

LIVRE BLANC

Météorologie-Climat-Océanographie-Hydrologie-Société

Pour une recherche collaborative d'excellence

Introduction

Ce livre blanc est une recommandation du colloque scientifique 'Climat, Eau et Société' qui s'est tenu à Tunis les 31 janvier et 1er février 2017 à l'initiative de l'Institut National de la Météorologie (INM) avec l'appui du Centre National de Recherche Météorologique (CNRM), de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer (INSTM), de l'Ecole National d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), de l'Institut National des Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF) et du Centre d'Etudes et de Recherches Economiques et Sociales (CERES). Il s'agit d'une première étape pour l'élaboration d'une prospective nationale tunisienne en sciences atmosphériques et domaines connexes, à savoir la météorologie, le climat, l'hydrologie, l'océanographie et les sciences humaines et sociales sur les risques liés aux compartiments du Système terre-mer-atmosphère (risques météorologiques, climatiques, hydrologiques, océaniques, ...).

Cette recommandation est d'autant plus importante qu'elle avait émané d'un grand nombre de compétences tunisiennes en sciences météorologiques et domaines annexes présentes au colloque. Plus de 80 chercheurs, ingénieurs, techniciens, étudiants et autres compétences se sont en effet réunis pour débattre de la thématique de la météorologie au sens large.

Le sentiment partagé d'une remise en question de l'approche suivie en sciences météorologiques -sentiment qui a poussé à la réalisation du colloque et qui a été l'une de ses principales conclusions- a été sans doute déterminant dans la décision d'élaboration de ce livre blanc. Le constat a été anonyme : la Tunisie dispose de compétences de très haut niveau dans les différents domaines en relation avec la météorologie (climat, prévision et prédiction, océanographie, environnement, hydrologie, impacts, vulnérabilité et adaptation alerte, ...). Cependant, à l'échelle individuelle comme institutionnelle, la collaboration entre ces compétences et même entre institutions est restée très souvent limitée, pour ne pas

dire inexistante. Pourtant il y'a une réelle conscience de la valeur ajoutée que pourrait engendrer l'approche collaborative. Les exemples illustratifs sont nombreux, en l'occurrence ceux d'institutions européennes pour lesquelles le travail collaboratif est désormais une tradition.

Ce livre blanc essaye de donner les orientations et de baliser la voie pour répondre au questionnement d'ordre général :

« Comment la recherche tunisienne pourrait-elle s'organiser pour mieux fédérer sa réponse aux enjeux sociétaux en environnement ».

Il a donc pour objectif d'identifier l'état des lieux de la situation actuelle, de détecter les défaillances constatées en termes de collaboration scientifique entre organismes et d'inciter les différents intervenants à travailler en réseau. Il propose des stratégies et des actions pour lever les verrous et progresser dans la connaissance et les applications dans les domaines météorologie-climat-hydrologie-océanographie-société. Il vise à servir la communauté scientifique tunisienne pour s'organiser, travailler en collaboration (coopérer) et mettre en œuvre les stratégies identifiées.

Pour atteindre cet objectif, un comité scientifique composé de compétences tunisiennes dans le domaine a été créé. Son rôle est de réaliser un diagnostic de l'état actuel en mettant en avant les atouts et en détectant les faiblesses, de présenter des orientations avec des actions précises. Ce livre blanc se veut donc un guide pour tous les intervenants dans le domaine météorologique au sens large et en particulier les décideurs. Il pourra constituer une base pour la mise en place d'une stratégie de recherche dans ce domaine.

Motivations

La Tunisie, pays méditerranéen par excellence mais aussi bordé par le Sahara a un climat variable avec une alternance d'épisodes de sécheresse et d'autres de pluies intenses qui génèrent du ruissellement et des apports d'eau avec des débits parfois très importants. Des inondations soudaines peuvent causer des dégâts très sérieux, comme celles de septembre 2003 dans le Grand-



Tunis et, dans certaines circonstances, des décès comme celles de 1969 dans la région de Kairouan.

En Tunisie, l'alternance d'épisodes de fortes précipitations et de longues périodes de sécheresses complique fortement la gestion des ressources en eau du pays. Au déficit de précipitations s'ajoute une évaporation importante pendant les périodes estivales et une pression anthropique croissante (accroissement démographique, développement socio-économique, etc.). Ainsi suivre et prévoir les ressources en eau, de l'échéance de quelques jours à l'échelle saisonnière ou annuelle, nécessitent de mieux observer et modéliser les termes du bilan d'eau des surfaces continentales (précipitations, ruissellement, évaporation, eaux souterraines, etc.), mais aussi de prendre en compte les facteurs anthropiques (aménagement pour la gestion des ressources en eau, des inondations et de la conservation des eaux et des sols, etc.). Ces actions requièrent donc une plus grande intégration des différentes disciplines en relation avec la question de l'eau en Tunisie.

Pays riverain de la Méditerranée, les interactions entre la mer, l'atmosphère et le littoral y sont très importantes. La

façade nord de la Tunisie, caractérisée par des fonds profonds et de nombreux chenaux, présente une circulation marine complexe fortement influencée par les vents du nord, fréquents et intenses. La façade orientale quant à elle se distingue par un plateau continental étendu peu profond et une forte évaporation des eaux superficielles en été. Il est donc important d'identifier et de renforcer les collaborations pour progresser dans la compréhension et la modélisation des effets des conditions météorologiques sur la circulation marine et les écosystèmes côtiers. Ces collaborations vont permettre aussi l'identification des effets conjugués de la mer et du vent sur les rivages et le rôle de la mer Méditerranée sur les phénomènes météorologiques côtiers.

La Tunisie est soumise à un climat irrégulier mais caractérisé par une grande aridité. Les projections climatiques indiquent une hausse des températures, une modification du régime pluviométrique, une modification de la fréquence des extrêmes, une surélévation du niveau de la mer et une intensification de la désertification. Ces modifications accroîtront sans aucun doute la vulnérabilité environnementale et socio-économique du pays.

A-t-on atteint aujourd'hui en Tunisie les conditions optimales en recherche, prévision et interaction avec le citoyen dans le domaine de la météorologie au sens large ? Les conditions sont-elles réunies pour atteindre les standards internationaux ? Ce livre blanc est une feuille de route qui met l'accent sur les faiblesses, les atouts et la stratégie à suivre. L'inexistence d'une structure de recherche scientifique en sciences atmosphériques et domaines annexes est une faiblesse majeure. A l'échelle mondiale, la recherche en sciences atmosphériques est désormais devenue partie intégrante des stratégies nationales. Ainsi se doter de moyens d'observation, de prévision et d'anticipation est devenu essentiel pour une gestion adéquate des aléas climatiques. En Tunisie, les actions de recherche à caractère interdisciplinaire sont encore trop timides. Cela découle de pratiques conservatrices, en particulier en ce qui concerne l'accès et le partage de données

météorologiques, océaniques et hydrologiques. D'un autre côté, la recherche en climatologie, météorologie, océanographie et hydrographie et les produits de prévision qui en ressortent reposent désormais sur la modélisation numérique. Des plateformes multi-systèmes (mer-atmosphère, sol et végétation) multi-institutions (institutions océanographiques, instituts météorologiques, centre de recherche en climat et en hydrologie, ...) sont maintenant les outils de recherche utilisés dans les centres de recherche de renom. La faible collaboration entre instituts et équipes de recherche rajoutée à une absence de moyens de calculs nécessaires (superordinateurs) sont des freins à la mise en place de plateformes numériques partagées. La Tunisie dispose d'un atout d'une grande importance. La recherche scientifique y est depuis 2008 bien structurée (laboratoires, unités et projets) et bien rodée. Elle bénéficie d'une entité indépendante d'évaluation (Commission Nationale d'Évaluation de la Recherche Scientifique, CNEARS) et d'intégration dans les projets internationaux (conventions bilatérales, programme, H2020, etc.). Mais le premier atout de la Tunisie est sûrement la disponibilité de compétences humaines de haut niveau bien formées et pour la plupart impliquées dans des projets de recherche internationaux.

Se basant sur ces exemples de faiblesses et d'atouts du système recherche-prévision-alerte, ce livre blanc propose des actions pour :

- *Développer et renforcer les études pluridisciplinaires en météorologie, climat et changements climatiques et présenter des stratégies d'adaptation de la Tunisie face aux aléas météorologiques, à la variabilité et au changement climatique. Les conséquences sont d'une importance majeure pour la population Tunisienne et pour les différents secteurs d'activités du pays (agriculture, tourisme, santé, etc.).*
- *Améliorer la connaissance en modélisation, prévision et alerte de ces aléas afin de maîtriser les conséquences hydrologiques et socio-économiques.*

La communauté scientifique tunisienne est intimement persuadée qu'une mise à niveau de la recherche scientifique en sciences météorologiques en Tunisie est primordiale et est possible.

1

Précipitations extrêmes et impact hydrologique



1 Précipitations extrêmes et impacts hydrologiques

Contexte

La Tunisie est un pays méditerranéen dont le développement est étroitement lié aux aléas météorologiques et climatiques. Les extrêmes, comme les crues importantes et les sécheresses exposent de façon périodique les populations urbaines et rurales à des pertes humaines et matérielles importantes. La gravité des dégâts a fait émerger une véritable prise de conscience du risque météorologique et hydrologique. Face à une telle situation, l'intervention des gestionnaires et des décideurs devrait être plus efficace en termes de prévision et d'impact. L'amélioration de cette efficacité passe nécessairement par un effort considérable de recherche dans le domaine de la modélisation des processus météorologiques, climatiques et hydrologiques aux échelles locales et régionales et pour différentes échelles temporelles.

Selon les Nations Unies (PNUD, 2004), la Tunisie est le 43ème pays le plus vulnérable aux inondations ; soit 16,44 décès par million d'exposés aux inondations (le Venezuela est le pays le plus vulnérable soit 491,84 décès par million d'exposés aux inondations).

Les inondations de 1969 et 1973 sont remarquables à nos jours et ont marqué les mémoires collectives ; les crues de Oued Zeroud en 1969 et de la Medjerda en 1973 sont d'ailleurs, parmi les plus extrêmes dans les annales hydrologiques mondiales. Les inondations de septembre 1969, ont fait 540 décès, 271 269 personnes affectées, et 100 millions US\$ de dommages.



Le village de Tamerghza a été dévasté et abandonné suite à la crue de l'oued Gouiffa en 1969 (photo Y. ZAHAR : 1999)

Depuis l'indépendance du pays en 1956, les villes tunisiennes, et l'agglomération tunisoise en particulier, ont connu une

croissance galopante qui s'est traduite à la fois par une extension rapide de l'espace urbain et une densification accrue du bâti.

Quels sont les facteurs qui augmentent le risque d'inondation ?

Des changements hydrologiques certains en relation avec une urbanisation galopante :

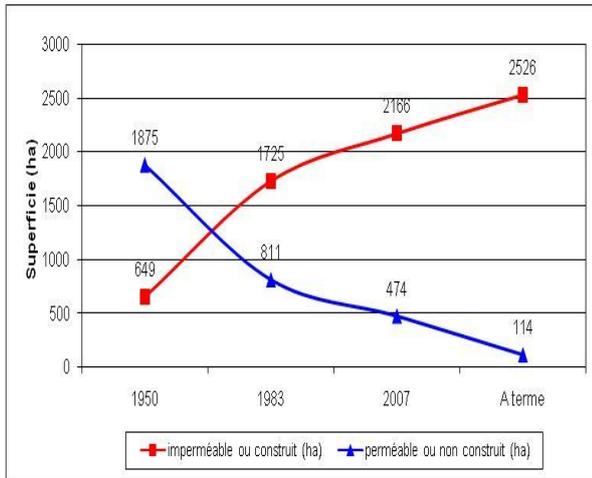
La croissance urbaine effrénée observée au cours des dernières décennies dans la plupart des grandes villes tunisiennes a eu des répercussions indéniables sur les processus hydrologiques des états de surface. Ces impacts se traduisent surtout par une augmentation des coefficients de ruissellement inhérente à l'augmentation des surfaces imperméables.

Les grandes étapes de cette extension pour l'agglomération tunisoise ont été retracées dans le cas du bassin expérimental des oueds El-Ghrich et El-Greb (26,4 km²) et leurs impacts hydrologiques étudiés et détaillés récemment dans des travaux de recherche :

- Durant les années 1960 fut construite la Cité El-Khadhra l'une des premières cités populaires construite après l'indépendance afin de reloger les habitants des bidonvilles. Constituée surtout d'un habitat en bande continue et d'immeubles, elle se caractérise par un tissu dense. Parallèlement, a vu le jour aussi la Cité Olympique constituée d'espaces mixtes (Bâti + espaces verts).
- Au cours des années 1970 furent aménagés la voie rapide appelée Route X et les quartiers résidentiels d'El-Menazeh.
- A partir des années 1980 une deuxième voie rapide a été aménagée : la X20. Parallèlement, les Cités Ennasr I, II et III ont progressivement vu le jour. Ces quartiers sont destinés aux classes moyennes et supérieures et sont constitués essentiellement d'habitat en villas ou en immeubles de standing.
- Dès les années 1990, le front urbain a avancé sur des terrains de plus en plus pentus et instables. Actuellement, cette tendance ne fait que se confirmer puisque de nouveaux quartiers résidentiels sont en train d'être érigés sur les

versants abrupts amont du bassin versant (Jardins El-Menze, etc.).

Ainsi presque entièrement rural en 1950, ce bassin versant est actuellement urbanisé à plus de 80%.



Évolution inverse des surfaces perméables et imperméables dans le bassin versant des oueds El-Ghrich et El-Greb.

Alerte et prévision des pluies extrêmes

L'Institut National de la Météorologie (INM) a la responsabilité de fournir des prévisions et des alertes qui soient les plus fiables possible et en temps opportun, axées sur la gestion des risques météorologiques. Comme mentionné plus haut, certains phénomènes, en particulier les précipitations extrêmes, peuvent avoir des conséquences importantes sur les personnes et les

Pluies intenses, extrêmes

Les pluies intenses sont celles qui apportent sur une courte durée (d'une heure à une journée) une importante quantité d'eau qui peut parfois dépasser le cumul mensuel de pluie.

Lorsque la quantité de pluie dépasse certains seuils, on parle alors de pluie extrême. Ces seuils dépendent, entre autres, de l'intensité de pluie, de la climatologie, de la localisation géographique et de l'occupation du sol.

L'émission d'alerte est tributaire du jugement du prévisionniste qui se base sur un retour d'expérience par rapport aux systèmes météorologiques et leurs impacts.

biens. Parfois très localisées et de fortes intensités, elles peuvent provoquer des dégâts importants : des inondations (risque naturel n°1 en Tunisie bien avant les séismes), tempêtes, raz de marée, etc. Celles-ci sont remarquables par leur soudaineté d'apparition et leurs impacts sporadiques, aléatoires et extrêmes.

A l'échelle synoptique, la Tunisie est exposée principalement aux perturbations atlantiques froides du côté nord et celles sahariennes chaudes provenant du sud. Par ailleurs, elle subit les effets de la Méditerranée qui représente une source importante d'humidité et de régulation.

Le développement de cellules orageuses à l'origine des pluies intenses est généré par deux systèmes :

- Un système frontal : les fronts séparant les masses d'air froides des masses d'air chaudes. Ce système est généralement prévisible à courte et moyenne échéance.
- Un système convectif : résultat d'un déséquilibre énergétique vertical de l'atmosphère dans une masse d'air instable. Ce système n'est prévisible qu'à courte, voire très courte échéance et il est plus délicat à prédire, vu sa résolution spatiotemporelle.

En Tunisie, les inondations les plus importantes sont

Connaître et maîtriser les risques météorologiques

Les risques concernent tous les phénomènes météorologiques sévères et dangereux. Une meilleure estimation des événements extrêmes – **les pluies extrêmes** – et les risques associés nécessite l'amélioration des systèmes d'observation du temps et de transmission de l'information, en les croisant à des prévisions météorologiques fiables. Pour cela, l'INM vise la mise en opérationnel du modèle de prévision numérique à maille très fine AROME. Ce dernier est dédié à la prévision des phénomènes météorologiques de petite échelle et potentiellement dangereux comme les orages et les pluies intenses.

généralement celles liées à des pluies convectives surtout en

Echéance de prévision

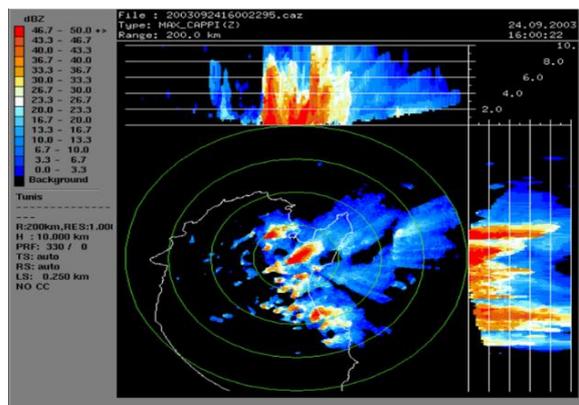
- Prévision très courte échéance/immédiate : une prévision de quelques heures à un jour
- Prévision à courte échéance : prévision de 1 à 2 ou 3 jours
- Prévision à moyenne échéance : prévision de 3 à 10 jours

intersaison.

En cas d'alerte lors d'événement météorologiques extrêmes, l'information mise à disposition du public est diffusée à travers des bulletins d'avertissement de l'imminence de phénomènes météorologiques dangereux (*communiqués ou bulletins spéciaux*).

En effet, en cas de pluies extrêmes et suite aux dépassements de seuils critiques, des informations pour les prochaines 24 heures sont diffusées et actualisées aussi souvent que nécessaire. L'évolution, la trajectoire et la fin prévue (i.e. les zones qui seront touchées), ainsi que l'intensité et éventuellement l'impact, permettent de juger de l'ampleur de la situation et l'estimation du niveau de l'alerte adaptée à communiquer.

Deux événements pluviométriques exceptionnels se sont succédés les 16-17-18 et le 24 septembre 2003 sur le Grand Tunis (INM, 2005). Ils ont été caractérisés par deux noyaux orageux centrés sur Tunis à une semaine d'intervalle. Le cumul des pluies du mois de septembre à la station de Tunis-Carthage a atteint 346 mm, soit 11 fois la normale du mois. Ces deux événements ont engendré de graves inondations avec un volume d'eau précipitée très largement supérieur à la capacité cumulée de la trentaine de bassins d'orages de Tunis (de l'ordre de 1 million de m³).



Carte Radar événement du 24 septembre 2003

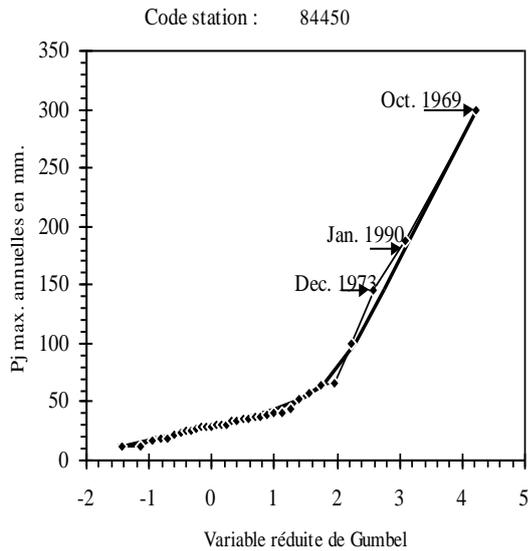
Modélisation des pluies extrêmes

Les précipitations journalières maximales annuelles présentent en Tunisie une distribution fortement dissymétrique du fait de la présence dans la majorité des cas de valeurs très exceptionnelles (qui ont occasionné les inondations les plus catastrophiques : 1969, 1973, 1990, etc.).

Cette dissymétrie est particulièrement marquée dans le centre et le sud du pays. Pour étudier les événements extrêmes on utilise un modèle d'ajustement d'une loi statistique qui tient compte de ces événements (modèle connu sous l'appellation générique de GEV ; testé et validé pour le sud de l'Italie, Rossi et al., 1984).

Dans ce modèle les pluies extrêmes « ordinaires » sont distingués de valeurs de pluies très exceptionnelles (*"outliers" ou horsains*). Cette façon de faire s'est révélée compatible avec la situation géographique de la Tunisie, qui se trouve en transition et sous l'influence de deux domaines climatiques bien distincts : l'influence méditerranéenne par le nord et l'influence Saharienne par le sud.

Le cas de la station de Mezzouna illustre bien la double population des précipitations extrêmes au centre et au sud. La série étudiée (période 1961-2015) contient trois records paroxysmiques journaliers : respectivement 300 mm pendant les inondations de 1969, 146 mm durant les inondations de 1973, et 188 mm lors des inondations de 1990.

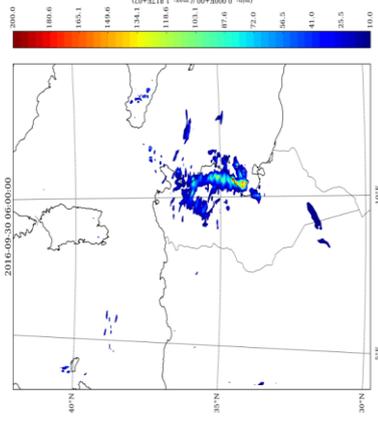


Station de Mezzoua : ajustement de la pluie journalière maximale annuelle. Il permet de détecter les événements extrêmes ou exceptionnels

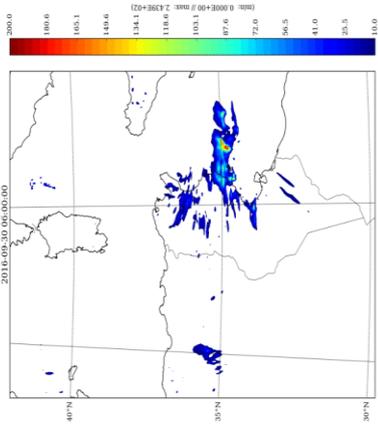
D'autres approches statistiques fournissent l'analyse adaptée à la réalité tunisienne. L'analyse du Gradex (Zahar et Laborde, 2007) a par exemple permis de montrer que les basses plaines méridionales, apparaissent comme le siège des événements extrêmes les plus violents (Gradex supérieur à 35 mm). C'est du moins cette partie de la Tunisie qui a subi par le passé les inondations les plus récurrentes et les plus violentes. Le Sahel, les hautes steppes, et les hauteurs des Djebels de la Dorsale, sont les régions suivantes qui semblent être menacées par les événements extrêmes (Gradex compris entre 20 et 35 mm).

La Tunisie du nord, le Cap Bon et la plaine de Kairouan, ainsi que les îles (Kerkennah et Djerba) sont en revanche des régions de moindres risques (Gradex inférieur à 20 mm). Dans le sud les risques semblent assez faibles dans la région de la Djeffara (Gradex inférieur à 20 mm). Certaines régions au sud sont quasiment dépourvues de postes ; la carte y est évidemment peu fiable.

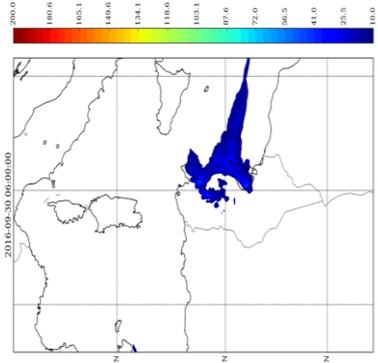
(a) AROME 3DVAR



(b) AROME



(c) Aladin

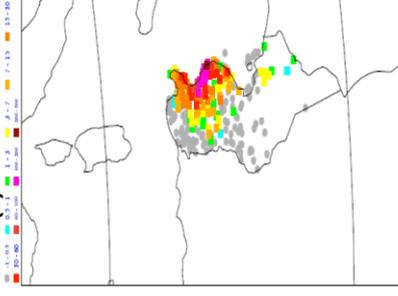


Vers une meilleure estimation de la localisation et de l'intensité des pluies extrêmes:

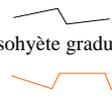
Inondations de 29 Septembre 2016 : Quel est l'apport d'un modèle à maille fine pour la prevision des pluies extremes ?

- Avec un cumul journalier de pluie de plus de 200 mm, la région de Hiboun dans le gouvernorat de Mahdia a connu de fortes inondations le 29 septembre 2016.
- Comme le montrent les figures des cumuls journaliers de pluie, le modèle AROME 2.5 km avec une chaîne d'assimilation de données variationnelles 3 DVAR (a) a mieux simulé la localisation et la quantité de pluie par rapport au modèle AROME 2.5 km en adaptation dynamique (b). Cependant tous les deux donnent une estimation meilleure par rapport au modèle ALADIN 7.5 km en adaptation dynamique (c) en se référant au réseau de pluviométrie de l'INM (d).

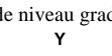
(d) Observation



Carte des gradex des précipitations journalières de Tunisie



 Courbe isohyète graduée en mm



 Courbe de niveau graduée en m

 Pluviomètre utilisé

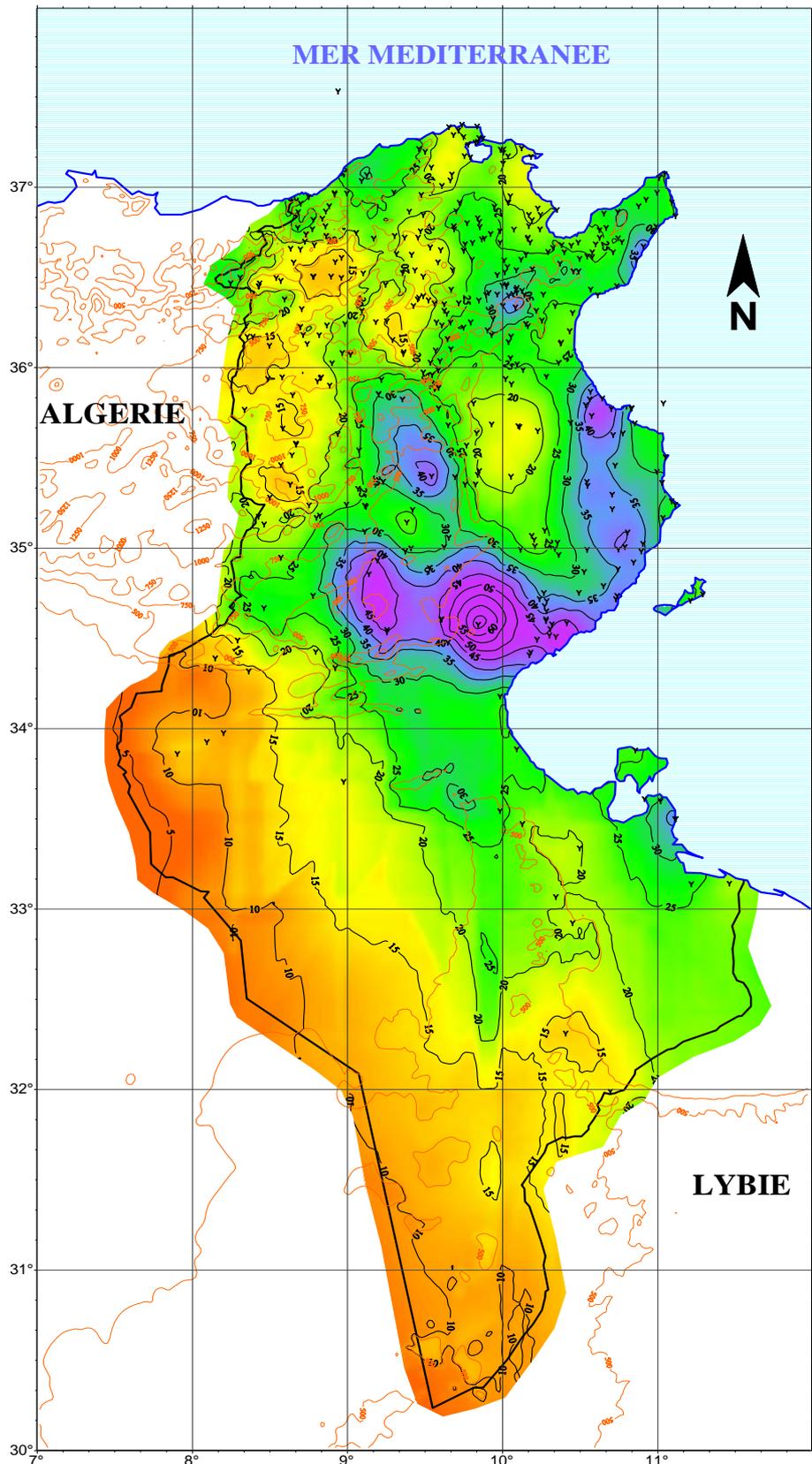
Cette carte a été établie par Y. ZAHAR* et J.P. LABORDE** d'après les observations faites sur 399 postes pluviométriques disposant de plus de 30 années d'observation. Ces données ont été aimablement communiquées par la Direction Générale des Ressources en Eau de Tunisie. Les tracés s'appuient sur les estimations ponctuelles faites aux postes pluviométriques et tiennent compte du relief, des longitudes et latitudes, ainsi que de la distance à la mer. Enfin, les tracés sont lissés en cohérence avec la précision des estimations ponctuelles.

* U.R. "GEOHYDE" du S.E.R.S.T., Université de La Manouba (Tunisie)

** U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S., Université de Nice - Sophia Antipolis (France)

Nice, le 28 Août 1999

0 100 km



La méthode du Gradex permet d'estimer par le calcul la probabilité des débits de crues rares et extrêmes

Le coût de l'inaction et les mesures sans regrets

- Les inondations de septembre 2003 sur le Grand Tunis ont occasionné des dégâts estimés à 600 Millions de DT. En contre partie l'étude de protection contre les inondations du Grand Tunis réalisée par le ministère de l'équipement, de l'habitat et d'aménagement du territoire (2006) a estimé le coût des travaux de protection contre les inondations du Grand Tunis à 600 Millions de DT, soit sensiblement le coût des pertes matérielles.
- Durant les 30 prochaines années chaque ville, chaque infrastructure et chaque région du pays aurait théoriquement connu au moins :
 - 6 crues de période de retour 5 ans.
 - 3 crues de période de retour 10 ans.
 - une crue de période de retour 30 ans.

-et une forte probabilité (60%) d'apparition d'une crue cinquanteennale (30% pour une centennale). Ceci est sans compter les crues plus exceptionnelles pouvant être enregistrées ici ou là et dont la période de retour serait très élevée (>100 ans). Ces crues vont mettre à rude épreuve, les personnes et les biens affectés. Comme la plupart des infrastructures sont destinées à durer plusieurs décennies, le problème de la résilience aux pluies et crues diluviennes se pose avec encore plus de pertinence. En effet, les logements, immeubles, installations hydrauliques, routes, ponts, et infrastructures autoroutières, ferroviaires, portuaires et aéroportuaires, etc. exigent normalement des reconstructions ou rénovations majeures tous les 20, 30, 50 ou même 100 ans. Cette longévité crée un obstacle

La Tunisie Membre du consortium ALADIN

La Tunisie a rejoint en 2001 le consortium ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International)

considérable pour l'adaptation aux risques d'inondations. En effet, il est économiquement et logiquement difficile d'envisager le remplacement de tels ouvrages avant la fin de leurs vies utiles. Selon une autre logique voulant que le coût de l'inaction soit supérieur à celui de l'action préventive, il s'avère économiquement viable de revoir et reconsidérer les risques de pluies et crues extrêmes dans la planification des nouveaux ouvrages, et même parfois de devancer certains ouvrages ou projets de rénovation et remplacement des infrastructures en prévision des risques à venir et pour une meilleure résilience du territoire et notamment des villes tunisiennes.

Les institutions tunisiennes concernées par les activités qui sont menées en relation avec la mise en place d'outils partagés

- Institut National de la Météorologie (INM)
- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT),
- Institut National de Recherche en Eaux et Forêts (INRGREF),
- Institut National Agronomique de Tunisie (INAT)
- Direction Générale des Grands barrages et des Grands travaux hydrauliques (DGBGTH)
- Direction Générales des Ressources en Eau (DGRE)
- Ecole supérieure de l'agriculture de Megrane
- Ecole Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab
- Faculté de sciences de Sfax (FSS)

Les plateformes de modélisation à l'INM

- Le modèle ALADIN-Tunisie tourne en opérationnel sur le calculateur de l'INM
- Le modèle AROME-Tunisie à maille fine avec adaptation statistique ; exploité en mode recherche est programmé pour être installé en opérationnel sur le prochain calculateur de l'INM.
- Le modèle Harmonie-Tunisie à maille fine en adaptation statistique est disponible sur le calculateur de l'INM.

- Les sorties des modèles de prévision numérique du temps sont sujets à un contrôle mensuel (dans le cadre d'un Système Management de la Qualité) et trimestriel (dans le cadre d'un système de vérification INOV).
- Une chaîne d'assimilation de données 3DVAR est en cours de test
- Une configuration AROME-Medjerda sur le bassin versant de Medjerda est disponible pour des applications hydrologiques
- Une carte de vigilance météorologique (dans le cadre d'un système d'alerte précoce) est en cours de préparation.

Analyse de situation

Faiblesses

- Visibilité restreinte des activités et des produits de la recherche et de développement de l'INM en relation avec les événements pluvieux (l'INM est sollicité principalement pour sa banque de données météorologiques)
- Coopération limitée entre l'INM et les autres institutions de recherche ainsi que le milieu universitaire.
- Moyens de calcul assez limités
- Réseau de radars météorologiques encore limité
- Peu d'articles scientifiques publiés
- Nombre de chercheurs au sein de l'équipe R&D de l'INM assez limité (l'équipe actuelle compte principalement des ingénieurs en hydrométéorologie)
- Absence d'un statut de chercheur à l'INM.
- Moyens d'expérimentation limités.

Menaces

- Absence de coordination interministérielle structurée pour la mise en œuvre de la stratégie de gestion des catastrophes climatiques.
- Peu de recherches interdisciplinaires et interactions interinstitutionnelles.

Forces

- Ressource humaine qualifiée au sein de l'INM
- Coopération bilatérale entre l'INM et Météo-France dans la prévision numérique du temps
- Coopération et interaction entre la Tunisie et des pays européens et maghrébins dans le cadre du consortium ALADIN
- Convention OPLACE (échange de données, développement de code) entre l'INM et le consortium LAGE

- Existence d'une configuration AROME-Medjerda du modèle météorologique AROME sur le bassin versant Medjerda pour des applications hydrologiques.

Opportunités

- Renforcement des moyens de calcul de l'INM à l'horizon 2018.
- Elaboration d'une carte vigilance (système d'alerte précoce) en cours dans le cadre du projet du Jumelage avec Météo-France.
- Prévision climatique et hydrologique à différentes échelles temporelles et spatiales
- Modélisation du cycle hydrologique.

Assurer une planification adéquate et établir des partenariats afin de mieux gérer les catastrophes ?

L'information sur la vigilance météorologique est destinée aux médias, aux autorités et aux services de sécurité qui doivent mobiliser les ressources humaines et matérielles nécessaires afin d'alerter la population et limiter les dégâts d'une catastrophe météorologique.

Une **carte vigilance** qui identifie les risques et représente le danger menaçant est en cours de préparation dans le cadre du projet de jumelage avec Météo-France à l'INM.

- Analyse géo-spatiale (Systèmes d'information géographiques) et traitement d'images satellitaires avec applications en météorologie, en climatologie et en hydrologie.
 - Modélisation distribuée des écoulements dans les principaux bassins versants et anticipation des crues en fonction des précipitations.
 - Etudes de la variabilité du climat et du changement climatique à haute résolution spatiale.
 - Etude de la vulnérabilité et de la résilience face à des risques d'inondation ou de sécheresse
- ### Actions à entreprendre
- Améliorer en continu les produits de la prévision numérique du temps en modélisation atmosphérique et en assimilation de données.
 - Mettre d'avantage en valeur les produits de la prévision numérique du temps en les mettant à contribution dans des

applications interdisciplinaires (hydrologique, océanographique).

- Renforcer les conventions entre l'INM et les autres institutions de recherche ainsi que le milieu universitaire
- Renforcer les compétences et les capacités de l'équipe R&D de l'INM (stages, travaux de thèses, ...)
- Mettre en place une structure de recherche commune interinstitutionnelle et multidisciplinaire.
- Renforcer la fiabilité et la représentativité spatiale et temporelle des données de précipitations extrêmes, et rendre plus accessibles ces données pour limiter l'empirisme et les approximations des ingénieurs-conseils, des concepteurs d'ouvrages hydrauliques, et des chargés de projets de développement.
- Renforcer le système d'alerte et d'annonce des pluies et crues pour une plus grande vigilance des autorités et

des populations.

- Normaliser les techniques et modèles statistiques selon l'état de l'art, et les réviser régulièrement selon les avancées scientifiques en hydrométéorologie décisionnelle (tous les 5 ans).
- Mettre en place un collège scientifique à l'INM de surveillance et de veille des risques climatiques de précipitations extrêmes et impact hydrologique.
- Développer les formations tunisiennes dans les domaines météorologique, hydrologique, océanique et risques ;
- Donner une forte priorité aux besoins sociétaux en prévision et climat ;
- Traiter spécifiquement la question de la ville (hydrologie urbaine).

ACTION 1

Améliorer les produits de la prévision numérique du temps en modélisation atmosphérique et en assimilation de données

L'amélioration des produits de la prévision numérique du temps passe par la mise à jour des outils de prévision en utilisant les moyens les plus avancés utilisés dans les instituts

météorologiques de pointe et en assurant une plus grande intégration de la recherche scientifique.

ACTION 2

Renforcer les conventions INM-instituts de recherche et universités (en climatologie, hydrologie, ...)

Ceci constitue une action nécessaire qui pourra permettre d'assurer la synergie entre les différents intervenants. Les

conventions constituent un cadre général qui permet la réalisation des tâches de façon commune, aisée et efficace.

ACTION 3

Donner une forte priorité aux besoins sociétaux en prévision du climat

Il s'agit d'orienter la prévision du climat vers les besoins du citoyen. Ceci peut se faire en ajustant les échelles de prévisions temporelles et spatiales à celles requises pour les secteurs clés. Ceci pourrait se faire aussi en adoptant une régionalisation

adaptée à la situation en question. Les interactions dans les deux sens permettront de faire converger rapidement vers les solutions optimales adaptées aux différentes sollicitations.

2

Sécheresse

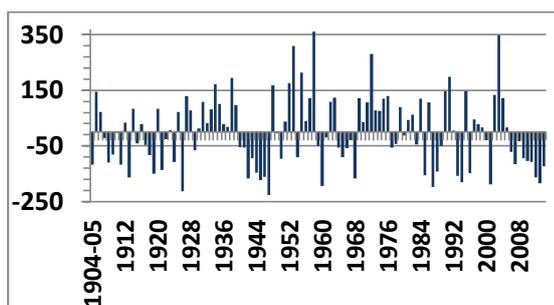


2 Sécheresse

La sécheresse : concepts et risques

La sécheresse, selon l'Organisation Météorologique Mondiale, est un phénomène naturel dangereux à caractère insidieux, qui résulte d'une insuffisance des précipitations par rapport aux valeurs prévues ou normales. La sécheresse est une composante essentielle de la réalité climatique du pays. Elle préoccupe et pèse le plus sur l'homme et ses activités par sa fréquence (c'est un phénomène récurrent), par les grandes dimensions spatio-temporelles qu'elle peut avoir (elle peut s'étendre sur plusieurs années successives et intéresser en même temps toutes les régions du pays) et par ses conséquences socio-économiques qui peuvent être désastreuses (Henia et al, 2015 ; Ben Boubaker, 2010).

Avant l'indépendance, grande sécheresse en Tunisie, est synonyme de famine, d'épidémie, d'insécurité et d'autres maux. Aujourd'hui, la Tunisie a réussi à éviter ces grands maux, mais la sécheresse est toujours durement ressentie sur le plan socio-économique et sa gravité risque d'augmenter avec le changement climatique, d'où la nécessité d'une stratégie adaptée pour faire face à ce phénomène à risque.



Variabilité des totaux pluviométriques à Tunis Manoubia : écart à la normale en mm/an (1904-2015)

Il est à noter que la sécheresse est une notion relative. Elle comprend à la fois une composante physique, l'aléa (une diminution des potentialités hydriques dans une région donnée et pour une période donnée, par rapport à une situation dite normale) et une autre sociale (le niveau des besoins en eau et la capacité de faire face au déficit hydrique). De ce fait, la sécheresse, un phénomène climatique au départ, peut s'étendre, graduellement, à d'autres domaines : sécheresse agricole, hydrologique, hydraulique, pédologique, socio-économique, etc. Le risque qui lui est associé est le produit de l'aléa et de la vulnérabilité de la société à l'aléa. Aussi la société est-elle en

bonne partie responsable du risque et est-il de son devoir de forger une stratégie pour y faire face.

En Tunisie, aussi bien la population rurale que le pouvoir central dispose de stratégies (parfois contradictoires) pour gérer la sécheresse. Les expériences paysannes ancestrales s'avèrent insuffisantes lors de grandes sécheresses et sont de plus en plus délaissées par la société moderne. L'engagement massif de l'état et ses multiples stratégies de la gestion du secteur de l'eau buttent à plusieurs difficultés d'ordre social, institutionnel, réglementaire et financier.

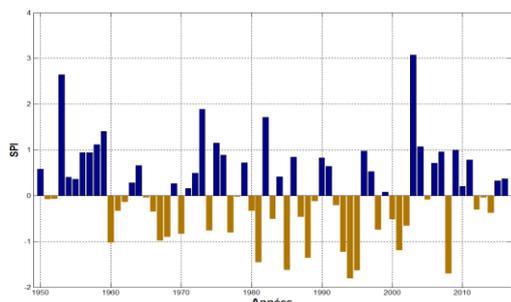
Sécheresse ou aridité?

La sécheresse est une anomalie temporaire, à la différence de l'aridité, qui est une caractéristique permanente du climat.

Suivi de la sécheresse et alerte précoce.

Le suivi de la sécheresse et sa quantification par des indicateurs permet d'informer sur la gravité des épisodes de sécheresse et ainsi sensibiliser les décideurs sectoriels sur l'impact de cette variabilité climatique afin de s'adapter et mieux agir pour minimiser au préalable les dégâts.

Le suivi et la surveillance de la sécheresse constituent une thématique d'intérêt majeure à l'INM. Plusieurs moyens de suivi de la sécheresse sont utilisés tel que le SPI (Standardized Precipitation Index). Il s'agit d'un indice de probabilité qui repose sur les séries interannuelles de précipitations. Les probabilités sont standardisées de sorte qu'un SPI de 0 indique une quantité de précipitation médiane par rapport à une climatologie moyenne de référence. Les sécheresses correspondent aux valeurs négatives de l'indice.

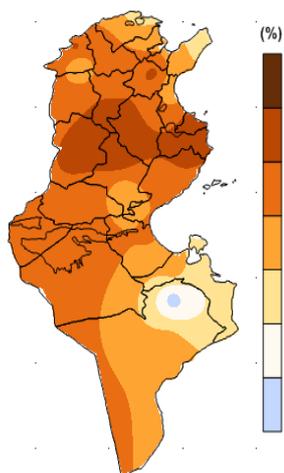


Indice de précipitation standardisé (SPI) de la station de Tunis Carthage au cours de la période 1950-2016 (source INM)

Cet indice est calculé à l'échelle annuelle (Janvier-Décembre) pour toutes les stations étudiées. La sécheresse modérée est la plus fréquente en Tunisie durant cette période. En revanche, la sécheresse extrême a tendance à devenir de plus en plus fréquente.

La sécheresse la plus extrême en terme d'intensité (durée et étendue spatiale) correspond à l'année 1961 pendant laquelle 74 % des stations ont vécu une année sèche. Parmi ces stations, 28% ont vécu une sécheresse extrême, 14% ont vécu une année très sèche et 32% une sécheresse modérée.

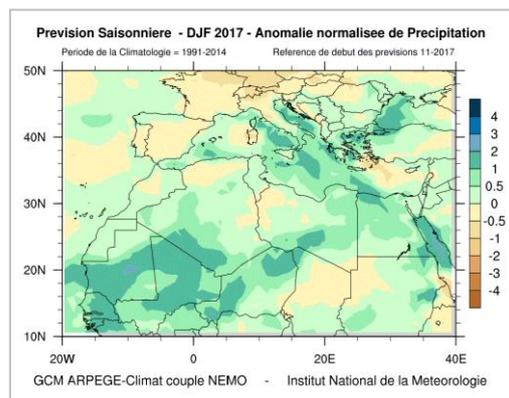
Géographiquement ; la fréquence d'années de sécheresse sur la période (1951-2010) révèle qu'un maximum s'observe au centre du pays (plus de 22% des années sont sèches) et qu'un minimum est enregistré dans le sud-est de la Tunisie (taux d'années sèches inférieur à 7%).



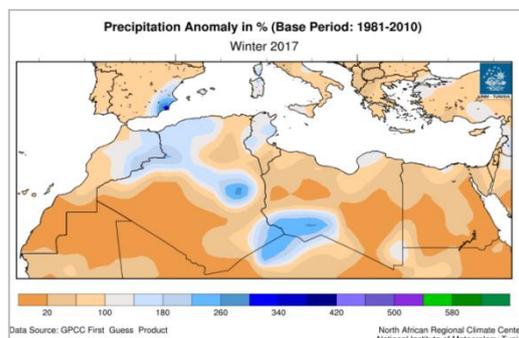
Fréquence des années de sécheresse (en %) en Tunisie sur la période 1951-2010 (source : INM)

Outre le suivi, l'annonce de façon précoce de la survenue d'une sécheresse est très importante pour sa gestion. L'Institut National de la Météorologie (INM) dispose d'un système opérationnel de prévision saisonnière. Ce système donne un aperçu sur l'état du climat futur. Un bulletin de prévision

saisonnière est élaboré à la fin de chaque mois et est mis à disposition des intéressés.



Prévision issue à l'INM de l'indice de précipitation normalisé (Du bleu clair au bleu foncé: précipitation supérieure à la normale. Du marron clair au marron foncé: précipitation inférieure à la normale)



Précipitation de la saison Décembre-Janvier-Février 2016-2017 (anomalies de la précipitation observée par rapport à la normale de 1981-2010 (en %))

L'utilisation des prévisions saisonnières permet de fournir une information à valeur ajoutée très importante se reflétant dans la gestion adéquate des ressources en eau et dans l'adaptation des activités agricoles. En effet, fournir une information adaptée dans un langage compréhensible est d'une importance capitale pour tout utilisateur potentiel.

On apporte ainsi une aide précieuse qui permet de minimiser les risques de la sécheresse. Cette information peut être comptabilisée dans la planification du développement régional et aider dans la mise en place de stratégies à court et à long termes.

Dans un contexte de changement climatique, la probabilité d'occurrence des événements extrêmes, telle que la sécheresse

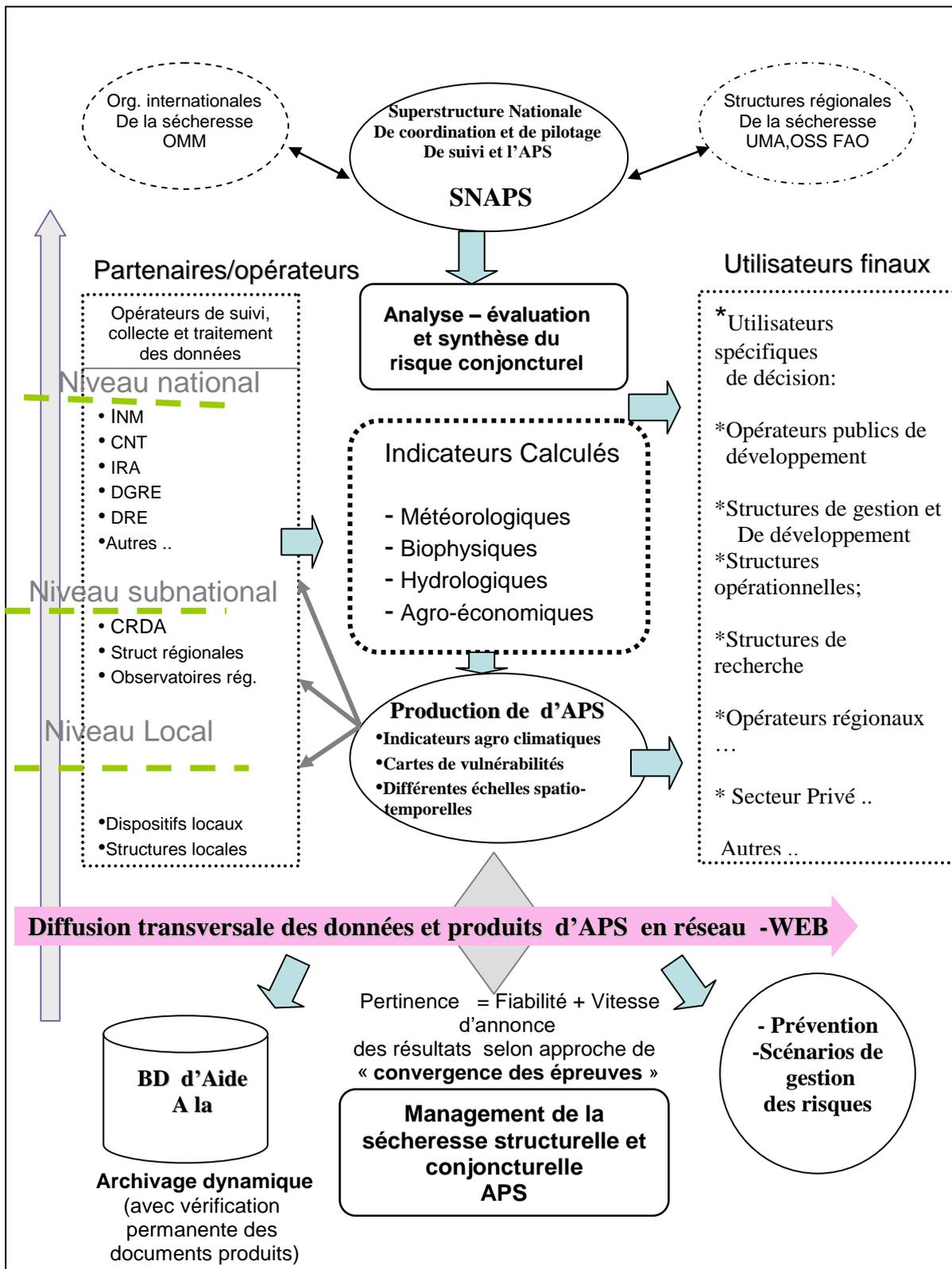
A-t-on besoin d'un système d'alerte précoce à la sécheresse?

La sécheresse est un danger naturel qui touche différents secteurs socio-économiques. Ses dégâts sont si coûteux qu'il est absolument indispensable de disposer de d'outils d'alerte précoce et de moyens de gestion efficace de ce risque climatique.

semble avoir augmenté. Vu la gravité de ses dégâts, la conception et la mise en place d'un système de gestion est devenu une nécessité.

La gestion de la sécheresse repose sur son suivi et sa prévision par un système d'alerte précoce. Il est aussi important dans ce cadre d'évaluer, à la fois, la vulnérabilité des différents secteurs affectés et les impacts subis. Ceci nécessite une synergie entre les différents secteurs que touche la sécheresse. Le diagramme ci-après illustre cette synergie.

La collaboration dans le cadre de la gestion de la sécheresse permet de fournir des informations qui aideront au développement des plans de gestion de risques pour atténuer les dégâts que peut causer cet aléa climatique.



Système d'alerte à la sécheresse: Structures et Partenaires
 Source: Évaluation des systèmes existants d'Alerte Précoce à la Sécheresse en Tunisie (SAPS)
 Projet LIFE05TCY/TN/000150; Rapport final (Janvier 2007) Habib BEN BOUBAKER

Institutions impliquées

Les institutions tunisiennes concernées par la gestion de la sécheresse et en particulier par la mise en place d'un système d'alerte précoce à la sécheresse sont:

-Institut National de la Météorologie

Comme mentionné auparavant, l'INM dispose d'un système de prévision saisonnière. Ce système qui repose sur l'utilisation du modèle atmosphérique global à haute résolution ARPEGE-Climat couplé au modèle océanique global NEMO à l'aide du coupleur OASIS fournit des prévisions saisonnières à une échéance de 4 mois et à une résolution de 80km sur la Tunisie.

L'INM s'intéresse aussi au suivi du climat et entre autre à la surveillance de la sécheresse. Plusieurs moyens de suivi de la sécheresse sont recommandés par l'OMM et sont utilisés tel que le SPI (Standardized Precipitation Index). Des travaux se rapportant à ce sujet ont eu lieu et sont en cours de développement.

Les autres institutions qui sont aussi concernées sont :

-Ministère de l'Agriculture (DGRE, CRDA)

-Institut des Régions Arides de Mednine (IRA)

-Société nationale d'exploitation et de distribution des eaux (SONEDE)

Limites

- Manque de stratégie de recherche
- Manque de collaboration entre les différents organismes impliqués pour la mise en place d'un système d'alerte précoce à la sécheresse
- Absence de coopération avec l'INM dans le cadre de la recherche scientifique

Opportunités

- Compétence en modélisation à l'INM
- Renforcement des capacités de calcul à l'INM (Projet d'acquisition d'un ordinateur en cours)
- Coopération de l'INM avec Météo-France sur la thématique de prévision saisonnière.
- Rôle de l'INM en tant que Responsable du Suivi du

Climat dans le Centre Climatique Régional de l'Afrique du Nord (RCC-NA) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Objectifs

- Renforcer la recherche scientifique à l'INM
- Améliorer l'interaction entre les différents organismes impliqués

Stratégie et Actions

Aujourd'hui un certain nombre d'actions s'avèrent prioritaires pour gérer ce phénomène à risque. En l'occurrence, il est recommandé de :

- Promouvoir la recherche scientifique
- Développer les capacités (humaines et matérielles) en matière de prévision à moyen et à long terme en vue d'instaurer un système d'alerte précoce à la sécheresse
- Développer le volet législatif en matière d'économie d'eau et de lutte contre le gaspillage et les usages non adaptés
- Prospector de nouvelles ressources, aussi bien fossiles que renouvelables
- Aménager de nouveaux ouvrages de stockage de l'eau et réaménager les ouvrages vétustes.

ACTION 1

METTRE EN PLACE UNE STRUCTURE DE
RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE SUR LA
THEMATIQUE DU SUIVI DE LA SECHERESSE

ACTION 2

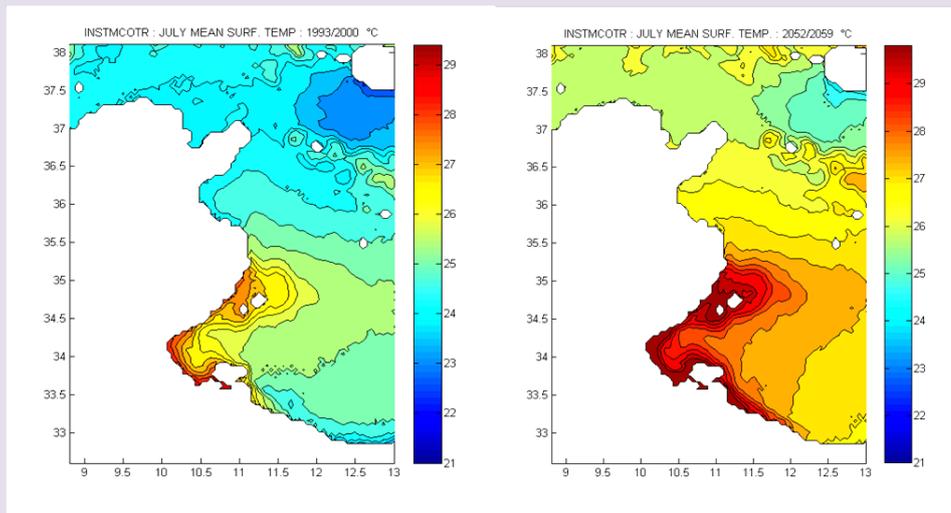
METTRE EN PLACE UN SYSTEME D'ALERTE
PRECOCE DE LA SECHERESSE

ACTION 3

VULGARISATION DE L'INFORMATION

3

Interactions Mer-Atmosphère.



3 Interactions mer-atmosphère

Pourquoi les interactions mer-atmosphère-terre sont importantes pour la recherche et un enjeu important pour la Tunisie ?

La mer a une capacité à stocker la chaleur bien supérieure que l'atmosphère. En effet, l'océan mondial absorbe près de 93 % de l'excédent d'énergie résultant de l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre due aux activités humaines, les continents en absorbent 3%, alors que l'atmosphère n'en absorbe que 1%. La mer qui est un réservoir de chaleur a ainsi un effet modérateur sur le climat et ses changements et il est la source principale des précipitations. L'absorption par la mer de l'excès de chaleur conduit au réchauffement de ses eaux, ce qui a des conséquences sur les propriétés et la dynamique de la mer, sur ses échanges avec l'atmosphère et sur les habitats des écosystèmes marins. La compréhension et l'anticipation de l'évolution du climat terrestre dépend de la connaissance des océans et de leur rôle sur le climat (Jhon et al, 1990). En effet, la surface de la mer est le lieu de transmission de l'énergie et la matière de la mer vers l'atmosphère et de l'atmosphère vers la mer. Comprendre les mécanismes de ces échanges, les quantifier avec précision et suivre leur évolution, est donc un enjeu important pour la compréhension du climat et de ses processus, ensuite pour maîtriser la modélisation du système couplé mer-atmosphère, donc du climat terrestre. L'eau joue un rôle primordial dans le système climatique de la terre et une meilleure compréhension de son cycle est nécessaire pour une représentation plus réaliste des changements climatiques et pour améliorer le couplage avec les modèles hydrologiques (Drobinski et al, 2013).

Le système mer-atmosphère dans les eaux marines tunisiennes

La Tunisie est un pays méditerranéen de plus de 1300 km de côtes. Elle est située au centre de ce bassin avec une façade Nord s'ouvrant sur le bassin occidental et soumise à l'arrivée d'air froid, souvent associé aux coups de vent Mistral violent. La façade Nord est aussi touchée par les perturbations méditerranéennes du golfe de Gênes lorsqu'elles ont des trajectoires plus au sud. Cette trajectoire est fortement modulée par la variabilité à grande échelle (NAO, North Atlantic Oscillation). Dans la partie nord de ce bassin occidental et en

particulier dans le golfe de Lions au sud de la France et suite à un effort important de la communauté scientifique aussi bien météorologiques qu'océanique une forte interaction entre les phénomènes météorologiques et océaniques a été établie. Ainsi les vents du nord provoquent un refroidissement des eaux de surface engendrant ainsi une plongée d'eau de surface vers les couches les plus profondes. L'étude et le suivi de ces masses d'eau formées au fond de la mer Méditerranée ont une importance cruciale pour la compréhension de l'évolution du climat dans cette région à travers une analyse de ses caractéristiques physiques. Du côté de nos côtes Nord, des masses d'eau circulent de façon continue d'Ouest en Est. Ces masses d'eau ont une origine lointaine, l'Océan Atlantique ; elles entrent en Méditerranée à travers le détroit de Gibraltar pour compenser la forte perte d'eau par évaporation qui caractérise la Méditerranée. Ces masses d'eau circulent sous forme de méandres, qui se détachent d'un courant plus au moins collé aux côtes algériennes. Au fur et à mesure qu'il progresse vers l'Est ses caractéristiques changent. La dépendance de la localisation de ce courant des conditions météorologiques est très importante à comprendre car le transport et la diffusion de toute matière déversée dans la mer en dépendent.

Pourquoi les interactions mer-atmosphère sont importantes pour la recherche et la prévision du temps en Tunisie ?

Mer réservoir de chaleur- perturbations du sud vers le nord et instabilité en septembre-les coups de Sirocco-les coups de mistral violents qui atteignent la Tunisie-le golfe de Gabès peu profond répond rapidement aux changements atmosphériques.

Après son passage le long des côtes Nord, l'eau d'origine Atlantique traverse le détroit Tunisie-Sicile en direction du bassin oriental. Elle se scinde en deux branches, l'une suit les côtes tunisiennes sous forme d'un courant (ATC, Atlantic Tunisian Current) et l'autre se dirige vers les côtes siciliennes sous forme de courant (AIS, Atlantic Ionian Stream) pour finir en mer Ionienne. Si cette dernière est bien documentée, la branche se dirigeant vers les côtes tunisiennes l'est nettement moins. Toutefois, les études montrent que l'ATC se détache selon la saison et selon les conditions météorologiques. Durant les

épisodes de fort Mistral, il arrive que tout l'écoulement soit stoppé ou même qu'il change de direction. Là aussi le sens de l'écoulement définit les zones qui sont susceptibles d'être affectées par un déversement en mer. Il définit aussi la quantité de matière apportée de l'extérieur vers le littoral. C'est le cas du golfe de Gabès où l'on soupçonne que la richesse phytoplanctonique est en relation avec un apport externe se faisant par la veine d'eau d'origine atlantique.

L'étude de la pénétration de cette veine dans les golfes de Tunis et d'Hammamet est importante pour comprendre aussi leurs fonctionnements. Le golfe de Gabès est un lieu où les interactions mer-atmosphère agissent par excellence. Étant un écosystème presque fermé et peu profond, le golfe répond et interagit très rapidement avec les conditions météorologiques. Ainsi les eaux dans ce golfe sont extrêmement refroidies en hiver et chauffées en été, beaucoup plus qu'ailleurs en Méditerranée. Cela implique

Les institutions tunisiennes concernées et les activités qui sont menées en relation avec la mise en place d'outils partagés

Les institutions tunisiennes qui seraient concernées par la mise en place d'une recherche associant les sciences atmosphériques et marines et les apports terrestres et en particulier par la mise en place d'une plateforme de modélisation atmosphère-mer-terre sont (e.g. Zavatorielli et al, 1995 ; Roussenov, 1995) :

Peut-on développer une plateforme tunisienne de modélisation couplée atmosphère-mer-terre.

Nous avons les compétences pour développer un tel outil. Une structure de recherche est nécessaire.

que ces eaux vont fortement subir l'impact des changements climatiques. C'est ce qui a été constaté en étudiant les caractéristiques physiques des eaux du golfe mais aussi à travers le nombre de plus en plus élevé d'espèces invasives qui ont été répertoriées. Les interactions entre les eaux du golfe et l'atmosphère créent de surplus un microclimat et des brises locales importantes.

En Tunisie les inondations que subissent plusieurs régions de façon brusque et violente en automne semblent devenir de plus en plus fréquentes. Ceci est attribué à une accumulation plus forte de l'énergie dans les eaux de la mer Méditerranée durant la saison estivale. Cette énergie est dégagée en fin d'été chargeant l'atmosphère en vapeur d'eau et renforçant les perturbations atmosphériques. Elles sont d'autant plus violentes quand il s'agit de masses d'air déjà instables, en provenance du Sahara.

Institut National de la Météorologie : INM

L'INM utilise le modèle numérique ALADIN avec adaptation dynamique. Il utilise aussi le modèle AROME à maille fine avec adaptation statistique et assimilation 3D-VAR. Son utilisation de façon opérationnelle est tributaire du renforcement des moyens de calcul à l'INM.

Pour les prévisions saisonnières : le modèle atmosphérique global à haute résolution ARPEGE-Climat couplé au modèle océanique global NEMO à l'aide du coupleur OASIS est utilisé. Les prévisions saisonnières effectuées sont à une échéance de 4 mois. Comme mentionné plus haut, un bulletin de prévision saisonnière est élaboré à la fin de chaque mois et est mis à disposition des intéressés. La production des prévisions climatiques régionales et nationales permet de sensibiliser les décideurs sectoriels sur l'impact de la variabilité climatique afin de mieux agir et concrétiser l'apport de l'information climatique.

L'INM réalise une prédiction de la température et la précipitation par descente d'échelle statistique de sorties de modèles MIROC5 avec RCP4.5 avec apprentissage par les ré-analyses NCEP.

Institut National des Sciences et Technologies de la Mer : Laboratoire du Milieu Marin: INSTM-LMM

- Application de modèles de circulation marine sur la base du modèle (PDM). Une hiérarchie de modèles comporte des versions à différentes échelles (Méditerranée, milieu marin tunisien et versions locales pour des écosystèmes particuliers). Des composantes spécifiques (biogéochimie, transport sédimentaire, ...) sont développées.
- Ces différents modèles servent à simuler l'état actuel et l'évolution du milieu marin et lagunaire tunisien. Ces modèles sont utilisés aussi pour les projections climatiques.
- Ces modèles sont forcés à la surface par :
 - les données atmosphériques sur les stations les plus proches pour les écosystèmes locaux.
 - les ré-analyses de données atmosphériques (e.g. ERA40, ERAInterim).
 - Les sorties de modèles atmosphériques ou modèles couplés en particuliers les modèles régionaux.

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis - Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement : ENIT-LMHE

Limitations

- Absence de recherche scientifique en sciences atmosphériques.
- Très peu d'interactions entre les équipes de recherche INSTM et INM en modélisation du système mer-atmosphère
- Absence totale de moyens de calcul intensif dédiés à la recherche scientifique.
- Peu de personnes (en particuliers ingénieurs) sont formées en calcul haute performance
- Absence de collaboration pour des réponses communes aux appels d'offres.
- Absence de partage de moyens de calcul disponibles au sein de chaque institution.
- Le développement de modèles au sein de l'INM et de l'INSTM est très limité.

- Modélisation des écosystèmes marins côtiers et lagunaires en particulier avec des modèles de type SMS adaptés à des morphologies complexes de petite échelle.
- Application à la recherche de solution d'aménagement
- Etudes statistiques des liens précipitation-hydrologie
- Etude statistique des apports fluviaux

Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Tunis : IPEIT-URMES88

Les principales activités de recherche reposent sur le développement d'outils numériques et d'analyse pour aborder différentes thématiques essentielles pour les études liées aux côtes tunisiennes dont notamment, l'énergie marine renouvelable, les ondes de tempête, et l'impact du changement climatique. On cite :

- -étude des processus côtiers
- -modélisation des marées au large des côtes tunisiennes
- -modélisation couplée des interactions marées-ondes et ondes-courants.

Opportunités

- Ressources humaines hautement formées en recherche sur le système mer-atmosphère
- Nombreux ont séjourné dans des laboratoires d'excellence européens (LMD, Laboratoire de Météorologie Dynamique CNRM, Centre National de Recherche Scientifique...).
- Nombreux ont donc expérimenté la structuration de recherche collaborative au sein de ces laboratoires
- Très bonne expérience dans des projets et initiatives de recherche à l'échelle internationale (CIRCE-HyMeX-MedCORDEX, JUMELAGE)

Objectifs à atteindre et moyens

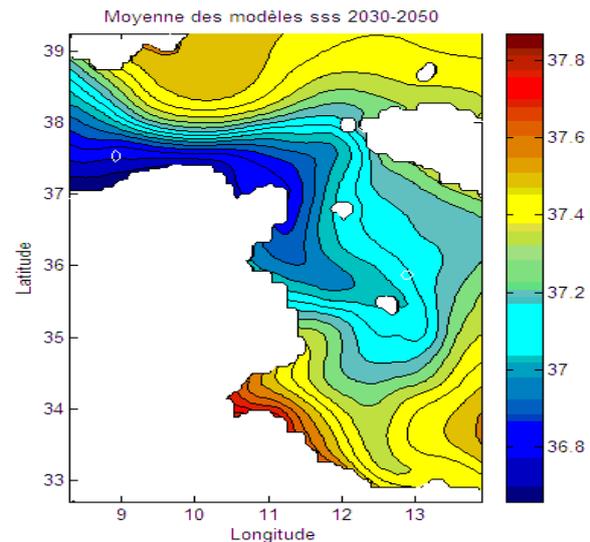
- Mettre à niveau la recherche en modélisation des processus atmosphériques et assimilation de données.
- Mettre à niveau la recherche en modélisation des processus océaniques, et le développement de modules spécifiques
- Mettre à niveau la recherche en modélisation couplée océan-atmosphère-terre.
- Améliorer les compétences tunisiennes qui permettront de concevoir les moyens d'améliorer la prévision à courte et moyenne échéance.
- Améliorer les compétences tunisiennes qui permettront de concevoir les moyens d'améliorer la prévision saisonnière.
- Mettre en place une équipe pour le développement d'outils nécessaires aux projections climatiques avec valeur ajoutée (plateforme propre à l'équipe tunisienne).
- Mettre en place une formation multidisciplinaire en sciences du système air-mer-terre qui permettra de préparer

Stratégie et actions

La circulation de la mer Méditerranéenne est le siège d'une variabilité saisonnière et interannuelle très marquée qui affecte certainement la circulation atmosphérique et a un impact très fort sur les échanges air-mer et sur le climat. L'étude spécifique de la variabilité saisonnière à interannuelle de la circulation marine et ses impacts sur les échanges à l'interface air-mer s'impose donc comme une priorité. Une telle étude repose essentiellement sur l'analyse de mesures in situ, de produits satellitaires et de résultats de simulations numériques ainsi que sur l'utilisation conjointe de modèles numériques de circulation générale et régionale. Une des questions prioritaires réside dans la compréhension des mécanismes marins qui régissent l'évolution de la température de surface de la mer, de la salinité de surface, de la profondeur de la couche de mélange ainsi que leur variabilité, principalement aux échelles saisonnières à interannuelles. Ceci contribuera à maîtriser la modélisation du système couplé mer-atmosphère, donc du climat terrestre. Le suivi et l'analyse de la variabilité dans un contexte de changement climatique nécessitent plusieurs actions dont notamment :

- La définition d'une stratégie nationale de campagnes de mesures in situ en fonction des objectifs identifiés et en étroite collaboration avec les différentes parties prenantes. Les

des futures ressources humaines par les stages en master et en thèses.



Les changements climatiques impactent le milieu marin tunisien : la veine d'eau Atlantique qui longe les côtes tunisiennes est amplifiée. Simulations de modèles couplés mer-atmosphère-terre (CIRCE)

mesures in situ seront essentiellement obtenues aux cours de campagnes dédiées, à raison de deux à trois campagnes par an, afin d'appréhender la variabilité saisonnière, et sur plusieurs années afin d'appréhender la variabilité interannuelle. Des mesures de flux turbulents seront nécessaires pour obtenir des mesures fines simultanées des couches limites océaniques et atmosphériques. Les mesures in situ disponibles et futures seront également utilisées pour valider au mieux les sorties des modèles numériques, l'ensemble des mesures satellitaires et des produits disponibles de différents paramètres océaniques et de flux :

- la collecte et l'analyse des produits de paramètres océaniques (SST, Sea Surface Temperature ; SSS Sea Surface Salinity, contenu thermique, courant...) et atmosphériques (vent, flux radiatifs,...) issus de mesures in situ ou satellitaires afin de permettre une étude de leur variabilité et de leurs interactions sur l'ensemble du domaine d'intérêt avec une résolution spatio-temporelle optimale ;
- le développement et l'utilisation de modèles numériques de grande échelle permettra d'étudier certains processus et de servir également de conditions aux limites pour des modèles d'échelles plus fines adaptés aux régions côtières. Ces derniers permettront une étude plus détaillée des processus régissant la couche limite océanique, les zones de front thermique et d'upwelling, etc. et de valider et de corriger localement les flux et les forçages. Une bonne estimation des flux permettra alors d'envisager des études sur les rétroactions entre les couches limites océanique et

atmosphérique, et donc les influences de ces couches limites sur les échanges mer-atmosphère. Le couplage entre modèles numériques apportera des améliorations sensibles à travers une meilleure représentation des échanges à l'interface air-mer. L'assimilation des données acquises dans les modèles numériques conduira certainement à des simulations plus réalistes.

La réussite de ce chantier nécessite la mise en place d'importants moyens de calcul numérique et d'une stratégie nationale pour assurer des campagnes de mesures continues. Les moyens de calcul dédiés aux modèles de prévision (météo-hydro-climat) adaptés aux phénomènes méditerranéens seront logiquement gérés et entretenus par l'INM qui s'engagerait à les mettre à la

disposition de la communauté scientifique tunisienne. Les mesures in situ, et les mesures en général en mer reviendront naturellement à l'INSTM qui coordonnera ce volet avec les différentes parties prenantes. Les données marines et atmosphériques collectées et envisagées contribueront à l'amélioration de la fiabilité des simulations numériques via leur assimilation dans les modèles marins, atmosphériques et couplés et ainsi contribueront à l'amélioration de la qualité des prévisions à court terme et à moyenne échéance. Le but de cette action est d'aboutir à une plateforme tunisienne couplée atmosphère-mer-terre.

ACTION 1

METTRE EN PLACE UNE STRUCTURE DE RECHERCHE ET DE FORMATION EN SCIENCES ATMOSPHERIQUES

-Il s'agit ici de mettre en place une structure de recherche scientifique en météorologie. Cette structure pourrait prendre la forme d'un centre de recherche en météorologie avec des laboratoires de recherche. En ce qui concerne les interactions mer-atmosphère cette recherche devra se faire en étroite collaboration avec la recherche marine et toucher en particulier l'interface air-mer : diagnostiquer la variabilité et les tendances de l'état de la mer et de l'atmosphère, et œuvrer pour la compréhension des processus et leur représentation dans les modèles numériques avec pour objectif l'étude du climat.

-appréhender la variabilité régionale, saisonnière et interannuelle de la circulation marine et atmosphérique dans la Méditerranée centrale.

-étudier la physique de l'interface air-mer.

-appréhender le rôle de la salinité de surface dans le cycle de l'eau.

-étudier les événements extrêmes (cyclones et houles extrêmes) en développant les modèles couplés mer-atmosphère.

Cette recherche devra s'intéresser en priorité aux zones côtières : étudier les échanges mer-atmosphère-terre en zone côtière dans une optique de compréhension de la

dynamique des processus en régions côtières et régionales, et de suivi de l'évolution des systèmes côtiers dans le contexte du changement climatique.

ACTION 2

METTRE EN PLACE UNE PLATEFORME COMMUNE DE MODELISATION MER- ATMOSPHERE-TERRE ET PARTAGE DES OUTILS DE CALCUL

Il s'agit ici de mettre en place une plateforme commune de modélisation du système mer-atmosphère-terre qui soit développée et entretenue de façon collaborative. Cet outil permettra de contribuer à l'effort international d'étude du climat et des changements climatiques et à la Tunisie de se positionner parmi les pays fournisseurs d'information dans cet aspect comme elle l'est actuellement dans le domaine marin en modélisation de la mer Méditerranée (www.medcordex.eu). Il n'est pas nécessaire que l'ensemble des composantes de la plateforme soit développé par des équipes tunisiennes. Par

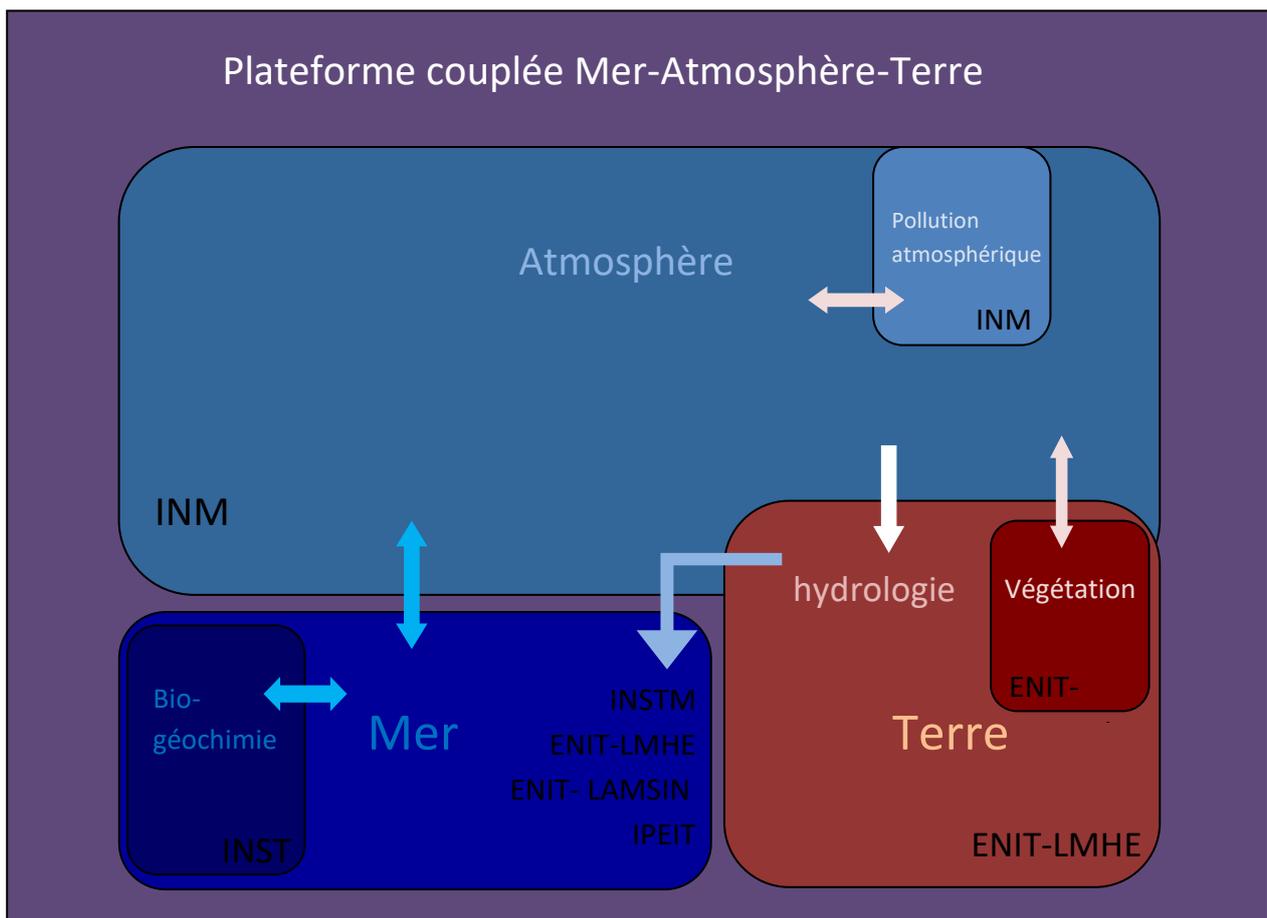
contre il est essentiel que l'ensemble soit piloté et entretenu en Tunisie par des compétences tunisiennes. Les sous-composantes seront développées par les compétences tunisiennes progressivement. Ce genre de plateforme permettra aux institutions tunisiennes de participer aux projets internationaux de grande envergure et dont les retombées sont très importantes de point de vue scientifique mais aussi en termes de visibilité pour la Tunisie et en apports en ressources financières.

ACTION 3

ASSURER UNE REPONSE COMMUNE AUX APPELS A PARTICIPATION

La recherche collaborative permettra aux chercheurs tunisiens et aux institutions tunisiennes de répondre aux appels à participations aux projets internationaux de recherche scientifique. En effet, les actions demandées requièrent des compétences multidisciplinaires regroupant les aspects marins, atmosphériques mais aussi les aspects en relation avec les impacts socio-économiques et ceux en relation avec les questions d'alerte, d'adaptation et de résilience. Les projets touchent aussi en plus les secteurs

économiques clés comme le transport, le tourisme, l'agriculture, la pêche et l'aquaculture. Les campagnes de mesure pourront contribuer à l'amélioration des prévisions numériques à courte et à moyenne échelles par exemple à travers l'amélioration de la description de l'occupation du sol (nature, couverture, etc.). Des modules de surface tels que SURFEX (Surface Externalisée) qui est intégré aux modèles ARPEGE, ALADIN et AROME en dépend énormément. Des travaux d'amélioration de ces bases de données se font en Europe mais pas encore en Tunisie.



4

Vulnérabilité et Adaptation aux Changements Climatiques



4 Vulnérabilité et Adaptation aux Changements Climatiques

Changements climatiques, érosion côtière et destruction des habitats.

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) chargé d'évaluer les travaux scientifiques consacrés aux changements climatiques vient de lancer la rédaction de deux rapports intitulés : *Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique et Changement climatique et terres émergées: rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres.*

Le dernier rapport de synthèse du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2014) confirme la tendance et l'incidence de l'homme sur le système climatique à l'échelle de l'ensemble des continents et des océans. Entre 1901 et 2010 le niveau moyen des mers et océans s'est élevé de 19 cm avec une vitesse moyenne d'élévation de 1,7 mm/an entre 1901 et 2010 et de 3,2 mm/an entre 1993 et 2010. Les scénarios basés sur les modèles couplés les plus récents projettent pour l'année 2100, une augmentation de la température de l'air du globe de l'ordre de 1 à 3,7°C et une élévation du niveau moyen des mers de l'ordre de 40 à 63 cm.

L'impact des changements climatiques sur la zone côtière a fait l'objet de nombreux travaux et la Tunisie en 2001 y a contribué par sa "Communication à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques". La façade maritime

tunisienne qui connaît un déficit sédimentaire suite à une gestion et une retenue des eaux continentales entamées depuis l'indépendance, subit actuellement l'effet de l'élévation du niveau de la mer et risque d'être parmi les pays méditerranéens les plus exposés et les plus vulnérables à l'érosion côtière. De plus la littoralisation et l'artificialisation de la zone côtière renforcent ce phénomène par la destruction des habitats côtiers qu'ils soient marins, lagunaires ou terrestres.

On estime d'après les visites des sites archéologiques que le niveau de la mer le long des côtes tunisiennes a augmenté

La modélisation hydrodynamique côtière, un outil d'évaluation de l'impact de l'élévation du niveau des eaux dans la gestion intégrée des zones côtières

d'environ 20 et 40 cm depuis l'époque romaine. Plus récemment on constate un recul du trait de côte au niveau de plusieurs zones pouvant atteindre -3,5 m/an à -12,2 m/an. L'élévation du niveau moyen de la mer en Tunisie est à l'origine de la modification de la position du rivage et de la morphologie de la côte. Cette modification a entraîné la perte d'espaces et d'habitats côtiers suite à l'érosion ou la submersion des terres avec comme principales conséquences la salinisation des terres et des nappes phréatiques, la fragilisation, voir la disparition d'écosystèmes particuliers comme les marais maritimes, les schorres et dans une moindre mesure l'écosystème côtier marin. Le scénario pessimiste d'une élévation moyenne du niveau marin de 100 cm pour l'horizon 2099 (GIEC, 2007), montre que 44% des côtes tunisiennes sont vulnérables à très vulnérables.

ACTION 1

ASSOCIER : CHANGEMENT CLIMATIQUE- IMPACT-ALERTE-ADAPTATION

En plus de son rôle d'alerte sur les dangers des impacts du changement climatique, la communauté scientifique est appelée aujourd'hui à apporter des éléments d'aide à la décision. En effet, il est désormais impératif d'associer les résultats de la recherche scientifique aux impacts attendus.

Ces recherches vont aider à identifier les risques et d'éventuelles opportunités associées au changement climatique. Ils permettront également d'identifier la vulnérabilité des systèmes socio-économiques au niveau sectoriel et des écosystèmes au niveau géographique. Ces recherches doivent aussi porter sur l'adaptation aux impacts du changement climatique.

ACTION 2

DIFFUSER A UN LARGE PUBLIC DES PROJECTIONS CLIMATIQUES CIBLES

Des projections décrivant les climats du XXI^e siècle à l'échelle régionale en Tunisie, ont été développées par l'INM. Ces produits climatiques constituent la base de toute étude d'impact ou d'adaptation aux changements climatiques. L'accès des institutions tunisiennes à ces produits est resté très limité malgré le grand effort mené par l'INM pour élaborer des produits dédiés, par secteur et par application.

La création d'une plateforme de diffusion des services climatiques qui assurera l'élaboration, la vulgarisation et la diffusion de l'information climatique personnalisée et dédiée aux différents usagers (orientée « end-users ») sera d'une très grande utilité.



Zone côtières et terres potentiellement submersibles en Tunisie. D'après Queslati et al, 2015



ACTION 3

METTRE EN PLACE UNE PLATEFORME
COMMUNE D'ANALYSE DES DONNEES
MAREGRAPHIQUES, BATHYMETRIQUES ET
D'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ; UN
SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE
DU LITTORAL TUNISIEN

Il s'agit d'analyser les données marégraphiques existantes, de développer l'acquisition de données bathymétriques sur l'ensemble de la zone littorale et de créer un système d'information géographique du littoral tunisien. Un moyen serait de renforcer les capacités de l'observatoire national du littoral

(sous la tutelle de l'APAL) à travers un partenariat ou un consortium avec l'INM, l'INSTM, et certains laboratoires spécialisés dans l'étude et la gestion intégrée des zones côtières et lagunaires.

ACTION 4

METTRE EN PLACE UNE PLATEFORME COMMUNE DE MODELISATION HYDRODYNAMIQUE COTIERE-LITTORAL

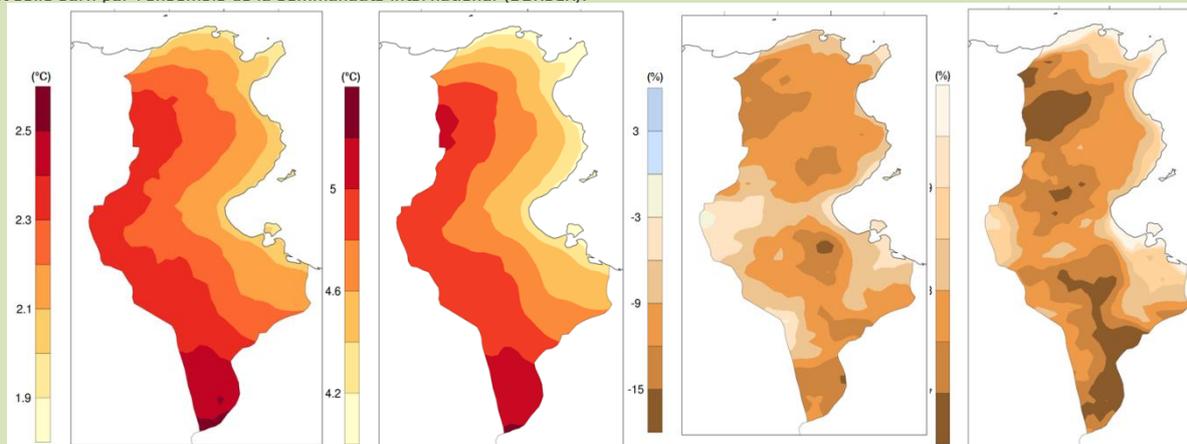
Il s'agit de développer la modélisation hydrodynamique côtière-littoral couplée houle, vents et marée pour une meilleure compréhension et prévision de la dynamique des transits littoraux et pour une gestion durable des ouvrages artificiels comme les brise-lames, épis, digues, émissaires, ports et marinas. La modélisation numérique doit aussi utiliser les modèles numériques les plus récents qui tiennent compte des effets à l'échelle de la Tunisie mais aussi celle régionale de la

Méditerranée et à une échelle plus large. A ce titre il est nécessaire de recourir aux modèles couplés mer-terre-atmosphère qui reproduisent au mieux l'ensemble du système. Des modèles fins côtiers peuvent être imbriqués dans ces modèles régionaux. Cela requiert une forte collaboration en particulier entre l'INM et l'INSTM.

Changements Climatiques et Impacts, l'INM à l'œuvre.

Dans le cadre du projet de comparaison des modèles couplés 3 (CMIP3) les modèles climatiques mondiaux ont fourni les projections futures des changements climatiques et leurs impacts sur la société et les écosystèmes. Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC a utilisé les scénarios d'émission basés sur le SRES. Actuellement, la communauté scientifique a développé un nouvel ensemble de scénarios d'émission appelés *chemins de concentration représentatifs (RCP)*. Contrairement aux scénarios SRES, les RCP représentent des voies de forçage radiatif, des récits ou des scénarios socio-économiques détaillés. De nouveaux groupes de modélisation élaborent de nouvelles prévisions climatiques en fonction de ces nouveaux scénarios RCP. Les projections climatiques basées sur le RCP sont maintenant disponibles à partir d'un certain nombre de modèles climatiques sous l'expérience CMIP5 (http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html). Les simulations CORDEX sont disponibles et comprennent une grande variété d'expériences et de modèles.

L'INM élabore des projections climatiques sur la Tunisie avec une résolution fine de 12,5km. Les résultats constituent une base scientifique solide pour les études d'impact et d'autres utilisations de l'information climatique à une échelle réduite. Cette approche de réduction d'échelle est celle suivie par l'ensemble de la communauté internationale (CORDEX).



Projections climatiques de la température de l'air (à gauche) et de la précipitation (à droite) aux horizons 2050 et 2100. (Scénario RCP8.5)

Les sorties des modèles révèlent une augmentation de la température annuelle prévue pour 2050 et 2100 par rapport à la période 1971-2000 pour le scénario RCP8.5. La hausse des températures moyennes varie entre **2,1°C et 2,4°C** à l'horizon 2050 pour atteindre l'intervalle de **4,2°C et 5,2°C** à la fin du siècle 2100, par rapport à la période de référence. D'autre part, les zones côtières du pays devraient connaître le réchauffement le plus modéré et correspondent aux zones les moins vulnérables comparées aux autres régions du pays. Quant aux précipitations, les résultats prévoient une diminution des cumuls annuels de précipitations aux horizons 2050 et 2100. Tous les modèles convergent sur ce résultat et ils confirment ainsi la diminution des cumuls de précipitation sur tout le pays. En effet, Les précipitations moyennes connaîtront une diminution variant entre **1% et 14%** en 2050, qui s'aggravera d'avantage en fin du siècle pour atteindre **18% à 27%** en 2100.

Changements Climatiques, Tropicalisation et "Jellyfication" des Zones Côtières.

Du point de vue géologique, la mer Méditerranée est le vestige de la mer Thétys, une mer tropicale qui s'ouvrait sur l'Océan Indopacifique puis sur l'Océan Atlantique. De ce fait, elle hébergeait une faune et une flore tropicale très diversifiée. Suite à la formation de l'isthme de Suez et la fermeture de la

communication avec l'Atlantique au cours du Miocène (10 Ma), la Méditerranée s'isole et subit les crises messiniennes à l'origine de la quasi disparition de la faune et de la flore Indopacifique. L'ouverture naturelle du détroit de Gibraltar et l'entrée des eaux atlantiques dans l'ensemble de la Méditerranée crée un nouvel écosystème avec des reliques indopacifiques. L'ouverture artificielle relativement récente du canal de Suez associée au réchauffement des eaux a entraîné la migration d'espèces

subtropicales provenant aussi bien de l'Atlantique que de l'Océan Indien et Pacifique.

Depuis les années 60, on constate une accélération significative de l'installation des espèces non indigènes en Méditerranée avec une nette majorité d'espèces indopacifiques ou de Mer Rouge (Galil, 2008).

La Méditerranée considérée comme une zone test des changements globaux, voit la température et la salinité de ses eaux profondes augmenter depuis 1959 (Bethoux et al., 1990). Cette tendance confirmée sur la période 1940 - 1995 est considérée comme le premier effet mesuré de l'effet de serre (Bethoux et al., 1998). Bien que le climat méditerranéen soit une variante du climat tempéré l'augmentation récente de la température des eaux de surface mais aussi du fond est à l'origine de sa tropicalisation. De ce fait la Méditerranée devient le refuge de nombreuses espèces tropicales qui lorsqu'elles arrivent trouvent comme sur les côtes tunisiennes les conditions favorables à leur installations, comme les caulerpes *Caulerpa taxifolia* et *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*, le bivalve *Pinctada radiata*, la crevette *Metapenaeus monoceros*, le crabe bleu, *Callinectes sapidus*, le poisson lapin *Lagocephalus sceleratus*, ou encore les scyphoméduses *Rhopilema nomadica* et *Phyllorhiza punctata*. (Daly Yahia et al., 2013 ; Gueroun et al., 2014) Parmi ces espèces non indigènes plusieurs peuvent être toxiques comme *Rhopilema nomadica* voire mortelles pour l'homme comme *Lagocephalus sceleratus*.

Par ailleurs, le réchauffement climatique, la surpêche et le "fishing down" associé ainsi que l'eutrophisation côtière croissante sont à l'origine d'une jellyfication des mers et des océans à laquelle la Méditerranée et la Tunisie n'échappent pas. Ce phénomène qui consiste en le développement du plancton gélatineux et en particulier des méduses exerce de nombreux impacts négatifs sur les écosystèmes par un phénomène de "top down control" et de forte prédation sur de nombreuses espèces marines et surtout les oeufs, larves, juvéniles et adultes de poissons. D'autres impacts s'observent sur le secteur de l'aquaculture, du tourisme, de la santé publique par les piqûres parfois mortelles exercées par ces cnidaires.

Selon Cury et al, 2008 et Boero (2013) les mers et les océans perdent progressivement depuis les années 1970 leurs stocks de poissons au détriment des méduses qui sont leurs principaux compétiteurs pour la nourriture zooplanctonophage. De plus dans les zones côtières et particulièrement dans les écosystèmes sud méditerranéens plus sensibles, le réchauffement des eaux diminue la solubilité de l'oxygène particulièrement au cours de la saison printanière et estivale. Le déficit en oxygène des eaux côtières fait fuir les poissons mais n'a pas d'impact sur les méduses qui peuvent ainsi conquérir de nouvelles niches écologiques.



Copyright. Laboratoire Biodiversité et Fonctionnement des Systèmes Aquatiques. FSB 2014



Copyright. Laboratoire Biodiversité et Fonctionnement des Systèmes Aquatiques. FSB 2014.

Les blooms de méduses sont de plus en plus importants en Méditerranée ces dernières décennies. Dernier bloom de la Scyphoméduse Pelagia noctiluca (photo du haut) et de l'Hydroméduse Velella velella (photo du bas) sur les côtes nord de la Tunisie.

ACTION 5

RENFORCER LES PROGRAMME DE SURVEILLANCE DES MEDUSES ET DES ESPECES NON INDIGENES

Il s'agit de créer un programme national de surveillance des méduses et des espèces non indigènes mais aussi de la biodiversité marine en étroite collaboration avec l'APAL, le CAR/ASP, l'INSTM et plusieurs laboratoires universitaires spécialisés dans ce domaine à travers un partenariat, un consortium ou un laboratoire d'excellence.

L'objectif étant de mettre en place un suivi régulier de la qualité de l'environnement, de la diversité marine, des méduses et des espèces non-indigènes, au niveau de régions côtières de références sur le littoral nord, est et sud de la Tunisie, mais aussi de développer la science citoyenne pour enrichir les bases de données.

ACTION 6

METTRE EN PLACE DES MODELES DYNAMIQUES COTIERS COUPLANT PROCESSUS BIOLOGIQUES/ETHOLOGIQUES - HYDRODYNAMIQUES POUR L'ETUDE DE LA DYNAMIQUE DES ESPECES MARINES NUISIBLES

Il faudrait aussi prévoir des outils mathématiques (modélisation probabiliste) pour créer une sorte de météo-méduse ou infos-espèces non indigènes, fournissant des informations clés aux

décideurs et aux gestionnaires de risques dans la zone côtière dans le secteur de la pêche et de l'aquaculture, du tourisme et de la santé publique.

Changements Climatiques et Tourisme

La conférence sur le changement climatique et le tourisme (du 9 au 11 avril 2003, à Djerba) à l'initiative de l'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT) a été l'occasion de faire prendre conscience aux acteurs du tourisme l'importance des impacts possibles des changements climatiques sur ce secteur clef en Tunisie. Depuis, les études sur le tourisme et le changement climatique se multiplient en Tunisie et dans le monde.

Mais la relation entre le tourisme et les changements climatiques est à double sens : les changements climatiques affecteront les ressources climatiques du tourisme (le niveau de confort du climat touristique, les phénomènes atmosphériques à risques) et indirectement, ses ressources non climatiques (les plages, les ressources en eau, les paysages...). Le tourisme contribue aux changements climatiques en raison essentiellement de son fort recours aux modes de transport les plus polluants.

En Tunisie des climatologues géographes se sont penchés sur le climat touristique actuel de la Tunisie et sa variation spatiale et saisonnière, ainsi que sur son évolution future dans le cadre de changements climatiques. Ils se sont focalisés sur les indices de confort climatique touristique (voir, entre autres, Alouane T., Hénia L., Hlaoui Z. Riahi M., Hammami K...). Ces études ont permis une assez bonne connaissance du climat touristique de la Tunisie et de son évolution probable dans le cadre du changement du climat. Plusieurs projets et initiatives ont permis entre autres l'élaboration d'une stratégie d'adaptation (*Tourisme et changement climatique en Tunisie : Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique du secteur touristique en Tunisie, MEDD et GIZ*). Ces études ont permis de mettre en lumière les forces et les faiblesses du secteur face aux changements climatiques.

Ces études ont montré que le secteur touristique tunisien présente une forte vulnérabilité aux changements climatiques et qu'il est fortement dépendant du climat estival et de l'évolution du littoral.

Des grands dossiers à gérer	Des opportunités à saisir
La chaleur et la dégradation des indices de confort climatique de l'été	L'amélioration des conditions climatiques de l'hiver et de l'inter saison
La dégradation du littoral et des ressources en eau	La relative proximité des marchés émetteurs
La question des transports et de la mobilité (taxes carbone)	Les changements climatiques : une motivation supplémentaire pour un enrichissement de l'offre

En matière d'adaptation, des actions sans-regret sont à privilégier notamment en matière de recherche scientifique. Il s'agit de renforcer la connaissance et la recherche ; développer les systèmes de suivi, renforcer l'information météo-climato-touristique locale (collaboration INM, chercheurs climatologues, modélisateurs).

Parallèlement à cet effort de la part de chercheurs climatologues géographes, les chercheurs de l'INSTM ont

réalisé des études de l'impact des changements climatiques sur le milieu marin et sur le littoral tunisiens. Ces études ont été menées en utilisant les données observées mais surtout à l'aide de modèles numériques qu'ils soient européens ou du modèle mis en place à l'INSTM. Ces études ont permis par exemple d'obtenir des projections sur l'évolution des activités touristiques balnéaires en Tunisie et même d'estimer les impacts socio-économiques.

Changements Climatiques, Agriculture et Eau

En Tunisie le secteur d'agriculture contribue pour 10% du PIB et à 18% de la population active. L'agriculture souffre de la surexploitation des nappes ; elle mobilise l'essentiel des

ressources naturelles productives avec 4.3 millions d'hectares érigés sur les 4.5 millions d'hectares arables. La production agricole demeure fortement dépendante des conditions climatiques qui influencent en premier l'agriculture pluviale notamment dans les régions du centre et du Sud.

Les ressources en eau constituent le "bien" économique et environnemental le plus précieux pour la Tunisie. Avec moins de 500 m³/hab/an; la Tunisie est déjà en situation de pénurie d'eau. Le secteur de l'eau en Tunisie est déjà confronté à plusieurs défis dont notamment i) une grande variabilité dans la disponibilité et ii) un équilibre "demande en eau /eau exploitable" fragile. Associé à une forte pression anthropique, le changement climatique serait de nature à exacerber cette rareté de l'eau.

C'est pour cela que le pays a mis en place une politique de rationalisation des usages des ressources naturelles en vue d'améliorer leur valorisation mais aussi d'assurer leur durabilité.

L'agriculture en Tunisie est très vulnérable aux changements climatiques (Rapports GIZ, 2007, 2014). L'augmentation des températures pourrait augmenter le risque d'incendie des forêts naturelles notamment dans le Nord de la Tunisie. Cela pourrait alors menacer directement certaines activités socioéconomiques (menaces sur certains barrages, glissements de terrain, etc.). Une recrudescence des espèces invasives pourrait en découler. Des sécheresses plus fréquentes et plus longues vont se traduire par des disponibilités fourragères fluctuantes pour les parcours steppiques du Centre et du Sud. Une surexploitation des ressources disponibles en découlerait augmentant la fragilité de ces couverts végétaux. Les parcours

seront donc amenés à s'étendre vers le Nord et induire un surpâturage. Du fait de l'augmentation des sécheresses et des phénomènes extrêmes et de la baisse du couvert végétal, certains sols pourraient s'éroder beaucoup plus facilement et diminuer grandement leur fertilité. Ainsi certaines terres aujourd'hui fertiles (exemple dans la zone du Tell tunisien) pourraient être plus sensibles à l'érosion. L'olivier est un arbre ancestral particulièrement adapté aux conditions climatiques de la Tunisie. En revanche, certaines variétés non autochtones, importées des pays du Nord de la Méditerranée présentent en revanche des capacités moins importantes d'adaptation aux changements climatiques.

Une intrusion marine entraînerait la perte de 53% des réserves actuelles des nappes phréatiques littorales, avec un fort impact négatif sur le plan socio-économique.

Les superficies des cultures céréalières connaîtraient une baisse suite aux changements climatiques. La superficie de l'arboriculture baisserait aussi selon les espèces fruitières menées en sec en fonction de leur importance relative à l'échelle nationale, notamment dans les régions du Centre et du Sud. L'effectif du cheptel (bovin, ovin et caprin) baisserait de même. Les plus grande baisses seront senties principalement dans le Centre et le Sud.

Changements Climatiques et Santé

Le secteur de la santé est un des secteurs les plus vulnérables aux changements climatiques en Tunisie. La qualité de l'air et de l'eau, la disponibilité de la nourriture et de l'eau et la salubrité de l'habitat sont influencés par les changements climatiques. En Tunisie, quatre groupes de pathologies sont particulièrement sensibles au changement climatique :

Les maladies à transmission hydrique, les maladies à transmission vectorielle, les maladies liées à l'exposition au soleil, les maladies du système respiratoire.

Les changements climatiques impactent la santé en Tunisie par la modification de la répartition géographique des insectes vecteurs qui propagent les maladies infectieuses, l'accroissement de la charge des maladies diarrhéiques,

l'accroissement du volume d'ozone au niveau sol, la précipitation du démarrage de la saison pollinique, le risque d'accroissement du nombre des décès et de traumatismes provoqués par la survenue plus fréquente d'événements climatiques extrêmes et des maladies telles que le choléra, la menace de la sécurité alimentaire en raison de la multiplication des sécheresses et des inondations affectant l'agriculture.

Une surveillance des maladies sensibles aux effets du changement climatique et la détection précoce et l'alerte rapide des phénomènes à potentiel épidémique sont nécessaires. Le renforcement de la recherche scientifique et la prévision des événements extrêmes sont importants pour anticiper l'impact sur la santé du Tunisien.

ACTION 7

AMELIORER LES PROJECTIONS RELATIVES AUX SECTEURS ECONOMIQUES

Il s'agit de renforcer les programmes de recherche scientifiques et les collaborations nationales et internationales afin de fournir les projections les plus robustes des impacts des changements

climatiques sur les différents secteurs économiques du pays. Des projections robustes permettent d'élaborer les stratégies d'adaptation adéquates.

5

Synthèse et Orientations



1 Constat

Cet aperçu sur la situation actuelle en météorologie et domaines annexes a mis l'accent sur une insuffisance majeure en Tunisie. La recherche météorologique au sens large est très peu développée. Pourtant un besoin pressant est mis en avant, vu la forte variabilité du climat tunisien, sa dépendance de la variabilité à l'échelle régionale et les changements profonds qu'il est en train de subir. Rajouté à cela la très forte vulnérabilité de la Tunisie tant au niveau terrestre que marin. Les inondations soudaines et violentes causées par des pluies diluviennes, les sécheresses récurrentes sont de plus en plus ressenties par le citoyen Tunisien. L'effort consenti par la Tunisie pour assurer une gestion des événements extrêmes et sans doute important, mais il est resté dans la plus part des cas restreint à une gestion à postériori. L'infrastructure mise en place pour la prévision opérationnelle, pour les études ciblées ou pour la recherche scientifique est aussi impressionnante. Pour s'en convaincre il suffit de parcourir la liste des institutions tunisiennes exerçant dans ce domaine. Les ingénieurs, chercheurs et autres cadres exerçant dans ces institutions sont d'un très haut niveau. Souvent les actions d'étude et de recherche qui y sont menées se font en collaboration avec des institutions internationales.

En Tunisie la coordination entre les différentes institutions en relation avec le domaine de la météorologie est restée très limitée. Une des causes principales est sans doute l'inexistence d'une structure de recherche en météorologie. Une telle structure existe dans la quasi-majorité des pays sous différentes formes et a toujours servi de locomotive pour l'ensemble des institutions en relation. Il s'agit typiquement d'un centre de recherche en météorologie-climat qui est adjoint à l'institution météorologique du pays. En France le Centre National de Recherche Météorologique est intégré à Météo-France. Aux états unis l'Administration Nationale pour l'Océan et l'Atmosphère (NOAA) incorpore différents centres dont ceux de la recherche scientifique. C'est la recherche faite au sein de ces centres qui est ensuite assimilée et utilisée de façon opérationnelle. Ces centres de recherche incluent dans la plus part des cas différents laboratoires dont ceux qui assurent le lien avec les secteurs économiques du pays et le citoyen.

2 Les principales actions proposées

- Renforcer les conventions INM-instituts de recherche et universités (climatologie, hydrologie, ...) pour améliorer les produits de la prévision numérique du temps et en assimilation de données.
- Donner une forte priorité aux besoins sociétaux en prévision du temps et en étude et projection du climat afin d'assurer la valeur ajoutée des produits de la météorologie et le retour de l'information du citoyen.
- Mettre en place une plateforme commune de modélisation mer-atmosphère-terre et partage des outils de calcul.
- Développer les outils de prévision météorologique à différentes échelles de temps, les adapter à la réalité tunisienne pour une assurer une anticipation des aléas et minimiser leurs impacts.
- Assurer une réponse commune aux appels à participation par interaction et regroupement des compétences et par partage des données et des outils.
- Renforcer les capacités en observations ; mise en place de plateformes communes (observations et analyses)

- Concevoir des modèles dynamiques adaptés aux secteurs clés de l'économie couplant différents processus en relation avec le secteur.

3 STRATEGIE

Le Centre National de Recherche en Météorologie

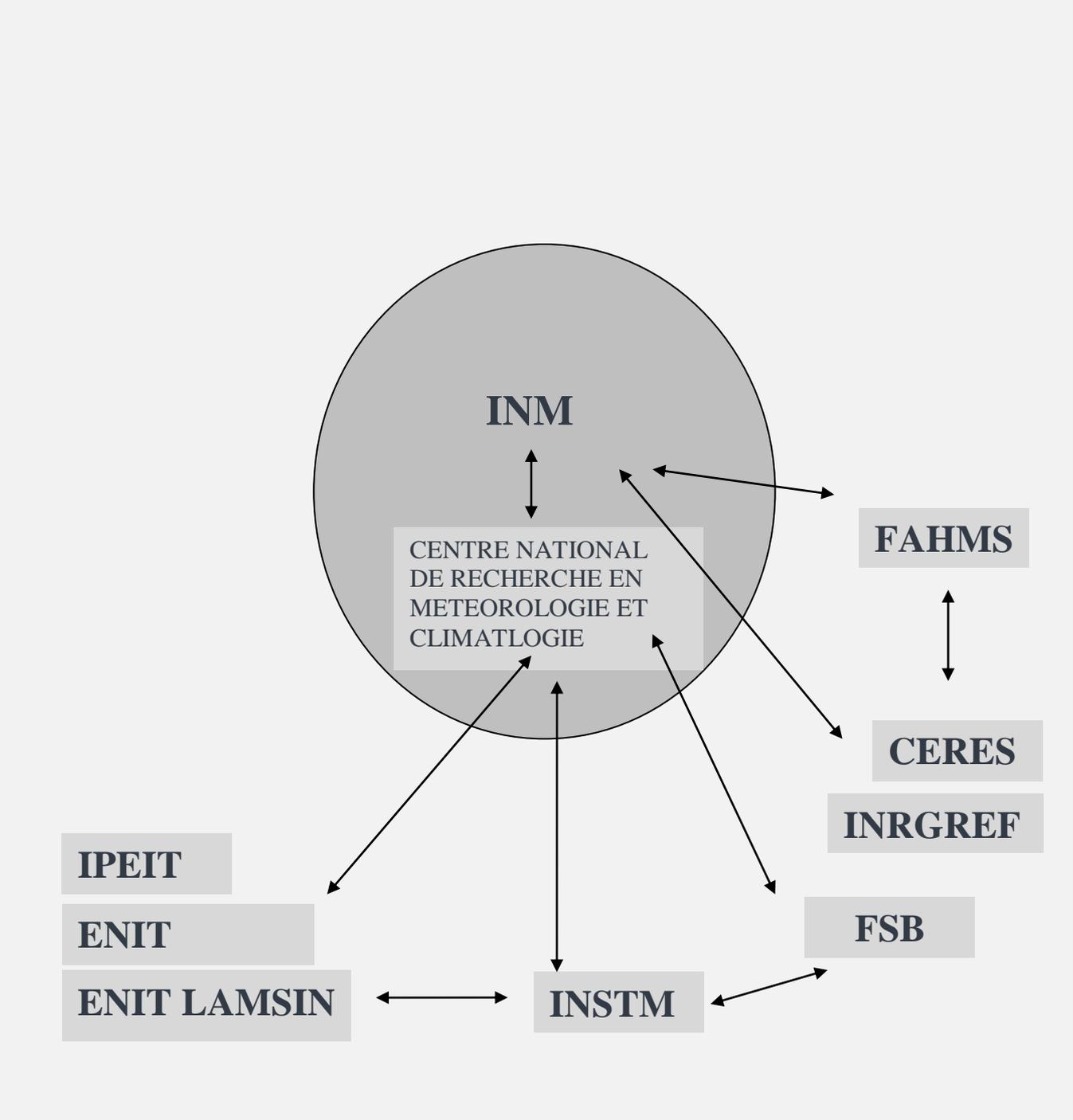
Les différentes actions proposées dans ce livre blanc nécessitent la mise en place d'une stratégie à long terme. Pour assurer la réalisation des actions proposées cette stratégie s'appuie sur la mise en place d'une structure nationale à caractère durable. Ainsi la recommandation principale de ce livre blanc est **la mise en place d'une structure de recherche en météorologie au sens large**. Cette structure qui serait sous la forme d'un centre national de recherche aurait pour objectif la conduite de recherche en météorologie au sens large pour répondre aux besoins du pays en termes de compréhension des phénomènes météorologiques-océaniques-hydrologiques, de développement d'outils (e.g., modèles numériques), d'étude et de proposition de solutions aux requêtes de secteurs économiques et autres du pays. Ce centre serait adossé à l'Institut National de la Météorologie. La recherche au sein de ce centre serait conduite dans des laboratoires de recherche à l'instar de ceux des institutions de recherche scientifique en Tunisie.

Le centre comprendrait un laboratoire de modélisation numérique qui aurait pour objectif de prendre en charge le développement des outils numériques avancés et adaptés à la réalité tunisienne. Il pourra ainsi inclure les modules

complémentaires (hydrologie, nature du terrain, couplage mer-atmosphère, impacts sociaux, impacts par secteur). Ce laboratoire prendrait aussi en charge la réalisation de simulations en relation avec les changements climatiques.

Le centre comprendrait aussi un Laboratoire de climatologie qui s'occuperait des études statistiques et autres du climat tunisien et du lien avec la variabilité à l'échelle de la Méditerranée et à l'échelle globale. Ce Laboratoire s'occuperait de la prédiction statistique du climat. Il prendrait aussi en charge les études en relation avec les caractéristiques hydrographiques de la Tunisie en ayant recours aux images satellitaires et à d'autres techniques avancées. Le laboratoire prendrait aussi en charge l'étude des répercussions des phénomènes extrêmes sur les secteurs économiques et sur le citoyen. Il serait ainsi une passerelle entre les résultats de recherche et le citoyen de façon générale.

4 INTERACTIONS ENTRE INSTITUTIONS



5 Priorités de recherche

Intégration dans les priorités de recherche scientifique 2017-2022.

Les actions qui sont proposées dans le cadre de ce livre blanc s'intègrent dans les priorités, les orientations futures et les initiatives clés établis récemment pour la recherche scientifique en Tunisie dont deux critères sont l'excellence scientifique comme valeur ajoutée et la question des catastrophes naturelles ayant un haut niveau d'urgence. L'excellence scientifique sera sûrement un des points forts de la recherche collaborative proposée. L'intégration des composantes atmosphériques, océaniques et terrestres permettra d'approcher les diverses questions scientifiques d'une manière plus complète faisant intervenir plusieurs points de vue. Une recherche plus aisée, pluridisciplinaire et approfondie pouvant aboutir à des conclusions plus robustes et applicables en découlera. L'amélioration des modèles de prévision du temps ne pourra se faire que si des compétences en modélisation numérique, en ingénieurs prévisionnistes, en informatique de haute performance et de calcul parallèle ainsi que des statisticiens et spécialistes en météorologie dynamique et en océanographie se regroupent ensemble. Ceci aboutira à une recherche d'excellence qui trouvera sa place dans le système de recherche international. La prévision d'inondations ou des sècheresses, comme exemples de catastrophes naturelles récurrentes en Tunisie avancera considérablement avec la mise en place d'une recherche regroupant les aspects atmosphériques pour la prévision du temps mais aussi les aspects terrestres et marins pour prévoir leurs impacts.

Les priorités de la recherche mettent l'accent sur la sécurité énergétique, hydrique et alimentaire, l'étude des changements climatiques et leurs impacts pour la préservation de la biodiversité, la lutte contre la désertification et l'érosion côtière ainsi que la pollution atmosphérique, terrestre et marine. Ce

sont des sujets qui s'intègrent complètement dans les thématiques proposées au sein de ce Livre Blanc.

Le premier objectif des Priorités de la recherche, qui concerne la stratégie de la gouvernance, à savoir **Promouvoir la cohérence du système national de recherche scientifique et d'innovation et la coordination entre toutes les parties prenantes**, ainsi que le 6ème objectif qui concerne le financement et l'évaluation de la recherche, à savoir **Établir des centres d'excellence et renforcer leurs capacités**, dont une initiative proposée : *Créer des consortiums de recherche dans des domaines prioritaires et soutenir la création de centres d'excellence*, illustrent parfaitement l'approche proposée dans ce Livre Blanc.

Le partage des moyens de calculs lourds proposé dans ce Livre Blanc, en particulier pour la mise en place d'un système de modélisation atmosphère-mer-terre complet, est l'objectif 10 des Priorités de la recherche en ce qui concerne la gouvernance interne : **Assurer une utilisation optimale des équipements scientifiques lourds et développer une infrastructure de recherche**. Pour cet objectif il a été proposé comme initiative de *développer une infrastructure de calcul scientifique et d'accès très haut débit (services de cloud computing, accès à large bande passante et un centre de calcul haute performance)*.

Les actions du Livre Blanc s'intègrent aussi dans l'objectif 19 des Priorités de la recherche : **Renforcer les liens entre les structures de recherche et leur environnement socioéconomique**. L'implication de sciences humaines et des acteurs locaux à côté de la recherche météorologique, océanique ou hydrologique, permettra de faire le lien entre les résultats de la recherche et le milieu socio-économique, de valoriser cette recherche et d'évaluer sa valeur ajoutée.

Bibliographie

PNUD/Bureau pour la prévention des crises et le relèvement. La réduction des risques de catastrophes : un défi pour le développement, J.S Swift et Co, Etats Unis, 2004

ROSSI F., M. FIORENTINO, P. VESACE, 1984. Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis. *Water Resources Research.*, 20, 7, 847-856.

Zahar, Y. & Laborde, J. (2007). Modélisation statistique et synthèse cartographique des précipitations journalières extrêmes de Tunisie. *Revue des sciences de l'eau*, 20(4), 409-424. doi:10.7202/016914ar

Bethoux J. P., Gentili, B. Raunet J. et Tailliez D., 1990. Warming trend in the western Mediterranean Deep Water. *Nature*. 347: 660 - 662.

Bethoux J. P., Gentili, B. et Tailliez D., 1998. Warming and freshwater budget change in the Mediterranean since the 1940s, their possible relation to greenhouse effects. *Geophysical Reserach Letters*. 25 (7): 1023-1026.

Daly Y M.N., Kefi-Daly Yahia D., Gueroun, S.K.M., Aissi M., Deudoun A., Fuentes V. and Pirano S., 2013. The invasive tropical scyphozoan *Rhopilema nomadica* Galil, 1990 reaches the Tunisian coast of the Mediterranean Sea. *BiolInvasions Records*. 2 (4) : 319-323.

Galil B.S., 2008. Alien species in the Mediterranean Sea. Which, when, where, why? *Hydrobiologia*. 606 : 105-116.

Gueroun, S.K.M., Kefi-Daly Yahia, D., Deidoun, A., Fuentes, V., Pirano, S. and Daly Yahia, M.N. 2014. First record and potential trophic impact of *Phyllorhiza punctata* (Cnidaria : Scyphozoa) along the north Tunisian coast (South Western Mediterranean Sea). *Italian Journal of Zoology*. 2014 : 1-6.

Anonyme, 2001. Communication initiale de la Tunisie à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques. Rapport Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. 177 p.

Coudert, E., 2002. Une approche régionale de la population et de l'urbanisation en Méditerranée, rétrospective et projections à 2025. © Presses universitaires François-Rabelais, 2002. <http://books.openedition.org/pufr/274?lang=fr>

Conditions d'utilisation : <http://www.openedition.org/6540>

GIEC, 2014 Rapport du Groupe International d'Etude du Climat.

Louati, M. et Zargouni F., 2013. Evolution du trait de côte du littoral du delta de Medjerdha par imagerie Landsat et Sig. 2013. <http://www.geosp.net/wp-content/uploads/2013/07/Mourad-Louati-Fouad-Zargouni.pdf>.

Queslati A, Labidi O. et Elamri T., 2015. Le littoral tunisien. Atlas de la vulnérabilité à l'élévation du niveau marin. 76 p.

Rapport GIZ, 2007 : Stratégie-nationale-d'adaptation-de-l'agriculture.pdf, Rapport GIZ en collaboration avec le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. 2007

rapport GIZ, 2012 : Le-secteur-de-la-santé-face-au-changement-climatique.pdf, en coopération avec le Ministère de la Santé., Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

rapport GIZ, 2014 : Le secteur agricole tunisien face au changement climatique , Rapport GIZ Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2014

John P. Jasper; & J. M. Hayes. *Nature* 347, 462-464 (04 October 1990); A carbon isotope record of CO₂ levels during the late Quaternary. doi :10.1038/347462a0

Philippe Drobinski, Véronique Ducrocq, Philippe Arbogast, Claude Basdevant, Sophie Bastin, et al.. HyMeX, le cycle de l'eau méditerranéen à la loupe. *La Météorologie, Météo et Climat*, 2013, pp.23-36.

Roussenov, V., E. Stanev, V. Artale, and N. Pinardi (1995), A seasonal model of the Mediterranean Sea general circulation, *J. Geophys. Res.*, 100(C7), 13515-13538, doi:10.1029/95JC00233.

Zavatarelli, M. and G.L. Mellor, 1995: A Numerical Study of the Mediterranean Sea Circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 1384-1414, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<1384:ANSOTM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<1384:ANSOTM>2.0.CO;2)

Henia L. et Hlaoui Z. (Coordinateurs) 2015 : Contribution à l'étude des risques climatiques en Tunisie ». Edition Université de Tunis 317 p.
BEN BOUBAKER H. (2010) : Les paroxysmes climato-thermiques en Tunisie : approche méthodologique et étude de cas. *Revue Climatologie*, vol. 7, p. 57- 87

Liste des institutions concernées

- Institut National de la Météorologie (INM)
- Institut National des Sciences et Technologies de la Mer : Laboratoire du Milieu Marin (INSTM-LMM)
- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis - Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement (ENIT-LMHE)
- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis - Laboratoire de Modélisation mathématique et numérique dans les Sciences de l'Ingénieur (ENIT-LAMMSIN)
- Faculté des Sciences de Bizerte (FSB)
- Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Tunis (IPEIT-URIIES88)
- Institut National des Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF)
- Centre d'Etudes et de Recherches Economiques et Sociales (CERES)
- Ecole supérieure de l'agriculture de Mograne (ESA Mograne)
- Ecole Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab (ESIER)
- Ecole Polytechnique de Tunisie, Laboratoire de Mathématiques Appliquées (LMA)
- Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités de Manouba (FLAHM),
- Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (FSHS)
- Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement de l'Urbanisme et du bâtiment (ISTEUB), Laboratoire VDEC : Villes Durables et Environnement Construit

Comité Scientifique de rédaction

Ali Harzallah, Président
Soumaya Ben Rached, Coprésident

Précipitations extrêmes : responsable de rédaction :

Co-rédacteurs :

Yadh Zahar
Emna Gargouri
Tawfik Hermessi
Zied Sassi
Wafa Khalfaoui
Hajer Dhouioui

Sécheresse : responsable de rédaction :

Co-rédacteurs :

Habib Ben Boubaker
Latifa Hnia
Soumaya Ben Rached
Hanene Mairech
Anis Zammel

Interactions Mer-Atmosphère-Terre : responsable de rédaction :

Co-rédacteurs :

Moncef Boukthir
Ali Harzallah
Nadia Mkhinini

Vulnérabilité et adaptation aux CC : responsable de rédaction :

Co-rédacteurs :

Mohamed Néjib Daly Yahia
Latifa Hnia
Haythem Belghrissi
Yadh Labbene