

**PROJECTION DES RESSOURCES EN EAU DE LA TUNISIE
SOUS LES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES GLOBAUX**

Dr Raoudha Gafrej Lahache⁽¹⁾, Pr Gonzague. Pillet ⁽²⁾

(1) Institut Supérieur des Sciences Biologiques Appliquées de Tunis –e-mail: r.lahache@gnet.tn

(2) Universités de Fribourg et de Genève ; Ecosys Inc. Genève (Suisse)- e.mail : pillet@ecosys.com

Résumé. La connaissance à ce jour des variables hydrologiques liées aux changements climatiques fait face à des incertitudes. Toutefois, par les simulations issues du modèle climatique HadCM3, nous avons pu déduire que les ressources en eau conventionnelles diminueront d'environ 28% à l'horizon 2030. Cette diminution sera localisée au niveau des nappes phréatiques surexploitées, celles du littoral et au niveau des nappes profondes non renouvelables. La diminution au niveau des eaux de surface sera d'environ 5% à l'horizon 2030. La confrontation des ressources et des besoins calculée en intégrant toutes les orientations stratégiques futures montre la satisfaction des besoins vers l'horizon 2030. Cependant, un simple retard dans la mise en place des stratégies déjà programmées se traduira par un déséquilibre bien avant 2030. Ainsi, la gestion des barrages intégrant les risques et les incertitudes, la mise en place effective de la réglementation sur l'eau et des différentes stratégies d'économie d'eau à toutes les échelles, joueront un rôle essentiel dans la disponibilité des eaux. Les changements climatiques se font ressentir si les techniques, les écosystèmes, les traditions, les comportements et les usages n'évoluent pas dans le sens qui permet une meilleure gestion de la ressource. Le compte de l'eau devra être élargi de manière à saisir la valeur totale de cette dernière, la gestion de la ressource par écosystème s'imposera et une attention particulière devra être accordée aux écosystèmes dont les services – ou *emternalités* – garantissent notre approvisionnement.

Mots clés : Changements climatiques, modélisation climatique, ressources en eau, écosystèmes, emternalités.

1. INTRODUCTION

Les problèmes soulevés et tous les débats sur les changements climatiques touchent le cycle de l'eau. En effet, l'évaluation de l'impact de l'augmentation de la température liée à l'émission des gaz à effets de serre nécessite une compréhension parfaite du cycle de l'eau du fait que les impacts liés aux changements climatiques qui inquiètent l'homme sont tous liés à la disponibilité de l'eau compte tenu de l'augmentation éventuelle de la fréquence des événements extrêmes comme les inondations, les sécheresses, l'élévation du niveau de la mer, etc. Cette inquiétude est justifiée pour les pays qui doivent avoir recours à l'irrigation pour assurer la sécurité alimentaire des populations.

Les modèles climatiques actuels permettent de reproduire l'évolution de la température, ce qui n'est pas le cas pour les autres paramètres météorologiques comme les précipitations et tout particulièrement les précipitations extrêmes. Nous verrons que cette difficulté de modélisation tient au caractère très local et réduit dans le temps (quelques heures) de ces événements. L'ampleur et la nature exacte des changements futurs restent à quantifier et seuls les modèles régionaux en cours d'élaboration pourront répondre en partie à ces besoins.

L'eau mobilisée en Tunisie est répartie en eaux de surface (51 %) et en eaux souterraines (49 %). L'eau exploitée se répartit entre les barrages (20,5 %), les nappes phréatiques (33,2 %) et les nappes profondes (46,3 %). Aussi, il est à noter que 88% des nappes phréatiques est à salinité supérieure à 3g/litre (DGRE, 2000). L'usage actuel de l'eau est réparti entre l'agriculture (81%), les particuliers et les collectivités (14 %), l'industrie (4%) et le tourisme (1%).

L'eau est l'actif naturel de base des agrosystèmes et des écosystèmes; dans l'Arc méditerranéen Sud, marqué par l'aridité, la Tunisie dépend étroitement de la qualité et de la disponibilité de cet actif à moyen et long terme. La quantité disponible (exploitable) par

habitant et par an est de 340 m³. L'eau, déjà rare et pouvant se raréfier encore, bénéficie d'une valeur supérieure à celle à laquelle l'économie l'exploite; son usage économique devrait donc être soumis à une allocation visant, à travers le prix courant de l'eau, à se rapprocher de sa valeur la plus réaliste possible (Bachta et al. 2007). Un accroissement de la rareté de l'eau se traduirait par une diminution de son allocation à l'agriculture. En effet, en cas de pénurie d'eau, le secteur agricole serait le premier à supporter un manque d'eau pouvant atteindre 50% de ses besoins, la priorité étant de satisfaire les besoins en eau potable. Les besoins de réviser la stratégie du secteur agricole en raison des changements climatiques (CC ci-après) sont ainsi intimement liés aux ressources en eau et de façon indirecte à tous les autres secteurs.

2. METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée pour projeter les ressources en eau à l'horizon 2030 sous les effets CC a nécessité :

- de réaliser en premier lieu un diagnostic complet et détaillé de l'état de la ressource et de son utilisation, des stratégies actuelles et futures liées au secteur de l'eau,
- d'établir les projections des ressources en eau sous conditions normales (sans CC) afin de construire ensuite un scénario de référence pour les projections sous CC,
- De réaliser les projections des ressources en eau sous conditions des changements climatiques.

L'objectif de la mobilisation des ressources en eau étant de satisfaire les besoins des différents secteurs socio-économiques, nous avons évalué selon trois scénarios, sans les CC, les ressources en eau ainsi que les besoins des différents secteurs et cela en se basant sur les différentes orientations stratégiques du 10ème et du 11ème plan.

Les projections des ressources en eau sous changements climatiques ont été basées sur les résultats de la modélisation climatique (MARH, 2007) utilisant le modèle HadCM3. La simulation par le modèle HadCM3 de circulation générale couplé, atmosphère-océan, développé par le Hadley Centre (UK) (Gordon et al. 2000). Le scénario de projection choisi est le scénario moyen A2 (IPCC 2001). Pour montrer les disparités régionales, le pays a été subdivisé en 6 zones géographiques, à savoir le Nord Ouest, le Nord Est, le Centre Ouest, le Centre Est, le Sud Ouest et le Sud Est. La simulation a été réalisée pour les horizons futurs 2020 (2011-2040) et 2050(2041-2070). Les variations sont données par rapport à la période climatique de référence 1961-1990. L'étude des extrêmes a été basée sur l'analyse des médianes des déciles de la population (1er décile, année ou saison très sèche et 9ème décile, année ou saison très humide).

La projection des ressources en eau avec l'intégration des effets des CC devrait permettre d'identifier les différents impacts liés à l'intensification des périodes extrêmes. Aussi, l'évaluation de la ressource exploitable confrontée aux besoins des différents secteurs socio-économiques devrait quant à elle permettre d'identifier la stratégie d'adaptation à mettre en place pour faire face aux effets des CC.

3. LE DIAGNOSTIC

Les ressources en eau potentielles conventionnelles formées par des eaux de surface et des eaux souterraines estimées à ce jour sont de 4833 Mm³ dont 2700 Mm³ en eau de surface et 2133 Mm³ en eaux souterraines (DGRE 2005). En 2002, les eaux non conventionnelles formées essentiellement par les eaux usées traitées sont de 250 Mm³ (ONAS 2002). A la fin de l'année 2005, la mobilisation et la protection des eaux de surface se fait à partir de 27

barrages, 193 barrages collinaires et 721 lacs collinaires. Certains ouvrages servent également à la protection contre les inondations, à la conservation des sols ainsi qu'à la recharge des nappes. Les eaux souterraines sont contenues dans 215 nappes phréatiques et 280 nappes profondes. Ces eaux sont exploitées à travers environ 128399 puits (DGRE 2000) et 4454 sondages (DGRE 2003).

Les volumes de l'exploitation des nappes restent entachés d'erreurs sachant qu'il est très difficile de comptabiliser tous les volumes pompés du fait de l'existence de puits et de forages illicites. Ces forages illicites fragilisent la ressource et ne permettent pas son économie. L'utilisation des eaux de forte salinité n'est soumise à aucune réglementation, de même pour l'utilisation des nappes côtières salées pour la production de l'eau osmosée pour le secteur touristique qui, sans contrôle, favorise les intrusions marines et par conséquent la dégradation davantage de la qualité des eaux des nappes. Il en est de même pour les nappes du Sud (Besbes et al. 2003). Pour résoudre en partie ce problème, actuellement 23 nappes bénéficient de la recharge artificielle. La recharge prévue à la fin du 11ème plan pour 40 nappes reste fortement tributaire de la disponibilité des eaux de surface.

Les installations de dessalement d'eau appartiennent dans la majorité à la SONEDE pour une capacité totale de 95000 m³ (SONEDE 2002). Le dessalement d'eau est en cours d'expansion surtout dans le secteur touristique. De nouvelles stations de dessalement à base d'eau de mer sont programmées par la SONEDE à Djerba, Zarrat et Sfax pour un potentiel global d'environ 80 Mm³ à l'horizon 2030.

La réutilisation des eaux usées traitées est d'environ 24% des volumes produits en 2002 par l'ONAS (Lahache 2005³). La difficulté de la réutilisation des eaux usées traitées dans le secteur agricole est liée essentiellement à la réglementation restrictive et au fait qu'environ 50% des eaux usées traitées sont produites dans le pôle de Tunis.

La tarification actuelle de l'eau prouve que le coût de l'eau reste subventionné par l'Etat et que seuls les secteurs industriels et touristiques payent l'eau au prix de revient. L'eau souterraine reste gratuite car elle est facturée à raison de 2 millimes le m³ pour l'agriculture et 5 millimes par m³ pour les autres usages.

La Tunisie a engagé des études du secteur de l'eau sur toutes ses formes. L'horizon fixé est l'année 2030. Toutes les études antérieures supposent la stabilité du climat. Aussi plusieurs études techniques et socio-économiques ont été engagées pour que le pays dispose de moyens d'actions et d'interventions pour assurer la satisfaction des besoins évolutifs en eau permettant une croissance économique et sociale harmonieuse et durable. On constate que les stratégies mises en place ont pour objectif l'augmentation du volume d'eau mobilisable. Il n'y a pas de stratégie adaptée directement à la protection de la qualité des eaux (à part indirectement la recharge artificielle des nappes) et à la réduction des inefficiences lors de son utilisation. Par exemple, des retards sont observés dans la mise en pratique de certaines stratégies telles que l'économie d'eau par les audits obligatoires (Lahache, 2005²). En effet, il a été signalé des pertes d'eau énormes et du gaspillage. L'étude stratégique pour la réduction de la consommation d'eau dans le secteur touristique a démontré l'efficacité de l'utilisation des audits pour l'économie d'eau (Lahache, 2007).

4. PROJECTIONS DES RESSOURCES EN EAU HORS CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La projection des ressources en eau a été réalisée en considérant les conditions moyennes en climat actuel sans intégrer l'effet des périodes extrêmes avec les CC. Pour cela nous avons considéré trois scénarios d'évolution de la ressource afin d'identifier le scénario de référence sur lequel il est prévu d'appliquer les effets des changements climatiques. Une projection des

besoins en eau des différents secteurs socio-économiques a été réalisée afin d'identifier le bilan besoins/ressources sans les CC.

Projection des ressources

Ressources conventionnelles

Sur la base des travaux de Kallel (1995) pour l'estimation des eaux de surface, des stratégies de mobilisation des eaux au niveau de la direction des barrages et la direction de la conservation des terres agricoles (MARH 1997, 2000, 2001, 2005, 2006) et des documents de l'exploitation des nappes profondes et des nappes phréatiques (DGGR 2000, 2003, 2005), nous avons émis différentes hypothèses en intégrant les phénomènes d'envasement des barrages, le rehaussement de certains barrages (MARH 2000), les fuites et l'évaporation au niveau des barrages. Pour les eaux souterraines, nous avons tenu compte de la dégradation de la qualité des eaux qui a pour conséquence une réduction des ressources exploitables (Besbes et al. 2003). Ainsi trois scénarios de projection (bas, moyen et haut) ont été réalisés. Les ressources exploitables à l'horizon 2030 seraient d'environ 2361 Mm³ pour le scénario bas, 3170 Mm³ pour le scénario moyen et 3829 Mm³ pour le scénario haut qui correspond à la mise en place effective de toutes les stratégies pour la mobilisation et la gestion rationnelle des ressources.

Ressources non conventionnelles

Il s'agit de la réutilisation des eaux usées traitées conformément aux trois scénarios proposés par la stratégie mise en place par l'ONAS (2002, 2005) et des eaux dessalées selon le programme prévisionnel de la SONEDE (2005). Seule l'eau dessalée en provenance de l'eau de mer a été comptabilisée puisque les eaux osmosées produites des eaux saumâtres sont déjà comptabilisées dans les eaux souterraines.

Les ressources non conventionnelles à l'horizon 2030 seraient d'environ 193 Mm³ pour le scénario bas, 285 Mm³ pour le scénario moyen et 372 Mm³ pour le scénario haut dont environ 80 Mm³ d'eau osmosée. Les ressources non conventionnelles ne représentent qu'une moyenne de 9% des ressources conventionnelles.

Les besoins en eau

Les projections des besoins en eau des différents secteurs ont été basées sur les différentes stratégies de la SONEDE, de la DGGR et des autres secteurs en intégrant les orientations stratégiques de la SONEDE pour l'économie de l'eau et l'amélioration de la qualité de l'eau distribuée et du rendement des réseaux. Pour les besoins du secteur de l'agriculture (actuellement environ 81% de ressources), nous avons considéré les options retenues dans l'étude EAU 21 réalisée en 1998 (Louati et al. 1998). Les besoins du secteur touristique ont été évalués sur la base des stratégies réalisées par l'ONTT (ONTT 2001, 2002, 2004 et AFT 2005).

Les besoins sont estimés à environ 3097 Mm³ pour le scénario bas relatif à la mise en place des différentes stratégies, 3242 Mm³ pour le scénario moyen (stratégie de la SONEDE pour l'amélioration des rendements des réseaux) et 3642 Mm³ pour le scénario haut qui suppose la continuité des conditions actuelles. Il est à signaler que ces besoins ne tiennent pas compte des besoins en eau des zones humides telle que ceux de l'écosystème de l'Ichkeul.

Bilan ressources-besoins

Pour confronter les ressources avec les besoins, on peut bien entendu considérer 9 scénarios mais la gestion rationnelle des ressources devrait nous épargner de tomber dans les situations extrêmes. C'est pour cela que nous présenterons ci-dessous les trois scénarios

relatifs aux hypothèses homogènes soit une évolution de la ressource et des besoins dans les mêmes proportions.

Nous retenons que dans le cas du scénario bas de l'évolution de la ressource confronté à l'évaluation stratégique des besoins selon le scénario moyen, un déséquilibre entre l'offre et la demande pourra apparaître vers l'année 2022. L'évaluation selon le scénario haut des ressources exploitables, c'est-à-dire en appliquant toutes les stratégies de l'Etat pour la mobilisation des eaux, les besoins même les plus hauts seront satisfaits à l'horizon 2030 avec une marge de 11%.

Aussi, si les besoins en eau ne diminuent pas conformément aux stratégies prévues par l'Etat, le bilan ressources/besoins sera négatif vers l'année 2015 pour le scénario bas d'estimation de la ressource.

5. PROJECTIONS DES RESSOURCES EN EAU SOUS CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'étude de la disponibilité de l'eau est intimement liée à la connaissance du cycle de l'eau qui est sujet à des processus et mécanismes complexes rendus possibles grâce au soleil qui est l'élément moteur du cycle hydrologique. Aussi, en plus de l'effet sur la température et la pluviométrie, le réchauffement global dû aux gaz à effet de serre va sans doute activer plus fortement le cycle hydrologique.

Comme le cycle hydrologique est caractérisé par l'interdépendance de ses composantes, par sa stabilité et son équilibre dynamique, cela conduit au fait que si un processus est perturbé, tous les autres s'en ressentent. Dans le contexte actuel des changements climatiques, il n'existe pas à ce jour des données chiffrées sur l'impact de ce phénomène sur toutes les composantes du cycle hydrologique. Seules la pluviométrie et la température ont pu être modélisées à l'échelle globale avec aussi des incertitudes relativement importantes (IPCC, 2007). En effet, les modèles climatiques actuels permettent de reproduire avec certitude l'évolution de la température, ce qui n'est pas le cas pour les autres paramètres météorologiques tels que les précipitations et tout particulièrement les précipitations extrêmes. Cette difficulté de modélisation tient dans leur caractère très local et réduit dans le temps (quelques heures). L'ampleur et la nature exacte des changements futurs restent à quantifier, c'est pourquoi des précautions doivent être prises pour transposer des informations globales à l'échelle régionale et encore plus locale.

Evolution moyenne des ressources en eau sous les CC

Le scénario moyen (A2) confirme la difficulté de préciser la variation de la pluviométrie sous les CC (MARH, 2007). En effet, l'évolution de la pluie est tantôt positive tantôt négative, elle est variable selon les régions et les saisons (figure 1 et tableau I). Soit une variabilité très importante pour le printemps et l'automne autrement à l'échelle globale, la diminution est très faible.

Tableau I. Evolution régionale et saisonnière de la pluviométrie en % sur la période globale de 2006 à 2030- Modèle HadCM3- Scénario A2.

Scénario A2	Nord		Centre		Sud	
	Ouest	Est	Ouest	Est	Ouest	Est
Hiver	-4,6	-4,2	-3,3	-4,5	-3,4	-1,6
Printemps	-1,9	-4,8	2,2	2,5	1,2	2,2
Eté	-7,3	-10,8	-5,5	-4,3	-21,9	-27,0
Automne	-2,0	-4,2	2,7	-0,1	-1,1	-5,9
Moyenne	-3,9	-6,0	-0,9	-1,6	-6,9	-8,1

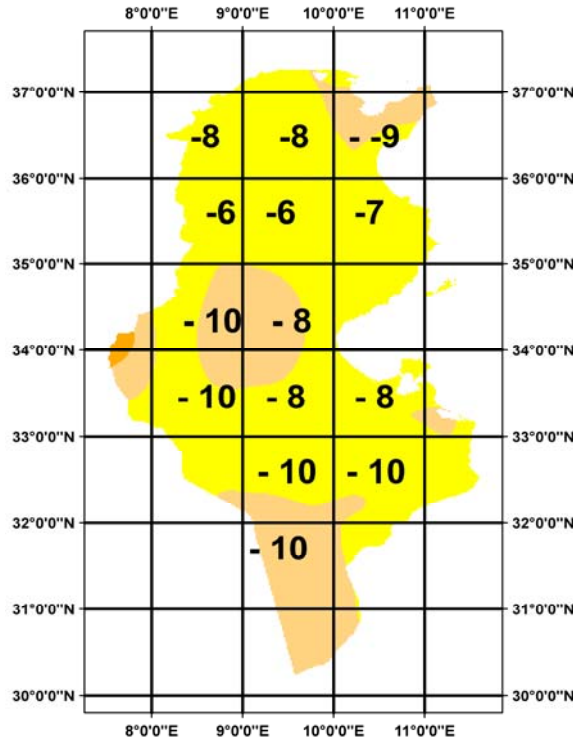


Figure 1 . Diminution en pourcent (%) de la pluviométrie en automne.
Projection de HadCM3 à l’horizon 2030.

Cette variation de la pluviométrie annuelle ne peut à elle seule donner des indications sur le sort du ruissellement à l’échelle des bassins versants. En effet, l’échelle temporelle en hydrologie est très importante et en plus en climat aride à semi-aride, le ruissellement dépend plus de l’intensité horaire de la pluie que de la quantité annuelle (Evans 1997).

Aussi, sachant que le ruissellement (Q) est égal à la pluviométrie (P) diminuée de toutes les pertes au niveau du bassin (E), on comprend, comme le précisent Wigley et Jones (1985), que si l’on ne tient pas compte du facteur (E), des distorsions significatives seront produites lors du calcul des changements de Q relatifs à ceux de P.

Ainsi, et en l’absence d’indications sur la variation de l’intensité de la pluie, de la couverture végétale future dont l’influence sur les écoulements est très importante (Kite 1994), nous retiendrons que cette faible variation de la pluviométrie n’affectera pas les écoulements ou plutôt les apports au niveau des barrages. Cette diminution sera minime devant la variabilité spatiotemporelle de la pluie (cette diminution peut apparaître lors d’une seule crue et n’affectera pas directement les stocks globaux sur l’année au niveau des barrages). Aussi, l’étude réalisée par De Wit et Stankiewicz (2006) confirme cette conclusion. En effet, en exprimant la relation entre la pluviométrie et la densité de drainage des zones étudiées, De Wit et Stankiewicz (2006), dans leurs travaux sur l’Afrique, ont montré que pour la Tunisie représentée par la station de Jendouba, les apports ne seront pas affectés par une diminution de 10 à 20% de la pluviométrie. Ce résultat global masque bien entendu la variabilité locale puisque dans ces travaux l’Afrique a été divisée en blocs de 1’000’000 km², mais qui nous semble relativement représentatif compte tenu que nos principaux apports sont situés dans le Nord du pays.

Par contre, la diminution des précipitations estivales accroît le déficit hydrique du sol (l’excédent hivernal étant perdu pour le réservoir sol). Le déficit est encore renforcé par l’ETP dû à l’augmentation de la température de l’air. Ceci peut entraîner une désaturation plus

précoce. En revanche, l'ETR a tendance à être réduite en été-automne par effet du stress hydrique. L'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de l'évaporation réelle pendant l'hiver et le printemps car les sols sont bien arrosés.

Selon les résultats de l'évolution de l'évaporation selon le scénario A2, on peut considérer une augmentation moyenne annuelle globale de 9,3%. Cette augmentation de l'évaporation affectera directement les stocks d'eau dans les barrages qui diminueront d'environ 1% le stock d'eau disponible. La variabilité saisonnière de la pluviométrie aura pour effet un dévasement moins fréquent et par conséquent une diminution de la capacité de stockage d'environ 5% à l'horizon 2030.

Tableau II. Evolution régionale de l'évaporation en % sur la période globale de 2006 à 2030. Modèle HadCM3-Scénario A2.

Scénario A2 Annuel	Nord		Centre		Sud	
	Ouest	Est	Ouest	Est	Ouest	Est
2006 - 2010	8,1	6,0	9,5	5,7	10,2	8,4
2011-2020	11,6	11,6	10,8	7,5	11,2	9,2
2021-2030	8,8	8,4	10,9	6,4	10,6	8,4
Moyenne	9,8	9,2	10,6	6,7	10,8	8,7

La diminution des pluies au centre et au sud, conjuguée à l'augmentation des besoins de l'agriculture due à l'augmentation de la température, va engendrer une exploitation plus importante des ressources en eau souterraine. Cette surexploitation qui n'aura pas d'effet direct sur la ressource l'année même sera importante à moyen et à long terme par une dégradation sensible de la qualité des eaux.

Evolution des ressources en eau sous les extrêmes

La modélisation climatique n'a pas pu définir l'évolution du nombre des périodes extrêmes. En effet, aucun modèle connu à ce jour n'a pu prédire avec certitude l'évolution du nombre de périodes extrêmes pour la simple raison que ces phénomènes sont rares et très limités dans le temps. Roulin et al (2000), ont testé des modèles hydrologiques sur la base des résultats de quatre modèles climatiques sur 6 bassins dont deux sous bassins de la Meuse et ont pu démontrer que du fait de la non variabilité de l'évaporation durant l'hiver, la fréquence des jours d'inondations varie dans le même sens que la variabilité des pluies. Aussi, la grande variabilité des réponses des scénarios pour les deux périodes de 2010-2039 et 2040-2070 ne permet aucune conclusion. Par ailleurs, Gellens et Schadler (1997) ont testé des modèles hydrologiques sur 11 bassins belges et suisses et ont montré que sous l'effet combiné des précipitations hivernales plus importantes et des faibles valeurs de l'évaporation, les débits moyens augmentent en hiver pour tous les bassins testés. Cependant, en été, les réponses des débits moyens sont différentes d'un bassin à un autre. Leur réponse dépend en fait de la géologie du terrain.

Pour le cas de la Tunisie, le modèle climatique a fait ressortir que les années sèches seront légèrement plus sèches et que seul le Nord du pays sera légèrement plus humide (une augmentation de 3%) alors que les autres zones seront moins humides (MARH, 2007). Le modèle reste cependant peu précis (difficulté de reproduire les événements de la période de référence) ce qui est général pour tous les modèles climatiques testés tel que le cas de l'étude de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie de la Seine et de son bassin réalisée par Ducharne et al. (2003). En effet, l'étude des trois simulations du modèle ARPEGE confirme ces incertitudes sur les précipitations qui contrôlent largement les impacts

hydrologiques. L'étude montre que la diminution des débits d'étiage est simulée avec un maximum de confiance par contre l'évolution des débits de crue est beaucoup moins certaine car on observe des diminutions et des augmentations avec une dispersion importante des changements de précipitation (selon les simulations climatiques).

En plus des informations que nous avons pu déduire de la modélisation climatique, nous avons étudié les apports au niveau des principaux barrages sur la période de 1947 à 2004 qui a fait ressortir deux principales conclusions : une diminution des apports globaux de la période de 1976 à 2004 par rapport à celle de 1947 à 1975 de 27%. Par contre les apports au niveau des barrages du Nord de la période de 1976 à 2004 sont de 21% supérieurs à ceux des apports moyens calculés et connus à ce jour. Cette constatation confirme l'influence de l'homme, par la mise en place de ses différents ouvrages (barrages), sur les apports des bassins versants et la nécessité de la révision des apports d'eau des différents oueds.

Aussi, nous voudrions préciser que le stock d'eau en un instant t donné dans les barrages est intimement lié à la gestion des barrages (transfert d'eau entre les barrages, lâchures, dévasement, déversement, etc.) et qu'une diminution de 5 à 10% dans les apports pourra être compensée par une gestion adéquate des barrages.

Une dégradation de la qualité des eaux de surface (augmentation de la salinité et de la turbidité) est également à considérer. Le dévasement moins fréquent des barrages en période de sécheresse aura pour effet, une diminution de la capacité de stockage. Aussi, une diminution de la production hydroélectrique sera attendue et cela est dû aux faibles volumes d'eau qui seront alloués à l'agriculture.

Les sécheresses auront pour effet une exploitation intensive des eaux souterraines. La simulation basée sur l'évolution historique de la qualité des ressources en eau souterraines a permis d'estimer une diminution du potentiel exploitable des nappes phréatiques égale à 467 Mm^3 vers l'horizon 2030. Cette quantité correspond au volume d'eau actuellement surexploité et aux eaux de salinité actuelle supérieure à 3 g/litres. Pour les eaux profondes, la diminution sera de 517 Mm^3 relative à 320 Mm^3 correspondant aux ressources saumâtres de la Djeffara et à 50% au niveau de complexe Terminal et à 197 Mm^3 correspondant aux ressources actuelles de salinité supérieure à 3 g/l. L'exploitation des nappes profondes nécessitera plus d'énergie pour le pompage de l'eau.

Les inondations ne seront pas à priori plus fréquentes, cependant, une légère augmentation des volumes apparaîtra probablement en un temps un peu plus court. L'augmentation probable de l'intensité des pluies aura pour effet une augmentation de l'érosion des sols, d'où l'intérêt de considérer dans la modélisation hydrologique tout l'écosystème et non le bassin versant en tant qu'entité géographique. La connaissance de l'évolution des intensités sous changements climatiques sera le seul moyen pour permettre la révision des capacités des ouvrages de drainages et des égouts. Aussi, une pollution des eaux de surface sera attendue par les produits chimiques issus du lavage des sols et des déchets urbains divers que peuvent transporter les eaux.

Compte tenu de ce qui précède, à l'horizon 2030, les ressources en eau exploitables subiront une baisse de 28%. Nous donnons l'évolution probable des ressources en eau à l'horizon 2030 (Tab. III).

Tableau III. Evolution des ressources en eau globales en Mm³
aux différents horizons sous CC.

Désignation	2010			2020			2030		
	Potentiel	Mobilisé	Exploitable	Potentiel	Mobilisé	Exploitable	Potentiel	Mobilisé	Exploitable
Grands barrages	2'700	2'121	1'378	2'700	2'131	1'385	2'700	1'890	1'229
Nappes phréatiques	758	758	758	781	781	591	805	805	308
Nappes profondes	1'544	1'350	1'350	1'791	1'535	1'215	2'079	1'731	1'214
Total eaux conventionnelles	5'002	4'229	3'486	5'272	4'447	3'191	5'584	4'426	2'751
Eaux usées traitées	253	99	99	400	156	156	512	292	292
Eaux dessalées		18	18	0	47	47	0	80	80
Total eaux non conventionnelles	253	117	117	400	203	203	512	372	372
Total Général	5'255	4'336	3'603	5'672	4'650	3'394	4'798	4'798	3'123

Si l'on considère l'hypothèse moyenne d'évolution des besoins telle que présentée dans les projections hors CC, le bilan des ressources besoins montre que les ressources conventionnelles ne pourront satisfaire les besoins à l'horizon 2030 qu'à concurrence de 92%. Cela signifie que sans les ressources non conventionnelles et la mise en place des stratégies d'économie d'eau, tous les besoins à l'horizon 2030 ne seront pas satisfaits, lesquels besoins devraient être révisés en intégrant les effets des CC.

6. CONCLUSION

Nous avons pu déduire que d'importants changements se préparent sans pouvoir à ce jour déterminer avec précision leur ordre de grandeur. Le rythme et l'ampleur des changements sont tributaires de l'évolution des émissions. Ni l'extrapolation des données récentes, ni la réduction des échelles des modèles généraux ne peuvent produire les informations précises que les planificateurs et les gestionnaires de l'eau souhaiteraient avoir. Plutôt, les changements climatiques remettent en question les habitudes et les pratiques actuelles par l'introduction d'un élément crucial dans les équations : l'incertitude – laquelle demeure une grande difficulté dans la gestion et la planification des ressources en eau. D'où la nécessité d'une gestion adaptative ou une gestion des risques et des incertitudes.

Au cours des cinquante dernières années, le cycle hydrologique de la plupart des bassins versants a été sujet à de vastes modifications humaines avec la construction des barrages, des changements d'occupation du sol, des pompages en rivière, des extractions d'eau souterraine, des diversions interbassins, etc. De telles modifications ont altéré les écoulements en rivière et l'hydrologie des bassins de façon significative d'où la difficulté de considérer les données historiques comme référence pour les projections futures. Aussi, les impacts hydrologiques cités ci-dessus demeurent insuffisants pour connaître l'évolution des ressources en eau car il faudra une meilleure compréhension des impacts économiques et sociaux des changements climatiques qui demeurent difficiles à identifier à l'heure actuelle par manque d'un suivi des indicateurs socio-économiques et hydrologiques à différentes échelles.

Il demeure mal aisé de prévoir avec certitude les variations de la disponibilité de l'eau à l'échelle du pays. En effet, si les chercheurs sont convaincus que la hausse des températures influera sur des variables comme l'évaporation, les incertitudes qui subsistent quant à la nature des variations régionales des régimes de précipitations et la complexité des

écosystèmes naturels limitent notre capacité de prévoir les changements hydrologiques à l'échelle des bassins versants.

De manière claire toutefois, la satisfaction des besoins des différents usagers de l'eau est tributaire de la mise en place effective des différentes stratégies envisagées par l'Etat. La demande en eau des secteurs socio-économiques utilisant l'eau potable doit également être révisée sous conditions des CC. En cas de sécheresse, le secteur agricole, qui consomme actuellement 81% des ressources, *subira un manque d'eau de surface importante* – ce qui se traduira par une intensification de l'utilisation des eaux souterraines pouvant avoir des effets dramatiques puisque ces ressources contribuent à concurrence de 82% à la satisfaction des besoins agricoles. Cela nous a conduit à nous interroger sur la nécessité de produire certaines cultures et, par conséquent, à la nécessité d'une révision du compte de l'eau étendu aux écosystèmes et intégrant l'eau virtuelle.

Enfin, il apparaît clairement aussi que, sans l'application du code des eaux, d'une tarification adéquate et d'un contrôle du pompage des eaux souterraines laissées «libres» et sur lesquelles se rabattent les différents usagers, il sera difficile de contrôler l'exploitation des ressources et donc d'envisager une gestion optimale des ressources pour faire face aux effets directs et indirects des CC. Le Sud Tunisien, qui ne dispose que des eaux des nappes profondes, sera la zone la plus vulnérable. La demande en eau connaîtra une augmentation due à l'élévation de la température qui génèrera une surexploitation des nappes profondes et, par conséquent, une diminution des niveaux piézométriques (donc des besoins énergétiques plus importants) et une dégradation de la qualité des eaux.

La diminution de l'eau de bonne qualité pourrait attiser les conflits entre les différents usagers de l'eau et rendre encore plus difficile l'approvisionnement des zones rurales en eau potable pour la population et l'alimentation du cheptel.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leur reconnaissance à la GTZ-Tunis ainsi qu'à tous leurs collègues de la *Stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques*.

Abréviations :

AFT : Agence Foncière Touristique

CC : Changement Climatique

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ONAS : Office National de l'Assainissement

ONTT : Office National du Tourisme Tunisien

SONEDE : Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des eaux

Bibliographie

AFT (2005). Etude stratégique pour la réduction de la consommation d'eau dans le secteur touristique.

Bachta M.S. El Hamrouni A., Lahache-Gafrej R., Pillet G. Changements climatiques: Apport de l'économie environnementale aux stratégies d'adaptation – le cas de la Tunisie. Rencontres Internationales sur l'Economie de l'Environnement d'Annaba Université Badji Mokhtar – Nov. 2007

Besbes, M. et al. (2003). Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). Recueil des communications. Séminaire Organisé par l'ENIT, l'INAT, la SHF et le concours de l'IFC.

De Wit, M., J. Stankiewicz (2006). Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. Sciences Express, 2 mars.

DGRE. Annuaire de l'exploitation des nappes phréatiques de 2000, 2003, 2004, 2005.

Ducharne, A., S. Théry, P. Viennot, E. Ledoux, E. Gomez, M. Déqué (2003). Influence du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine. Vertigo - la presse de l'environnement sur WEB 4 (3), décembre.

Evans, T.E. (1997). Les effets des changements dans le cycle hydrologique mondial sur la disponibilité des ressources en eau. Chapitre 2 in : Changement du climat et production agricole. Rome : FAO.

Gellens, D., B. Schadler (1997). Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat. Revue des sciences de l'eau 3: 395-414.

Gordon, C., C.Cooper, c.a. Senio, H.bANKS, J.M. Gregory, T.C. jOHNS, j.f.b. Mitchell and R.A. wOOD (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of Hadlet Centre coupled mode without flux adjustments. Climate Dynamics 16: 147-168.

IPCC(TAR). Summary for police makers. A report of the working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001; 20p.

IPCC (2007). Working group II. Impacts, adaptation and vulnerabiliy.

INS – Institut National de la Statistique (2004). Rapport annuel sur les infrastructures.

Kallel, M.R. (1995). La gestion des ressources en eau de surface et son impact sur les eaux souterraines (en arabe). Atelier sur la sauvegarde des eaux souterraines. UNESCO –ACSAD-DGRE.

Kite, G.W., A. Dalton, K. Dion (1994). Simulation of streamflow in a macroscale Watershed using GCM data. Water Research paper 30 (5).

Lahache Gafrej R. (2005)1. Réduction de la consommation d'eau dans le secteur touristique en Tunisie. Poster à WATMED 2 – Marrakech du 14 au 17 novembre 2005- Maroc.

Lahache Gafrej R. (2005)2. Assise juridique pour Le diagnostic des systèmes internes d'eau chez les gros consommateurs en Tunisie. Communication à WATMED 2 – Marrakech du 14 au 17 novembre 2005 – Maroc.

Lahache Gafrej R. (2005)3. La réutilisation des eaux usées traitées comme ressources alternatives pour la préservation des eaux souterraines. Communication au Colloque international sur les ressources en eau souterraines dans le Sahara (CIRESS)- Ouargla 12-13 décembre 2005. Algérie.

Lahache Gafrej R. (2007). Comment réduire la consommation d'Eau dans le secteur touristique en Tunisie. Approche et stratégie. 3ème atelier régional de la Commission Méditerranéenne de Développement Durable portant sur le thème "Gestion de la demande en eau (GDE), progrès et politiques", Espagne - Saragosse 19-21 mars 2007

Louati, M.H. et al. (1998). Eau 21 - Stratégie du secteur de l'eau en Tunisie à long terme 2030.

MARH – Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (1997). Etude sur la stratégie des ressources naturelles.

MARH – Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques. Eau 2000.

MARH – Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (2001). Etude d'évaluation technico-économique du programme national d'économie d'eau en irrigation.

MARH – Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (2005). Rapport annuel de la DG/ ACTA.

MARH – Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (2006). Les statistiques sur les périmètres irrigués en intensif. Campagne de 2004/2005.

MARH-GTZ – Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques | Coopération technique Allemande (2007). Stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques. Rapport de deuxième Etape. Tunis.

ONTT (2001). De développement du tourisme en Tunisie a l'horizon 2016. Conditions de valorisation des ressources touristiques- culturelles, écologiques et sahariennes. Agence Japonaise de Coopération Internationale pour le compte de l'ONTT.

ONTT (2002). Stratégie de développement touristique. Banque Mondiale pour le compte de l'ONTT.

ONTT (2004). Le tourisme tunisien en chiffres.

ONAS (2002). Etude de la stratégie nationale de valorisation des eaux usées traitées.

ONAS (2005). Rapport annuel d'exploitation des stations d'épuration.

Roulin, E., A. Cheymol, D. Gellens (2000). Impact of climate change on the water resources in the river *Meuse* basin. ICIWRM. Proceedings of International Conference on Integrated Water Resources Management for Sustainable Development . National Institute of Hydrology. Roorkee, UP-India.

SONEDE (2005). Projections des consommations d'eau à l'horizon 2030.

SONEDE (2004, 2005). Rapports statistiques.

Wilgley, T.M.L., P.D. Jones (1985). Influences of precipitation changes and direct CO2 effects on stream flow. Climate change 10.