa érosion et minorée dans les cas des submersions marines.

Tableau 4 : Valeurs "théoriques" du risque en fonction des aléas « érosion » et « submersion »

		Enjeux		
		<i>Faible</i>	<i>Moyen</i>	<i>Fort</i>
Érosion	<i>Faible</i>	Risque faible	Risque moyen	Risque moyen
	<i>Moyenne</i>	Risque faible	Risque fort	Risque fort
	<i>Forte</i>	Risque moyen	Risque fort	Risque fort
Effet de la submersion	<i>Faible</i>	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
	<i>Moyenne</i>	Risque faible	Risque moyen	Risque moyen
	<i>Forte</i>	Risque moyen	Risque moyen	Risque fort

Après une analyse globale des **enjeux socio-économiques et patrimoniaux** du littoral de l'embouchure du Bouregreg, il a été décidé de regrouper ces deux enjeux en une seule catégorie, car l'ampleur des enjeux patrimoniaux sur ce littoral ne justifiait pas de prendre ces derniers en compte au même niveau que les enjeux socio-économiques. En effet les descripteurs sur lesquels les enjeux patrimoniaux étaient évalués sont les suivants :

Zones réglementées
Inventaires scientifiques
Engagements internationaux
Zone de protection foncière
Forêts
Plages et dunes
Marais maritimes : Enganes, prés salés, vases, sables mouillés
Eaux continentales et lagunes
Paysage
Patrimoine historique – périmètre de protection

4.8.2 Évaluation du risque

4.8.2.1 Nature des zones sensibles sur les côtes de l'embouchure du Bouregreg

Les espaces et terrains à risque dans le périmètre d'étude sont variés et étendus: falaises, plages sableuses, zones basses.

- **Les falaises** : Elles ne présentent pas de vulnérabilité particulière si ce n'est une accélération relative de l'érosion des falaises.
- **Les plages sableuses** : Les plages sableuses, surtout lorsqu'elles sont bordées par des constructions de front de mer et encore sans ouvrages de protection doivent être considérées d'une **extrême vulnérabilité**. Quel que soit le scénario, ces plages, ou ce qui en reste, parce qu'elles sont en réalité déjà en cours d'érosion avec le niveau marin actuel, finiront par disparaître. Le rivage sera fixé par les constructions qui la bordent et dans lesquelles se concentreront les formes de dégradation.
- **Les zones basses** : elles correspondent aux débouchés en mer des oueds.

4.8.2.2 Analyse des enjeux et des aléas en situation actuelle

Aléa érosion à l'embouchure du Bouregreg

L'analyse des tendances évolutives des rivages de l'embouchure du Bouregreg issue de l'analyse diagnostic de l'évolution du littoral permet de définir la sensibilité du littoral à l'aléa érosion au regard des contraintes hydrosédimentaires.

Cet aléa est (cf. Figure 9) :

- **fort** sur la plage de Rabat compte tenu de sa largeur réduite et de l'évolution régressive décrite dans le temps,
- **moyen** sur la plage de Salé qui présente une plus grande largeur et une topographie plus marquée malgré également une évolution régressive dans le temps.

Aléa submersion marine

Lors d'une tempête associée à un haut niveau des eaux, le littoral peut être submergé par les eaux marines. En situation actuelle, la cote d'eau retenue pour un **évènement exceptionnel est de +2,65 m NGM** (voir **Tableau 5**) le long du rivage à l'embouchure de la vallée du Bouregreg.

Tableau 5 : Caractéristiques des niveaux d'eau

Secteur	Cote de la marée de VEE (m ZH)	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

VEE : Vive Eau Exceptionnelle.

- Effet sur les plages

La surcote marine à +2,65 m NGM conduirait à la submersion quasi totale de la plage de Rabat et partielle de la plage de Salé (cf. Figure 11). Mais cette submersion ne semble pas devoir affecter les équipements et l'urbanisation limitrophe des plages, sauf très ponctuellement si des équipements étaient installés sur la partie basse de la plage.

En conséquence, **l'aléa est considéré comme fort pour la plage de Rabat et moyen pour la plage de Salé** (cf. Figure 10). Le niveau d'eau pris en compte associée à une tempête entraînerait également une remontée du niveau des eaux jusqu'au barrage SMBA comme le montre la planche ci-après (cf. Figure 12). Cette remontée **pourrait entraîner une submersion de zones du lit majeur de l'oued Bouregreg**.

- Limites de l'analyse

La cartographie réalisée des zones inondées pour un niveau d'eau à +2,65 m NGM montre clairement les zones submersibles. Toutefois **les résultats doivent être regardés avec précaution**. En effet les données topographiques de la partie émergée des plages utilisées dans le MNT sont peu nombreuses. En conséquence, le MNT a été généré par interpolation sur des zones où la topographie n'existait pas. Cette interpolation induit des erreurs sur les résultats qui se traduisent sur les cartes par un manque de précision et/ou des aberrations.

Par ailleurs, lors de l'analyse de l'effet de la submersion marine sur le littoral, **il faut garder à l'esprit que la valeur du niveau d'eau extrême (+2,65 m NGM) est calculée avec le niveau de marée de vive eau exceptionnelle** (marée coefficient 120). Or un tel niveau ne se maintient

que durant une faible durée de la période de la marée haute (quelques dizaines de minutes à une heure environ) selon les conditions météorologiques.

Il faut également noter que les durées de tempêtes qui génèrent la surcote marine prise en compte (100 cm) sont probablement relativement courtes, environ une demi-journée à une journée au maximum. En conséquence la valeur de la surcote marine prise en compte est également limitée dans le temps. L'addition des différentes valeurs de niveaux d'eau « extrêmes » conduit donc à une valeur élevée mais limitée dans le temps. Cette valeur de surcote est néanmoins suffisante pour entraîner des dommages.

La cartographie générée par le SIG par comparaison des niveaux d'eau hors évènement exceptionnel et durant un évènement exceptionnel peut donc être considérée comme pessimiste en termes de résultats, car le temps de propagation de la surcote marine dans l'oued en particulier n'est pas connu au regard de l'évènement pris en compte, et la comparaison est uniquement une comparaison « topographique ». Et il est donc possible que, compte tenu des caractéristiques géométriques de l'oued et de la vitesse de propagation de l'onde de tempête dans le cours d'eau, la surface des zones impactées telles que représentées sur la Figure 12 soit différente de la réalité.



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 9
L'aléa érosion littoral de la vallée du Bouregreg en situation actuelle



Légende

Aléa érosion

-  Fort
-  Moyen
-  Faible



200

Mètres



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 10
L'aléa submersion littoral de la vallée du Bouregreg en situation actuelle

Légende

Aléa submersion

- Fort
- Moyen
- Faible



200

_____ Mètres



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 11
Aléa submersion
de l'embouchure du Bouregreg

Légende

- 2.65m NGM (Situation actuelle)
- 2.85m NGM (Horizon 2030)



100 Mètres



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT
CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES
NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES
D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 12
Zones de la vallée du Bouregreg impactées
par une surcote marine exceptionnelle
en situation actuelle et à l'horizon 2030

Légende

-  Secteurs inférieurs
à la cote 2.65m NGM
-  Secteurs inférieurs
à la cote 2.85m NGM



1 000
Mètres

4.8.2.3 La cartographie des risques

Les cartes de risque érosion et submersion en situation actuelle issues du croisement des enjeux littoraux et des aléas érosion et submersion sont reportées sur les figures ci-après.

Le risque érosion

La carte de risque érosion en situation actuelle (cf. Figure 14) est issue du **croisement** :

- de la **carte d'aléa érosion** (cf. Figure 9),
- de la **carte de sensibilités / enjeux** (cf. Figure 13) issue de l'analyse des composantes socioéconomiques et patrimoniales du littoral

L'analyse de la carte de risque érosion en situation actuelle montre que **le risque en situation actuelle est fort** sur les deux plages de l'embouchure de la vallée du Bouregreg.

Le risque submersion

La carte de risque submersion en situation actuelle (cf. Figure 15) est issue du **croisement** :

- de la **carte d'aléa submersion** (cf. Figure 10),
- de la **carte de sensibilités / enjeux** (cf. Figure 13) issue de l'analyse des composantes socioéconomiques et patrimoniales.

L'analyse de la carte de risque de submersion en situation actuelle montre que le risque est:

- **Fort** pour la plage de Rabat
- **Moyen** pour la plage de Salé.



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 13
Les enjeux littoraux de la vallée du Bouregreg en situation actuelle

Légende

Niveau de sensibilité

- Fort
- Moyen
- Faible



200

— Mètres



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRÉS NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 14
Le risque érosion littoral de la vallée du Bouregreg en situation actuelle

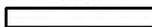
Légende

Risque érosion

-  Fort
-  Moyen
-  Faible



200

 Mètres



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 15
Le risque submersion littorale de la vallée du Bouregreg

Légende

Risque submersion

-  Fort
-  Moyen
-  Faible



200

Meters

5 Hydrologie et inondations

5.1 Études de référence

- 5.1.1 Projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg : Étude hydraulique générale – volets I à IV – Royaume du Maroc – SABR Aménagement – CID (avril 2002 à février 2003).

Cette étude hydraulique fournit les **éléments de référence pour le projet** : débit de la crue de référence prise en compte pour les aménagements, conditions aval.

Des **modélisations hydrauliques** ont été effectuées pour la situation actuelle avant aménagement, et pour étudier différentes solutions d'aménagement possibles pour permettre la mise hors d'eau des secteurs urbanisés prévus dans le projet. Des cartographies des zones inondables ont été effectuées pour la situation actuelle.

- 5.1.2 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.
- Mission III : étude des crues et caractérisation des séquences sèches.

L'étude de la Mission III comporte une **estimation des débits de pointe et des hydrogrammes des crues de projet** pour les oueds dépendant de l'Agence de bassin. Les estimations ont été pour la plupart faites au droit des barrages (existants et projetés), avec détermination de l'hydrogramme de crue entrant dans le barrage et de l'hydrogramme en sortie du barrage (incidence du laminage). Les débits ont été estimés pour les oueds jaugés et non jaugés.

Une analyse critique des différentes études ayant fait des estimations d'hydrogrammes de crue est effectuée, avec comparaison des résultats aux nouvelles estimations proposées, associées à une critique des données et des méthodes de calcul homogènes.

5.2 Méthodologie

L'aléa inondation dans la zone d'étude concerne le bassin versant de l'**Oued Bouregreg**.

La Figure 16 représente le réseau hydrographique de ces oueds, qui font partie de la zone hydrographique du Bouregreg et de la Chaouia.

5.3 Analyse de la situation actuelle

L'Oued Bouregreg a un bassin versant de 10130 km². Son estuaire est situé entre les villes de Rabat et Salé, et était soumis à un ensablement progressif important, avant la réalisation du **barrage SMBA**, mis en service en 1975 et situé à 23,3 km du débouché en mer.

Ce grand barrage est destiné principalement à l'alimentation en eau. De par sa superficie importante, il permet un **écrêtement important des crues de l'oued**. En 2005, sa surélévation a permis d'accroître son volume de stockage (1 milliard de m³), et sa capacité d'écêtement.

Le barrage SMBA contrôle 95,7% de la surface du bassin versant de l'oued Bouregreg. **L'oued Akrach** drainant un bassin versant de 264 km² conflue avec l'oued Bouregreg à l'aval du barrage SMBA.

Les **débits caractéristiques** de crue de l'oued Bouregreg en aval du barrage SMBA résultent de calculs de laminage de crue dans le barrage et d'hypothèses d'ouverture des différentes vannes de restitution. Les études pour l'aménagement de la vallée de l'oued Bouregreg ont défini les conditions à prendre en compte pour la crue centennale, qui est la crue de référence retenue :

- Pas de tranche d'écêtement spécifique pour les crues (cette hypothèse a été analysée, mais elle n'a pas été retenue pour la suite des études d'aménagement. Réserver une tranche d'écêtement pour les crues permettrait d'obtenir un débit aval moindre mais pénaliserait la ressource),
- Retenue du barrage à la cote normale 65m NGM,
- Vanne de vidange ouverte, vanne de vidange additionnelle ouverte, 1 vanne de l'évacuateur ouverte,
- La crue centennale en aval de l'oued Akrach est établie en supposant qu'il y a concomitance entre la crue centennale de l'oued Bouregreg et la crue centennale de l'oued Akrach non contrôlé par le barrage.

Les calculs d'écêtement de la crue centennale par le barrage SMBA ont été effectués pour différentes hypothèses d'ouverture de vannes, qui conditionnent fortement le niveau d'écêtement obtenu.

Le Tableau 6 fournit les résultats de débit de pointe en sortie du barrage pour la crue centennale (débit de pointe entrant 4906 m³/s), pour les différentes hypothèses d'ouverture de vannes. **La valeur de référence retenue dans les études d'aménagement est 1 903 m³/s.**

Tableau 6 : Débit de pointe en sortie du barrage SMBA pour la crue centennale pour différentes hypothèses d'ouverture des vannes

	Nombre de vannes de l'évacuateur ouvertes			
	1	2	3	4
	Vanne de vidange additionnelle ouverte / fermée (débit sortant en m ³ /s)			
Vanne de vidange fermée	1786 / 1560	2169 / 1933	2560 / 2313	2957 / 2703
Vanne de vidange ouverte	1903 / 1671	2290 / 2050	2685 / 2437	3089 / 2929

Le Tableau 7 fournit les valeurs des débits et volumes caractéristiques pour les **périodes de retour de 10 ans à 100 ans**, pour l'oued Bouregreg en entrée et en sortie du barrage SMBA, pour l'oued Akrach et pour la crue de référence de période de retour 100 ans en aval de la confluence.

Tableau 7 : Débits et volumes de crue caractéristiques pour l'oued Bouregreg

Bassin versant	Période de retour	Débit de pointe (m3/s)	Volume (Mm3)
Oued Bouregreg entrant dans barrage SMBA	10 ans	2258	231
	20 ans	3092	317
	50 ans	4139	424
	100 ans	4906	502
	1000 ans	7366	754
	10000 ans	9740	997
Oued Bouregreg sortant du barrage SMBA	10 ans	1246	
	20 ans	1423	
	50 ans	1689	
	100 ans	1903	
	1000 ans	2642	
	10000 ans	3322 (déversement)	
Oued Akrach	10 ans	120	6.7
	20 ans	180	10
	50 ans	260	15.5
	100 ans	320	17.9
	1000 ans	550	30.7
Oued Bouregreg en aval de l'oued Akrach	10 ans	1361	
	20 ans	1594	
	50 ans	1937	
	100 ans (crue de référence)	2223	

Remarque : l'étude de l'Agence de bassin réalisée en 2004 a fait une estimation des débits caractéristiques de l'oued Bouregreg. Cette étude aboutit à un débit centennal de 5 495 m3/s, soit supérieur d'environ 11%. Cet écart faible montre la cohérence des estimations avec les valeurs prises en compte, issue d'études antérieures, compte-tenu des incertitudes inhérentes à ce type d'estimation. Cette étude **propose de conserver la valeur de 4 906 m3/s comme débit centennal de référence pour l'oued Bouregreg.**

Une modélisation mathématique a été mise en œuvre pour déterminer **les zones inondables** en situation actuelle pour la crue de référence, en aval du barrage SMBA (Projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg – Étude hydraulique générale - Mission III). Les conditions aval prises en compte correspondent à une marée moyenne de vives eaux, avec une cote maximale de 1,13mNGM, une cote minimale de -1,27m NGM et une période de 12h25 minutes.

Pour la crue de référence (crue de période de retour 100 ans), les débordements sont généralisés et de nombreuses infrastructures sont inondées :

- Routes longeant l'oued en rive gauche et rive droite,
- Village d'Akrach,

- Station d'épuration d'El Youssoufia,
- Une partie du quartier industriel d'El Youssoufia, la route qui relie El Youssoufia à la voie de contournement,
- La zone industrielle située au pied de la voie ferrée, le complexe des potiers, la route le reliant à Sala El Jadida,
- le terrain de football côté Salé à l'aval du pont Moulay Al Hassan.

Les hauteurs d'eau obtenues dans les différents secteurs sont les suivantes :

- Dans la partie située en amont de la voie de contournement, les hauteurs d'eau sont généralement comprises entre 1 et 2m, avec des hauteurs d'eau allant ponctuellement jusqu'à 3,50m à l'amont immédiat de la voie de contournement,
- Dans la plaine, entre la voie de contournement et le pont ONCF, les hauteurs d'eau sont comprises entre 1m et 2,80m et ponctuellement supérieures à 3m en rive gauche.

La superficie totale des zones inondées en aval des gorges de l'oued Bouregreg est d'environ 1640 hectares. Aucun ouvrage de franchissement n'est submergé.

La Figure 17 extraite de la mission III de l'étude hydraulique fournit la délimitation des zones inondées et les hauteurs d'eau obtenues pour la crue centennale en situation actuelle. Le Tableau 8 fournit les superficies des zones inondées dans les différents secteurs.

Tableau 8 : Vallée du Bouregreg - Superficies des zones inondées pour la crue centennale en situation actuelle

Zone	Surface de zone inondée en crue centennale (hectares)	
	Rive gauche	Rive droite)
Zone C : de la sortie des gorges jusqu'à la voie de contournement	326	95
Zone B : Plaine	305	815
Zone A : Aval pont ONCF	22	77

Une étude plus ancienne (Étude de la propagation des ondes de lâchers d'eau et de submersion à l'aval du barrage SMBA, 1991 –CID-NEDECO pour la DRPE) avait déterminé les zones inondables pour les crues de période de retour 10, 50 et 100 ans. Les hypothèses de débit étaient différentes des hypothèses finalement retenues pour les aménagements du fait de la prise en compte de conditions différentes pour le barrage SMBA, avec des débits inférieurs (Q10 =881m³/s, Q50=1639 m³/s, Q100=1997 m³/s). Les indications fournies par cette étude sont néanmoins intéressantes pour les crues de période de retour 10 ans et 50 ans.

Les résultats obtenus fournissent les informations suivantes :

- Des débordements se produisent dans la partie amont dès la crue décennale, avec des remous importants causés par les ponts. Certaines infrastructures sont inondées (routes, stations d'épuration d'El Youssoufia), et une partie du quartier industriel d'El Youssoufia. Dans la partie aval, on n'obtient pas de débordement.
- Pour la crue cinquantennale, les niveaux d'eau s'accroissent et les inondations se généralisent : une surélévation de l'ordre de 1,20m à 1,80m par rapport à la crue décennale est obtenue (+1,50m dans la partie amont, +1,20m à +1,80m dans la plaine, +1,60m à +0,40m dans la partie aval). De nouvelles infrastructures sont inondées.

5.4 Conclusion

Des **études hydrauliques détaillées** ont été effectuées dans le cadre de l'étude du projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg. Ces études ont défini les hypothèses à prendre en compte pour la suite des études : 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.

6 Ressources et besoins en eau

Les études de référence relatives à cette section ainsi que l'analyse de la situation actuelle au regard de la ressource sont décrits dans le rapport commun. La présente section se concentre sur la situation actuelle au regard des besoins et de l'adéquation besoins/ressources.

6.1 Analyse de la situation actuelle au regard des besoins

6.1.1 Eau potable

Actuellement caractérisée par une très faible densité d'habitat (quelques douars en limite de zone) et la présence de quelques activités commerciales, la vallée du Bouregreg ne présente que de faibles besoins en eau potable. Par ailleurs, des données précises sur la consommation existante ne sont pas disponibles.

6.1.2 Agriculture

L'agriculture est sans conteste la principale source de consommation en eau de la vallée du Bouregreg. Les données afférentes ne sont cependant pas disponibles.

6.2 Adéquation besoins-ressources

Au regard de l'énorme capacité d'alimentation en eau du barrage du Bouregreg, **les besoins actuels sont largement couverts par la ressource.**

Chapitre 4 - 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.

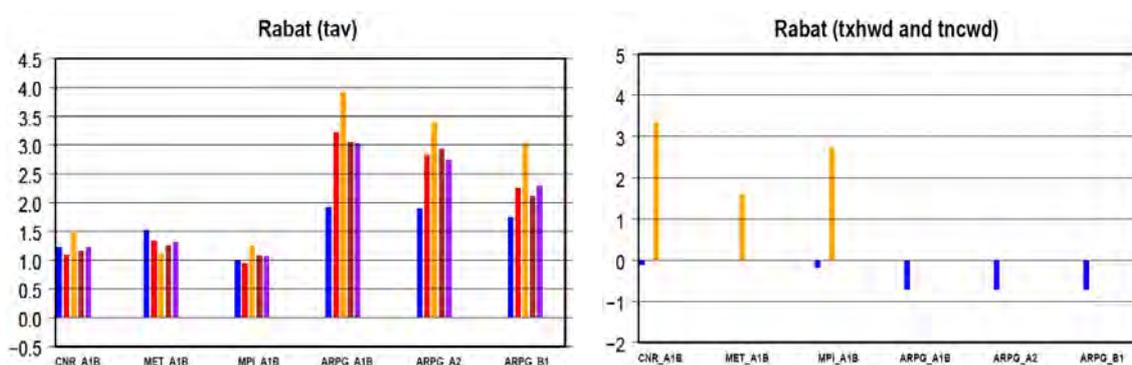
Références de l'étude : F. Driouech, R. Sebbari, A. Mokssit, A. Nmiri, M.I. OMAR , A. El-Hadidi, D. Bari, (2009) : Scénarios de changement climatique au niveau des villes côtières d'Afrique du nord : Alexandrie, Casablanca, Rabat et Tunis. Projet de la Banque Mondiale « Adaptation au changement climatique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

Les données et méthodologie de modélisation, les éléments généraux d'information concernant les projections futures de changement climatique ainsi que l'élévation des niveaux marins sont décrits dans le rapport commun. La présente section se concentre sur les résultats de ces réflexions pour le site du Bouregreg.

1.1 Projections futures de changement climatique pour Rabat

Les changements projetés par les différents-modèles scénarios pour les indices de changement climatique précités au niveau du site de Rabat sont présentés sur les Figure 18 à 22.

Figure 18 : Changements projetés, selon les différents modèles-scénarios, pour les températures moyennes saisonnières et annuelles (gauche, °C) et pour le nombre de jours de vagues de chaleur estivales et ceux des vagues de froid hivernales (droite).



Hiver : barres bleues, printemps : barres rouges, été : barres oranges, automne : barres marron, l'année : barres violettes.

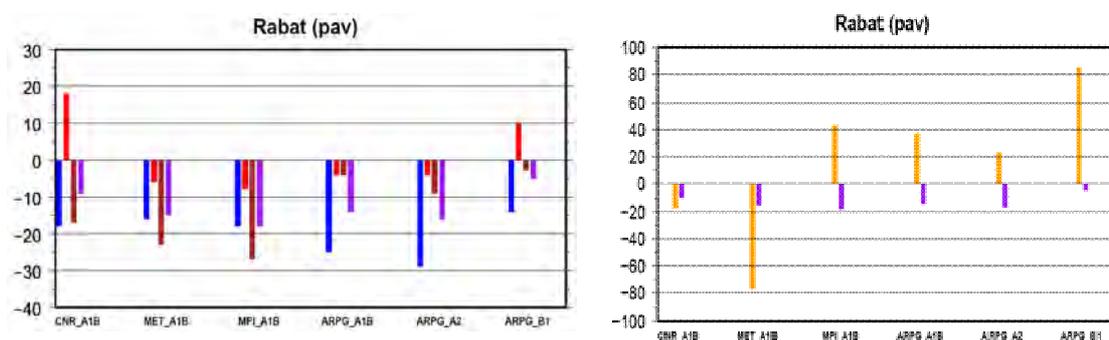
Les trois modèles régionaux (RCM) CNRM, METO-HC et MPI-M donnent une hausse de la température moyenne au niveau de Rabat de 1 à 1.5 °C pour les quatre saisons. Le modèle à résolution variable ARPEGE-Climat, dont les sorties ont été calibrées de la même manière que les RCM, élargit la fourchette à 4°C. Cette valeur est élevée et peu réaliste pour un horizon

aussi proche. Elle semble traduire un problème de calage ou une défaillance de la modélisation. Les sorties des trois modèles régionaux nous semblent plus conformes aux valeurs attendues.

En termes d'extrêmes thermiques, les trois RCM d'ENSEMBLES donnent une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur estivales pouvant dépasser 3 jours. Notons que le nombre annuel moyen de jours de vagues de chaleurs estivales observé (sur 1961-2008) est de 0,42 pour Rabat. Le nombre de jours de vagues de froids hivernales diminue selon la plupart des modèles-scénarios, mais avec de façon relativement faible.

Les cumuls pluviométriques diminuent en hiver de 14 à 29% et en automne de 3 à 37%. A l'échelle annuelle la baisse varie de -5 à -18%. Les modèles-scénarios ne donnent pas tous une diminution des cumuls pour le printemps ; 2 sur 6 modèles-scénarios projettent une augmentation (de 10 à 18%), les quatre autres donnent une diminution qui reste relativement faible (de 4 à 8%). Pour la saison estivale, qui correspond à la saison la plus sèche, rappelons que les variations ne portent que sur quelques millimètres de précipitations, et n'ont qu'une faible significativité statistique

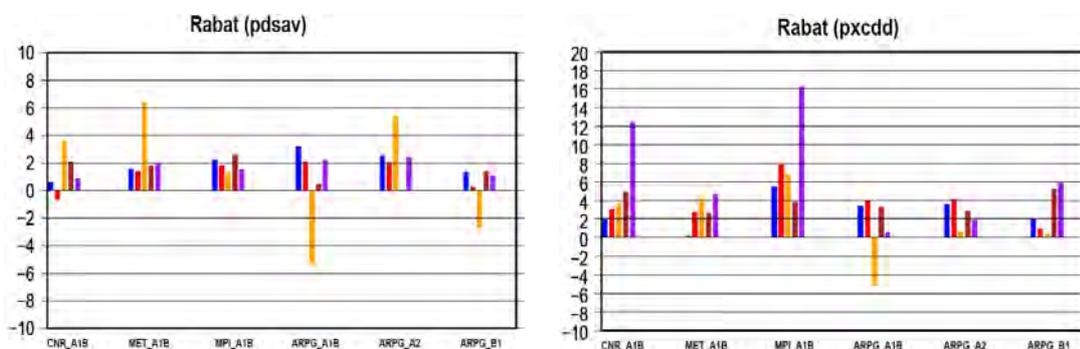
Figure 19 : Changements projetés, selon les différents modèles-scénarios, pour les précipitations moyennes saisonnières et annuelles (%).



Hiver : barres bleues, printemps : barres rouges, été : barres oranges, automne : barres marron, l'année : barres violettes.

En termes de sécheresse, tous les modèles-scénarios donnent un allongement dans le futur des périodes moyennes et maximales de jours consécutifs secs pour l'hiver et l'automne. Un seul modèle-scénario donne un signe négatif au changement de la période moyenne de sécheresse au printemps, mais qui n'atteint pas un raccourcissement de 1 jour. Les plus forts allongements intra saisonniers sont donnés pour la période maximale de sécheresse printanière (8 jours avec MPI_A1B). Le même sens de l'évolution des périodes maximale et moyenne de sécheresse est trouvé en hiver pour Rabat dans Driouech et al. (2009).

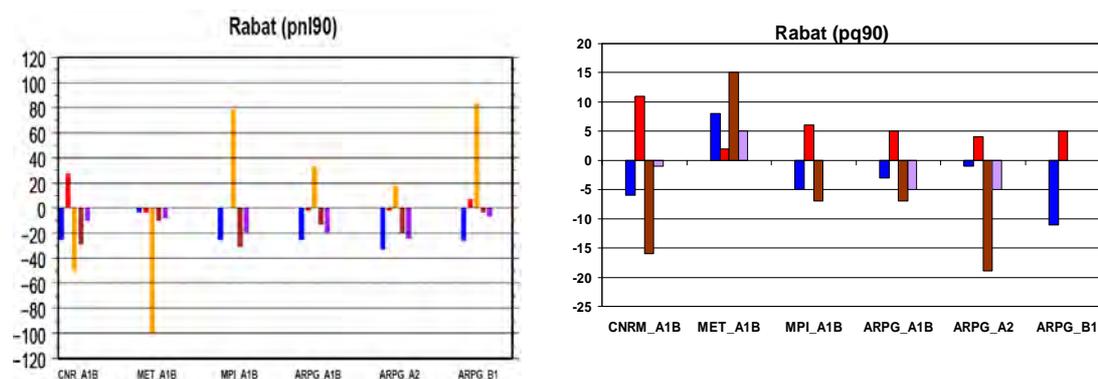
Figure 20 : Changements projetés, selon les différents modèles-scénarios, pour la période maximale (pxcdd) et moyenne (pdsav) de sécheresse pour les quatre saisons et pour l'année (jour).



Hiver : barres bleues, printemps : barres rouges, été : barres oranges, automne : barres marron, l'année : barres violettes.

L'évolution va dans le sens de la diminution du nombre d'évènements de fortes précipitations hivernales. Une large fourchette est donnée cependant par les modèles-scénarios (de -2 à -37%). La diminution concerne aussi la saison d'automne (-2 à -36%). Deux modèles-scénarios sur 6 donnent une augmentation du nombre d'évènements extrêmes au printemps (de 6 à 28%), le reste de l'ensemble ne donnent pas dévotion notable sinon une très légère baisse (-2%).

Figure 21 : Changements projetés (%), selon les différents modèles-scénarios, pour le nombre d'évènements de fortes précipitations (pnl90) et pour le 90ème centile (pq90).



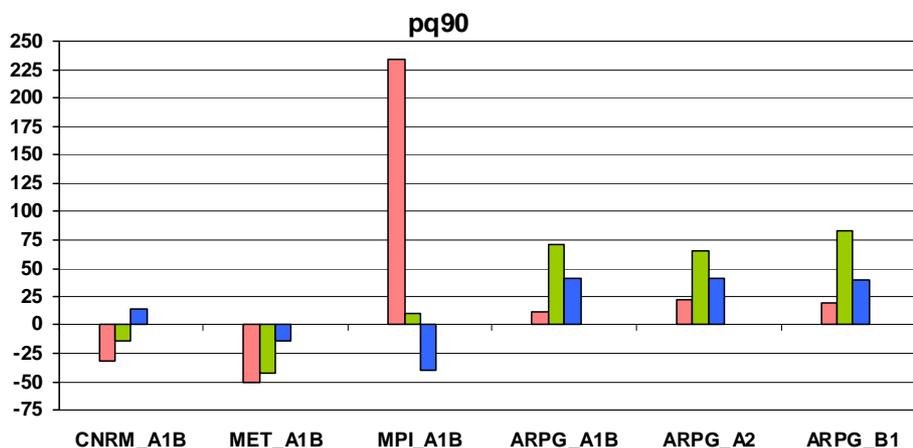
Hiver : barres bleues, printemps : barres rouges, été : barres oranges, automne : barres marron, l'année : barres violettes.

En termes d'amplitudes de fortes précipitations, le 90^{ème} centile diminue en hiver selon la plupart des modèles-scénarios, la baisse est comprise entre -1 et -11%. L'évolution au printemps obtient un consensus total, soit une augmentation de 2 à 11%. Pas de grand consensus pour le signe du changement en automne.

En été, les changements projetés pour les cumuls pluviométriques, les périodes de sécheresse et les fortes précipitations ne font pas apparaître un grand consensus entre les différents

modèles-scénarios. Les fortes augmentations ou diminution des cumuls pluviométriques de l'été sont à considérer en tenant compte de la faible pluviométrie que connaît cette saison.

Figure 22 : Changements projetés pour les cumuls pluviométriques par les différents modèles-scénarios au niveau des quatre villes de la zone d'étude pour le 90ème centile de la saison d'été (%).



Rose : Rabat; Vert : Casablanca; Bleu : Tunis. Aucun changement (non nul) n'est projeté pour Alexandrie.

Les résultats du test de Student appliqué aux températures moyennes quotidiennes issues de chacun des modèles-scénarios indiquent une significativité à 95 % des résultats pour chaque modèle-scénario. Il en va de même pour les précipitations, sauf pour Rabat avec ARPG_B1, non significatif sur la période automnale. Notons que même si dans la plupart des cas les différences entre le présent et le futur en termes de température moyenne et de précipitations sont statistiquement significatives (à 95%), le degré d'accord entre les modèles-scénarios sur le signe et l'amplitude du changement reste un critère important.

1.2 Développement spécifique concernant les événements extrêmes de fortes précipitations

Les événements extrêmes climatiques, tels que les sécheresses, les vagues de chaleur, les fortes précipitations, etc., suscitent un intérêt croissant de nos jours. **Par définition, les événements extrêmes sont rares**, mais ils se produisent. On doit donc se poser la question de savoir si les événements extrêmes, en particulier de précipitation, vont croître en fréquence et en amplitude. Les fortes précipitations et les inondations qu'elles peuvent provoquer sont des phénomènes peu fréquents mais causent parfois des dégâts importants au niveau matériel ou même humain.

Les événements extrêmes de précipitations peuvent être définis de différentes manières, en fixant un seuil donné, ou en utilisant la fonction de probabilité et en choisissant ceux dont la probabilité est inférieure à certains seuils tels que 10% ou 5%.

L'estimation de la fréquence d'un événement pluvieux peut être réalisée à l'aide de différentes approches. A partir d'une période d'observation de N années, 48 ans dans cette étude pour Rabat, **les maximums annuels des précipitations de 24 heures sont retenus dans cette étude**. Un modèle probabiliste est ensuite recherché pour décrire les fréquences de ces

données. Ce modèle est utilisé pour estimer la période de retour supérieure ou égale à une valeur fixe.

Dans la littérature, la modélisation des événements extrêmes de précipitation est mieux approchée par **la loi GEV** (Generalized Extreme Value). Cette loi permet la prise en compte des événements récents et le bon ajustement des événements rares (Overeem, 2009 ; <http://climatheque.meteo.fr/Docs/DRR2R-methode.pdf>). Dans cette étude, les maximums annuels de précipitations quotidiennes sont ajustés par une distribution GEV. Partant des séries observées, la détermination des durées de retour des phénomènes extrêmes consiste à calculer les valeurs du paramètre susceptibles d'être dépassées en moyenne une fois tous les 10, 20, 50 ou 100 ans. Signalons cependant que le calcul de quantités de précipitation pour des durées de 50 ans ou 100 ans pose généralement des problèmes méthodologiques dans le cadre d'un climat non stationnaire. **Les extrapolations au delà de 4 fois la longueur de la série sont peu fiables.**

Nous avons testé plusieurs lois pour le cas des précipitations journalières à Rabat pour déduire celle qui ajuste au mieux les événements extrêmes. Les résultats montrent que, selon les deux critères de Kolmogorov-Smirnov et Anderson Darling, la distribution GEV est meilleure pour modéliser les extrêmes quotidiens.

Tableau 9 : Qualité de l'ajustement de l'échantillon de Rabat avec les tests de Kolmogorov Smirnov et Anderson Darling

Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling	
	Statistique	Rang	Statistique	Rang
Gen. Extrême Value	0,11473	1	0,63572	1
Lognormal	0,12787	3	0,70477	2
Log-Pearson 3	0,12735	2	0,77767	3
Gumbel Max	0,13295	4	1,3489	4
Weibull	0,1543	5	3,2222	5

Le Tableau 10 montre, pour des durées de retour choisies, les amplitudes de précipitations observées correspondantes.

Tableau 10 : Précipitations quotidienne extrêmes observées (mm) à Rabat pour différentes périodes de retour.

	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Rabat	71 mm	83 mm	99 mm	112 mm
Intervalle de confiance (mm)	[61, 82]	[67, 98]	[74, 123]	[78, 145]

Pour différentes périodes de retour, les amplitudes de précipitations quotidiennes associées, avec l'intervalle de confiance correspondant à 95%, ont été calculées pour les

données issues des 6 modèles-scénarios (Voir Tableau ci-dessous). Ceci a été fait pour la période de référence 1961-2000 et pour le futur 2021-2050. Certains intervalles de confiance sont très larges, principalement pour les durées de retour de 50 et 100 ans ; ceci est indicatif de la grande incertitude de la valeur de précipitations correspondante.

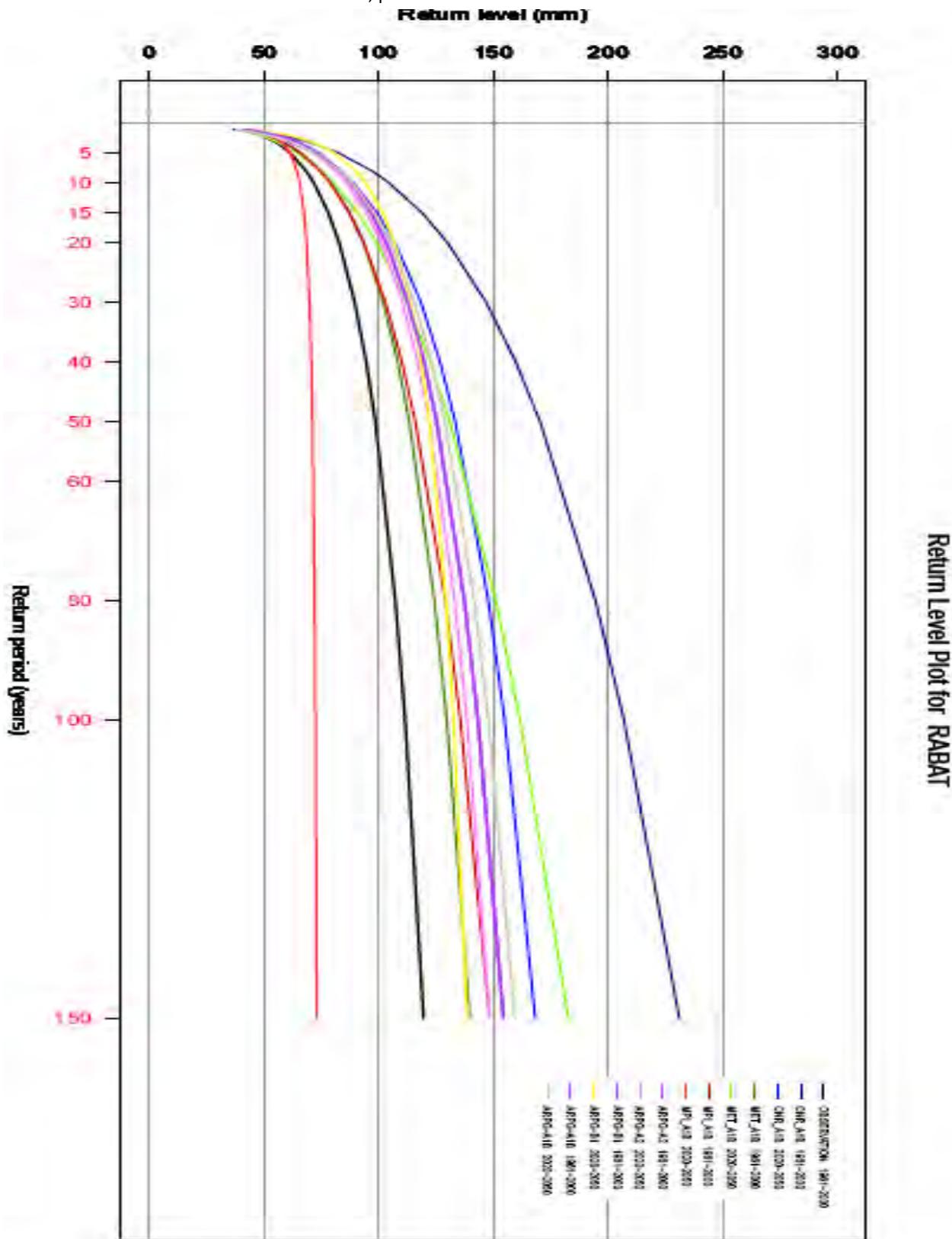
Tableau 11 : Précipitations quotidiennes extrêmes (mm) en fonction des périodes de retour (an) 10, 20, 50 et 100 ans, estimées avec la loi GEV, avec l'intervalle de confiance correspondant à 95%.

Période de retour avec intervalle de confiance à 95% →		10 []			20 []			50 []			100 []		
Rabat	1961-2008	71	61	82	83	67	98	99	74	123	112	78	145
CNR_A1B	1961-2000	103	75	131	129	80	179	170	73	266	207	57	357
CNR_A1B	2021-2050	88	64	112	107	68	145	133	65	202	155	55	255
MET_A1B	1961-2000	79	64	93	93	71	115	113	78	149	130	80	179
MET_A1B	2021-2050	79	57	101	99	61	136	131	59	202	161	51	272
MPI_A1B	1961-2000	78	63	93	93	70	116	116	76	156	136	78	193
MPI_A1B	2021-2050	66	61	70	69	64	73	71	66	77	73	66	80
ARPG_A2	1961-2000	87	71	104	103	78	128	125	84	167	143	85	202
ARPG_A2	2021-2050	85	65	106	101	67	135	122	62	182	138	51	226
ARPG_B1	1961-2000	87	71	104	103	78	128	125	84	167	143	85	202
ARPG_B1	2021-2050	94	76	111	107	82	131	122	82	162	133	79	186
ARPG_A1B	1961-2000	87	71	104	103	78	128	125	84	167	143	85	202
ARPG_A1B	2021-2050	87	65	110	105	67	143	129	60	197	148	48	248

Pour chaque période de retour, les colonnes correspondant à « [» représentent le bord inférieur de l'intervalle de confiance relatif à la valeur de précipitation de la colonne précédente, et celles correspondant à «] » représentent le bord supérieur.

Les graphes des figures suivantes présentent les différentes courbes de la distribution GEV pour l'observation et pour le climat actuel et futur simulés par les différents modèles-scénarios. Les changements des extrêmes pluviométriques relatifs aux périodes de retour 20, 50 ou 100 ans dépendent du modèle et du scénario. **Pour une période de retour donnée, certains modèles-scénarios donnent une augmentation des phénomènes extrêmes de précipitations, d'autres au contraire donnent plutôt une diminution.**

Figure 23 : Précipitations quotidiennes extrêmes (mm) en fonction des périodes de retour (an) pour l'observation (courbe noire) et pour le climat actuel (courbes claires) et futur (courbes foncées) issues des différents modèles-scénarios, pour Rabat.



Le tableau suivant montre pour une période de retour donnée, le pourcentage de **changement des amplitudes futures d'extrêmes par rapport à la période de référence**. Pour Rabat, et si on se fixe par exemple une durée de retour de 20 ans, 3 modèles-scénarios sur 6 prévoient une diminution de l'amplitude des événements extrêmes entre -26% et -2%.

Le raisonnement inverse qui consiste à se fixer une valeur d'extrême donnée et regarder les changements projetés pour la période de retour y correspondant, fait aboutir aux mêmes résultats : une **divergence entre les modèles-scénarios**. Notons aussi que les changements des périodes de retours des événements les moins intenses sont moins marqués que ceux des événements les plus forts.

Tableau 12 : Changement, en pourcentage, des précipitations quotidiennes extrêmes entre le présent (1961-2000) et le futur (2021-2050) correspondant aux différents modèles-scénarios et à différentes périodes de retour.

Période de retour en nombre d'années →		10	20	50	100
Ville	Modèle/scénario				
Rabat	CNR_A1B	-15	-18	-22	-25
	MET_A1B	1	6	15	25
	MPI_A1B	-16	-26	-38	-46
	ARPG_A2	-2	-2	-2	-3
	ARPG_B1	7	4	-2	-7
	ARPG_A1B	0	2	3	3

On trouvera dans le tableau suivant les **écart-types temporels des extrêmes quotidiens** pour le présent (1961-2000) et le futur (2021-2050) pour les 6 modèles-scénarios. Il n'y a **pas de consensus pour l'évolution des variances d'extrêmes**. Il faut savoir que **la modélisation des extrêmes est par nature associée à une marge d'erreur large**. Peu de valeurs sont utilisées pour estimer les paramètres de la distribution GEV. Par conséquent les résultats doivent être manipulés avec précaution pour les grandes périodes de retour.

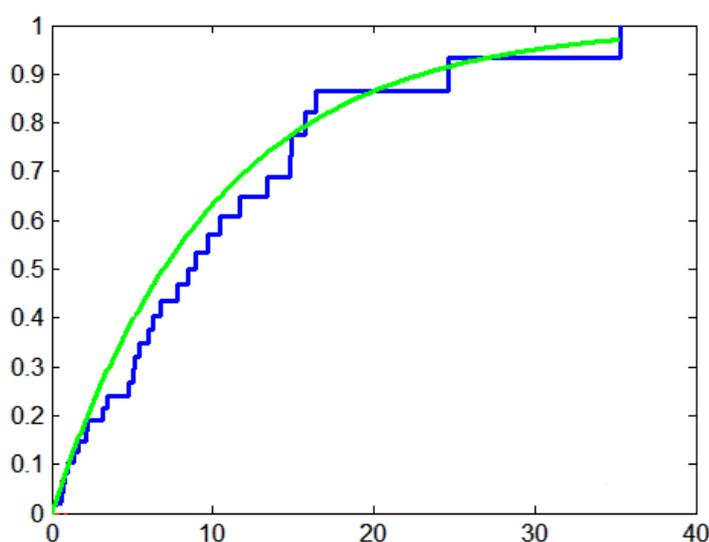
Tableau 13 : Écart-types d'extrêmes quotidiens de précipitation (mm) pour le présent (1961-2000) et le futur (2021-2050) selon les 6 modèles-scénarios.

Rabat	Présent	Future
CNR_A1B	31.4	28.1
MET_A1B	24.3	25.9
MPI_A1B	24.4	15.4
ARPG_A1B	25.3	26.9
ARPG_A2	25.3	25.2
ARPG_B1	25.3	27.9

1.3 Fonction de distribution cumulative

On se focalise pour cette partie sur la **distribution des précipitations annuelles** à travers la fonction de distribution cumulative (CDF). La CDF renseigne sur la probabilité d'avoir un cumul ne dépassant pas une valeur particulière. Une estimation de la CDF (ou fonction de distribution cumulative empirique) relative à une valeur (cumul) particulière est égale au **nombre d'observations inférieures ou égales à cette valeur rapporté au nombre totale d'observations**. La CDF d'une variable discontinue comme les précipitations est aussi discontinue. Le tracé de la CDF en fonctions des valeurs de précipitations est une courbe en escaliers de type celle représentée par la Figure 24 (courbe bleue). On obtient une courbe lissée en passant par exemple par une distribution normale de moyenne et écart-type égaux à celle de la série des précipitations (un exemple est donné sur la Figure 24, courbe verte).

Figure 24 : Exemple de courbes de CDF, pour une distribution discontinue quelconque (bleu) et pour une distribution normale (vert)



L'ajustement par une loi de type Lognormal, mieux adapté aux précipitations annuelles, permettra d'avoir des courbes CDF lissées. Cependant, pour ne pas alourdir la procédure, on se limitera au calcul des CDF sur les données brutes.

Le tableau 14 représente les **pourcentages de chance de dépasser différents seuils en cumul pluviométrique selon les 6 modèles-scénarios** pour la période de référence et le futur. L'analyse de ce tableau permet de retrouver une fois de plus l'incertitude entourant le sens de l'évolution à l'horizon 2030 des cumuls les plus élevés, et ce pour les quatre sites. Le manque de grand consensus entre les modèles-scénarios considérés dans cette étude s'affiche aussi pour les cumuls moyens. Selon les 6 modèles-scénarios, la probabilité d'avoir un cumul annuel supérieur à 100 mm diminue dans le futur à Rabat (de 10 à 20%).

Tableau 14 : Pourcentage de chance de dépasser les seuils de 300, 500 et 800 mm en cumul annuel selon les différents-modèles scénarios, pour le présent (1961-200) et le futur (2021-2050)

Rabat	1961-2000			2021-2050		
	300 mm	500 mm	800 mm	300 mm	500 mm	800 mm
CNR_A1B	82	45	15	70	50	13
MPI_A1B	95	52	7	83	37	3
MET_A1B	90	52	5	80	40	7
ARPG_A1B	90	60	15	77	33	13
ARPG_A2	90	60	15	70	37	3
ARPG_B1	90	60	15	80	50	10

1.4 Élargissement de la réflexion au bassin du Bouregreg

Un travail d'analyse similaire a été effectué sur les résultats des modèles climatiques régionaux pour les bassins versants des oueds affectant les zones d'étude. Le territoire considéré a été découpé en **16 mailles de 50km de côté**, et les résultats des modèles régionaux MET, MPI, CNR et ARPEGE ont été analysés pour le scénario A1B. Le territoire est celui de l'Agence de bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia.

L'analyse comparative a été effectuée sur les séries sorties des modèles, sans recalage avec la méthode quantile/quantile. En effet, d'une part, on ne dispose pas de séries de pluies journalières sur chaque maille alors que la variabilité de la pluie est élevée sur le bassin, d'autre part les séries de pluies journalières disponibles comportent fréquemment des lacunes.

Les paramètres analysés ont été :

- La pluie moyenne annuelle et saisonnière,
- La température moyenne,
- Les pluies extrêmes.

La Figure suivante fournit la position des 16 mailles pour lesquelles les résultats des modèles régionaux seront analysés.

Tableau 15 : Évolution des extrêmes des pluies maximales journalières annuelles sur le bassin du Bouregreg, entre la période actuelle et la période future (horizon 2030), pour différents modèles régionaux (scénario A1B)

Modèle	Période de retour	Variation de la pluie maximale journalière entre la période de référence et la période future					
		maille 15	Maille 8	maille 9	maille 10	maille 3	maille 4
METO	50ans	-2%	-15%	-38%	-37%	-20%	-28%
	10 ans	8%	-11%	-11%	-17%	-30%	-12%
	5 ans	9%	-9%	6%	-19%	-24%	-26%
MPI	50ans	-13%	-2%	-24%	3%	17%	13%
	10 ans	8%	-1%	-4%	11%	-14%	15%
	5 ans	8%	2%	7%	0%	0%	6%
CNRM	50ans	11%	17%	5%	10%	-11%	13%
	10 ans	19%	3%	9%	17%	2%	-15%
	5 ans	19%	7%	11%	7%	0%	2%
ARPEGE	50ans	11%	-32%	-2%	-26%	-32%	-26%
	10 ans	16%	5%	27%	-5%	1%	-5%
	5 ans	8%	19%	12%	3%	-5%	3%

Tableau 16 : Évolution des extrêmes des pluies maximales annuelles de durée 2 jours sur le bassin du Bouregreg, entre la période actuelle et la période future (horizon 2030), pour différents modèles régionaux (scénario A1B)

Modèle	Période de retour	Variation de la pluie maximale sur 2 jours entre la période de référence et la période future					
		maille 15	maille 8	maille 9	maille 10	maille 3	maille 4
METO	50ans	-11%	-36%	-44%	-42%	-9%	-10%
	10 ans	6%	-15%	7%	-25%	-34%	-36%
	5 ans	15%	-3%	0%	-7%	-20%	-16%
MPI	50ans	-18%	-13%	0%	5%	-5%	14%
	10 ans	21%	-8%	1%	-9%	-20%	13%
	5 ans	23%	-12%	8%	-5%	-14%	14%
CNRM	50ans	8%	28%	33%	3%	-12%	12%
	10 ans	17%	-10%	19%	33%	21%	-17%
	5 ans	16%	-2%	4%	7%	15%	-5%
ARPEGE	50ans	4%	-2%	-6%	-20%	-31%	-20%
	10 ans	-19%	-17%	-7%	-14%	31%	-14%
	5 ans	21%	14%	21%	1%	1%	1%

Pluies maximales journalières

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 entre -30% et $+27\%$ selon les modèles :

- le modèle CNRM prévoit une hausse de la pluie décennale sur toutes les mailles sauf pour la maille 4 (maille Sud-Est du bassin),
- le modèle MPI prévoit également une tendance à la hausse de la pluie décennale sauf pour les mailles 8, 9 et 3 (partie Sud-Ouest du bassin),
- le modèle METO prévoit une hausse pour le Nord du bassin (maille 15), et une baisse pour les autres mailles situées plus au Sud,
- Le modèle ARPEGE prévoit une hausse sur les mailles côté Ouest du bassin (mailles 15, 8, 9 et 3), et une baisse sur les mailles côté Est.

Globalement, **la tendance est par conséquent plutôt à la hausse de la pluie décennale sur les parties Nord et centrale du bassin, et plutôt à la baisse sur les mailles du Sud du bassin.**

Les résultats obtenus pour la période de retour 50 ans sont plus variables, avec cependant une tendance à la baisse qui semble s'accroître par rapport à ce qui est obtenu pour la pluie décennale. L'interprétation reste toutefois délicate, du fait de la courte durée des séries analysées (30 ans).

Pluies maximales de durée 2 jours

Les évolutions entre la situation actuelle et la situation future **varient entre -36% et $+33\%$, selon les modèles** :

- le modèle CNRM prévoit une hausse de la pluie décennale sur toutes les mailles sauf pour les mailles 4 et 8
- le modèle MPI prévoit également une tendance à la hausse de la pluie décennale sauf pour les mailles 8, 10 et 3,
- le modèle METO prévoit une hausse pour le Nord du bassin (maille 15), et pour la maille 9, et une baisse pour les autres mailles situées plus au Sud ou à l'Est,
- Le modèle ARPEGE prévoit une baisse sur toutes les mailles sauf pour la maille 3.

Les variations obtenues sont un peu différentes de celles obtenues pour la pluie journalière, avec une accentuation du comportement différent des parties Ouest et Est du bassin et un nombre de mailles plus important pour lesquelles on obtient une baisse (15 cas de baisse contre 12 pour la pluie journalière, pour les valeurs décennales).

Pour l'analyse de l'incidence du changement climatique, les hypothèses prises en compte correspondront aux résultats du modèle le plus pénalisant, le modèle CNRM.

1.5 Limites de l'analyse

Avant de clore ce chapitre sur l'évolution des tendances climatiques à l'horizon 2030, il convient de rappeler le **caractère exploratoire de la démarche** et les limites de l'analyse.

Il convient notamment d'aborder le **rôle de la variabilité naturelle dans les résultats**. Ce rôle peut être considéré comme dominant pour des horizons relativement proches, tels que 2030. A cet horizon, l'incertitude sur le scénario d'émission (A1B, A2, B1) n'est pas un vrai problème et ne joue que pour la fin du siècle. En revanche, sur 10 ou 20 ans, la planète est soumise à une variabilité climatique naturelle, apparemment essentiellement liée aux cycles d'éruptions solaires et des oscillations océaniques. Cela fait dire à certains chercheurs que, jusqu'en 2025, l'incertitude intrinsèque du climat est supérieure à celle des modèles climatiques, et que 2030 correspond au « sweet spot », soit l'horizon temporel présentant le maximum d'incertitudes.

Il faut également souligner que **les modèles climatiques sont encore peu fiables sur les projections d'évènements climatiques exceptionnels**, comme les précipitations extrêmes. Cela se reflète dans la grande variabilité des résultats obtenus pour ce type d'évènement par les couples modèles-scénarios étudiés. Cela justifie la grande prudence actuelle des climatologues sur la question de l'évolution des précipitations intenses ; c'est l'aléa pour lequel il est le plus difficile de travailler actuellement, car il s'agit de phénomènes à petite échelle, que même les modèles à 25 ou 50km ne reproduisent que très imparfaitement. Compte tenu de l'incertitude attachée à ces projections, dans le cadre de la présente étude, il a été jugé nécessaire de mettre en avant le principe de précaution, et de travailler sur les projections les plus pessimistes, tout en s'assurant de leur crédibilité (notamment par corrélation avec les séries de données observées). Ce « worst case » scénario peut être comparé à la situation climatique actuelle, qui peut être considérée comme un scénario climatique optimiste de stabilisation du climat à l'horizon 2030.

1.6 Conclusion

Les projections futures à l'horizon 2030 (2021-2050) ont été évaluées à l'aide des données de **descente d'échelle dynamique** issues de 3 modèles du projet européen ENSEMBLES avec le scénario A1B et du modèle de Météo-France ARPEGE-Climat avec les scénarios A1B, A2 et B1. Les changements sont calculés par rapport à la période de référence (1961-2000).

La température annuelle à **Rabat** augmente à l'horizon 2030 de 1 à 1.3 °C avec les trois modèles-scénarios d'ENSEMBLES mais de façon plus forte avec ARPEGE-Climat (2.3 à 3 °C). Les grandes valeurs affichées par ARPEGE-Climat restent cependant dans la marge de ce qui est projeté pour la zone méditerranéenne. Les extrêmes thermiques de vague de chaleur et de froid ne montrent pas de changements consensuels. Les cumuls pluviométriques diminuent de 14 à 29% en hiver, de 3 à 37% en automne et de 5 à 18 % à l'échelle annuelle. Ils sont accompagnés d'un allongement des périodes maximales et moyennes de jours consécutifs secs mais qui reste parfois faible (la fourchette de l'augmentation va de 1 à 5 jours pour l'hiver et l'automne et jusqu'à 8 jours au printemps).

Les extrêmes quotidiens (précipitations maximales sur 24h) n'évoluent pas non plus de la même façon pour tous les modèles-scénarios. L'incertitude concerne aussi bien les amplitudes que les périodes de retour et même la variabilité.

Sur le bassin du Bouregreg, 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 entre -30% et + 27% selon les modèles. Cette variabilité s'accroît encore pour la

période de retour 50 ans. A défaut, il est décidé, pour analyser l'incidence du changement climatique sur le bassin du Bouregreg, de considérer les résultats du modèle-scénario le plus pessimiste, soit CNRM_A1B, ne serait-ce que pour répondre au principe de précaution.

Les **fortes incertitudes** attachées à ces estimations devront néanmoins être gardées à l'esprit pour les analyses présentées ci-après. Ces analyses présentent toujours l'écart entre les résultats de ce scénario pessimiste et le scénario de stabilité.

2 Risques géologiques et sismiques

Les risques de mouvement de terrain, de séisme ou de tsunami sont **indépendants du processus de changement climatique en cours**. A l'horizon 2030, les aléas, tels que définis au Chapitre 3 précédent, ne seront donc pas significativement différents. Par contre, les vulnérabilités urbaines peuvent, elles, évoluer d'ici 20 ans. C'est donc au chapitre 5 suivant consacré à ces vulnérabilités que seront abordés les changements prévisibles entre la situation actuelle et la situation future au regard des risques géologiques et sismiques.

3 Érosion côtière et submersion marine

Les informations relatives aux effets du changement climatique sur l'élévation des niveaux marins ainsi que les projections du niveau marin pour le XXI siècle à l'échelle globale et régionale sont présentées dans le rapport commun.

La présente section se concentre sur l'évolution des conditions océanographiques et sédimentologiques à l'échéance 2030 pour le site de Bouregreg.

3.1 Évolution des conditions océanographiques et sédimentologiques

3.1.1 Effet sur la marée

Sur le littoral de Rabat, les effets des changements du climat sur la marée ne devraient **pas entraîner de modifications significatives** sur les caractéristiques de la marée compte tenu de la bathymétrie importante.

3.1.2 Effet sur les houles

Les variations de la houle sur le littoral de Rabat lié au changement climatique devraient être très faibles voire nulles en l'absence de plateau continental. En effet, la bathymétrie ne se fait sentir sur la propagation des houles que très près des côtes.

Devant Rabat, la valeur de la surcote a été estimée à +1m sur la base des rares données bibliographiques ; cette valeur étant par ailleurs largement supérieure à celle actuellement retenue par les services maritimes locaux puisqu'elle est comprise entre 0,5 et 0,7 m.

Si l'on se réfère à la méthodologie utilisée par l'IHEE (2008) à Tunis pour déterminer l'incidence du changement climatique à l'horizon 2100 sur la valeur de la surcote et au résultat obtenu, il apparaît que la variation de niveau sera en fait très faible sur la période 2010-2030 : de l'ordre du centimètre. En conséquence, il est possible de considérer que la valeur de surcote prise de +1m en situation actuelle, compte tenu de la marge d'erreur, intègre le centimètre voire les deux

centimètres qui pourraient être à prendre en compte en plus à l'horizon 2030. Ce résultat conduit à proposer le tableau suivant pour le niveau d'eau extrême en 2030 à Rabat.

Tableau 17 : Caractéristiques des niveaux d'eau

Secteur	Cote de la marée de VEE (m ZH)	Surcote (m)	Niveau extrême actuel proposé (m ZH)	Élévation du niveau des eaux en 2030 (m)	Différence entre le 0 ZH et le 0 NGM	Niveau extrême actuel proposé (m NGM)
Rabat	+3,79	1,00	+4,79	0,20	+2,14	+ 2,85

VEE : Vive Eau Exceptionnelle.

3.1.3 Effets sur la sédimentologie marine

La surélévation du niveau des eaux n'aura **probablement que très peu voire pas du tout d'incidence sur la quantité de matériaux non cohésifs (sables) apportés par l'oued Bouregreg au rivage**. En effet, même si le changement de climatologie favorisait un accroissement des précipitations et une augmentation de fréquence des crues, à Rabat le barrage SMBA situé en amont continuera à bloquer la majorité du transport des matériaux non cohésifs. Le lessivage des terres à l'aval des barrages pourrait apporter un peu plus de matériaux mais ces apports seront peu significatifs en première approximation et ce d'autant que la vallée doit être aménagée.

Au niveau du rivage proprement dit, la surélévation du niveau des eaux n'entraînera aucune modification dans la nature des sédiments qui tapissent actuellement les fonds marins à l'embouchure de la vallée du Bouregreg.

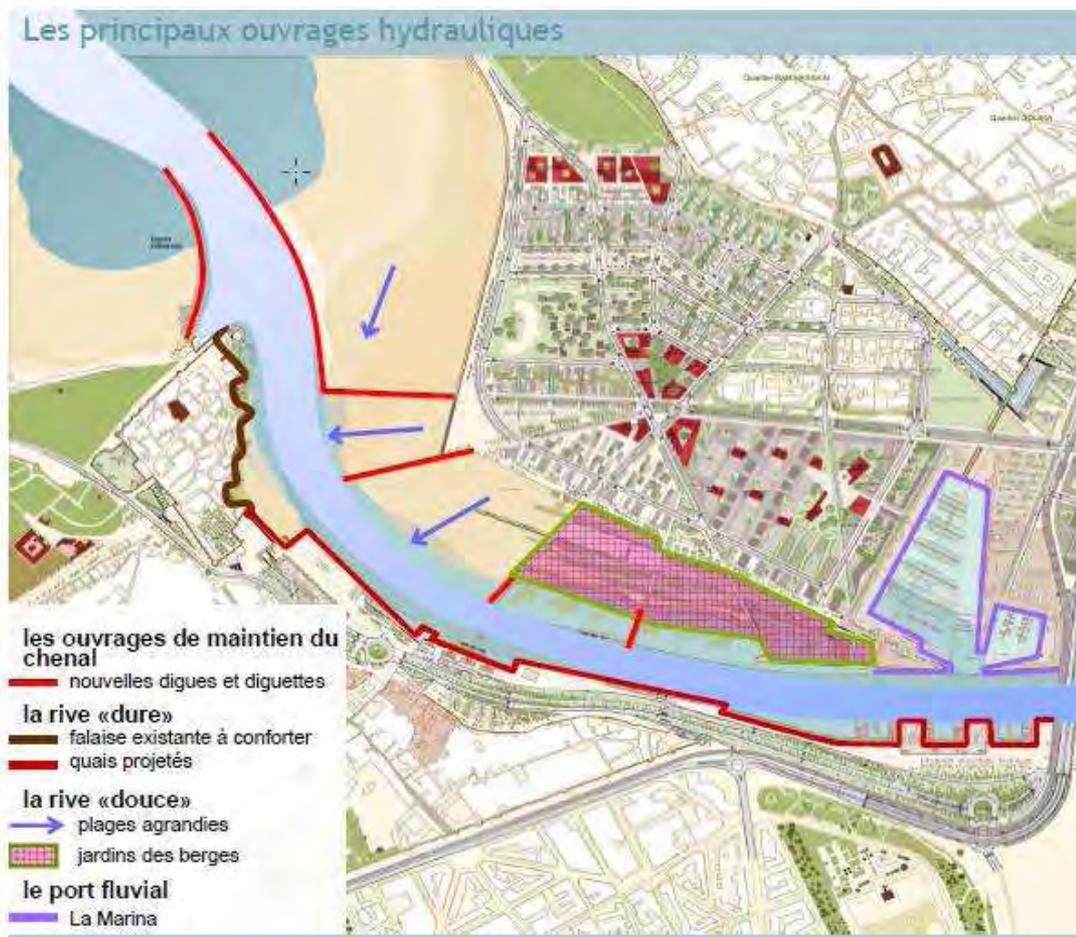
3.2 Projets d'aménagement du littoral

Dans le cadre de l'aménagement de la vallée du Bouregreg par **l'Agence pour l'aménagement de la vallée du Bouregreg**, établissement public doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière et placé sous la tutelle de l'État, une des six séquences d'aménagement dénommée **Bab Al Bahr** porte sur la partie aval de l'oued. Dans le cadre de cette séquence, il est projeté un certain nombre de travaux à l'embouchure de l'oued qui sont illustrés ci-après :

- création d'un port de pêche,
- création d'un port au pied des Oudayas,
- création d'une Marina en rive droite,
- création de petites digues à l'embouchure de l'oued,
- allongement de la grande digue nord,
- aménagement de quai en rive gauche de l'oued,
- etc.

A ce jour ces travaux sont avancés voire terminés : petites digues au débouché de l'oued, quai le long de la rive gauche, Marina, brise-lames du port de pêche.

Figure 26 : Principaux ouvrages hydrauliques de la section aval du Bouregreg



Infrastructures HYDRAULIQUES

.....Équipement rehaussant la valeur du site et du foncier

CHENAL

Navigabilité



Calibrage

- Afin d'assurer une parfaite navigabilité du fleuve, des travaux de dragage du chenal ont eu lieu depuis l'été 2006. Ils permettront d'assurer un tirant d'eau minimum de 3 mètres.
- Ces profondeurs seront maintenues grâce aux travaux de recalibrage du fleuve (épis, diguettes, ...) et au confortement des digues d'embouchure existantes.

DRAGAGE	Près de 800.000 m ³ dragués
DIGUES	940 blocs cubes de 12,5 m ³
DIGUETTES	831 m de diguettes finalisés

Infrastructures HYDRAULIQUES

.....Équipement rehaussant la valeur du site et du foncier

Quais de

RABAT



VUE AERIENNE SUR LES QUAIS RIVE GAUCHE

- D'une longueur totale de près de 1,3 kilomètres, les quais et débarcadères de Rabat ont été livrés au public en Juin 2008.
- La rive de Rabat est ainsi équipée de points d'amarrage pour les vedettes et bateaux de grande taille et abritera des cafés, des restaurants sur pilotis ainsi que des débarcadères sécurisés pour les barcassiers.
- La réalisation de tous ces aménagements à l'embouchure du Bouregreg forme, avec le port de plaisance, un ensemble portuaire et nautique intégré.

Infrastructures HYDRAULIQUESÉquipement rehaussant la valeur du site et du foncier

BOUREGREG MARINA



1. Dotée d'une capacité de 250 anneaux extensible à 350 anneaux à horizon 2010.
2. Le port peut accueillir des bateaux de plaisance d'un tirant d'eau de 2 à 4 mètres et d'une longueur allant jusqu'à 40 mètres.
3. La marina sera bordée d'espaces de restauration, d'animation et de loisirs, ainsi que d'un front résidentiel et hôtelier adossé à la Cité des Arts et Métiers.
4. Dès la mise en service du nouveau pont Moulay El Hassan, une extension de ce port de plaisance sera réalisée sur une superficie de 3 hectares, dont 1,6 pour son plan d'eau.



VUE PANORAMIQUE DE LA MARINA DU BOUREGREG



Infrastructures HYDRAULIQUES





LOCALISATION ET DESCRIPTIF

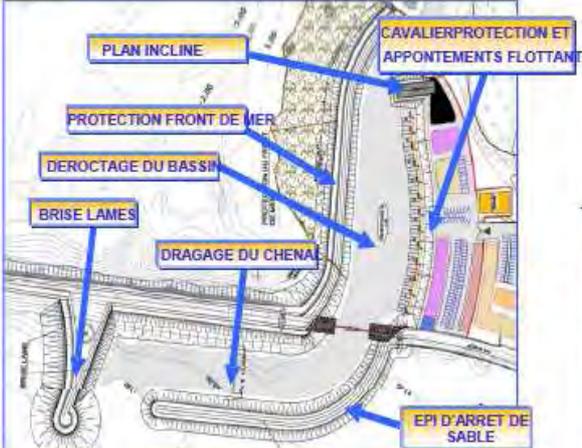
- ▶ Le port se situe derrière la digue Nord (digue de Salé) à l'embouchure du fleuve.
- ▶ un bassin de près 1 Ha isolé de l'océan par un cavalier extérieur et doté d'un chenal d'accès intérieur protégé par un brise lame. Le port de pêche est équipé d'appontements flottants pouvant accueillir plus de 130 barques de pêcheurs.

CADRE JURIDIQUE ET INSTITUTIONNEL

- ▶ La réalisation s'inscrit dans le cadre d'un partenariat tripartite entre l'Agence, le Département de la Pêche et l'Office National des Pêches
- ▶ Infrastructures réalisées par l'AAVB et superstructures réalisées en partie par le Département de la Pêches et l'ONP (locaux administration, halles aux poissons, entrepôts frigorifiques...)

▶ PORT DE PÊCHE

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES



▶ Cavalier de protection	210 mètres
▶ Protection du front de mer	240 mètres
▶ Brise Lame	160 mètres
▶ Epi d'arrêt de sable	250 mètres
▶ Appontement flottant	144 mètres

ETAT D' AVANCEMENT

▶ PROTECTION FRONT DE MER

▶ EPI D' ARRET DE SABLE

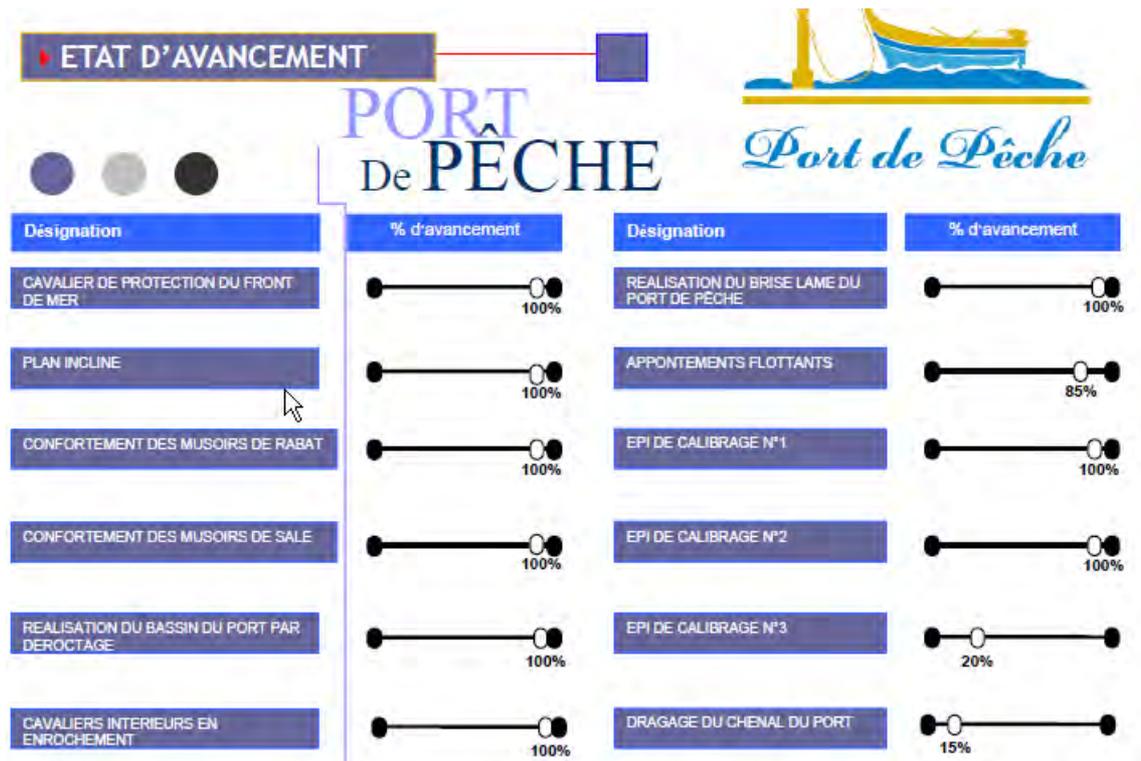
▶ DEROCTAGE DU BASSIN

▶ BRISE LAME



INTEVENANTS

- ▶ Construction des infrastructures confiée à SOGEA MAROC
- ▶ Ingénierie et Maîtrise d'œuvre confiée au groupement CID - SOGREAH
- ▶ Dragage assuré par DRAPOR

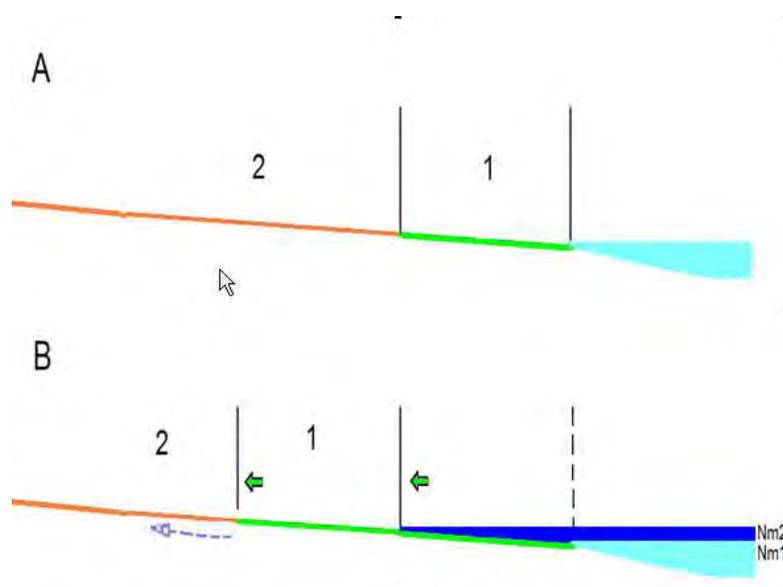


3.3 Impacts prévisibles sur l'érosion côtière

3.3.1 Détermination de l'effet de l'élévation du niveau des eaux

Les plages représentent une part importante du linéaire de côte et ce sont des formes sensibles à une élévation du niveau des eaux. En effet, une **élévation du niveau de la mer sur une plage en équilibre sédimentaire déclenche une érosion et un recul du trait de côte**. Les sédiments qui sont enlevés sur la plage se déposent sur l'avant plage avec une épaisseur qui compense l'élévation du niveau de la mer.

Figure 27 : Effet de la remontée du niveau des eaux en l'absence d'obstacles sur le haut de plage³



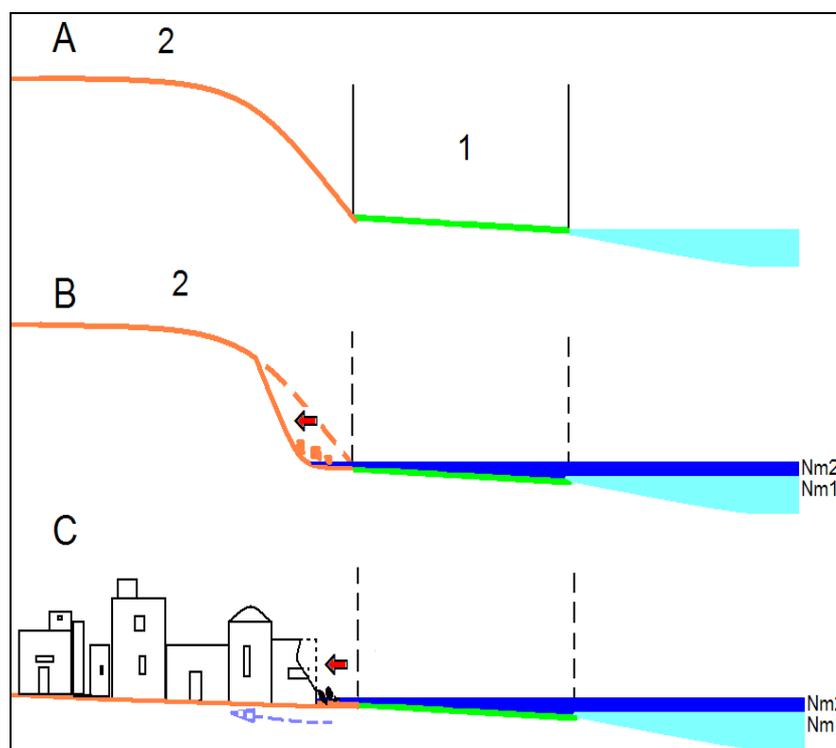
A-avant la submersion ; B-après la submersion.

1-terrain submersible ; 2-terres basses

La flèche pleine indique le sens de la migration du système côtier et la flèche discontinue indique l'intrusion des eaux marines et la progression de la salinisation

Lorsqu'il existe une urbanisation en bordure du littoral, la migration de la plage s'avère impossible. Et cela rend alors ces « obstacles » très sensibles à la surélévation ; ils deviennent donc très vulnérables. Et par ailleurs ils participent à l'accélération de l'érosion de la plage située en avant.

³ In Étude de la vulnérabilité environnementale et socio-économique du littoral tunisien face à une élévation accélérée des niveaux de la mer dues aux changements climatiques et identification d'une stratégie d'adaptation – Rapport de la phase III –janvier 2008 - Direction Générale de l'Environnement et de la qualité de la vie – Ministère de l'environnement et du développement durable.

Figure 28 : Effet de la remontée du niveau des eaux en présence d'obstacles sur le haut de plage²⁷

A-avant la submersion ; B et C- après la submersion dans un terrain non occupé et dans un terrain occupé.

1-terrain submersible ; 2-terrain accidenté ou occupé par des constructions en dur

La flèche pleine indique le sens de la migration du système côtier

La flèche discontinue indique l'intrusion des eaux marines et la progression de la salinisation

L'élévation du niveau de la mer se traduit théoriquement par un recul de la ligne de rivage, donc par une perte nette de la surface émergée. En connaissant localement la profondeur limite de l'action des vagues, le profil de plage et en imposant l'élévation du niveau de la mer, il est possible de chiffrer ce recul grâce à la règle de Bruun⁴ :

$$R = \frac{L_*}{B + H_*} S$$

Avec :

R=retrait de la ligne de rivage

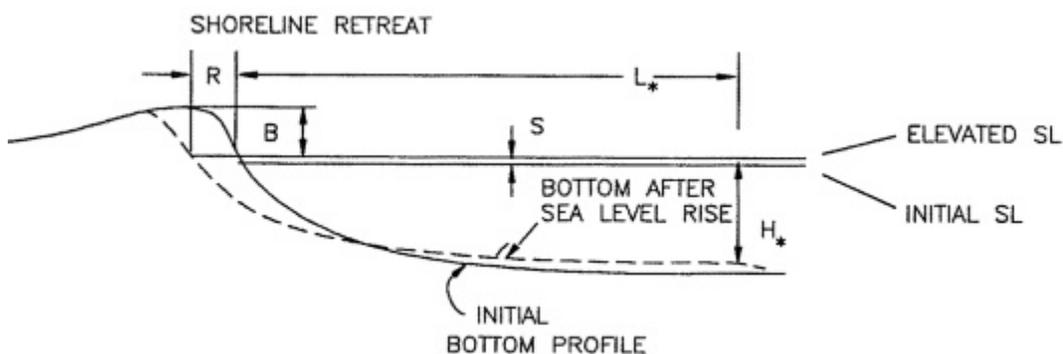
S= accroissement du niveau des eaux,

L* = distance du rivage à la profondeur H* (H* = profondeur limite d'action des houles),

B= hauteur de la berme dans la zone érodée.

⁴ Bruun, P. 1988. "The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion of Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usages," *Journal of Coastal Research*, Vol 4, pp 627-648

Figure 29 : Réponse de la ligne de rivage à une élévation du niveau des eaux d'après la règle de Bruun



Bien que la règle de Bruun soit issue d'une formule bidimensionnelle qui ne tient pas compte de tous les paramètres hydrodynamiques, elle peut permettre de prédire le retrait du trait de côte des littoraux jugés stables et instables. **Ainsi le calcul du retrait du trait de côte selon la formule de Bruun pour une surélévation du niveau des eaux de 20 cm montre que**, en fonction des conditions hydrodynamiques locales (amplitude et période de la houle selon le secteur du rivage : la profondeur limite d'action de la houle significative de l'ordre de 7,5m pour une houle de 3,4m avec une probabilité d'occurrence de 10% se situe en moyenne à 500m du rivage) retenues (période de retour annuelle, décennale etc.) et la morphologie du fond selon le secteur (pentes des fonds : prise égale à 1% en l'absence de bathymétrie précise) **pourrait subir théoriquement, d'ici l'an 2030, un retrait moyen compris entre 10 et 15 mètres sur la période, soit 0,5 à 1m par an.**

Il est important de signaler que les côtes en cours d'érosion et les côtes basses à pente faible sont et resteront les zones les plus fragilisées du littoral.

3.3.2 Effet de l'élévation du niveau des eaux sur l'érosion

L'analyse des tendances évolutives des plages de Rabat et de Salé au regard des aménagements prévus à Bab Al Bahr permet d'estimer la sensibilité du littoral à **l'aléa érosion** au regard des contraintes hydrosédimentaires comme **faible** (cf. Figure 30) compte tenu de la réalisation très enveloppante de la digue nord.



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 30
L'aléa érosion littoral de la vallée du Bouregreg à l'horizon 2030

Légende

Niveau d'aléa

- Fort
- Moyen
- Faible
- Aménagement programmé



200

— Mètres

3.4 Impacts prévisibles sur la submersion marine

3.4.1 Rappel sur les surcotes à considérer

Les valeurs de niveau d'eau prise en compte dans l'analyse de l'effet de la submersion sont reportées dans les tableaux qui suivent.

Afin d'essayer d'évaluer **l'effet de la surcote d'une tempête exceptionnelle**, une hauteur d'eau de 20 cm a été rajoutée aux valeurs retenues initialement.

Tableau 18 : Niveau d'eau en situation actuelle et future (2030) sans évènement exceptionnel sur Rabat

Rabat	Niveau d'eau (ZH)
Situation actuelle sans évènement exceptionnel	+ 3,79
Situation 2030 sans évènement exceptionnel	+ 3,99

Cela conduit aux valeurs suivantes :

Tableau 19 : Caractéristiques des niveaux d'eau en tenant compte d'un évènement exceptionnel

Secteur	Cote de la marée de VEE (m ZH)	Surcote (m)	Niveau extrême actuel proposé (m ZH)	Différence entre le 0 ZH et le 0 NGM	Niveau extrême actuel proposé (m NGM)
Rabat	+3,99	1,00	+4,99	+2,14	+ 2,85

VEE : Vive Eau Exceptionnelle.

3.4.2 Les effets de la submersion marine

3.4.2.1 Situation sans évènement exceptionnel (tempête)

L'absence de données topographiques très précises sur ces zones de plage ne permet pas de conclure à l'effet de 20 cm de l'élévation du niveau de la mer (+1,85 m NGM) par rapport à la limite haute des eaux en situation actuelle (+1,65 m NGM). En fonction de la pente de la plage émergée actuelle, on observera un **léger recul de la laisse de mer** se traduisant par une petite réduction de superficie de plage disponible. Mais cet impact sera réduit.

3.4.2.2 Situation avec un évènement exceptionnel (tempêtes)

La surcote marine à +2,85 m NGM à l'horizon 2030 conduit comme pour la situation actuelle à la submersion partielle ou totale de l'ensemble du linéaire des plages de Rabat et Salé (cf. Figure 11). Mais **cette submersion ne devrait pas affecter les équipements et l'urbanisation limitrophe des plages**, sauf très ponctuellement si des équipements étaient installés sur la partie basse de la plage. Par ailleurs, il faut noter que ces éléments de niveau

d'eau futurs sont très pessimistes à l'horizon 2030 par rapport à la situation à l'embouchure de la **vallée du Bouregreg**. En effet dans la surcote de 1m considérée, il est pris en compte l'effet du set up (effet de surélévation lié *sensu stricto* à la houle) sur le niveau d'eau. Or la réalisation des digues envisagées dans le projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg supprimera quasiment l'effet du « set up », il ne restera plus que l'effet de la pression atmosphérique. En conséquence la surélévation du niveau des eaux sera très certainement moindre de quelques dizaines de centimètres. De fait, **l'aléa submersion peut être considéré comme moyen pour la plage de Rabat et faible pour la plage de Salé**.

Le niveau d'eau pris en compte à l'horizon 2030 associé à une tempête entrainerait également une remontée du niveau des eaux jusqu'au barrage SMBA comme le montre la Figure 12. Cette remontée pourrait entrainer une **submersion de zones du lit majeur de l'oued Bouregreg** ; cette submersion pouvant être ponctuellement importante en termes de superficie.

La superficie de terrain supplémentaire impactée à l'horizon 2030 par rapport à la situation actuelle est **de l'ordre de 105 hectares** lorsque les cartes de submersion sont comparées entre elles. Celle-ci se répartit le long du cours d'eau.

3.4.2.3 Limites de l'analyse

La cartographie réalisée des zones inondées pour un niveau d'eau à +2,85 m NGM montre clairement les zones submersibles. Toutefois **les résultats doivent être regardés avec précaution**. En effet les données topographiques de la partie émergée des plages utilisées dans le MNT sont peu nombreuses. En conséquence, le MNT a été généré par interpolation sur des zones où la topographie n'existait pas. Cette interpolation induit des erreurs sur les résultats qui se traduisent sur les cartes par un manque de précision et/ou des manques ou des aberrations.

Par ailleurs, lors de l'analyse de l'effet de la submersion marine sur le littoral, **il faut garder à l'esprit que la valeur du niveau d'eau extrême (+2,85 m NGM) est calculée avec le niveau de marée de vive eau exceptionnelle** (marée coefficient 120). Or un tel niveau ne se maintient que durant une faible durée de la période de la marée haute (quelques dizaines de minutes à une heure environ) selon les conditions météorologiques.

Il faut également noter que les durées de tempêtes qui génèrent la surcote marine prise en compte (100 cm) sont probablement relativement courtes, environ une demi-journée à une journée au maximum. En conséquence la valeur de la surcote marine prise en compte est également limitée dans le temps. L'addition des différentes valeurs de niveaux d'eau « extrêmes » conduit donc à une valeur élevée mais limitée dans le temps. Cette valeur de surcote est néanmoins suffisante pour entraîner des dommages.

La cartographie générée par le SIG par comparaison des niveaux d'eau hors évènement exceptionnel et durant un évènement exceptionnel peut donc être considérée comme pessimiste en termes de résultats, car le temps de propagation de la surcote marine dans l'oued en particulier n'est pas connu au regard de l'évènement pris en compte, et la comparaison est uniquement une comparaison « topographique ». Et il est donc très possible que, compte tenu des caractéristiques géométriques de l'oued et de la vitesse de propagation de l'onde de tempête dans le cours d'eau, la surface des zones impactées telles que représentées sur la Figure 31 soit différente de la réalité.



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 31
L'aléa submersion littoral de la vallée du Bouregreg à l'horizon 2030



Légende

Niveau d'aléa

-  Fort
-  Moyen
-  Faible
-  Aménagement programmé



200

Mètres

3.5 Cartographie des risques à l'horizon 2030

3.5.1 Le risque érosion

La carte de risque érosion à l'horizon 2030 (cf. Figure 32) est issue du croisement :

- de la carte d'aléa érosion (cf. Figure 30),
- de la carte de sensibilités / enjeux (cf. Figure 13) issue de l'analyse des composantes socioéconomiques et patrimoniales du littoral

L'analyse de la carte de risque érosion à l'horizon 2030 montre que **le risque est moyen** pour l'ensemble des plages de l'embouchure de la vallée du Bouregreg.

3.5.2 Le risque submersion

La carte de risque submersion à l'horizon 2030 (cf. Figure 33) est issue du croisement :

- de la carte d'aléa submersion (cf. Figure 31)
- de la carte de sensibilités / enjeux (cf. Figure 13) issue de l'analyse des composantes socioéconomiques et patrimoniales.

Le croisement conduit à un **risque moyen** pour les plages de Rabat et de Salé.

3.6 Conclusion

En dépit des incertitudes sur la valeur réelle en 2030 de l'élévation du niveau de la mer, celle-ci aura une incidence certaine sur la morphologie côtière de l'embouchure de la vallée du Bouregreg.

L'élévation du niveau aura des **conséquences immédiates sur l'érosion du littoral** : les plages sableuses risquent de reculer en moyenne de 10 à 15m. Dans les secteurs urbanisés lorsque les résidences sont protégées par des murs de protection, le recul de plage si celle-ci présente une très faible pente pourra conduire à des dommages notables (affouillements en pied des murs, etc.) de ceux-ci. Dans les secteurs où le haut de plage est encore à l'état naturel, l'effet du recul sera moins sensible mais néanmoins réel.

Au niveau de l'embouchure de la vallée du Bouregreg, le projet de digue enveloppante à terme 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.

L'élévation du niveau de la mer aura également comme conséquence la submersion des terrains les plus bas. Cette élévation du niveau de la mer aura donc des conséquences directes et indirectes sur le littoral et aussi sur différents secteurs de l'économie. Ceci obligera à des interventions et des **mesures d'adaptation**.



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRÉS NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 32
Le risque érosion littoral de la vallée du Bouregreg à l'horizon 2030



Légende

Niveau de risque

-  Fort
-  Moyen
-  Faible
-  Aménagement programmé



200

Mètres



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRÉS NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 33
Le risque submersion littoral de la vallée du Bouregreg à l'horizon 2030

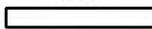
Légende

Niveau de risque

-  Fort
-  Moyen
-  Faible
-  Aménagement programmé



200

 Mètres

4 Hydrologie et inondations

4.1 Données et méthodologie utilisées

La méthode employée pour évaluer l'incidence du changement climatique est **différente selon les bassins versants**, et dépend de la nature des informations et études existantes sur le risque de crue sur ces bassins.

Pour l'oued Bouregreg l'estimation des débits de crue sera effectuée selon la méthode utilisée par l'Agence de bassin (Étude des crues et caractérisation des séquences sèches – août 2004), en modifiant les valeurs des pluies caractéristiques prises en compte sur le bassin. L'estimation de l'impact sur les zones inondables sera effectuée à partir des informations existantes.

4.2 Évolution des conditions hydrologiques

Pour l'analyse du risque inondation, **les paramètres du changement climatique pris en compte sont :**

- **les pluies extrêmes** : à partir de l'évolution des pluies journalières, de nouvelles pluies de projet de fréquence 10 ans à 100 ans ont été construites,
- **le niveau de la mer** : pour les conditions limites aval de certains réseaux d'assainissement, et les oueds côtiers.

4.2.1 Pluies et débits de projet pour l'oued Bouregreg

La méthode d'estimation des débits de crue de l'oued Bouregreg est la **méthode du gradex**. Cette méthode est basée sur l'hypothèse qu'au-delà d'un certain seuil, toute la pluie précipitée va ruisseler sur le bassin.

Les hypothèses prises en compte dans l'étude de l'Agence de bassin sont les suivantes :

- calcul du gradex des pluies sur le bassin, à partir des pluies caractéristiques calculées à onze postes pluviométriques sur le bassin (une critique approfondie des données a été effectuée dans l'étude). La durée caractéristique prise en compte au droit du barrage SMBA est de 34heures.
- Seuil d'application de la méthode : 10 ans, justifié par la nature du bassin versant.
- Forme d'hydrogramme unitaire de type exponentiel avec un facteur de forme égal à 12 défini à partir des hydrogrammes observés aux stations hydrométriques du bassin.

Les calculs ont été effectués pour **3 sites de barrages sur le bassin**: Tiddas (2175 km²), Oujlet Béni Khémis (2582 km²) et SMBA (9698 km²).

La prise en compte de l'incidence du changement climatique a été effectuée de la manière suivante :

- Détermination des pluies caractéristiques modifiées pour chaque poste pluviométrique, en appliquant les variations de la maille correspondante,
- Détermination du gradex de bassin modifié, pour la durée caractéristique du bassin (34 heures),

- Détermination du débit de crue décennale, point-pivot pour l'application de la méthode du gradex. Pour cette détermination, on a considéré que l'accroissement de pluviométrie décennale entre la situation actuelle et la situation future (+12,6 mm sur le bassin) se reportait entièrement sous forme de ruissellement.
- Calcul du volume de crue pour les périodes de retour 50 ans et 100 ans,
- Calcul des débits de pointe pour 50 ans et 100 ans, en appliquant la forme d'hydrogramme définie dans l'étude de l'Agence de bassin.

Ce sont les variations obtenues pour le modèle CNRM qui ont été prises en compte, modèle le plus pénalisant vis à vis du risque de crue (cf. section 1.4).

Tableau 20 : Estimation des volumes et débits de crue de période de retour 50 et 100 ans sur le bassin du Bouregreg (amont du barrage SMBA), avec prise en compte des hypothèses du changement climatique (horizon 2030)

Point pivot (Qp 10 ans)	Gradex de bassin pour la durée 34 heures (mm)	Volume 50 ans (Mm3)	Volume 100 ans (Mm3)	Qp 50 ans (m3/s)	Qp 100 ans (m3/s)
Période actuelle	10.8	397	490	4452	5495
Période future (horizon 2030)	12	491	572	5500	6420
écart	+11%	+24%	+17%	+24%	+17%

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 20. On obtient un accroissement de 24% du débit cinquantennal et de 17% du débit centennal à l'entrée du barrage SMBA. On retiendra un **accroissement de 17% du débit de pointe centennal** de référence pour l'oued Bouregreg en entrée du barrage SMBA, soit un débit de 5730m³/s.

On prendra en compte cette même hypothèse d'accroissement du débit de pointe pour la crue centennale de **l'oued Akrach**, soit un débit de pointe qui passerait de 320 m³/s à 374 m³/s.

4.2.2 Évolution du niveau marin

La surélévation prévue à l'horizon 2030 est de **20 cm**. Les conditions de niveau marin prises en compte dans les différentes simulations seront par conséquent réévaluées de 20 cm.

4.3 Projets de protection contre les crues

Les différents projets d'aménagement associés à la protection contre les crues sont décrits ci-après.

Le projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg prévoit notamment l'implantation d'équipements et d'une zone urbaine dans le lit majeur de l'oued. Un plan d'eau est également prévu (voir Figure 1). Les études hydrauliques de la mission IV, basées sur le scénario d'aménagement 5.3, ont étudié plusieurs principes de protection contre les crues, et les principes retenus consistent en une **protection localisée des secteurs retenus pour une mise hors d'eau pour la crue centennale**. Ces secteurs sont les suivants :

- **Ile Rabat-Salé** : cette île sera créée par le creusement d'un chenal en rive gauche de l'oued dans le terre-plein situé en rive gauche entre le pont Moulay Youssef et le pont Moulay El Hassan. Le remblaiement actuel de cette zone n'est pas homogène, et la

protection contre la crue centennale nécessitera un endiguement du chenal, d'une hauteur d'environ 1m sur un linéaire total de 674m.

- **Pièce urbaine** : cette pièce urbaine d'une superficie de 370 hectares s'intègre dans l'aménagement de la rive droite de l'oued entre le pont de la voie de contournement et le pont ONCF. Elle est associée à la création d'un plan d'eau, de deux zones vertes et d'une cité sportive aménagée en bordure de l'oued. L'un des objectifs du lac est de maintenir des niveaux suffisants dans les chenaux de navigation en aval du pont ONCF, en permettant des volumes oscillants suffisants entrants et sortants suivant les phases de marée. Seule la pièce urbaine sera mise hors d'eau pour la crue centennale. L'aménagement prévoit un **remblaiement de la zone à la cote 6m NGM**, associé à un endiguement sur un linéaire d'environ 5360m, entre le pont ONCF et le pont Mohammed V.
- **La nouvelle rocade** qui franchit la vallée en amont du pont ONCF est prévue hors d'eau.

Remarque : les autres solutions de protection étudiées, telles que l'endiguement ou le recalibrage de l'oued, n'ont pas été retenues du fait de contraintes techniques ou financières. Le recalibrage seul ne permet pas une protection suffisante.

Des simulations à l'aide d'une modélisation hydraulique 2D ont été effectuées dans des études complémentaires, avec l'analyse de plusieurs scénarios pour la séquence 3 (Séquence 3 – calculs hydrauliques préliminaires – scénarios 1 et 2). Les deux scénarios 1 et 2 correspondent aux variantes d'aménagement suivantes :

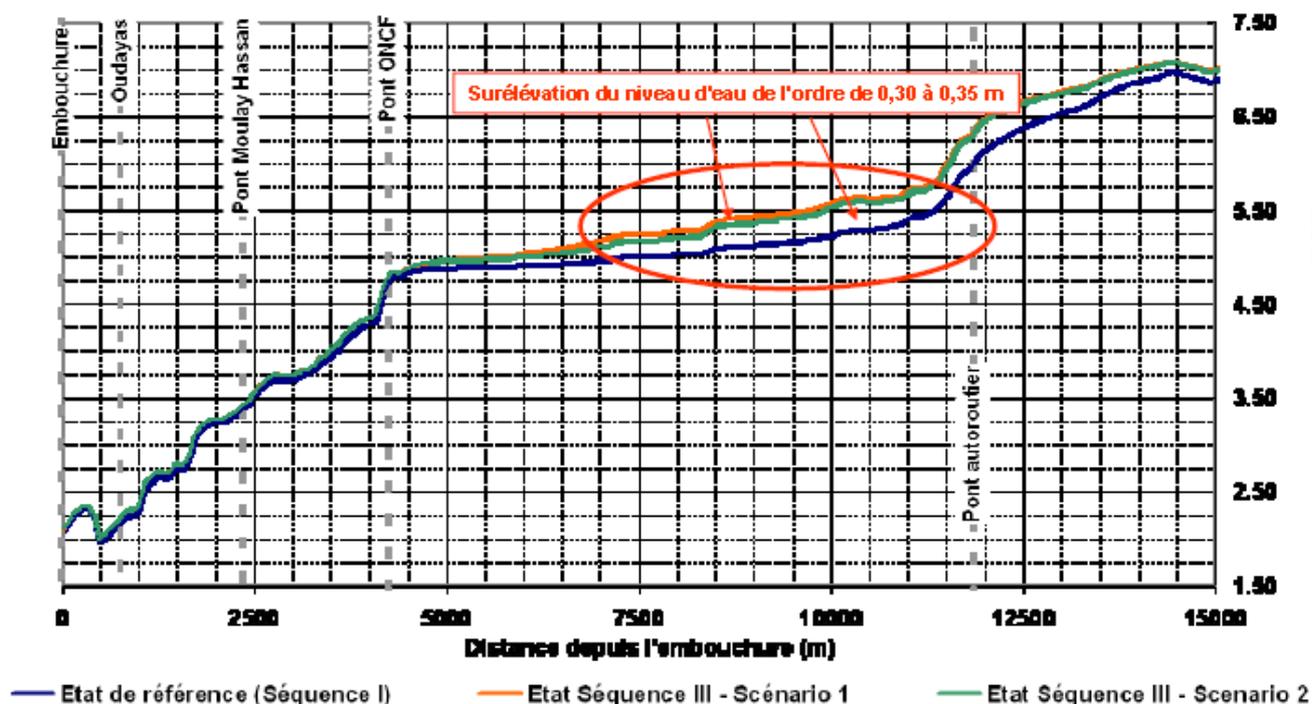
- Scénario 1 : un seul lac de superficie 72.5 ha, isolé du passage de la crue par une digue ;
- Scénario 2 : un lac supplémentaire de superficie 35,4 ha, qui serait traversé par la crue.

Comparés à la situation actuelle avant aménagement, **les résultats obtenus montrent** :

- une surélévation généralisée de la ligne d'eau en amont du pont ONCF, qui peut atteindre 35cm pour le scénario 1 à l'aval du pont autoroutier,
- Le scénario 2 réduit l'accroissement des niveaux maximaux de 5cm,
- En aval du pont ONCF, les deux scénarios conduisent à une surélévation de 5cm,
- En amont du pont ONCF, les vitesses dans le lit mineur et dans le lit majeur sont augmentées au moment de la pointe de crue, mais restent inférieures à la vitesse observée pendant la montée de crue avant le début du débordement, ou lors de la décrue.
- En aval du pont ONCF, les vitesses augmentent également, mais restent insuffisantes pour assurer l'objectif de maintien du chenal à un niveau suffisamment bas (vitesses atteintes : situation actuelle 0,6 m/s, scénario 1 : 0,8 m/s, scénario 2 : 0,9 m/s). L'objectif est d'obtenir une vitesse de 1m/s en marée de vives eaux.

La Figure suivante montre la comparaison des lignes d'eau calculées dans les trois situations.

Figure 34 : Lignes d'eau calculées pour les scénarios 1 et 2 de l'aménagement de la séquence 3 ((Étude CID-Sogreah – mai 2007)



Remarque : un **scénario 3 est en cours d'étude**, afin d'accroître encore les vitesses en aval du pont ONCF.

4.4 Impacts prévisibles sur les inondations

4.4.1 Laminage de la crue centennale dans le barrage SMBA

La crue de référence centennale voit son hydrogramme modifié de +17% (débit de pointe et volume), suite aux hypothèses prises en compte pour le changement climatique. La détermination de l'hydrogramme de crue en aval du barrage SMBA dépend des conditions de vidange (nombre de vannes ouvertes et positions des vannes).

Les informations disponibles sur les **possibilités d'écrêtement** offertes par le barrage conduisent aux éléments suivants :

- Les hypothèses pour la crue de référence en situation actuelle consistent en un minimum de vannes ouvertes (1 vanne de l'évacuateur, 2 vannes de vidange), de manière à écrêter au maximum la crue centennale,
- L'évacuateur de crue de surface (seuil libre) est calé à la cote 65m NGM,
- Le niveau initial pris en compte est le niveau de la retenue pleine (niveau normal 65 m NGM),
- la cote de couronnement du barrage (73 m NGM) n'est atteinte que pour la crue décennale (Qp=9740 m3/s)

Un calcul de simulation de l'écrêtement du barrage SMBA a été effectué en reprenant les hypothèses concernant les vannes et le seuil d'évacuation. La Figure 35 représente les hydrogrammes en entrée et sortie du barrage, pour la situation actuelle ($Q_p=4906 \text{ m}^3/\text{s}$) et la situation obtenue avec les hypothèses liées au changement climatique ($Q_p=5730 \text{ m}^3/\text{s}$). Avec les mêmes conditions de vannes ouvertes, on obtient un **débit de sortie qui passe de 1903 m^3/s à 2180 m^3/s , soit un accroissement de +15%**. La cote maximale atteinte passe de 69.2m NGM à 70.1m NGM. En fermant les deux vannes de vidange de fond, on aboutit à un débit maximum en aval du barrage de 1980 m^3/s , et à une cote maximale de 71m NGM.

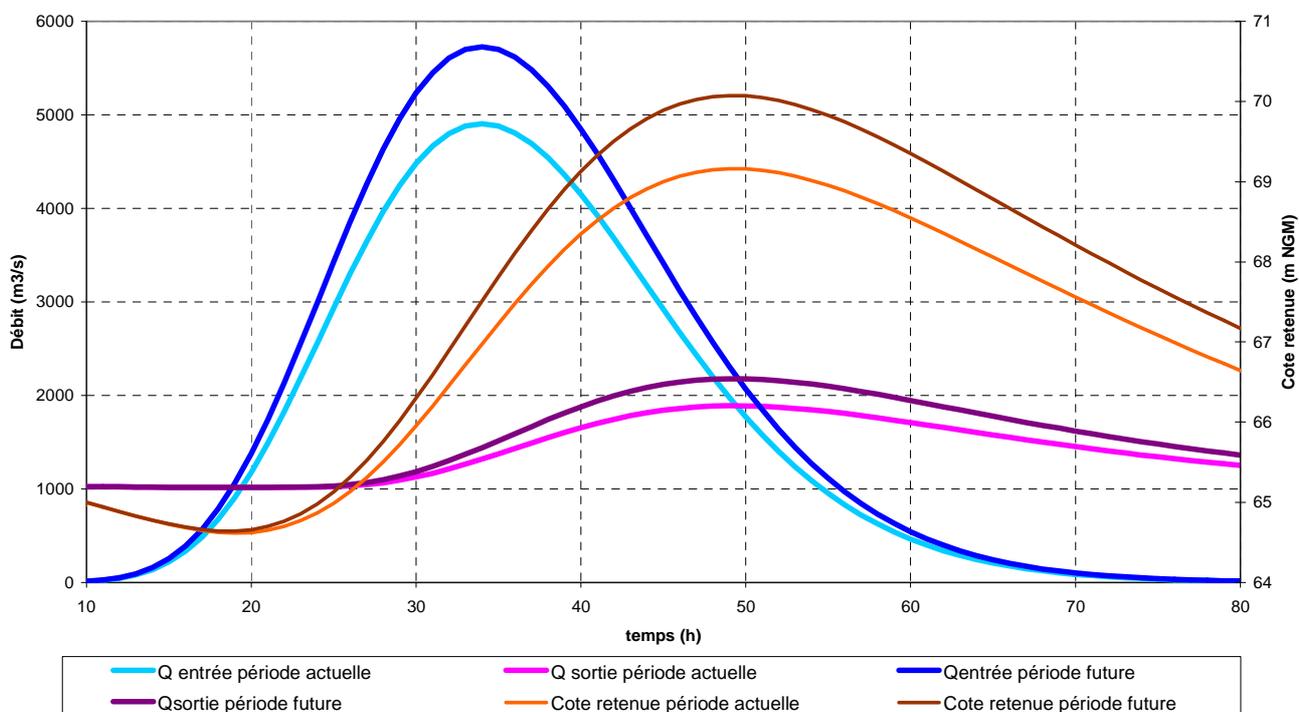
La gestion du barrage en cas de crue peut permettre de limiter le débit aval au débit maximum de l'ordre de 1900 m^3/s , moyennant une anticipation de l'arrivée de la crue permettant de faire des lâchures préventives afin d'obtenir une tranche supplémentaire d'écrêtement au moment de l'arrivée de la crue. La Mission IV de l'étude hydraulique générale du projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg recommande la mise en place d'un système d'alerte sur le bassin, ayant deux objectifs principaux :

- L'anticipation de la crue en amont pour pouvoir gérer au mieux le barrage,
- La mise en place d'un plan d'évacuation pour les zones aménagées dans la vallée (zones non protégées [lac de plaisance, zones vertes, cité sportive,...] et zones protégées en cas de crue supérieure à la crue de référence).

Figure 35 : Calcul de laminage de la crue centennale par le barrage SMBA, pour la période actuelle et la période future (horizon 2030)

Laminage de la crue centennale dans la barrage SMBA

conditions de calcul : 2 vannes de vidange ouvertes, 1 vanne de l'évacuateur ouverte, retenue pleine (cote 65m NGF)



Le débit de pointe de la crue centennale en aval de la confluence avec l'**oued Akrach** est estimé à 2554 m³/s (2180 m³/s + 374 m³/s), en conservant l'hypothèse pessimiste de concomitance entre les pointes de crue des deux oueds.

4.4.2 Conditions d'écoulement en aval du barrage

4.4.2.1 Situation actuelle d'aménagement

La vallée du Bouregreg en aval du barrage SMBA est largement inondable pour la crue centennale. **L'impact d'une augmentation du débit de pointe de la crue centennale de 15% a été évalué en quelques points :**

- En aval du pont Moulay Hassan : impact sur la cote maximale de l'ordre de +35cm
- En amont du pont ONCF : impact sur la cote maximale de l'ordre de +27cm
- En aval de la voie de contournement : impact sur la cote maximale de l'ordre de +19cm

L'impact a été estimé à partir des résultats de l'étude hydraulique générale (CID – Mission III), qui fournit les caractéristiques des écoulements au droit des profils en travers utilisés pour la modélisation de la situation actuelle. Le calcul a été effectué pour 3 sections, en faisant l'hypothèse d'une pente de ligne d'eau identique à celle calculée pour la situation actuelle. Les débits pris en compte correspondent aux débits figurant dans cette étude pour chaque profil, augmentés de 15%. Ces débits prennent en compte l'amortissement qui se produit dans la vallée.

L'impact de la **montée du niveau de la mer** de +20cm a été évalué pour la crue centennale. Cet impact se réduit assez rapidement vers l'amont :

- A 450 mètres en amont de l'embouchure, l'impact est de 10cm,
- A 850 mètres de l'embouchure, l'impact n'est plus que de 5cm.

Remarque : pour le débit de la crue centennale non modifié, l'impact s'étendrait un peu plus vers l'amont ; il serait de 10cm à 650 mètres de distance de l'embouchure, et de 5cm à 1200 mètres en amont de l'embouchure.

4.4.2.2 Situation future d'aménagement

Les conditions d'écoulement pour la situation future d'aménagement prenant en compte les nouvelles hypothèses de crue centennale **ne peuvent être déterminées qu'à l'aide du modèle hydraulique 2D**. La surélévation des niveaux maximaux obtenus devrait être du même ordre de grandeur que celle obtenue par rapport à la situation actuelle. On obtiendrait par conséquent une surélévation totale maximale de 35cm + 27cm : soit 62 cm (27cm du à l'accroissement du débit, et 35 cm du au projet).

L'impact de la surélévation du niveau marin ne devrait pas concerner les niveaux maximaux de crue en amont du pont ONCF. Par contre, cette surélévation aura un impact sur les vitesses d'écoulement en aval du pont ONCF, ce qui pourrait être pénalisant pour le maintien des chenaux à un niveau suffisant.

Ces nouvelles conditions devraient être prises en compte dans les simulations faites à l'aide du modèle 2D existant, et pour l'analyse de différentes variantes.

4.5 Conclusion

Les aménagements urbains prévus dans la vallée de l'oued Bouregreg prévoient une protection localisée des zones à maintenir hors d'eau pour la crue centennale, crue de référence du projet d'aménagement.

La mise hors d'eau de la pièce 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 35cm (résultats issus de la modélisation 2D réalisés 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 +35cm en aval du pont Moulay Hassan, entre +20 et +30cm 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 65cm en amont de la pièce 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 avoir une incidence sur les vitesses d'écoulement dans les chenaux de navigation hors période de crue.

De manière générale, **la nécessité d'une maîtrise des facteurs aggravants du risque d'inondation apparaît :**

- planification du développement de l'urbanisation prenant en compte les contraintes de non aggravation des débits en aval,
- maîtrise de l'occupation des sols en zone inondable afin de ne pas accroître la vulnérabilité face au risque inondation,
- Mise en place d'une gestion du risque pour les événements exceptionnels.

5 Ressources et besoins en eau

5.1 Données et méthodologie utilisées

Une analyse a été effectuée à partir d'un **découpage de la zone hydrographique des bassins du Bouregreg et de la Chaouia en mailles de 50 km** de côté, numérotées de 1 à 16. Pour chaque maille, les séries journalières de pluies et de températures ont été fournies par Maroc-Météo, pour les mêmes modèles régionaux et scénarios climatiques que ceux utilisés pour l'analyse au droit de Casablanca.

Comme pour les pluies extrêmes, l'analyse comparative a été effectuée sur les séries sorties des modèles, sans recalage avec la méthode quantile/quantile. En effet, d'une part, on ne dispose pas de séries de pluies journalières sur chaque maille alors que la variabilité de la pluie est élevée sur le bassin, d'autre part les séries de pluies journalières disponibles comportent fréquemment des lacunes.

Rappelons que les modèles pris en compte sont basés sur des mailles de 25km de côté, sauf le modèle ARPEGE, qui est basé sur des mailles de 50km. De manière à minimiser les traitements, les résultats ont été exploités sur la base de mailles de 50km. La Figure 25 représente le découpage en mailles utilisé.

5.2 Évolution des ressources en eau

5.2.1 Impacts prévisibles du changement climatique

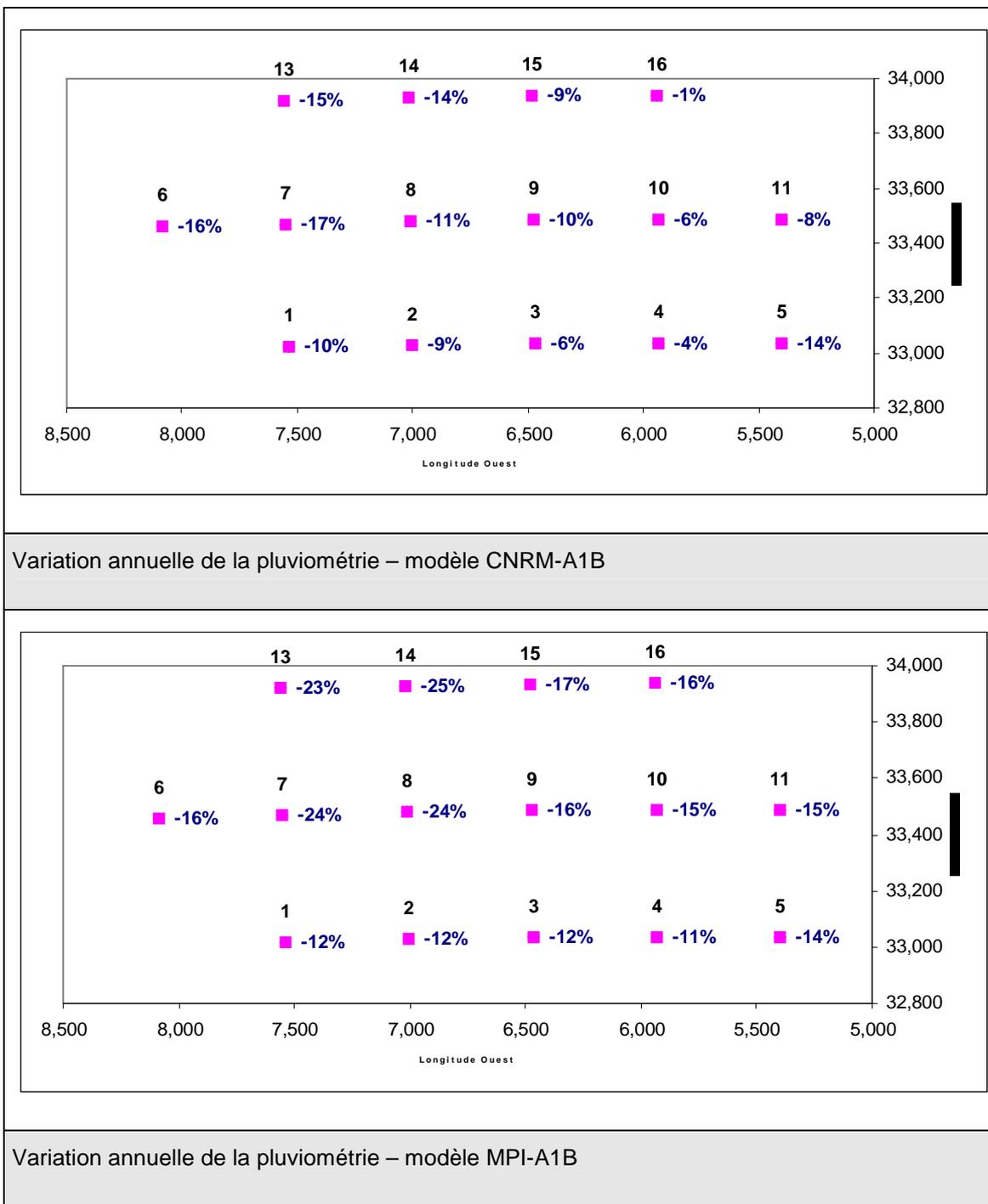
5.2.1.1 Variations de la pluviométrie annuelle et saisonnière

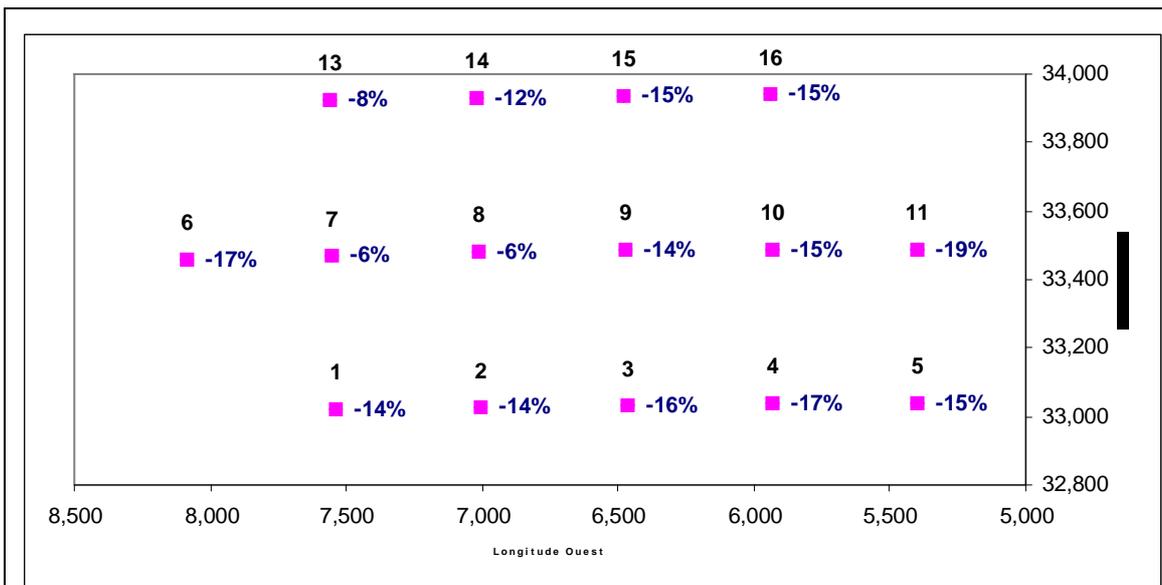
Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants, pour les **quatre modèles régionaux** disponibles, et pour le scénario climatique « médian », soit le **scénario A1B**. La comparaison est effectuée entre la période de référence (1970-2000) et la période future (2020-2050).

Les variations annuelles obtenues montrent globalement une forte diminution de la pluviométrie annuelle :

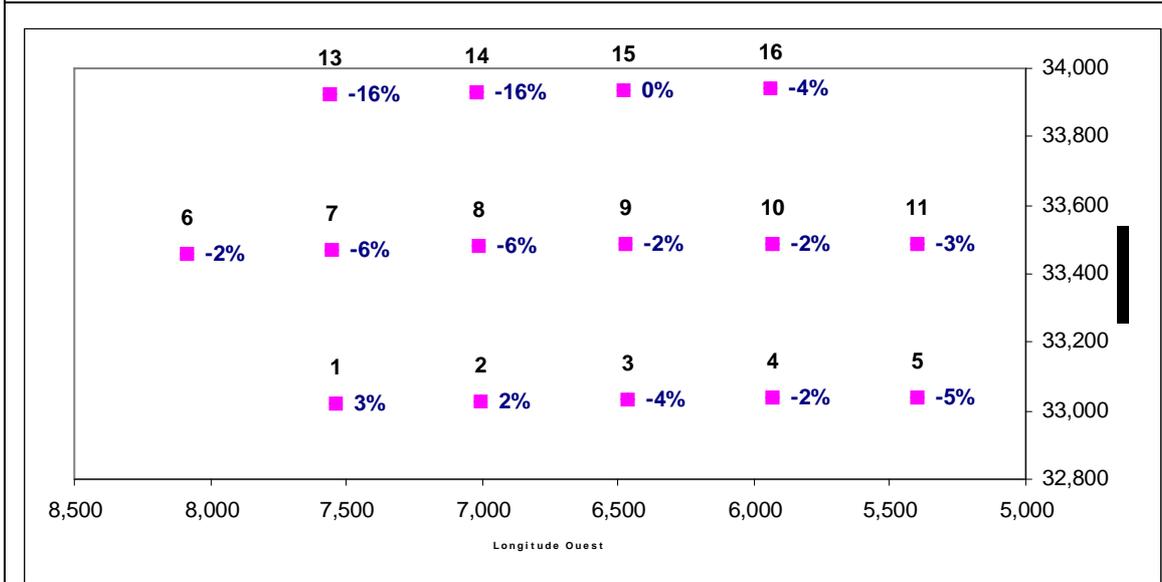
- la baisse maximale est de -25% pour le modèle MPI. Pour ce modèle, 4 mailles ont une diminution de plus de 20%,
- Le modèle CNRM prévoit une baisse comprise entre -4% et -17%,
- Le modèle METO prévoit une baisse plus importante, avec 8 mailles ayant une baisse de plus de 15%
- Le modèle ARPEGE prévoit des baisses plus réduites, de l'ordre de -2% à -4% pour la majorité des mailles, sauf pour deux mailles qui obtiennent une baisse de -16%.

Tableau 21 : Variation annuelle de la pluviométrie dans le bassin hydrographique du Bouregreg et de la Chaouia pour les différents modèles-scénarios





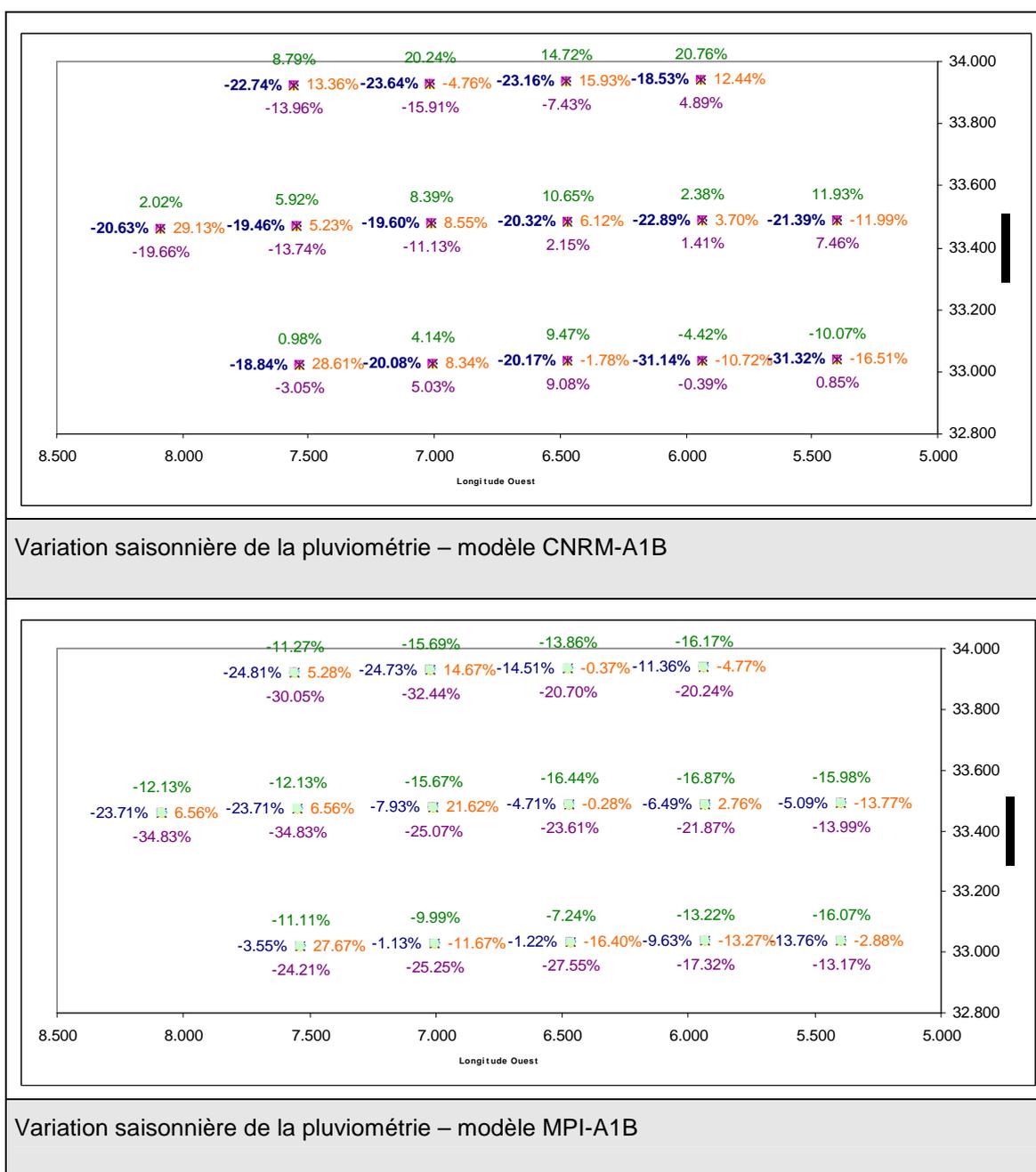
Variation annuelle de la pluviométrie – modèle METO-A1B

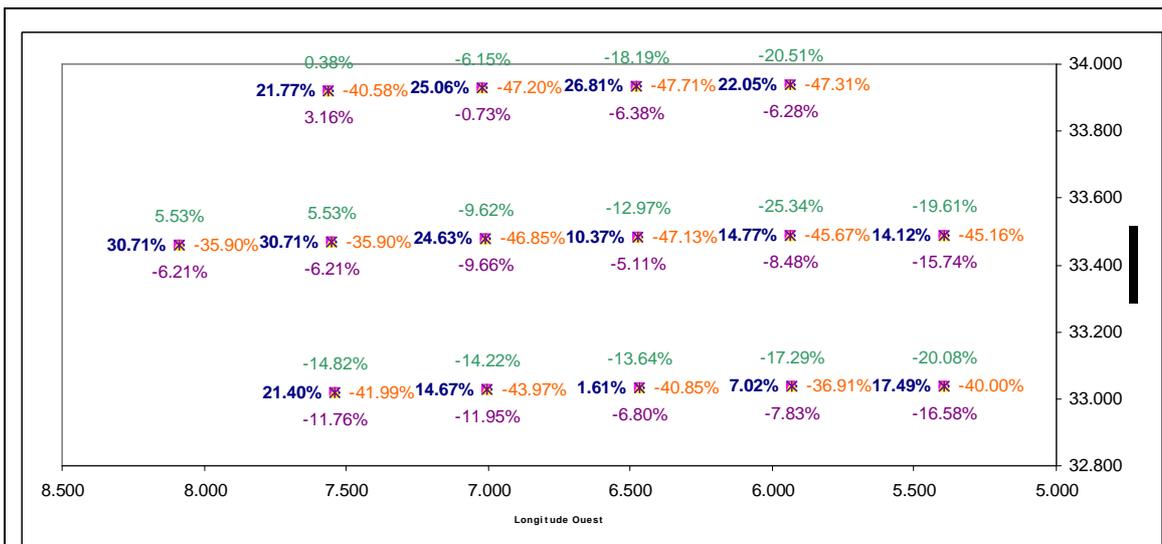


Variation annuelle de la pluviométrie – modèle ARPEGE-A1B

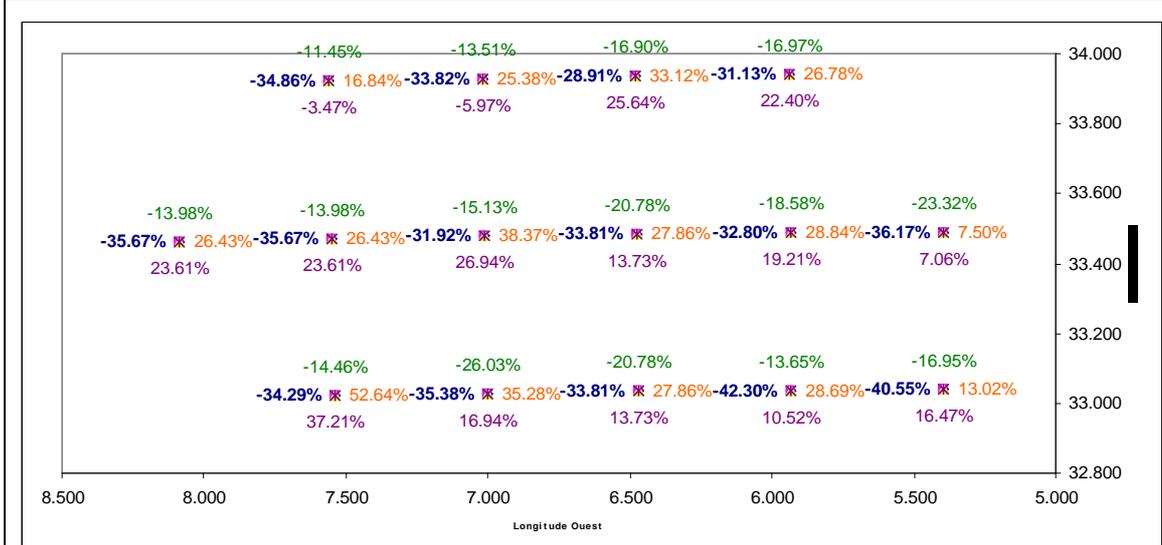
Le tableau suivant fournit les variations saisonnières obtenues avec les quatre modèles. **Les résultats sont variables** selon les modèles, mais on peut dégager les tendances suivantes :

Tableau 22 : Variation saisonnière de la pluviométrie dans le bassin hydrographique du Bouregreg et de la Chaouia pour les différents modèles-scénarios





Variation saisonnière de la pluviométrie – modèle METO-A1B



Variation saisonnière de la pluviométrie – modèle ARPEGE-A1B

Légende : gauche : janvier-mars, haut : avril-juin, droite : juillet-septembre, bas : octobre-décembre.

5.2.1.2 Impact sur la ressource en eau du bassin du Bouregreg

L'impact de l'évolution de la pluviométrie et de la température sur les apports moyens mensuels du Bouregreg au droit du barrage SMBA a été **évalué en utilisant le modèle pluie-débit mis en œuvre par l'Agence de bassin** pour l'évaluation des apports de la période actuelle.

Les entrées du modèle pluie-débit sont les suivantes :

- Séries de pluies mensuelles à 17 postes du bassin du Bouregreg : chaque poste a été affecté à la maille qui lui correspond, et les coefficients de réduction correspondants ont été appliqués aux pluies mensuelles (un coefficient de variation par trimestre),
- Température moyenne interannuelle sur le bassin : il s'agit de la moyenne de la température entre Rabat et Oulmès. La variation mensuelle de température obtenue pour les mailles correspondant à Rabat et Oulmès a été prise en compte pour modifier les nouvelles températures interannuelles.

Les paramètres du modèle pluie-débit, calés sur la période 1972-2002, ont été conservés. La comparaison a été effectuée sur une période de 30 ans, soit entre la période 1972-2002 et la période future 2020-2050. **Les résultats obtenus sont variables selon les modèles :**

- -27% pour le modèle MPI, -33% pour le modèle CNRM, +12% pour le modèle METO et -39% pour le modèle ARPEGE.
- Ces différences s'expliquent par la variabilité de l'impact du changement climatique sur les pluies saisonnières, notamment pour les pluies de l'hiver.
- Pour le modèle ARPEGE, la baisse est très forte pour l'hiver (-33% en moyenne), ce qui pénalise fortement les apports.
- Pour le modèle METO, les pluies saisonnières de l'hiver augmentent (+15% en moyenne) d'où une hausse moyenne des apports alors que la pluie annuelle diminue.
- Les modèles MPI et CNRM ont des baisses plus modérées en hiver.

Il est à noter que ces résultats sont à considérer seulement comme un **ordre de grandeur de l'évolution possible de la ressource**. Des tests et analyses de sensibilité plus complets permettraient d'affiner ces estimations. De plus, la période 1972-2002 utilisée pour la comparaison est une période globalement déficitaire.

Une **estimation des nouveaux volumes régularisables** a été effectuée sur la base des hypothèses suivantes :

- bathymétrie 2005,
- retenue rehaussée à la cote 65m NGM,
- évaporation annuelle : 43 Mm3 en situation actuelle, 49 Mm3 en situation future.
- période de simulation de 30 ans.

Les séries d'apport obtenues pour les 4 modèles régionaux ont été fournies en entrée du calcul de volume régularisable, et les volumes régularisables maximaux ont été déterminés de manière à n'obtenir aucune défaillance sur la période de simulation. On obtient une **diminution des volumes régularisables pour tous les scénarios** de : -7% pour le modèle METO, -29% pour les modèle CNRM, -35% pour le modèle ARPEGE et -38% pour le modèle MPI.

La contrainte vis à vis du volume régularisable est liée à la succession d'années sèches qui se produit à partir des années 1980 jusqu'en 1995.

Notons que ces résultats ne donnent qu'une indication sur le risque de diminution de la ressource, basée sur la fiabilité actuelle des modèles. Il y a en effet une incertitude importante sur la plage de variation des évolutions climatiques. Cependant, ce n'est pas seulement la valeur des apports moyens qui est significative, mais également la répartition des apports. Le calcul des volumes régularisables montre qu'on obtient dans tous les cas une diminution du volume régularisable (variable selon les modèles-scénarios), même en cas d'augmentation des apports moyens.

5.2.2 Projets d'amélioration de la gestion des ressources

5.2.2.1 Développement de nouvelles ressources

Deux barrages sont prévus sur le bassin du Bouregreg : les barrages de Tiddas et Boukhmiss, d'une capacité maximale de l'ordre de 600 Mm³ chacun. Le projet de barrage de Boukhmiss semble être remis en cause, ou du moins différé.

En effet, l'estimation des volumes régularisables supplémentaires faite par l'Agence de bassin montre que le barrage de Tiddas permettrait un gain de 32Mm³/an (par rapport au barrage SMBA surélevé). Par contre, le barrage Boukhmiss aurait une performance inférieure, ne permettant de régulariser qu'un volume supplémentaire de 26Mm³/an seulement (par rapport au barrage SMBA surélevé), et un gain de 13Mm³ seulement par rapport au barrage SMBA surélevé et au barrage Tiddas, pour une capacité maximale identique à celle du barrage Tiddas. Ce barrage présente de plus des impacts socio-économiques négatifs plus importants (nombreux axes et ouvrages routiers inondés).

Ces estimations sont issues du rapport provisoire du PDAIRE (2006), la version finale n'étant pas encore disponible. Ce rapport provisoire préconise par conséquent la réalisation du seul barrage Tiddas, et un transfert d'eau éventuel à partir du bassin de Sebou au-delà de l'horizon 2025 pour faire face à l'accroissement de la demande, cette dernière alternative étant à comparer avec l'exploitation de ressources non conventionnelles. Le barrage de Boukhmiss serait par conséquent différé et mis en œuvre, si nécessaire, à plus long terme.

5.3 Évolution prévisible des usages

5.3.1 Eau potable

Avec la construction d'environ 30 500 logements prévus à terme pour accueillir quelques 137 600 nouveaux habitants et la création estimée de 88 200 emplois, les besoins en eau potable correspondront à ceux d'une ville nouvelle.

5.3.2 Agriculture

Une partie de la vallée du Bouregreg, et notamment les secteurs Sahrij El Oued et Al Menzah al Kabir, va continuer à accueillir des activités agricoles. Les besoins en eau pour l'agriculture vont cependant nettement diminuer, et seront de toute façon négligeables par rapport aux besoins en eau potable des nouveaux quartiers urbanisés.

5.4 Conclusion

L'incidence du changement climatique pourrait être importante sur la disponibilité de la ressource du barrage SMBA, le volume régularisable pouvant diminuer de l'ordre de 30%, et même jusqu'à 40%. Le barrage supplémentaire Tiddas prévu sur l'oued Bouregreg en amont du barrage SMBA à courte échéance apporterait un gain de l'ordre de 10% du volume régularisable, ce qui permettrait de compenser en partie seulement l'éventuelle diminution de la ressource.

Dans le même temps l'urbanisation de la vallée du Bouregreg augmentera d'environ 10% les besoins en eau de l'agglomération de Rabat-Salé, ce qui nécessitera à terme de trouver des ressources supplémentaires ou alternatives.

Chapitre 5 - Identification des vulnérabilités urbaines

1 Analyse de l'occupation des sols en l'état actuel

Le périmètre du grand projet d'aménagement du site de la vallée du Bouregreg est **actuellement occupé en grande majorité par des espaces naturels dédiés à l'agriculture**. Les zones urbaines existantes n'occupent que 3% de l'espace global du projet, soit 156 ha. sur un total de l'ordre de 5750 ha.

Afin de pouvoir maintenir une comparaison entre l'état actuel et l'état futur du site à l'horizon 2030, nous présentons la répartition des secteurs urbains par séquence à l'instar de la présentation du projet.

1.1 Séquence 1 - Bab Al Bahr

Cette séquence à l'**embouchure du Bouregreg** dans l'océan entre la Kasbah des Oudayas, la médina de Rabat sur la rive gauche et la médina de Salé sur la rive droite, occupe 335 hectares. La zone urbaine existante ne représente que 78 ha (23%).

Hormis le tissu urbain dense de la Kasbah des Oudayas et d'une bande de la médina de Rabat, l'occupation urbaine actuelle est **composée majoritairement d'équipements et quelques zones d'activités industrielles et commerciales**.

La Kasbah des Oudayas construite sur un promontoire surplombant la vallée et la mer est à l'abri des inondations, en revanche, sa densité et son tissu traditionnel serré la rend vulnérable et risquent d'interroger sur les problématiques d'îlot de chaleur urbain et de séisme.

Les équipements existants dans cette séquence sont voués à la disparition dans le cadre du projet d'aménagement du Bouregreg. Le projet prévoit la construction d'une zone résidentielle dense à moyennement dense globalement à vocation touristique à l'emplacement de ces équipements et d'une partie des zones d'activités existantes.



Le chantier des constructions « pieds dans l'eau » de Bab el Bahr face à la médina de Salé



La marina construite dans le cadre du programme d'aménagement de la vallée du Bouregreg, juste en aval du pont Moulay Hassan

1.2 Séquence 2 - Al Saha Al Kabira (La grande place)

Cette séquence s'étend **entre le pont Moulay Hassan et le pont ONCF**. Elle occupe 247 ha dont **seulement 3 ha sont urbanisés**. Cette urbanisation concerne principalement un supermarché « Marjane » situées en fond de vallée dans une zone réputée inondable et quelques clubs privés situés le long de la vallée. La destinée de ces constructions n'est pas identifiable dans le projet du Bouregreg, car cette zone est couverte par un futur projet non identifié aujourd'hui.

1.3 Séquence 3 - Kasbat Abi Raqraq

La partie de la vallée située en amont, **entre le pont ONCF et la rocade autoroutière** est actuellement **occupée pour l'essentiel par l'agriculture**. C'est une zone exposée aux inondations. Sur ses marges, l'espace est occupé par **des constructions médiocres et dispersées** : zones industrielles, dépôts et décharges, exploitation de carrière et de l'habitat spontané. Sur les plateaux des deux rives, de grands quartiers non réglementaires se sont développés.

Néanmoins, l'ensemble de cette séquence possède une **grande qualité paysagère et dominé par le site archéologique majeur de Chellah**.



Vue sur le Chellah et la plaine du Bouregreg

Eu égard à l'occupation actuelle de cette séquence, nous pouvons considérer que les vulnérabilités urbaines à l'intérieur du périmètre du site du projet sont inexistantes. Cependant, il faut signaler que **l'occupation urbaine tout autour de ce périmètre est très vulnérable**. Car des quartiers d'habitat insalubre dense sont construits sur des flans de coteaux instables. Ils déversent leurs déchets de toutes sortes directement dans la vallée. Des activités industrielles et artisanales se retrouvent également dans les espaces adjacents ainsi que des carrières à ciel ouvert. Souvent ces activités sont également non réglementaires et elles ne sont pas contrôlées.

1.4 Séquence 4 - Sahrij El Oued

En amont du pont Mohamed V et de la rocade, le vaste paysage agricole de 1055 ha est encore resté jusqu'à aujourd'hui vide de toute urbanisation.

Les équipements d'infrastructure sont inexistantes, à l'exception de petites routes médiocres. La partie amont, autour d'un **bidonville (Akreuch)** est défigurée par les carrières et la décharge d'ordures de Rabat.

Le positionnement de la **décharge non contrôlée** en amont des secteurs fortement urbanisés de Rabat et de Salé est très préoccupant. En plus, la pollution des sols et de la nappe phréatique sont également à déplorer.

1.5 Séquence 5 - Al Menzah al Kabir

Cette séquence, qui concerne 1494 ha. est actuellement occupé par l'agriculture, elle ne possède aucune occupation urbaine. **Quelques constructions rurales** parsemées sont éparpillées le long de la petite route qui les dessert.

1.6 Séquence 6 - Les Belvédères de H'ssaine

Cette espace de 336 hectares possède **36 hectares (11%) d'occupation urbaine**. Cette occupation est composée d'un grand espace d'équipement et de trois regroupements de tissu d'habitat rural moyennement dense. Le reste de l'occupation est composé d'espaces naturels et agricoles.

2 Analyse de l'occupation des sols à l'horizon 2030

Le grand **projet d'aménagement** du site de la vallée du Bouregreg⁵ est composé de six séquences d'une **superficie globale de l'ordre de 5 750 ha**. La zone urbaine existante avant le projet occupe 156 ha. Les zones urbaines projetées devraient occuper 2 384 ha (41% de l'espace global du projet) dont 468 ha de zones constructibles, soit 8% de l'espace global du territoire du projet. Les 3 210 hectares qui restent sont classés en grand paysage.

Nous avons considéré l'horizon 2030 comme le terme de la réalisation de cette grande opération d'aménagement et d'urbanisme.

Les **illustrations des pages suivantes** présentent le parti d'aménagement global avec ses six séquences, puis le Plan d'Aménagement Spécial (PAS), qui fixe les conditions d'aménagement de chaque zone.

Le projet prévoit la **structure urbaine en trois gabarits de constructions**. Elles se répartissent en fonction de leur hauteur.

- Une première baptisée ville basse : elle varie entre R+1 et R+3, avec des densités exprimées en coefficient d'occupation du sol s'étalant de 0,5 à 2,2.
- Une deuxième baptisée ville moyenne : elle est limitée à R+5, avec des densités exprimées en coefficient d'occupation du sol s'étalant de 1,5 à 3.
- Une troisième baptisée ville haute : elle varie entre R+6 et R+12, avec des densités exprimées en coefficient d'occupation du sol entre 2 et 3.

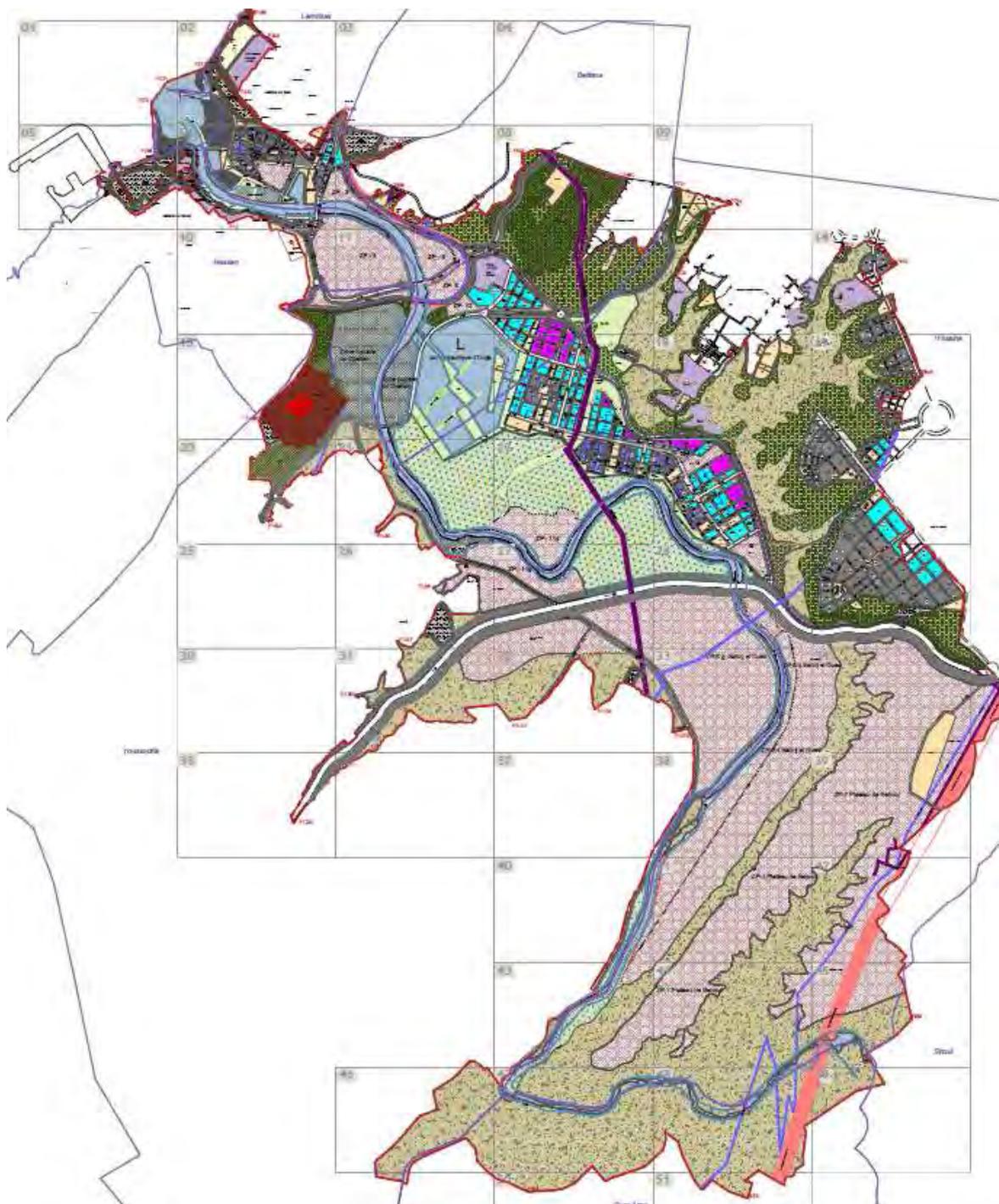
Des émergences sont localisées à des points précis. Le premier gabarit est limité à 37 mètres de hauteur et le second à 100 mètres de hauteur.

⁵ Les données analysées sont extraites des documents fournis par l'Agence pour L'Aménagement de la Vallée du Bouregreg.

Figure 36 : Parti d'aménagement du site du Bouregreg



Figure 37 : Plan d'Aménagement Spécial de la Vallée du Bouregreg



Légende

Annexe 3 - Légende du Plan Spécial d'Aménagement de la Vallée du Bouregreg

GRAND PAYSAGE

ZONES RURALES ET RESERVES NATURELLES

- oued, lac hydraulique
- zone humide
- plage
- terrain naturel

ELEMENTS EMBLEMATIQUES

- monument, site historique repère visuel
- Sites archéologiques

ARMATURE DES ESPACES PUBLICS

VOIRIE ET PARCS DE STATIONNEMENT

- type et emprise de la voirie publique
- principe de voie de desserte, de passage ou de promenade
- parc de stationnement (localisation préférentielle)
- carrefour

ESPACE PUBLIC

- espace public à dominante minérale
- espace public à dominante végétale

STRUCTURE URBAINE

SECTEURS URBAINS

VILLE BASSE

- B0.5 niveaux max:R+1 COS:0.5
- B1.1 niveaux max:R+2 COS:1.1
- B1.5 niveaux max:R+2 COS:1.5
- B1.9 niveaux max:R+3 COS:1.9
- B2.2 niveaux max:R+3 COS:2.2

VILLE MOYENNE

- M 1.5 niveaux max:R+5 COS:1.5
- M 1.9 niveaux max:R+5 COS:1.9
- M 2.5 niveaux max:R+5 COS:2.5
- M 3 niveaux max:R+5 COS:3

VILLE HAUTE

- H 2 niveaux max:R+6 COS:2
- H 2.5 niveaux max:R+6 COS:2.5
- H 3 niveaux max:R+12 COS:3

SECTEURS SOUMIS A DES CONDITIONS SPECIALES

- zone de projet
- zone de restructuration

EMERGENCES

- émergences + 37m
- émergences -100m

ALIGNEMENT DES CONSTRUCTIONS

- alignement obligatoire total 100 % de la façade agricole par rapport aux voies
- alignement obligatoire partiel 50 % de la façade agricole par rapport aux voies

ELEMENTS PROGRAMMATIQUES

- équipement, installation d'intérêt général (localisation préférentielle)
- équipement, installation d'intérêt général (localisation excentrée)
- commerces et services en RDC (emplacement préférentiel)
- cimetière

SERVITUDES

- servitude chemin de fer et autoroute
- servitude réseau d'eau potable
- servitude réseau d'électricité
- servitude voiries publiques voies de niveau 1 et 2
- servitude de passage en zone paysagère intégrée
- servitude de protection et d'aménagement des berges
- servitude de protection du patrimoine historique
- servitude de protection des cimetières
- servitude paysagère : bande riante

PERIMETRES

- périmètre du PAS
- limite communale

réserve boisée

zone paysagère intégrée

réserve naturelle protégée

promontoire (point de vue)

ligne de tramway

station de tramway

parc de stationnement (localisation préférentielle)

espace public à dominante végétale

espace public à dominante minérale

niveaux max:R+5 COS:1.5

niveaux max:R+5 COS:1.9

niveaux max:R+5 COS:2.5

niveaux max:R+5 COS:3

niveaux max:R+1 COS:0.5

niveaux max:R+2 COS:1.1

niveaux max:R+2 COS:1.5

niveaux max:R+3 COS:1.9

niveaux max:R+3 COS:2.2

niveaux max:R+6 COS:2

niveaux max:R+6 COS:2.5

niveaux max:R+12 COS:3

zone de restructuration

émergences + 37m

émergences -100m

alignement obligatoire total 100 % de la façade agricole par rapport aux voies

alignement obligatoire partiel 50 % de la façade agricole par rapport aux voies

équipement, installation d'intérêt général (localisation préférentielle)

équipement, installation d'intérêt général (localisation excentrée)

commerces et services en RDC (emplacement préférentiel)

cimetière

servitude chemin de fer et autoroute

servitude réseau d'eau potable

servitude réseau d'électricité

servitude voiries publiques voies de niveau 1 et 2

servitude de passage en zone paysagère intégrée

servitude de protection et d'aménagement des berges

servitude de protection du patrimoine historique

servitude de protection des cimetières

servitude paysagère : bande riante

périmètre du PAS

limite communale

Parmi les réalisations phare du projet, signalons la construction de la première **ligne de tramway reliant Salé à Rabat** en traversant la vallée du Bouregreg sur un nouveau pont en construction et en reliant par la suite la gare centrale et les grands pôles des deux agglomérations.

L'analyse, par séquence du projet, des vulnérabilités urbaines cherche à aborder la question d'une façon plus qualitative en corrélation avec la localisation de l'urbanisation future.

2.1 Séquence 1 - Bab Al Bahr (La porte de la mer)

Cette séquence à l'embouchure du Bouregreg dans l'océan Atlantique, entre la Kasbah des Oudayas, la médina de Rabat sur la rive gauche et la médina de Salé sur la rive droite, occupe 335 hectares. **La zone urbaine projetée est de l'ordre de 141 ha soit 42% de l'espace total de cette séquence.**

Hormis la kasbah des Oudayas et la bande de la médina de Rabat, l'occupation urbaine actuelle composée majoritairement d'équipements et de quelques zones d'activités industrielles et commerciales sera remplacée par de nouveaux programmes.

Le programme projeté à vocation majoritairement touristique est réparti de la façon suivante :

- Équipements : 23 ha,
- Espace publics : 58 ha,
- Voirie : 30 ha,
- Terrains cessibles (tissu mixte) 17 ha,
- Zone de projet (non défini) 14 ha

Le parti d'aménagement de cette **première séquence, la plus urbaine**, propose de créer un lieu central offrant des espaces publics, des activités culturelles, une offre commerciale importante et d'activités tertiaires.

Deux ports sont envisagés, l'un sur l'Atlantique et l'autre de plaisance sur le Bouregreg déjà réalisé. Une **cité des arts et métiers** est projetée sur la rive droite autour de la marina.

La majorité des constructions de cette séquence ne dépasse pas les hauteurs de la ville basse (R+3 maximum).

En termes d'infrastructure routière, le projet prévoit la réalisation d'un **tunnel routier** pour dégager la voirie entre la Kasbah des Oudayas et la médina de Rabat.

Le nombre de logements projeté dans cette zone est de l'ordre de **1 533 logements**. Ce parc de logement, ramené à la superficie de 17 hectares de terrains dédiés à l'habitat, représente une densité moyenne de l'ordre de 90 logements à l'hectare (forte densité).

La population estimée à terme du projet dans cette séquence est de l'ordre de **6 900 habitants** ce qui représente une taille moyenne de ménage de l'ordre de 4,5 individus par ménage. Nous pensons que ce chiffre est surestimé à l'horizon 2030.

La densité globale (nombre d'habitants par hectare de la totalité de la zone urbaine projetée) est de l'ordre de 50 habitants/ha ce qui est relativement faible. Cependant, si nous ramenons le nombre d'habitants au nombre d'hectares dédiés à l'habitat y compris la voirie, la densité qui en résulte s'approcherait de 150 habitants à l'hectare. Ce qui est considéré comme une forte densité. D'autant plus, que les zones urbaines projetées se situent dans un secteur très

sensible et vulnérable vis à vis des risques naturels, notamment, l'élévation du niveau de la mer et/ou de fortes précipitations et surtout corrélés avec une forte houle.

Le nombre d'**emplois** attendu dans cette séquence est estimé à 7 250 actifs. La densité humaine (habitants et actifs) attendue à terme est donc de l'ordre de 100 individus à l'hectare.

2.2 Séquence 2 - Al Saha Al Kabira (La grande place)

Cette séquence s'étend entre le pont Moulay Hassan et le pont ONCF. Elle occupe **247 ha dont seulement 3 ha sont urbanisés actuellement**. Cette urbanisation concerne principalement un supermarché « Marjane » situées en fond de vallée dans une zone réputée inondable et quelques clubs privés situés le long de la vallée. La destinée de ces constructions n'est pas identifiable dans le plan d'aménagement, car **ce secteur est couvert par une zone de projet (ZP – 3) futur non défini aujourd'hui**.

Néanmoins, les documents de vulgarisation du projet prévoient **l'aménagement de deux axes transversaux à la vallée**. Le premier, monumental, doit relier la Tour Hassan au futur projet emblématique, situé au milieu de la vallée, sur une île, par une succession de places et d'équipements publics. Le second axe, dédié aux commerces et aux activités tertiaires, s'étendra du pied du versant de Rabat jusqu'à l'autre rive (cité des potiers).

Le programme projeté dans cette séquence est réparti de la façon suivante :

- Équipements : 01 ha,
- Espace publics : 13 ha,
- Voirie : 31 ha,
- Zone de projet (non défini) 133 ha

Le nombre de logements projeté dans cette zone est de l'ordre de **5 500 logements**. Ce parc de logement ramené à la superficie de 133 hectares de zone de projet urbain non défini représente une **densité moyenne de l'ordre de 41 logements à l'hectare**. Or, la densité en nombre d'habitants à l'hectare affichée par le projet est de l'ordre de 140 habitants/ha ce qui représente une forte densité, presque le triple de la densité affichée par le projet dans la première séquence (50 habitants/ha).

La population estimée à l'horizon 2030 dans cette séquence est de l'ordre de 24 750 habitants ce qui représente une taille moyenne de ménage de l'ordre de 4,5 individus par ménage. Nous pensons également que ce chiffre est surestimé à l'horizon 2030.

Le **nombre d'emplois** projeté dans cette séquence est estimé à 12 750 actifs. La densité humaine (habitants et actifs) attendue à terme est donc de l'ordre de 267 individus à l'hectare. Ce qui est considéré comme une très forte densité.

La vulnérabilité urbaine de cette séquence dense est liée principalement à deux facteurs : la problématique d'inondation et la qualité médiocre du sol. Car, elle se situe dans la zone réputée inondable de la vallée, ce qui explique d'ailleurs son état resté naturel pendant des siècles. Par ailleurs, le sol est composé de sédiments cumulés à travers le temps et charriés par la rivière du Bouregreg.

2.3 Séquence 3 - Kasbat Abi Raqraq

La partie de la vallée située en amont, entre le pont ONCF et la rocade autoroutière est actuellement occupée pour l'essentiel par l'agriculture. Cette zone dénommée Al Oulja (la courbe) est **exposée complètement aux inondations**. Sur ses marges, l'espace est occupé par des constructions médiocres et dispersées : zones industrielles, dépôts et décharges, exploitation de carrière et de l'habitat spontané. Sur les plateaux des deux rives, de grands quartiers non réglementaires se sont développés.

Néanmoins, l'ensemble de cette séquence possède une **grande qualité paysagère** et dominé par le site archéologique majeur de Chellah.

La zone urbaine projetée représente 508 ha soit 22% de l'espace total de cette séquence qui est de l'ordre de 2 283 ha.

Le programme projeté à est réparti de la façon suivante :

- Équipements : 59 ha
(essentiellement occupés par le lac hydraulique d'Oulja),
- Espace publics : 154 ha,
- Voirie : 43 ha,
- Terrains cessibles (tissu mixte) 120 ha,
- Zone de projet (non défini) 132 ha

Le projet prévoit le **maintien de la zone humide de Chellah**, la création en fond de vallée d'un plan d'eau et d'une membrane verte. L'urbanisation (Pièce urbaine) s'effectuera le long du plan d'eau en bas des coteaux sur des remblais ainsi que sur la rive gauche en créant deux quartiers. Une technopole est prévue en amont en bas de coteau sur la rive droite.

Le nombre de logements projeté dans cette zone est de l'ordre de **10 542 logements**. Ce parc de logement ramené à la superficie de 120 hectares de terrains dédiés à l'habitat représente une **densité moyenne de l'ordre de 88 logements à l'hectare** (densité importante).

La population estimée à terme du projet dans cette séquence est de l'ordre de **47 437 habitants** ramenée au nombre de logements représente une taille moyenne de ménage de l'ordre de 4,5 individus par ménage. Nous pensons que ce chiffre est surestimé à l'horizon 2030.

La densité globale (nombre d'habitants par hectare de la totalité de la zone urbaine projetée hors équipements majeurs) est de l'ordre de **150 habitants/ha** ce qui représente une forte densité.

Le **nombre d'emplois** attendu dans cette séquence est estimé à 53 246 actifs. La densité humaine (habitants et actifs soit 100 683) attendue à terme est donc de l'ordre de 200 individus à l'hectare. En enlevant les 59 hectares majoritairement occupés par le lac, ce chiffre sera de l'ordre de 225 individus à l'hectare. En plus, si nous raisonnant en termes de densité humaine nette, à savoir, habitants et actifs par rapport à l'espace constructible y compris la voirie, cette densité était de l'ordre de 618 individus à l'hectare.

Eu égard à ces différentes densités très élevées et à la localisation de cette séquence, les **vulnérabilités urbaines** en conséquence très importantes. Ces vulnérabilités ne sont pas uniquement liées la densité et aux risques d'inondation mais également à la qualité médiocre

des sols et aux risques d'éboulement et de pollution liés à l'urbanisation non réglementaire sur les collines surplombant les secteurs d'urbanisation future de cette séquence.

Enfin, il est à signaler que **l'occupation urbaine tout autour de ce périmètre est très vulnérable également**. Car des quartiers d'habitat insalubre dense sont construits sur des flancs de coteaux instables. Ils déversent leurs déchets de toutes sortes directement dans la vallée. Des activités industrielles et artisanales se retrouvent également dans les espaces adjacents ainsi que des carrières à ciel ouvert. Souvent ses activités sont également non réglementaires et elles ne sont pas contrôlées.

2.4 Séquence 4 - Sahrij El Oued

En amont du pont Mohamed V et de la rocade, le **vaste paysage agricole** est encore resté jusqu'à aujourd'hui vide de toute urbanisation. Les équipements d'infrastructure sont inexistant, à l'exception de petites routes médiocres. La partie amont, autour d'un bidonville (Akreuch) est défigurée par les carrières et la décharge d'ordures de Rabat.

Le positionnement de la **décharge non contrôlée** en amont des secteurs fortement urbanisés de Rabat et de Salé est très préoccupant. En plus, la pollution des sols et de la nappe phréatique sont également à déplorer.

La zone urbaine projetée représente 599 ha soit 57% de l'espace total de cette séquence qui est de l'ordre de 1 055 ha..

Le programme projeté est réparti de la façon suivante :

- Voirie : 30 ha,
- Zone de projet (non défini): 569 ha

Aujourd'hui, aucune information officielle n'est disponible sur le programme détaillé en termes d'urbanisation de cette séquence. Le Plan d'aménagement délimite deux zones de projet : ZP-6 g et ZP-6 d.

Cependant, les documents de vulgarisation du projet prévoient le **maintien majoritairement de l'occupation agricole et l'installation d'un bassin d'eau d'irrigation**. A terme, et après des travaux d'assainissement et de dépollution (décharge et carrière), le projet prévoit l'installation d'une cité des sports et d'un technopole.

2.5 Séquence 5 - Al Menzah al Kabir

Cette séquence qui **concerne 1 494 ha est actuellement occupée par l'agriculture**, ne possède aucune occupation urbaine. Quelques constructions rurales parsemées sont éparpillées le long de la petite route qui les dessert.

Le projet du Bouregreg prévoit le **maintien en espace naturel de cette séquence**. Le plan d'aménagement désigne un périmètre de projet de 635 ha dont le programme n'est pas défini et un espace pour équipement de l'ordre de 23 ha

2.6 Séquence 6 - Les Belvédères de H'ssaine

Cet espace de 336 hectares possède 36 hectares (11%) d'occupation urbaine le reste de l'occupation est composée d'espaces naturels et agricoles. **La zone urbaine projetée représente 300 ha soit 89 % de l'espace total de cette séquence.**

Le programme projeté à est réparti de la façon suivante :

- Équipements : 42 ha
- Espace publics : 17 ha,
- Voirie : 57 ha,
- Terrains cessibles (tissu mixte) : 184 ha,

Situé sur les coteaux de H'ssaine, le projet prévoit une urbanisation essentiellement en habitat à proximité de Sala al Jedida.

Le nombre de logements projeté dans cette séquence est de l'ordre de **13 000 logements**. Ce parc de logement ramené à la superficie de 184 hectares de terrains dédiés à l'habitat représente une **densité moyenne de l'ordre de 70 logements à l'hectare** (densité très importante).

La population estimée à terme du projet dans cette séquence est de l'ordre de **58 500 habitants** ramenée au nombre de logements représente une taille moyenne de ménage de l'ordre de 4,5 individus par ménage. Nous pensons que ce chiffre est surestimé à l'horizon 2030.

La densité affichée par le projet est de l'ordre de **195 habitants à l'hectare** ce qui représente déjà une très forte densité. Cependant, en appliquant la taille moyenne des ménages à la densité de logements à l'hectare y compris voirie et espaces publics (hors équipements) nous obtiendrons 50 log./ha soit 225 habitants à l'hectare, ce qui représente encore une plus forte densité.

Le **nombre d'emplois** attendu dans cette séquence est estimé à 15 000 actifs. La densité humaine (habitants et actifs soit 71 500) attendue à terme est donc de l'ordre de 238 individus à l'hectare. Ce qui représente une très forte densité humaine.

3 Analyse des risques à l'horizon 2030

Les cartes présentées aux pages suivantes permettent d'appréhender et de comparer les vulnérabilités du site en situation actuelle et future.

Le tableau suivant désigne la répartition des densités en fonction des postes de légende retenus pour la carte d'occupation du sol en 2030.

Tableau 23 : Caractérisation de l'occupation des sols dans le cadre du projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg.

Occupation du sol	Ville Basse	Ville moyenne	Ville haute	
Tissu urbain résidentiel continu dense	B2.2	M2.5	H2 + H2.5 + H3	Émergences
Tissu urbain résidentiel continu moyennement dense	B1.5 + B1.9	M1.5 +M1.9		
Tissu urbain résidentiel continu peu dense	B1.1			
Tissu urbain résidentiel discontinu	B0.5			

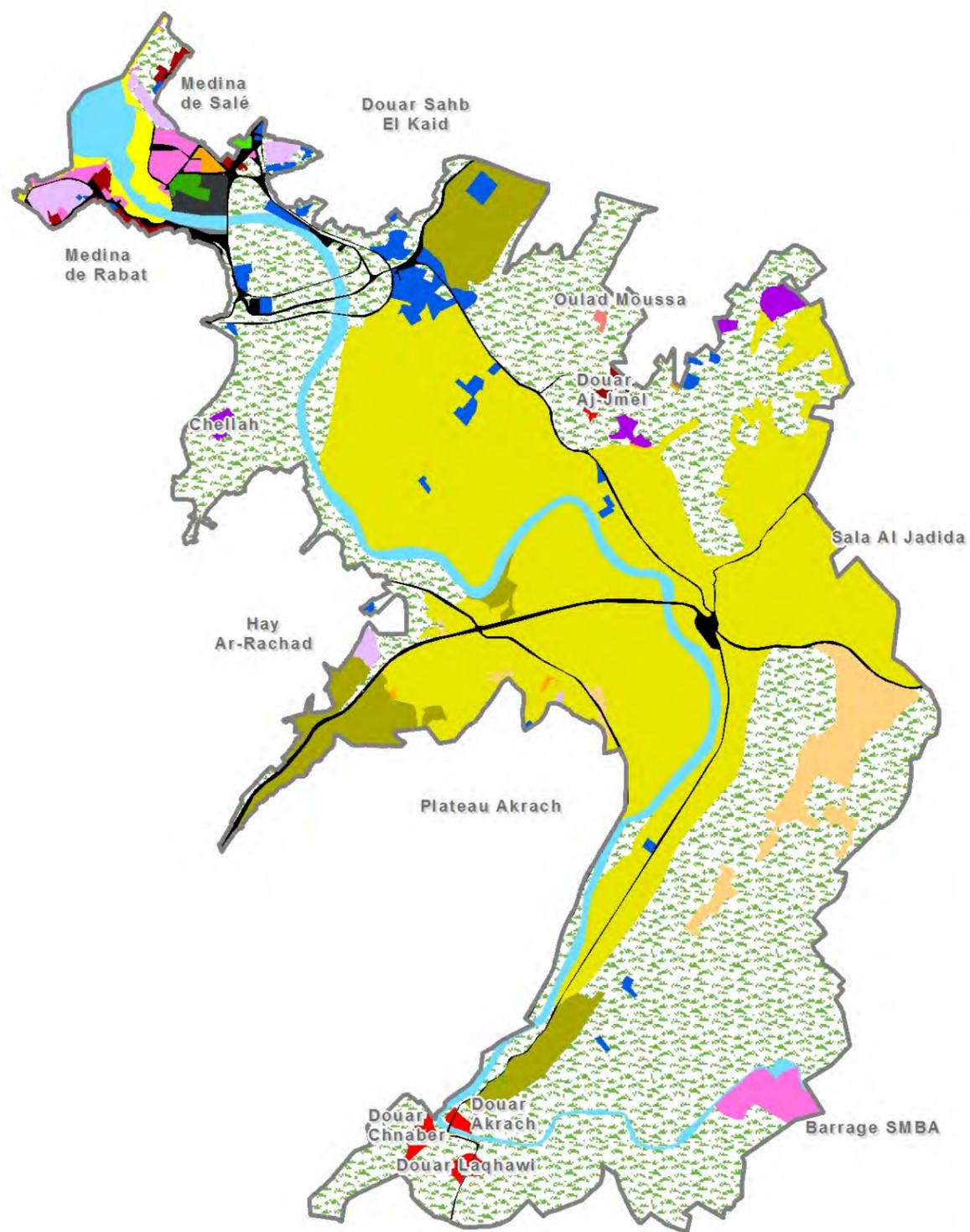
Ces cartes traduisent bien le **profond changement que va connaître la vallée** du Bouregreg dans les années à venir.

Même si le projet du Bouregreg prévoit des structures urbaines s'échelonnant sur trois niveaux de gabarits urbains (ville basse, moyenne et haute), nous avons constaté que **les densités sont globalement élevées à très élevées**. Avec la construction d'environ 30 500 logements prévus à terme pour accueillir quelques 137 600 nouveaux habitants et la création estimée de 88 200 emplois, le volume global représente une grande ville répartie par quartiers sur un **site sensible et vulnérable aux risques naturels et au changement climatique**.

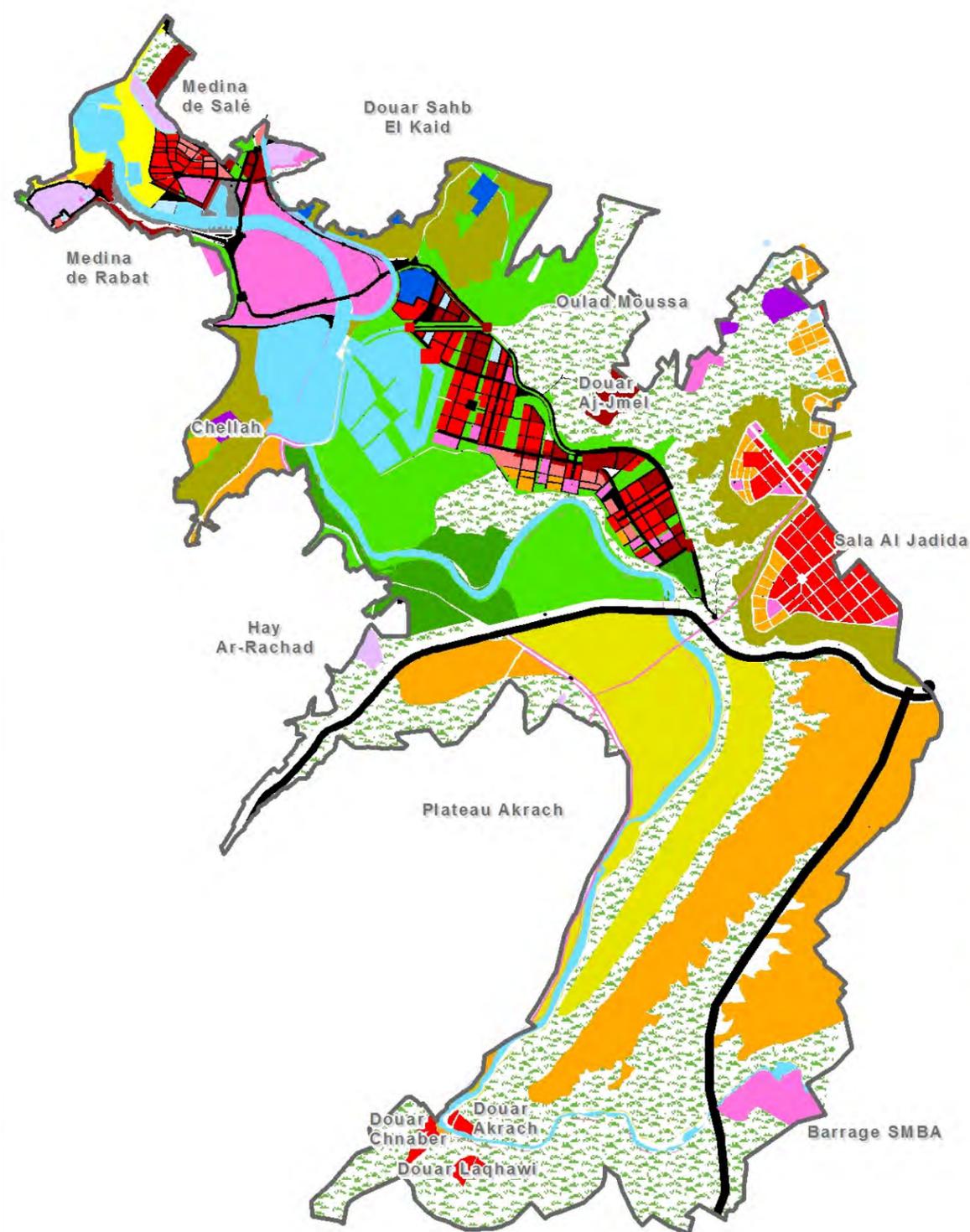
En effet, si le site est actuellement très faiblement urbanisé, c'est justement qu'il cumule un certain nombre de risques naturels, à commencer par le **risque d'inondation**. L'on s'aperçoit que les quelques zones agglomérées actuelles (douars) se situent à l'extérieur de la zone inondable pour une crue centennale. En l'état futur, le plan d'aménagement de la Séquence 3 (Kasbat Abi Raqraq) prévoit l'urbanisation d'une partie du champ d'inondation. Environ 50 000 habitants et autant d'employés seront ainsi potentiellement exposés aux crues du fleuve (hors prise en compte du risque dans le projet). Au risque d'inondation s'ajoute un risque sismique qui, bien que modéré, se trouve exacerbé par la mauvaise qualité géotechnique des sols (fortement compressibles en fond de vallée et instables sur les versants). Seul le futur quartier de Sala Al Jadida (Séquence 6 - Les Belvédères de H'ssaine), construit en haut de versant sur le socle rocheux, bénéficie d'une situation relativement privilégiée par rapport au risque d'inondation et au risque sismique. Quant au risque de submersion par une surcote marine, il ne touche le projet d'aménagement qu'à la marge, l'impact de l'élévation du niveau marin sur l'écoulement des crues n'étant par ailleurs sensible que sur quelques centaines de mètres.

Les **mesures d'adaptation** pour articuler et faire vivre en sécurité tous les secteurs urbains risquent de représenter un effort et des coûts très importants.

ACTUEL



2030



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 38
L'occupation du sol actuelle et à l'horizon 2030 dans la vallée du Bouregreg

Légende

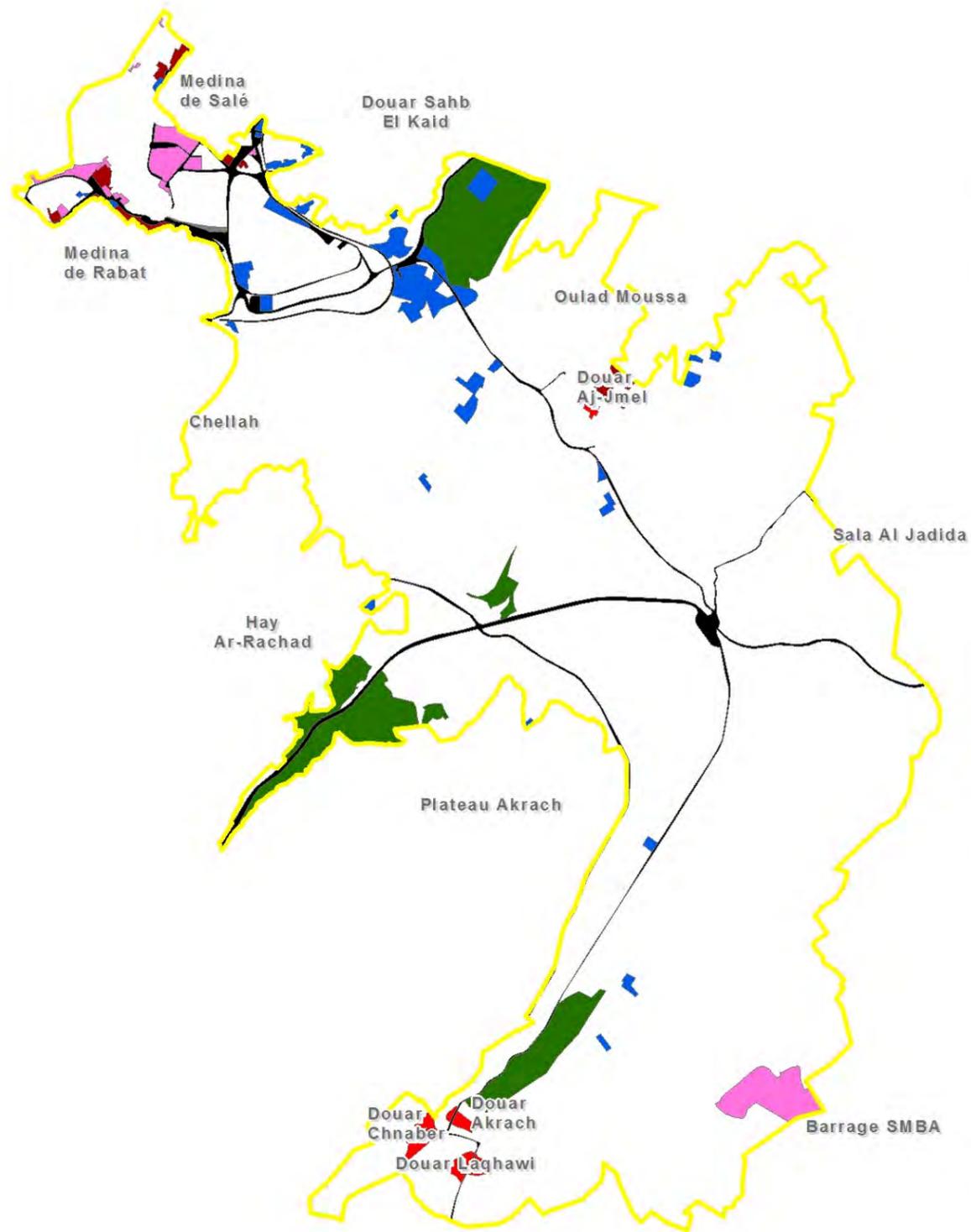
Occupation du sol

- Tissu urbain résidentiel continu dense
- Tissu urbain résidentiel continu moyennement dense
- Tissu urbain résidentiel continu peu dense
- Tissu urbain résidentiel discontinu
- Constructions résidentielles isolées
- Zone industrielle ou commerciale
- Zone portuaire
- Espaces routiers et ferroviaires
- Equipement
- Cimetière
- Espace vert urbain
- Equipement sportif et de loisirs
- Espace à dominante agricole
- Bois ou forêt
- Plage et dunes
- Végétation clairsemée
- Cours d'eau, plan d'eau ou zone humide
- Secteur urbain existant à fort intérêt patrimonial

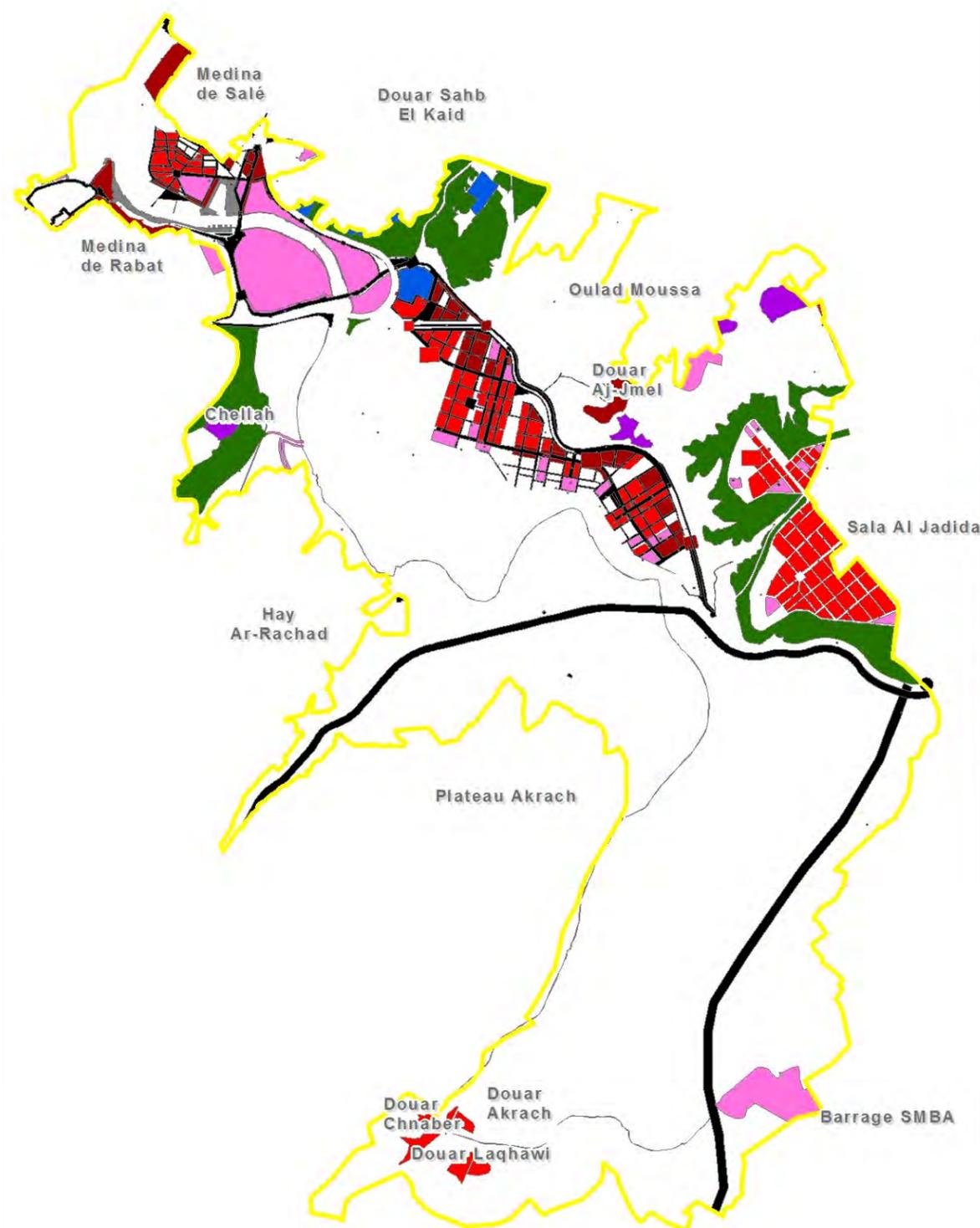
1 000 Mètres



ACTUEL



2030



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 39
Sensibilités actuelles et à l'horizon 2030 dans la vallée du Bouregreg

Légende

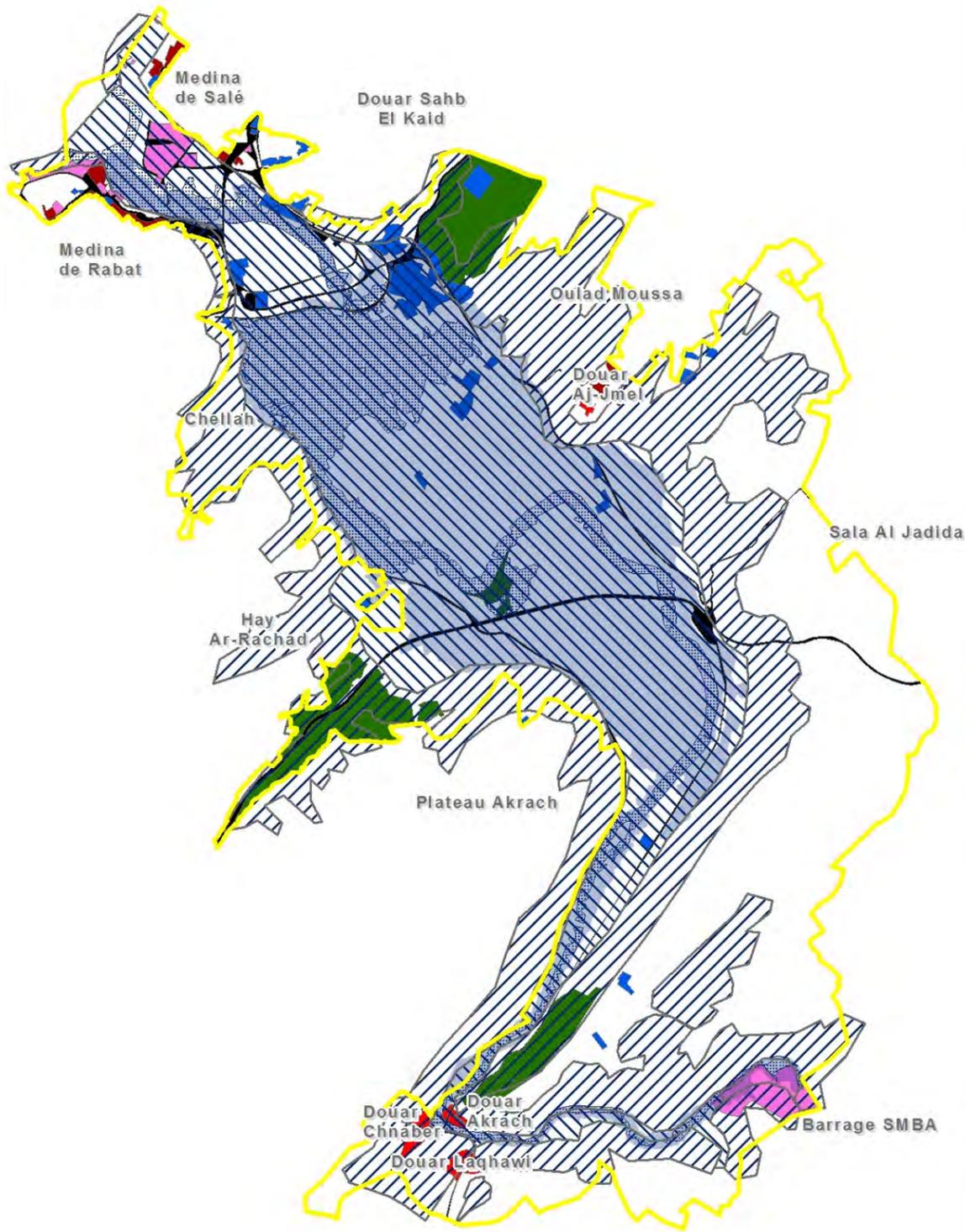
Occupation du sol

- Zone résidentielle dense
- Zone résidentielle moyennement dense
- Zone industrielle ou commerciale
- Zone portuaire
- Espaces routiers et ferroviaires
- Equipement
- Zones naturelles à préserver ou à créer
- Secteur urbain existant à fort intérêt patrimonial
- Limite du secteur d'étude

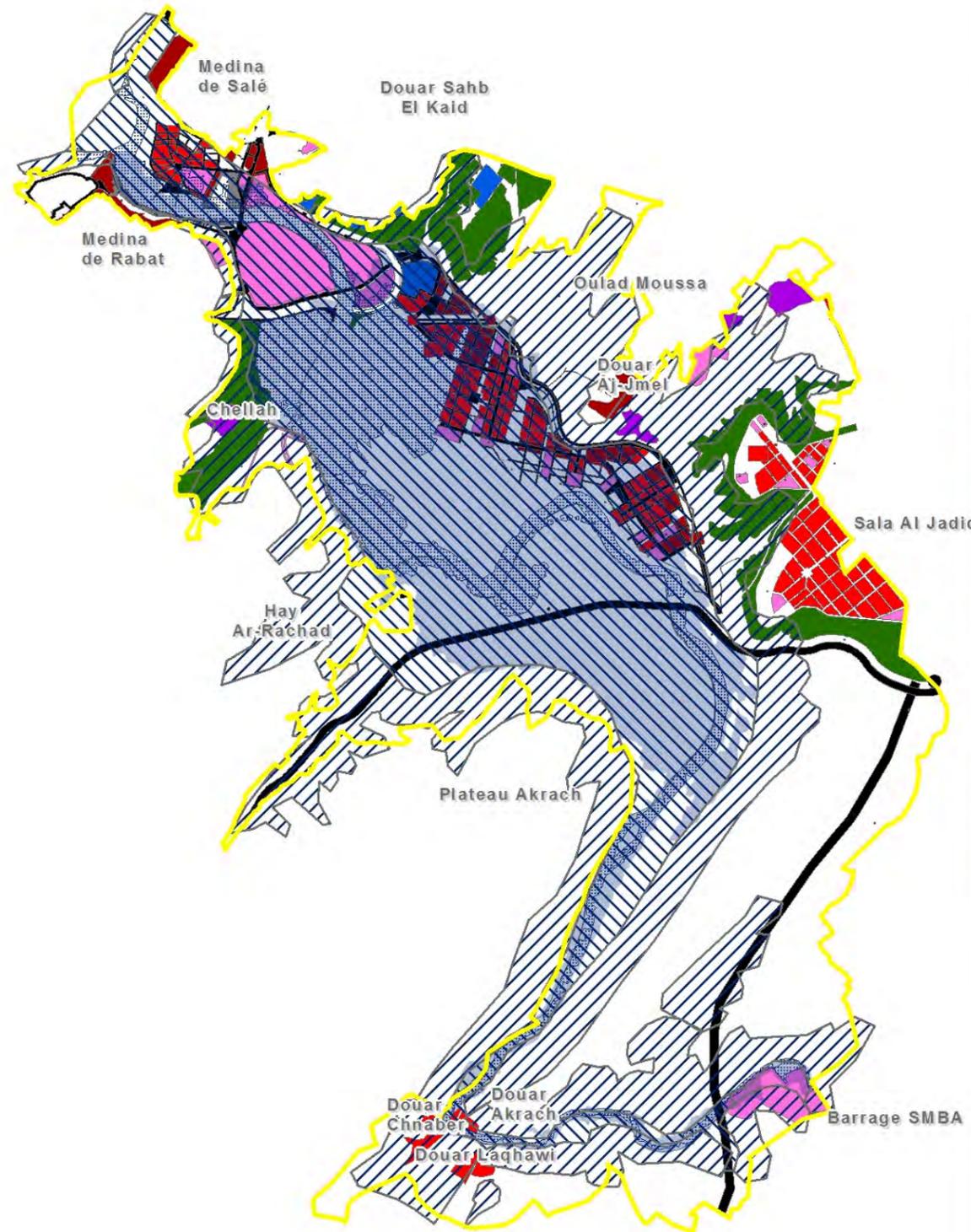
1 000
Mètres



ACTUEL



2030



BANQUE MONDIALE

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUX DÉSASTRES NATURELS DES VILLES CÔTIÈRES D'AFRIQUE DU NORD

Royaume du Maroc

Figure 40 Les aléas et les sensibilités dans la vallée du Bouregreg

Légende

Occupation du sol

- Zone résidentielle dense
- Zone résidentielle moyennement dense
- Zone industrielle ou commerciale
- Zone portuaire
- Espaces routiers et ferroviaires
- Equipement
- Zones naturelles à préserver ou à créer
- Site urbain existant à fort intérêt patrimonial
- Limite du secteur d'étude

Aléas

- Aléa géotechnique : terrains instables
- Aléa sismique : terrains compressibles
- Aléa submersion
- Aléa inondation (Q100)

1 000 Mètres



Chapitre 6 - Références bibliographiques

Evaluation des aléas en situation actuelle

- 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 Méditerranéan 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 AE 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., Delgado 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, *ISET 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 Méditerranéean area from the 11th to the 15th century
- Kaabouben F., Baptista A., Iben Brahim A., El Mouraouah A., Toto A. (2009) On the morroccan 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

Evaluation des aléas à l'horizon 2030

- 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