

Water Resources and Climate Change: Key Adaptation Strategies and the Role of Scientific Research in Tunisia

Ressources en Eau et Changement Climatique: Stratégies Clés d'adaptation, et Rôle de la Recherche Scientifique en Tunisie

B. BEN NOUNA ¹, M. REZIG ¹, S. KANZARI ¹, A. CHEBIL ¹, S. JEBARI ¹

¹ Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF)

*Corresponding author: bennouna.bechir@iresa.agrinet.tn

Abstract – This paper aims to strengthen the climate change adaptation strategy in water sector in Tunisia. It considers the preservation of water resources, the water irrigation demand management, and economic analysis of the adaptation strategies costs. A summary of the research work from international experiences is established in this article. These experiments were carefully described and analyzed their relevance to the development of water resources adaptation approach to the specific climate context of Tunisia. This study is the link with the role of scientific research and its multidisciplinary and innovative contribution.

Keywords: Water resources, climate change, adaptation strategies, scientific research, Tunisia

Résumé – Ce papier, a pour objectif, de renforcer la stratégie d'adaptation aux changements climatiques du secteur eau en Tunisie. Le renforcement considère des adaptations clés en matière de préservation de la ressource en eau, de gestion de la demande en eau d'irrigation, et d'analyse économique des coûts des stratégies d'adaptation. Une synthèse des travaux de recherches issues des expériences internationales est établie dans cet article. Ces expériences ont été minutieusement décrites et analysées selon leurs pertinences en vue de l'élaboration d'une approche d'adaptation des ressources en eau spécifique au contexte climatique de la Tunisie. Ce travail fait le lien avec le rôle de la recherche scientifique et son apport pluridisciplinaire et innovant.

Mots clés : Ressources en eau, changement climatique, stratégies d'adaptation, recherche scientifique, Tunisie

1. Introduction

Les ressources en eau sont au cœur du débat sur les principaux impacts attendus du changement climatique (CC) sur l'environnement naturel, notamment, en zones semi-arides et arides (El-Quosy, 2009). En effet, le CC affecte à la fois sa variabilité et par conséquent, sa disponibilité dans de nombreuses régions. Dans ce contexte, les prélèvements pour satisfaire les besoins mondiaux en irrigation d'ici à 2050 varient de 2760 km³/an à 4120 km³/an selon les différentes hypothèses des scénarios de l'étude du Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (CAWMA, 2007).

Concernant les impacts économiques, Fankhauser(1995) a estimé que la réduction de ruissellement par le CC aux États-Unis qui est environ de 7% imposera un cout moyen sur l'eau de l'ordre de 0,42 \$ par mètre cube. Il a suggéré aussi que l'affectation des eaux de ruissellement par le CC imposerait globalement un coût de 13,7 milliards de dollars à l'économie américaine.

Le secteur de l'eau en Tunisie, a été confronté à plusieurs reprises à l'impact du CC. Nous citons comme exemple, le cas d'extrême sécheresse qui a sévi entre 1999 et 2001 et qui a été à l'origine de conflits entre usagers. Ces conditions climatiques défavorables peuvent conduire selon les scénarios climatiques projetés aux horizons 2020 et 2050 pour la Tunisie à une baisse quantitative et qualitative des ressources en eau de surface et souterraine ainsi qu'une diminution de 20% de son produit intérieur brut agricole (MARH, 2007). Pour faire face à ce défi de pénurie croissant et aux incertitudes liées au CC, la Tunisie doit réviser ses stratégies d'aménagement et de gestion des ressources en eau. En effet, il devient



impératif de développer des plans d'adaptations prioritaires capables de considérer à la fois une offre en eau limitée, une demande en eau continuellement croissante, un cout et un contexte socio-économique. Cette démarche sera fort utile pour orienter et guider les décideurs à atténuer la vulnérabilité de la ressource vis-à-vis des conséquences relatives au changement climatique.

Ce papier, a établi un état de l'art relatif aux incidences des CC sur : la disponibilité future en eau, la demande en eau d'irrigation, et les aspects socioéconomiques de l'eau. Des expériences internationales ont été minutieusement décrites et analysées selon leurs pertinences en vue de l'élaboration d'une approche d'adaptation des ressources en eau spécifique au contexte climatique de la Tunisie. Ce travail fait le lien avec le rôle de la recherche scientifique et son apport pluridisciplinaire et innovant. Un ensemble des conclusions et des recommandations relatives aux formes et aux modes d'adaptations est émise.

2. Incidences des changements climatiques et ressources en eau

Les ressources en eau de la Tunisie sont considérées parmi les plus faibles du bassin de la Méditerranée. Elles sont en outre, contrastées et menacées par : 1- une urbanisation en croissance rapide, 2- une agriculture avec un secteur irrigué en pleine expansion et conditionné par 82% des ressources eau mobilisées, 3- une implantation touristique qui s'accroît davantage et, 4- des périodes climatiques sèches qui sont de plus en plus fréquentes.

Ce pays, dispose de ressources conventionnelles et non conventionnelles relativement limitées. Elles sont évaluées à environ 4.920Mm³ (dont 2.700Mm³ en eau de surface, 1.970Mm³ en eaux souterraines et 250Mm³ en eau non conventionnelle) (Hamza, 2007).

Ces ressources seront particulièrement atteintes par le CC, bien que les modèles utilisés présentent de nombreuses incertitudes (MARH, 2007). Les projections climatiques réalisées aux horizons 2020 et 2050 ont été faites sur la base des résultats du modèle HadCM3. Ce modèle utilise pour la Tunisie, une résolution basée sur un maillage de 55km x 55km soit un ensemble de 56 mailles couvrant le pays. Deux scénarios moyens et plus probables de ce modèle (A2 et B2) ont été favorisés par rapport à la période de référence «1961-1990». Les principaux résultats obtenus à partir de ces études prospectives, montrent les tendances suivantes (MARH, 2007):

-une faible élévation de température (+0.8°C) pour le Nord, le Cap Bon et le Centre-Est. La zone intermédiaire du centre du pays qui est formée par le Sud-ouest et l'extrême Sud, est caractérisée par une élévation de température plus importante (+1.3°C) (Figure1). A l'horizon 2050, la tendance à l'augmentation s'accroît avec la plus forte augmentation, de l'ordre de +2.7 °C, au Sud-Ouest.

-une baisse modérée des précipitations à l'horizon 2020 qui s'accroît à l'horizon 2050 pour le scénario B2 avec une variation de -10% au Nord Ouest à -30% à l'extrême sud (Figure2). Quant à l'échelle saisonnière l'hiver enregistre la plus faible diminution des précipitations, alors que l'été se marque par la baisse la plus accentuée allant du -8% au Nord à -40% à l'extrême Sud.

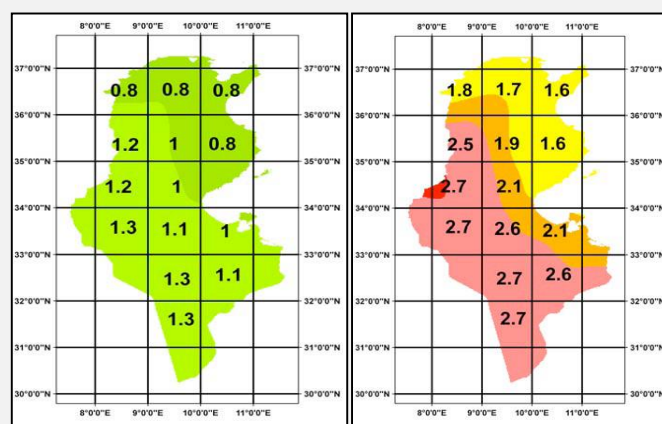


Figure 1. Élévation des températures (°C) moyennes annuelles du modèle HadCM3 (scénario A2) par rapport à la période de référence à l'horizon 2020 (gauche) et à l'horizon 2050 (droite). (MARH, 2007)

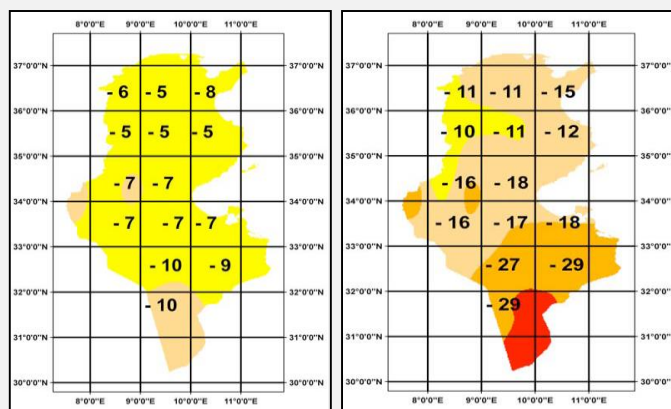


Figure 2. Baisse (%) des précipitations moyennes annuelles du modèle HadCM3 (scénarioA2) par rapport à la période de référence à l'horizon 2020 (gauche) et à l'horizon 2050 (droite). (MARH, 2007)

Les répercussions attendues du CC sur les ressources en eau sous les facettes de l'offre, de la demande en eau et de l'outil économique seront importantes.

2.1. Incidences sur l'offre en eau

Des études liées au sud de la Méditerranée montrent une réduction des pluies de l'ordre de 20% et une diminution du ruissellement de 30%. La saison estivale se prolongera de 3 à 5 semaines et les besoins en eau pour des fins d'irrigation augmenteront de 40%. La couverture végétale sera moins dense, la dégradation des sols plus active et la tendance vers la désertification plus importante (Giannakopoulos et al., 2005).

Le tableau 1 résume les résultats des 21 modèles globaux du GIEC pour le scénario A1B (IPCC, 2007). Les valeurs minimales et maximales sont indiquées ainsi que la médiane, les premiers et derniers quantiles, et la fréquence (% d'occurrence) des saisons extrêmes. En prenant l'hypothèse d'un signal temporel linéaire entre 1980-1999 et 2080-2099, il est aussi indiqué dans combien d'années le signal du changement climatique sera détectable pastel-00838516, version 1 - 25 Jun 2013 par rapport à la variabilité naturelle du climat (IPCC, 2007).

Pour le cas de la Tunisie, une analyse des tendances hydrologiques à travers des stations du semi-aride tunisien a été entreprise (Jebari et al., 2008). Cette analyse des tendances permet de détecter l'impact du CC (Easterling, 1995). Des séries de pluie, de débit et d'envasement ont été étudiées sur une période moyenne de 50 années (1960-2004). Les résultats obtenus ont révélé principalement des tendances décroissantes pour la pluviométrie annuelle et mensuelle (Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars).

Tableau 1. Résumé des résultats des 21 modèles globaux du GIEC sur le changement de la température de surface, des précipitations et de certains extrêmes pour la zone méditerranéenne calculés entre les périodes 1980-1999 et 2080-2099 pour le scénario A1B, (IPCC 2007)

	Température (°C)						Précipitations (%)						Saisons extrêmes		
	min.	25	50	75	max.	tan	min.	25	50	75	max.	tan	chaude	humide	sèche
Hiver (DJF)	1,7	2,5	2,6	3,3	4,6	25	-16	-10	-6	-1	6	>100	93	3	12
Printemps (MAM)	2,0	3,0	3,2	3,5	4,5	20	-24	-17	-16	-8	-2	60	98	1	31
Été (JJA)	2,7	3,7	4,1	5,0	6,5	15	-53	-35	-24	-14	-3	55	100	1	42
Automne (SON)	2,3	2,8	3,3	4,0	5,2	15	-29	-15	-12	-9	-2	90	100	1	21
Annuel	2,2	3,0	3,5	4,0	5,1	15	-27	-16	-12	-9	-4	45	100	0	46

2.2. Incidences sur la demande en eau d'irrigation

Des travaux de recherches internationales et nationales ont été sujet d'étude d'impact du CC sur la demande en eau d'irrigation. Ces travaux, ont montré que, des températures plus élevées et une augmentation de la variabilité des précipitations peuvent conduire, d'une manière générale, à une hausse de la demande en eau d'irrigation, même si les précipitations totales restent identiques pendant la saison de croissance (GIEC, 2008).

À l'échelle mondiale, des études d'impact du CC sur la demande en irrigation ont été conduite par Diaz et al. (2007), sur des zones d'irrigation représentatives du bassin Méditerranéen. Leur calcul a montré une hausse potentielle de l'aridité et des besoins en irrigation (+9%) pour les scénarios A2 et B2, au sein du modèle climatique HadCM3. Selon les mêmes scénarios, les cultures d'été semées au mois de mars présenteront une augmentation moyenne des besoins en eau d'irrigation de l'ordre de 18%. Lovelli et al., (2010) ont souligné dans la région Méditerranéenne l'importance de la concentration du CO₂ et de la température sur la physiologie des cultures. Cette étude a montré que les besoins en eau et en irrigation des cultures changent en fonction de leurs besoins thermiques et de la période de l'année pendant laquelle elles se développent.

En Tunisie, Mansour et al 2007 ont montré que l'évapotranspiration de référence par l'application des scénarios climatiques, relatifs à l'augmentation de la température, accuse une hausse qui va de 3.1% (scénarios le plus optimiste : +1,3°C) à 9,4 % (scénarios le plus pessimiste : + 4°C) en rapport avec les valeurs actuelles de l'ET_o. Aussi, Ben Nouna et al. (2014) ont révélé que l'impact du CC sur les besoins en eau du blé dur conduit en irrigué dans les régions semi-arides de la Tunisie se traduira par une augmentation de 10% à l'horizon de 2050. La présente synthèse sur l'impact du CC vis à vis de la demande en eau d'irrigation, prévoit une augmentation de celle-ci, qui est due essentiellement à l'élévation de la température et à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

2.3. Incidences socioéconomiques du changement climatique sur les ressources en eau

Les conséquences socio-économiques majeures du CC sur la quantité et la qualité des ressources en eau, se feront sentir à travers le changement dans la disponibilité et la demande de ces ressources. Ces effets sont plus accentués dans les pays en voie de développement pour au moins deux raisons. Il s'agit d'abord d'un ensemble de pays plus chauds que la moyenne mondiale et par conséquent plus vulnérables aux élévations de températures.

D'autre part, ce sont des pays qui dépendent principalement des activités agricoles compte tenu de la valeur ajoutée agricole dans le produit national et la part de l'emploi agricole dans l'emploi totale. Des études montrent que le revenu net total de certaines productions agricoles pourrait baisser considérablement (Mendelson *et al.*, 1994; Molua and Lambi , 2007). De telles baisses de productivité auraient de lourdes répercussions sur l'emploi et la sécurité alimentaire. De plus, le CC réduira l'accès à l'eau potable, affectera négativement la santé des pauvres personnes, et constituera une vraie menace à la sécurité alimentaire dans plusieurs pays (Kurukulasuriya et Rosenthal, 2003). Il sera aussi à l'origine de l'exode rural et de la migration vers les villes, avec une accentuation des tensions et un affaiblissement du lien social qui à son tour favorise la dégradation des ressources naturelles. L'évaluation économique de l'impact du CC sur les ressources en eau à différentes échelles est fondée sur des approches spécifiques. Nous citons en particulier :

- *Echelle nationale* : l'approche la plus utilisée à l'échelle nationale est celle du modèle d'équilibre général. Cette approche est utilisée par plusieurs auteurs à l'échelle internationale pour évaluer l'impact de la réduction de l'offre d'eau sur l'économie en général (Zhai *et al.*, 2009 ; Adams, R. M *et al.*, 1999). En Tunisie, Thabet et al., (2014) l'ont utilisé pour quantifier l'impact de la réduction de la quantité d'eau sur l'économie Tunisienne.

- *Echelle Sectorielle* : L'approche d'analyse de l'impact du CC sur un secteur donné notamment celui de l'agriculture est celle IMPACT model développé par l'IFPRI. Ce modèle a été appliqué à plusieurs pays notamment la Tunisie (Breisinger *et al.*, 2013) . L'approche Ricardienne est souvent utilisée pour mesurer l'impact au niveau sectoriel (Mendelsohn *et al.*, 1994, 1999 ; Mendelsohn and Dinar, 2003 ; Dinar *et al.*, 1998; Molua and Lambi ,2007). Cette approche a été utilisée aussi en Tunisie par Chebil et al., (2014) pour le cas du secteur du blé en Tunisie.

-*Echelle Régionale* : Le modèle hydro-économique est utilisé par plusieurs scientifiques pour évaluer l'impact du CC sur la ressource en eau et en conséquence sur le bien-être à l'échelle régionale ou au niveau des bassins versants. Parmi les travaux qui ont utilisé ce modèle, on trouve Brian et al.

(2004), Hurd and Coconrod (2006) ; Lund et al. (2003). En Tunisie, il n'existe pas des études qui ont estimé l'impact économique du CC sur les ressources en eau en utilisant ce modèle.

- *Echelle d'exploitation* : L'approche bio-économique est utilisée souvent pour évaluer l'impact du CC sur le revenu des exploitations agricoles. Elle commence par des modèles de simulation des changements du rendement des cultures sous différents climats. Les rendements estimés sont ensuite intégrés dans les modèles économiques des exploitations pour estimer l'impact économique. Cette approche est appliquée par Adams and McCarl 2001; Adams et al. 1998 ; Kaiser et al, 1993 ; Reilly et al. , 1994 ; Rosenzweig et 1994. Swiss (2012) a utilisé cette approche pour quantifier l'effet du CC sur le revenu des exploitations dans la basse vallée de Medjerda en Tunisie.

3. Adaptations clés des ressources en eau au changement climatique

Selon L'IPCC (2007), l'objectif de l'adaptation est de réduire la vulnérabilité, à court et long terme. Il est à signaler que cette capacité d'adaptation dépendra fortement du niveau de développement socio-économique d'un pays donné. Pour le secteur de l'eau L'IPCC préconise un certain nombre de mesures d'adaptation, notamment le développement de la collecte des eaux de pluie, des techniques de stockage et de conservation de l'eau, la réutilisation de l'eau, la désalinisation, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des techniques d'irrigation. Il préconise également la mise en place de politique de gestion intégrée à l'échelle nationale

Dans le contexte Tunisien, la priorité pertinente d'adaptation au CC vise à faire converger une offre en eau limitée à une demande en eau en hausse. L'adoption de cette action prioritaire présente des coûts socio-économiques importants. Ce dernier permet de prévoir et d'interpréter les implications des différentes stratégies d'adaptation. Plus encore, les instruments économiques peuvent aider à guider les décideurs à atténuer les effets du CC. C'est dans cet esprit, que cet article vise à proposer trois adaptations clés afin de limiter les incidences du CC sur l'offre en eau, la demande en eau d'irrigation et les aspects socio-économiques de l'usage de l'eau.

3.1. En matière de préservation de l'offre en eau

L'échange d'expériences internationales dans ce contexte devrait couvrir les aspects scientifiques, techniques, et institutionnels. Ceci est d'autant plus important que les recherches entreprises en Tunisie, ont rarement visé le développement de schémas cohérents de gestion et d'aménagement de la ressource hydrique à l'échelle des bassins versants. Au niveau des pays développés, la gestion durable des ressources en eau est assurée par des institutions qui disposent de plans d'actions clairs, de compétences techniquement qualifiées, de structures efficaces et coordonnées et finalement de moyens financiers suffisants. Cette manière de faire est décrite au niveau de la littérature comme étant l'unique solution pour gérer efficacement les ressources en eau, même, modeste. Plus encore, la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des unités hydrologiques permet de freiner la perte de capacité de stockage des ressources en eau, minimiser les risques hydrométéorologiques, équilibrer l'offre aux besoins et finalement assurer l'adaptation au CC (Philips et al., 2004). En ce qui concerne les principales adaptations qui peuvent intéresser l'offre nous citons en particulier :

- Compléter les données hydrologiques sur les oueds et définir les régimes actuels ;
- Mettre à disposition toutes les bases de données nationales liées à la ressource en eau (hydrométéorologie, paramètres hydrologique, climat, cartographie, etc.);
- Quantifier les processus de l'érosion hydrique et les taux d'envasement des barrages ;
- Choisir des modèles hydrologiques et de perte en sol qui soient adaptés au contexte du pays ;
- Reconnaître le bassin versant comme étant un domaine de décision là où la gestion intégrée de la ressource en eau devrait être considérée ;
- Redonner la voie aux agriculteurs pour qu'ils puissent participer au devenir de leurs ressources en eau ;
- Préparer des guides techniques décrivant l'évolution du dimensionnement et des formes liés aux aménagements hydro-agricoles à installer à travers les petits bassins versants ;
- Valoriser le savoir-faire dans le domaine des systèmes hydrauliques traditionnels afin de généraliser l'aménagement hydro-agricole à travers les petits bassins versants cultivés ;
- Concevoir des plans de gestion et d'aménagements qui soient protecteurs des ressources en eau mais aussi générateurs de revenus additionnels ; et
- Sensibiliser la communauté civile aux problématiques de l'eau et du CC...

3.2. En matière de gestion de la demande en eau d'irrigation

La demande en eau est liée au changement des comportements d'individus, potentiellement en compétition, avec des capacités d'adaptation différentes. Ainsi, l'efficacité de ces mesures n'est pas certaine, car elles nécessitent l'action cumulée d'acteurs disposant de capacités d'adaptation variées et avec des intérêts qui peuvent être parfois conflictuels (Bates *et al.*, 2008). Plusieurs études marquent bien la prédominance des mesures d'adaptation du côté de l'offre par rapport à celles de la demande. Par exemple Amarasinghe et al., (2008) proposent la recharge artificielle des eaux souterraines car leur utilisation continuera à alimenter la demande en eau d'irrigation. En ce qui concerne les principales adaptations qui peuvent intéresser la demande en eau nous citons en particulier :

- Renforcer les programmes d'amélioration et de sélection et proposer des systèmes de culture plus efficaces ;
- Réduire la demande en eau d'irrigation par l'établissement des calendriers d'irrigation, la modification du calendrier cultural, et l'utilisation des technologies d'irrigation économes en eau ;
- Réallouer l'eau vers des usages à plus grande valeurs ajoutées ; et
- Utilisation accrue des incitations économiques, dont des mesures de comptage et la tarification de l'eau, pour encourager sa conservation.

3.3. En matière d'analyse économique des stratégies d'adaptation

L'analyse économique des stratégies d'adaptation au CC, fournit d'une part des outils analytiques qui aident à prévoir et à interpréter les implications des différentes stratégies d'adaptation, et d'autre part, elle présente des instruments économiques capables de guider les décideurs à atténuer les effets du CC. Le rôle potentiel de ces deux apports est capital pour la compréhension des implications des différentes stratégies d'adaptation au CC. L'analyse coût-bénéfice compare les coûts engendrés par une action et les bénéfices qui y sont associés. Cette méthode permet de comparer les deux situations : avec et sans action d'adaptation. Le résultat du bénéfice net de l'action est comparé avec le coût d'adaptation. Des avantages de l'action peuvent effectivement être exprimés en tant que «dommage à éviter ». Des dommages de ligne de base peuvent être exprimés comme fonction du temps $D(t)$, dommages qui se produisent quand aucune mesure d'adaptation n'est prise (scénario sans action).

L'analyse coût-bénéfice permet de dégager des résultats comparés en termes économiques (valeur actualisée nette-VAN) pour les deux scénarios suivants : avec et sans action d'adaptation. Mathématiquement la formule de calcul de la VAN s'exprime comme suit :

$$VAN_s = \sum_{t=1}^n \frac{B_{ts} - C_{ts}}{(1+r)^t}$$

Avec :

VAN : Valeur actualisée nette exprimée en monnaie

Bts : Bénéfices de l'année t pour le scénario s

Cts : Coûts de l'année t pour le scénario s

Bts : Bénéfice de l'année t pour le scénario s

Cts : Coûts de l'année t pour le scénario s

N : Durée de vie du projet d'action (années)

r : Taux d'actualisation

S = 1,2 correspondent aux deux scénarios (avec et sans action d'adaptation)

A chaque fois qu'on a une VAN supérieure ou égale à zéro l'action d'adaptation est jugé rentable.

Autrement dit, il est nécessaire de démontrer que les bénéfices de l'action soient supérieurs aux coûts.

La théorie économique a développé aussi différentes méthodes pour permettre d'évaluer

économiquement des biens environnementaux (il n'existe pas de marché). La valeur de ces biens

environnementaux est introduite dans l'analyse cout-bénéfice élargie. Nous distinguons deux grandes catégories de méthodes d'évaluation : directes et indirectes.

Le Tableau 2 permet d'établir une distinction entre ces deux méthodes d'évaluation.

Tableau 2. Différentes méthodes d'évaluation (Brahic et Terreaux, 2009)

Méthodes indirectes (méthodes de préférences révélées)		Méthodes directes (méthodes de préférences déclarées)	
Exemples	Principes	Exemples	Principes
Méthode des coûts de transport/voyage	Estimer les dépenses de déplacement des individus par une enquête de fréquentation du site étudié	Méthode de l'évaluation contingente	de Déterminer les préférences des individus en les interrogeant directement sur leur consentement à payer
Méthode des prix hédoniques	Déterminer l'influence d'une caractéristique environnementale sur les prix consentis sur un marché (exemple : immobilier)	Méthode d'expérimentation des choix.	Déterminer les préférences des individus en leur demandant directement de choisir l'option qu'ils préfèrent parmi un ensemble d'options aux caractéristiques particulières
Méthode des changements dans la productivité	Etablir l'impact de changement dans les services écologiques sur les biens produits		
Approches fondées sur les coûts (coûts de remplacement...)	Evaluer les coûts de remplacement du bien ou service perdu		

Les méthodes directes dites aussi méthodes des préférences déclarées sont employées lorsqu'il n'existe pas de marché pour un bien associé à l'actif environnemental à évaluer. Il s'agit de définir un marché hypothétique sur lequel les individus sont invités à indiquer combien ils consentiraient à payer pour une amélioration de l'environnement. S'inscrivent dans cette catégorie la méthode de l'évaluation contingente et celle de l'expérimentation des choix (Brahic et Terreaux, 2009).

Les méthodes indirectes dites aussi méthodes des préférences révélées, consistent à utiliser les informations fournies par les marchés et par les comportements observés sur ces marchés. Selon les situations et les données exploitables, les méthodes des coûts de transport, des prix hédoniques, des changements dans la productivité et celles fondées sur les coûts (coûts de restauration, de remplacement...) sont utilisées (Brahic et Terreaux, 2009).

L'autre outil d'analyse est celle de l'analyse coût-efficacité. Cette analyse vise à comparer différentes actions. L'objectif est d'identifier les actions d'adaptation les plus rentables, par exemple, pour une réduction de la perte d'eau suite au CC. Le ratio coût-efficacité s'exprimera alors en Dinars/m³. L'action d'adaptation qui présente un coût minimum pour atteindre l'objectif visé est celle recommandée.

4. Discussion

4.1. Impacts du changement climatique

En général, la synthèse des travaux a montré que dans un contexte de CC, l'offre en eau sera réduite. Cette réduction touchera d'une part les apports liés à la pluviométrie et d'autre part à la capacité de stockage des réserves hydriques (sols et réservoirs) à l'échelle des unités hydrologiques. Cependant, la demande en eau d'irrigation, accusera une augmentation des besoins en eau des cultures. Ce constat devrait être traité à travers une généralisation des techniques d'irrigation localisées et la considération d'une tarification plus adaptée comme mentionné au niveau des études stratégiques du secteur de l'eau en Tunisie à l'horizon 2030 (M.A, 1998). Les conséquences du CC sur l'offre et de la demande en eau décrites ci-dessus seront traduites par un contexte socio-économique fragile. En effet, nous assisterons à une baisse considérable du revenu net total de certaines productions agricoles (Mendelson *et al.*, 1994; Molua and Lambi, 2007). De telles baisses de productivité auraient de lourdes répercussions sur l'emploi et la sécurité alimentaire.

Malgré l'abondance d'une certaine littérature scientifique liée au CC et à ses impacts attendus relatifs au secteur de l'eau, il reste encore beaucoup à faire. Afin de réduire les interrelations entre le système climatique et les ressources en eau qui sont nombreuses et d'une redoutable complexité, certains scientifiques ont commencé à appliquer un ensemble de prédiction de la probabilité sur les effets du CC (Tao et Zhang, 2011b).

4.2. Adaptations au changement climatique

La présente étude propose des mesures d'adaptations au CC avec les facettes de l'offre et de la demande en eau et les outils économiques pour leur analyse. En effet, le processus d'estimation des coûts d'adaptation est complexe et comporte de nombreuses incertitudes. Néanmoins, plusieurs études ont projeté des coûts des mesures d'adaptation telles que (De Bruin *et al.*, 2009; Hof *et al.*, 2010; Banque mondiale, 2010a). Ces études diffèrent en terme de période et de méthodologie. Certaines études mettent l'accent sur les coûts d'adaptation en cours, d'autres études considèrent les flux d'investissement. Pour le cas de la Tunisie, les coûts majeurs d'adaptation au CC à considérer, sont ceux relatifs à : 1-installation des infrastructures, 2-la protection de la zone côtière, et 3-l'adaptation aux phénomènes météorologiques extrêmes. Ces coûts représentent respectivement, 37, 26, et 24 % du coût total annuel moyen d'adaptation, soit 87% du coût global prévu pour la période d'adaptation 2010-2050 (Banque mondiale, 2010a).

Plus encore, un intérêt de plus en plus croissant couvre l'aspect adaptation. D'où, une implication forte et conséquente de la recherche scientifique. Des équipes multidisciplinaires sont en train de se former presque partout. De nos jours, des collaborations et des réflexions intra- et interdisciplinaires émergent continuellement. De plus, la promotion et la création de partenariats entre le monde de la recherche et celui du développement et l'une des étapes pressantes à établir dans un proche avenir. Tous cela, représente une plateforme adéquate et utile pour une réflexion commune capable d'étudier d'une manière participative et engagée aussi bien les formes et les modes d'adaptation à considérer dans un plan national lié aux ressources en eau dans les conditions climatiques futures. Ces adaptations devraient répondre aux exigences économiques et être acceptées par les décideurs. D'ailleurs, l'évaluation coût-bénéfice des mesures d'adaptation a fait l'objet d'études élaborées par certains scientifiques (Xiong *et al* 2005,2009).

Finalement, l'approche nationale d'adaptation devrait être orientée par des principes directeurs à savoir :

- Une meilleure coordination entre les instituts de recherche, les bureaux d'études spécialisés, les gestionnaires et les planificateurs.

- Une intégration de la volatilité climatique dans la politique nationale de l'eau du pays.

- Des études sociologiques sont nécessaires pour évaluer la capacité d'adaptation.

5. Rôle du système de la recherche agricole

Le secteur de la recherche scientifique révélera un enjeu majeur de l'adaptation au changement climatique. Il peut constituer un outil de thésaurisation et d'élaboration de nouveaux savoirs attachés au domaine de l'adaptation au changement climatique, alimenté par la communauté scientifique de haute compétence et accessible au grand public. Cet outil, doit progresser simultanément vers :

- Le développement d'une recherche pluridisciplinaire et moins fragmentée et ce à travers la création d'un programme fédérateur sur le changement climatique ;

- L'attribution et l'analyse économique aux résultats des programmes de recherche sur l'eau ;

- L'introduction des thèmes innovants en liens avec le CC. Parmi ces thèmes, nous citons en particulier : 1-proposer des systèmes de cultures plus efficaces et promouvoir l'agriculture pluviale (eau verte), 2-Développer des outils d'aide à la décision et améliorer les méthodes d'évaluation des risques au niveau des unités hydrologiques, 3-Anticiper la modification des flux d'eau (répartition spatio-temporelle) dans les bassins, 4-procéder en utilisant des approches participatives, 6-Considérer la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des bassins versants, etc.

6. Conclusion

Dans une première étape de ce travail, nous avons procédé à dresser un constat pour caractériser la vulnérabilité des ressources en eau du pays face au contexte climatique actuel. Dans une seconde étape, nous avons essayé d'évaluer la vulnérabilité des ressources en eau du pays tout en considérant des projections climatiques futures. Ceci, afin d'entreprendre une approche débouchant vers des options d'adaptation nécessaires au CC. Cette approche, vise la priorité d'une d'adaptation de l'offre et de la demande en eau dans un contexte économiquement viable. En fait, elle opte pour l'établissement d'un plan national en la matière, qui soit basé sur les acquis de recherches, les principes directeurs tenant compte de la coordination entre les différents acteurs concernés et des stratégies et des politiques nationales de l'eau du pays. Cette étude considère aussi l'apport de la recherche agricole qui pourra être traduit par l'élaboration d'un référentiel qui permettra de développer et d'engranger de la connaissance,

de produire des solutions et de modeler différemment notre savoir-faire actuel de manière à s'adapter aux nouveaux besoins liés au CC.

7. Références

- Adams R. M., McCarl B. A., Segerson K., Rosenzweig C., Bryant K. J., Dixon B. L., Conner R., Evenson R. E., and Ojima D., 1999.** The Economic Effects of Climate Change on U.S. Agriculture. In : Mendelsohn R. O. and Neumann J. E. (eds). *The Impact of Climate Change on the United States Economy*. Cambridge University Press, Cambridge, 18-54.
- Amarasinghe U., Shah T., and McCornick P. G., 2008.** Seeking calm water: exploring policy options for India's water future. *Natural Resources Forum*, (32):305–315.
- Banque mondiale, 2010.** *The Costs to Developing Countries of Adapting to Climate Change - New Methods and Estimates*.
- Bates, B., Z. Kundzewicz, S., and Wu, J. P., 2008.** *Climate Change and Water*. ed. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ben Nouna B., Jebari S., Khelifi A., and Ben, Amor A., 2014.** Evaluation globale de l'impact des changements climatiques sur le blé dur en conditions semi-arides de la Tunisie. Actes du séminaire international "Gestion durable des ressources en eau et en sols : Situation, Défis et Perspectives. 19-20 novembre 2013 Hammamet. *Annales de l'INRGREF, Numéro spécial* (19) : 156-170.
- Brahic E. et Terreaux J.P., 2009.** *Evaluation économique de la biodiversité –méthodes et exemples pour les forêts tempérées*. Ed. Quae, Paris, 200p.
- Bresinger C., Al-Riffai P., and Wiebelt M., 2013.** Economic impacts of climate change in the arab World: A summary case studies from Syria, Tunisia and Yemen. In: Sivakumar M.V.K, Lal R., Selvaraju R., and Hamdan I. (eds), *Climate Change and Food Security in West Asia and North Africa*. Springer, 339-366.
- Bryson b., Zbigniew W.K., and Shaohong W J., 2008.** *Le changement climatique et l'eau*. Document technique VI du GIEC, 228p.
- Chebil A., Brian H., Mtimet N., Dhehibi B. and Weslati B., 2012.** Economic impact of climate change on Tunisian agriculture: The case of wheat. Chapter 8. In Mohamed Behnassi Kirit Shelat Kiyotada Hayashi Margaret Syomiti (eds.), *Vulnerability of agriculture, water and fisheries to climate change: Towards sustainable adaptation strategies*, Springer publisher (Under press).
- Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (Ed.), 2007.** Water for food, Water for life: A Comprehensive Assessment for Water Management in Agriculture. Colombo, IWMI (International Water Management Institute); London, Earthscan Publications Ltd, 645p.
- De Bruin, K. C., Dellink R. B., and Tol R. S. J., 2009.** "AD-DICE: An implementation of adaptation in the DICE model." *Climatic Change* 95(1-2): 63-81.
- Díaz S., Lavorel S., de Bello F., Quétier F., Grigulis K., Robson T.M., 2007.** Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (104): 20684–20689.
- Easterling D.R., and Peterson T.C., 1995.** A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series. *Int. J. Climatol.* (15): 369–377.
- El-Quosy D., 2009.** Impact of Climate Change: Vulnerability and Adaptation. Fresh Water pp 75-86 Report of the Arab forum for Environment and Development. Mostafa K. Tolba and Najib W. ed. Saab 522 pp.
- Fankhauser S., 1995.** Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse. Earthscan, London.
- Giannakopoulos M., Bindi M., Moriondo M., and Tin, T., 2005.** Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise. A report for WWF.
- GIEC, 2008,** *Changement climatique et l'eau*. Document technique VI du GIEC.
- Hamza M., 2007.** Gestion des ressources en eau en Tunisie. INECO, Nabeul. Présentation orale de la Direction Générale des Ressources en Eaux, Ministère de l'Agriculture, République Tunisienne.
- Hof A. F., den Elzen M. G. J., and van Vuuren D. P., 2010.** "Including adaptation costs and climate change damages in evaluating post-2012 burden-sharing regimes." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15(1): 19-40.
- Hurd B., and Coonrod J., 2012.** Hydrological and economic consequences of climate change in the Upper Rio Grande region. *Climate Research*, (53):103-118. doi: 10.3354/cr01092.

- Hurd B.H., Callaway J.M., Smith J.B., and Kirshen P., 2004.** “Climatic Change and U.S. Water Resources: From Modeled Watershed Impacts to National Estimates,” *Journal of the American Water Resources Association*. 40(1): 129-148.
- Hurd B.H., Callaway J.M., Smith J.B., and Kirshen P., 1999.** “Economic Effects of Climate Change on U.S. Water Resources,” Chapter 6. In: Robert M. and James E. Neumann. (eds) *The Impact of Climate Change on the United States Economy*. Cambridge University Press, Cambridge, 133-177.
- Jebari S., Berndtsson R., Uvo, C., and Bahri A., 2014.** Rainfall trend and impact on discharge and siltation in Tunisian semiarid areas (*forthcoming*).
- Jebari S., Berndtsson R., Lebdi F., et Bahri A., 2008.** Sediment, discharge and precipitation variation in the wadiMellegue catchment during the 50 past years. *Annales de l'INRGREF* (11):116-122.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007.** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Eds: S Solomon, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor, HL Miller. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996p.
- Lahache Gafrej R., 2007.** Stratégie d'adaptation des ressources en eau et des écosystèmes. Communication au séminaire national sur « l'étude d'une stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques» (phase2 de l'étude). Tunis, 11 janvier 2007.
- Le Gallic T., 2010.** Contexte Garonne 2050 : Adaptation au changement climatique, Document final Février 2010, ACTeon
- Lorenz K., Zoheir N., ALMOHAMAD H., Clemens C. M., 2007.** Cahier 7 rapports des groupes d'experts, 12-22.
- Lovelli M., Perniola Di., Tommaso t., Ventrella D., Moriondo M., and Amato M., 2010.** Effects of rising atmospheric co2 on crop evapotranspiration in a mediterranean area. *Agricultural water managment* (97) : 1287-1292.
- Mansour M., Mougou R., et Marco J., 2008.** Les scénarios climatiques, un outil d'aide à la décision. Poster du séminaire international " Exploitation des ressources en eau pour une agriculture durable" 21-22 novembre 2007 Hammamet.
- MARH 1998,** *Eau 21, stratégie du secteur de l'eau en Tunisie à long terme, 2030.*
- MARH, GTZ, 2007,** *Stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques.*
- Mark Svendsen and Nana Künkel, 2010** Eau et adaptation au changement climatique, Rural 21, 24-28_1-2020_01.
- Mendelsohn R., Ariel D., 2003.** Climate, water, and agriculture. *Land Econ* 79 (3):328–341.
- Mendelsohn R., Nordhaus W., and Shaw D., 1994.** The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *Am Econ Rev* (84):753–771.
- Mendelsohn R., Nordhaus W., and Shaw D., 1999.** The impact of climate variation on US agriculture. 349 In: Mendelsohn R, Neumann J (eds) *The impacts of climate change on the U.S. economy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 55–74
- Molua EL., and Lambi CM., 2007.** The economic impact of climate change on agriculture in Cameroon, vol 4364, Policy research working paper. World Bank, Washington, DC
- Phillips, S.J., Dudík, M., and Schapire, R.E., 2004.** A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*, ACM Press, New York, pp. 655–662.
- Tao F L, Zhang Z. 2011b.** Impacts of climate change as a function of global mean temperature: maize productivity and water use in China. *Climatic Change*, 105, 409-432.
- Thabet C (2014).** Water policy and poverty reduction in rural area: a comparative economy wide analysis for morocco and Tunisia. 14th EAAE Congress, Slovenia, August 26-29.
- Xiong W., Conway D., Lin E. D., Xu Y. L., Ju H., Jiang J., Holman I., and Li Y., 2009b.** Future cereal production in China: the interaction of climate change, water availability and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, (19): 34-44.
- Xiong W., Xu Y L., and Lin E. D., 2005.** The simulation of yield variability of winter wheat and its corresponding adaptation options under climate change. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, (21): 380-385.
- Zhai, F., Lin T., and Byambdorj E., 2009.** A General Equilibrium Analysis of the Impact of Climate Change on Agriculture in the People's Repu