

L'ETAT DES RESSOURCES EN EAU AU MAGHREB EN 2009



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture

UNESCO Office in Rabat
Cluster Office for the Maghreb



Avec le soutien
du Programme
hydrologique
international

L'ETAT DES RESSOURCES EN EAU AU MAGHREB EN 2009



Les idées et opinions exprimées dans ce document sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO).

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant à leurs frontières ou limites.

Les frontières qui figurent sur les cartes que nous publions n'impliquent pas reconnaissance officielle par l'UNESCO ou par les Nations Unies.

Edité par GEB-Environnement.com



GEB-Environnement

Bureau d'études • Expertise • Conseil

Publié au Maroc

ISBN : 978-9954-8068-3-0

L'ETAT DES RESSOURCES EN EAU AU MAGHREB EN 2009



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture

UNESCO Office in Rabat
Cluster Office for the Maghreb



Avec le soutien
du Programme
hydrologique
international

PREFACE

Dr. Youssef FILALI-MEKNASSI

Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat
Spécialiste de programme pour les Sciences Exactes et Naturelles

L'eau, en tant que ressource, est un bien très important et surtout fondamental pour tous les pays. En effet, en plus d'être indispensable à la vie et à la santé de l'être humain, l'eau est un vecteur du développement socio-économique.

La région du Maghreb est l'une des régions du monde où la pluviométrie est irrégulière et variable dans le temps et l'espace et où l'agriculture dépend essentiellement de l'irrigation. Ainsi, il apparaît indispensable que les ressources en eau doivent être bien gérées et contrôlées dans cette région du monde. Pourtant, des problèmes de gestion de l'eau semblent être évidents. En effet, les ressources en eau du Maghreb sont souvent surexploitées et/ou souillées à cause de la croissance démographique, de l'amélioration du niveau de vie, du développement du tourisme, de l'industrie et de l'irrigation.

Généralement, un ministère se voit confier la question de l'eau, mais il n'a pas l'exclusivité de l'action. En effet, les Ministères de l'Intérieur, de l'Agriculture, des Finances, etc., y interviennent aussi de manière directe. L'action de plusieurs départements, ce qui pourrait être un atout, se révèle, en fait, être un obstacle dans le cas du Maghreb car finalement cette gestion partagée de l'eau provoque une politique instable et souvent une gestion plus complexe. Il est vrai que l'eau, en tant que vecteur du développement socio-économique, est une affaire de tous. Ainsi, une bonne gestion des ressources en eau passe par une politique transversale. Cependant, une politique transversale signifie d'une part une collaboration interministérielle avec un seul ministère pour référence qui doit gérer les questions relatives à l'eau, et à un niveau plus bas, une gouvernance à niveaux multiples, qui conjugue les stratégies et les instruments nationaux, régionaux, sous-régionaux et locaux.

Bien que la région du Maghreb ait fait de grands pas en avant au niveau de la réglementation dans le domaine de l'eau, l'ensemble des progrès sont souvent lents. Des changements sont encore nécessaires pour mieux gérer et protéger les ressources en eau et assurer une gestion durable de son utilisation. En outre, le Maghreb connaît une pénurie d'eau et la plupart des pays de la région ne sont pas en mesure de satisfaire la demande en eau. Pourtant, le Maghreb est une région où il y a le plus de barrages sur les cours d'eau au vu de la disponibilité en eau douce¹. Les forages ont dépassé, dans certaines régions, la capacité des organismes réglementaires à assurer le contrôle du puisement. Ainsi, les ressources renouvelables en eau utilisée (en pourcentage) au Maghreb dépassent de loin celles utilisées par la plupart des autres pays du Monde. Il est donc

¹ BANQUE MONDIALE - Rapport : « Obtenir le meilleur parti des ressources rares : Une meilleure gouvernance pour une meilleure gestion de l'eau au Moyen-Orient et en Afrique du Nord ».

nécessaire que les pays maghrébins doivent être en mesure d'adapter leur gestion de l'eau en prenant en compte la disponibilité des ressources sinon les conséquences sociales, économiques et budgétaires qui en découleraient pourraient être considérables. C'est pourquoi les législateurs se doivent de trouver, par la réglementation, des solutions adaptées et adéquates aux problèmes in situ et à la situation historique, culturelle, économique et climatique de la région. Par exemple, il serait intéressant de voir, dans un futur proche, apparaître des mesures réglementaires concernant les objectifs de qualité des eaux et des mesures destinées à lutter contre la pollution des eaux souterraines par épandage excessif de produits chimiques et/ou organiques ; de voir également les difficultés de coordination et d'application des lois et de leurs décrets d'application surmontées ; et finalement de clarifier et préciser les responsabilités et les compétences de chacune des entités intervenant dans le secteur.

Par ailleurs, il est évident que, dans un contexte de pénurie d'eau, la nécessité de lutter contre la pollution industrielle et urbaine devient une priorité. Malgré les avancées que les pays du Maghreb ont enregistrées, certaines régions continuent à subir les effets de la dégradation de l'environnement liée notamment au manque d'assainissement. Devant ce constat plutôt inquiétant, dans des pays plus que d'autres, les Ministères se retrouvent souvent immobilisés entre les politiques, la situation économique et la hausse de la demande en infrastructures. Notamment au Maroc, selon la dernière publication du Conseil National de l'Environnement (CNE) (mai 2009), la dégradation environnementale représente 3,7% du Pouvoir Intérieur Brut (PIB) (soit 1 600 millions USD) alors que la dépense publique nationale pour l'environnement ne dépasse pas 0,7% du PIB annuellement.

Concernant le changement climatique, il est souvent question de trois aspects distincts de suivi et d'évaluation : (i) le suivi et l'évaluation de la mise en place des engagements ; (ii) le suivi et l'évaluation des indicateurs capables de produire un modèle adéquat de changement climatique ; (iii) et le suivi et l'évaluation des effets du changement climatique. Le point faible de beaucoup de pays, dont ceux du Maghreb, réside au niveau de l'état des lieux. En effet, sans un état des lieux fiable, il est impossible de passer à l'étape de l'atténuation du changement climatique puisqu'il n'est pas possible de cerner, de façon fidèle et sûre, le problème au niveau local. L'eau est l'une des ressources naturelles qui pourrait être la plus affectée par des effets irréversibles d'un changement climatique potentiel. Or, dans un article² intitulé « Le changement climatique, un déficit en données sur l'eau », il est rappelé que les données manquent souvent, ou quand elles existent elles sont généralement de mauvaises qualités pour pouvoir obtenir une image correcte de la situation actuelle et de pouvoir prédire l'impact du changement climatique sur le l'environnement aquatique. Dans les années à venir, l'une des priorités des gouvernements du Maghreb devrait donc être le renforcement des capacités dans le domaine du suivi et de l'évaluation des données ainsi que l'association de leurs centres d'analyse aux différents réseaux internationaux afin de conforter leurs plaidoyers vis-à-vis de la problématique du changement climatique.

Ainsi, l'évolution vers une situation dans laquelle la gestion de l'eau devient une activité financièrement, socialement, et écologiquement viable, ce qui passe incontestablement par plusieurs choix politiques transparents, est inévitable. En outre, les efforts intergouvernementaux maghrébins doivent converger, ensemble, vers ce même objectif et en outre doivent maintenir le rythme des engagements globaux pris depuis la déclaration du Millénaire des Nations Unies

² Water 21, numéro de février 2009 - Bimensuel de l'International Water Association (IWA).

en 2000. Les donateurs, de leur côté, doivent éviter la tentation de réduire leurs budgets d'aide pendant les crises financières et économiques³ et, dans certains cas, mieux les cibler.

Le présent ouvrage, publié par le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat, regroupe les expériences de plusieurs spécialistes en eau de la région du Maghreb. L'objectif d'un tel ouvrage est de faire partager le vécu des différents experts des pays du Maghreb et de rassembler les visions de chacun pour permettre de propager de nouvelles idées visant un meilleur système de gestion de l'eau au Maghreb.

Sans aucun doute, ce travail permettra donc, d'alimenter un débat renouvelé et constituera un plaidoyer toujours utile pour la mobilisation de la science et de l'expertise au service des politiques publiques et du développement durable.

³ Rapport « Water in a changing world » (WWDR3), du « World Water assessment program » et de « UN Water », publié par l'UNESCO en mars 2009.

REMERCIEMENTS

Un tel livre n'aurait pas été possible sans le soutien et le concours précieux des auteurs, qui ont volontairement donné de leur temps pour rapporter leurs expériences dans le domaine de l'eau au Maghreb et faire de ce livre une référence.

Le bureau Multipays de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) à Rabat tient donc à remercier tous les auteurs pour leurs contributions significatives.

Tous les auteurs ont joué un rôle crucial dans l'élaboration et la qualité de cet ouvrage.

A.A. ABUFAYED	<i>AlFateh University, Libya (Chap. 13 et 18)</i>
B. ACHOUR	<i>Université de Biskra, Algérie (Chap. 8)</i>
S. ACHOUR	<i>Université de Biskra, Algérie (Chap. 14 et 15)</i>
M. ARRIFI	<i>Administration du Génie Rural au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Maroc (Chap. 10)</i>
M. AURIOL	<i>Expert consultant en génie environnemental, Maroc (Chap. 9)</i>
H. BEN ABDELFADEL	<i>Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Maroc (Chap. 21)</i>
S. BENS Aid	<i>Office National de l'Eau Potable (ONEP), Maroc (Chap. 1)</i>
J.-L. BOHM	<i>Université de Caen, France (Chap. 16)</i>
R. BOUAICHA	<i>Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Maroc (Chap. 20)</i>
L. BOUSSELMi	<i>Centre de Recherches et des Technologies des Eaux, Tunisie (Chap. 19)</i>
B. DHIMMI	<i>Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Maroc (Chap. 21)</i>
T. EL AFTI	<i>Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Maroc (Chap. 3)</i>
A.B.S. EL GUEDDARI	<i>Administration du Génie Rural au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Maroc (Chap. 10)</i>
A.A. ELKEBIR	<i>AlFateh University, Libya (Chap. 13 et 18)</i>

H.L. FRIGUI	<i>Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), Tunisie (Chap. 7)</i>
A. GHRABI	<i>Centre de Recherches et des Technologies des Eaux, Tunisie (Chap. 19)</i>
O. GILBERT	<i>Veolia Water Afrique Moyen Orient Inde (AMI) (Chap. 2)</i>
S. GUERGAZI	<i>Université de Biskra, Algérie (Chap. 14)</i>
W. HALLOUCHE	<i>Université Saad Dahlab-Blida / Université de Biskra, Algérie (Chap. 8)</i>
N. HARRAT	<i>Université de Biskra, Algérie (Chap. 14)</i>
T. HASCOET	<i>Veolia Services à l'Environnement Maroc (Chap. 2)</i>
N. HOUMY	<i>Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement, Maroc (Chap. 3)</i>
A. KOUNDI	<i>Expert indépendant en traitement des eaux, Tunisie (Chap. 19)</i>
M. MAKBOUL	<i>Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement, Maroc (Chap. 4)</i>
C. MBARECK	<i>Université de Nouakchott, Mauritanie (Chap. 16)</i>
B. NADIR	<i>Université Mohammed V Rabat Souissi, Maroc (Chap. 5)</i>
Q.T. NGUYEN	<i>Université de Rouen / CNRS, France (Chap. 16)</i>
B. REMINI	<i>Université Saad Dahlab-Blida / Université de Biskra, Algérie (Chap. 8)</i>
O. SALEM	<i>General Water Authority (GWA), Libya (Chap. 6)</i>
B.M. SEMEGA	<i>Université de Nouakchott, Mauritanie (Chap. 11 et 17)</i>
O. TAHIRI ALAOUI	<i>Université de Rouen / CNRS, France (Chap. 16)</i>
S. TOUZI	<i>Institut National Agronomique de Tunisie (Chap. 7)</i>
L. YUCEF	<i>Université de Biskra, Algérie (Chap. 15)</i>
A. ZEGGAF TAHIRI	<i>Expert international, Manzanar Mangrove Foundation, Mauritanie (Chap. 9 et 12)</i>
N. ZINE	<i>Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Maroc (Chap. 21)</i>

TABLE DES MATIERES

Abréviations

xv

PARTIE I : LA GOUVERNANCE ET LA POLITIQUE DANS LE DOMAINE DE L'EAU

Chapitre 1	Partager le savoir-faire en vue de généraliser l'accès à l'eau potable et à l'assainissement / <i>Cas du partenariat public public : ONEP (Maroc) – SNDE (Mauritanie)</i>	3
Chapitre 2	<i>Saqayti</i> , pour une meilleure rationalisation de l'utilisation de l'eau en libre service	15
Chapitre 3	L'expérience du Maroc dans le secteur de l'alimentation en eau potable en milieu rural	29
Chapitre 4	Loi 10-95 sur l'eau : acquis et perspectives	47
Chapitre 5	La loi 10-95 sur l'eau : apports et limites	61
Chapitre 6	National water policy review and management of water scarcity in Libya	87

PARTIE II : LES EAUX DOUCES ET DE SURFACE

Chapitre 7	Caractérisation des événements extrêmes en Tunisie et possibilités de la maîtrise des excédents pour une gestion durable de la ressource	107
Chapitre 8	L'Algérie : plus d'un siècle de désenvasement des barrages	123

PARTIE III : L'EAU ET L'AGRICULTURE

Chapitre 9	Mangroves implantation in coastal arid country	145
Chapitre 10	L'agriculture irriguée au Maroc face à la rareté des ressources en eau	163
Chapitre 11	Eau et agriculture en Mauritanie : l'agriculture irriguée, production plus fiable ou option incontournable	181
Chapitre 12	Problématique et perspectives de l'efficience d'utilisation de l'eau agricole au Maghreb	203

PARTIE IV : LE TRAITEMENT ET LA QUALITÉ DES EAUX POTABLES

Chapitre 13	Municipal water management practices in Libya	221
Chapitre 14	Pollution organique des eaux de barrage de l'Est algérien et effet de la chloration	241
Chapitre 15	Fluor et possibilités de traitement des eaux souterraines du Sahara septentrional algérien	257
Chapitre 16	Potabilisation des eaux du lac d'Aleg par des membranes d'ultrafiltration chargées à base « de polysulfone et d'acide polyacrylique »	277
Chapitre 17	Desserte domestique d'eau potable en milieu rural : potabilisation des eaux de surface par filtration lente sur sable	297

PARTIE V : LE TRAITEMENT ET LA QUALITÉ DES EAUX USÉES

Chapitre 18	Municipal wastewater management practices in Libya	317
Chapitre 19	La gestion locale et durable de l'eau municipale – Une nouvelle approche : utiliser l'eau plusieurs fois vers le zéro rejet	339

PARTIE VI : LA RECHERCHE ET LES DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Chapitre 20	Application de la modélisation déterministe et stochastique à la prévision des étiages / Cas du bassin de Reraya, affluent de Tensift	361
Chapitre 21	Utilisation des techniques isotopiques pour la connaissance et l'évaluation des ressources en eau au Maroc	371

ABREVIATIONS

2,4-D	<i>Acide 2,4 dichlorophénoxyacétique</i>
ABH	<i>Agence de Bassin Hydraulique (Maroc)</i>
ABHL	<i>Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (Maroc)</i>
ACF	<i>Fonction d'autocorrélation</i>
ADRAO	<i>Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest</i>
AECI	<i>Agence Espagnole pour la Coopération Internationale</i>
AEP	<i>Alimentation en eau potable</i>
AEPMR	<i>Approvisionnement en eau potable dans le milieu rural (Maroc)</i>
AEPMR	<i>Plan directeur de développement de l'approvisionnement en eau potable dans le milieu rural (Maroc)</i>
AFD	<i>Agence Française de Développement</i>
AFSSA	<i>Agence française de Sécurité Sanitaire des Aliments</i>
AGID	<i>Agence nationale de réalisation et de Gestion des infrastructures hydrauliques pour l'Irrigation et le Drainage (Algérie)</i>
AIC	<i>Akaike Information Criterion</i>
AIEA	<i>Agence Internationale de l'Energie Nucléaire</i>
AMHY	<i>Alpine and Mediterranean Hydrology</i>
AMI	<i>Afrique Moyen Orient Inde (Veolia Water)</i>
ANB	<i>Agence Nationale des Barrages (Algérie)</i>
AS	<i>Boue active / Activated Sludge</i>
BAD	<i>Banque Africaine de Développement</i>
BEI	<i>Banque Européenne d'Investissement</i>
BERD	<i>Banque Européenne pour la Reconstruction et le Développement</i>
BF	<i>Borne fontaine</i>
BI	<i>Branchement individuel</i>
BID	<i>Banque Islamique de Développement</i>
BO	<i>Bulletin Officiel</i>
BOD ₅	<i>Biochemical Oxygen Demand</i>
BW	<i>Eaux noires</i>
CAS	<i>Compte d'Affectation Spéciale (Maroc)</i>
CF	<i>Coliformes fécaux</i>

CI	<i>Nappe du Continental Intercalaire</i>
CILEF	<i>Conférence Internationale des Limnologues d'Expression Française</i>
CNESTEN	<i>Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (Maroc)</i>
CNRS	<i>Centre National de la Recherche Scientifique (France)</i>
CORAF	<i>Conseil Ouest et Centre africain pour la recherche et le développement</i>
COT	<i>Carbone Organique Total</i>
CPPE	<i>Commissions Préfectorales et Provinciales de l'Eau (Maroc)</i>
CSEC	<i>Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (Maroc)</i>
CT	<i>Nappe du Complexe Terminal</i>
CTB	<i>Agence Belge de Coopération au Développement</i>
DBO ₅	<i>Demande Biochimique en Oxygène</i>
DCO	<i>Demande Chimique en Oxygène</i>
DDC	<i>Direction du Développement et de la Coopération du Département Fédéral des Affaires Etrangères (Suisse)</i>
DDT	<i>Dichlorodiphényltrichloroéthane</i>
DG	<i>Directeur général</i>
DGBGTH	<i>Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (Tunisie)</i>
DGCL	<i>Direction Générale des Collectivités Locales (Maroc)</i>
DGH	<i>Direction Générale de l'Hydraulique (Maroc)</i>
DGRE	<i>Direction Générale des Ressources en Eaux (Tunisie)</i>
DPE	<i>Directions Provinciales de l'Equipeement (Maroc)</i>
DPH	<i>Domaine Public Hydraulique (Maroc)</i>
DRH	<i>Direction de la Région Hydraulique (Maroc)</i>
DRHS	<i>Direction Régionale de l'hydraulique du Sahara</i>
DRPE	<i>Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (Maroc)</i>
ECOU	<i>Engineering Consulting Office for Utilities (Libye)</i>
EDR	<i>Electrodialysis reversal</i>
EDTA	<i>Acide éthylène-diamine-tétraacétique</i>
EGA	<i>Environment General Authority (Libye)</i>
EIE	<i>Etude d'impact sur l'environnement</i>
ENOF	<i>Entreprise nationale des produits miniers non ferreux (Algérie)</i>
EP	<i>Eau potable</i>
EPA	<i>Eau potable et assainissement</i>

ERESS	<i>Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional</i>
EUE	<i>Efficiency d'utilisation de l'eau</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations / Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture</i>
GBEAS	<i>Gélose à la Bile, à l'Esculine et à l'Azine de Sodium</i>
GDP	<i>Gross Domestic Product</i>
GIS	<i>Geographic Information Systems</i>
GMR	<i>Great Man-made River (Libye)</i>
GMRP	<i>Great Man-made River Project (Libye)</i>
GSPLAJ	<i>Great Socialist People's Libyan Arab Jamahiriya</i>
GTZ	<i>Coopération Technique Allemande</i>
GW	<i>Eaux grises</i>
GWA	<i>General Water Authority (Libye)</i>
HAP	<i>Hashimoto Action Plan</i>
HDR	<i>Rapport mondial sur le développement humain / Human Development Report</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IEA	<i>Institut International de l'Eau et de l'Assainissement</i>
IME	<i>Institut Méditerranéen de l'Eau</i>
INDH	<i>Initiative Nationale pour le Développement Humain (Maroc)</i>
INRGREF	<i>Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts (Tunisie)</i>
INSP	<i>Institut National de Santé Publique (Algérie)</i>
IUCN	<i>International Union for Conservation of Nature</i>
JICA	<i>Japan International Cooperation Agency</i>
KFW	<i>Banque Etatique Allemande</i>
LARHYSS	<i>Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (Algérie)</i>
LSC	<i>Scintillation liquide</i>
LYDEC	<i>Lyonnaise des Eaux de Casablanca du groupe Suez Environnement (Maroc)</i>
MAD	<i>Dirham marocain</i>
MARH	<i>Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (Tunisie)</i>
MATEE	<i>Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement (Maroc)</i>
MBR	<i>Réacteur biologique à membrane</i>
MCA	<i>Mac Conkey Agar</i>
MDRE	<i>Ministère du Développement Rural et de l'Environnement (Mauritanie)</i>

MEB	<i>Microscopie Electronique à Balayage</i>
MEDD	<i>Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (Tunisie)</i>
MENA	<i>Région Moyen-Orient et Afrique du Nord</i>
MES	<i>Matières En Suspension</i>
MON	<i>Matière Organique Naturelle</i>
MRT	<i>Management des Ressources de Tadla (Maroc)</i>
MSF	<i>Multistage filtration</i>
MWCO	<i>Seuil de coupure en masse moléculaire</i>
MWW	<i>Eaux usées municipales</i>
NDWS	<i>National Drinking Water Standards (Libye)</i>
NE	<i>North Eastern</i>
NGO	<i>Non Governmental Organization</i>
NTK	<i>Azote Total de Kjeldhal</i>
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
NW	<i>North Western</i>
NWSP	<i>National Water and Sewerage Program (Libye)</i>
O & M	<i>Operation and Maintenance</i>
OCDE	<i>Organisation de Coopération et de Développement Economiques</i>
OIEau	<i>Office International de l'Eau</i>
OMD	<i>Objectif du Millénaire pour le Développement</i>
OMS	<i>Organisation Mondiale de la Santé</i>
OMVS	<i>Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal</i>
ONAS	<i>Office National de l'Assainissement (Tunisie)</i>
ONE	<i>Office National de l'Electricité (Maroc)</i>
ONEA	<i>Office National de l'Eau et de l'Assainissement (Burkina Faso)</i>
ONEP	<i>Office National de l'Eau Potable (Maroc)</i>
ONG	<i>Organisation Non Gouvernementale</i>
ONU	<i>Organisation des Nations Unies</i>
ORMVA	<i>Office Régional de Mise en Valeur Agricole (Maroc)</i>
OSS	<i>Observatoire du Sahara et du Sahel</i>
PAA	<i>Acide polyacrylique</i>
PACF	<i>Fonction d'autocorrélation partielle</i>
PAGER	<i>Programme d'Approvisionnement Groupé en Eau Potable des Populations Rurales (Maroc)</i>

PAGI	<i>Projets d'Amélioration de la Grande Irrigation (Maroc)</i>
PAM	<i>Programme Alimentaire Mondial</i>
PAN-PA	<i>Autonomous port of Nouakchott said «Port of Friendship» (Mauritanie)</i>
PCCl ₂	<i>Potentiel de consommation en chlore</i>
PCM	<i>Pourcentage de Carbone Moderne</i>
PDAIRE	<i>Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (Maroc)</i>
PDIAM	<i>Projet de Développement Intégré de l'Agriculture Irriguée en Mauritanie</i>
PFTHM	<i>Potentiel de formation des composés trihalométhanes</i>
PFTOX	<i>Potentiel de formation des composés organohalogénés</i>
PHI	<i>Programme Hydrologique International</i>
PMH	<i>Petite et Moyenne Hydraulique</i>
PNA	<i>Programme national d'assainissement liquide et d'épuration des eaux usées (Maroc)</i>
PNB	<i>Produit National Brut</i>
PNE	<i>Plan National de l'Eau (Maroc)</i>
PNEEI	<i>Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (Maroc)</i>
PNUD	<i>Programme des Nations Unies pour le Développement</i>
PPG	<i>Périmètre Pilote du Gorgol (Mauritanie)</i>
PPP	<i>Partenariat Public Privé</i>
PRGI	<i>Projet de Réhabilitation de la Grande Irrigation (Maroc)</i>
PSF	<i>Polysulfone</i>
PUP	<i>Partenariat public public</i>
RIM	<i>République Islamique de Mauritanie</i>
RIOB	<i>Réseau International des Organismes de Bassin</i>
RO	<i>Reverse osmosis</i>
SAEPR	<i>Système d'Alimentation en Eau Potable Rurale (Maroc)</i>
SASS	<i>Système Aquifère du Sahara Septentrional</i>
SBR	<i>Réacteur biologique séquentiel</i>
SCP	<i>Société Canal de Provence (France)</i>
SD	<i>Standard of deviation</i>
SDB	<i>Salle de bain</i>
SEM	<i>Scanning-Electron Microscope</i>
SEWG	<i>Secretariat for Electricity, Water and Gas (Libye)</i>
SH	<i>Substance humique</i>

SIAAP	<i>Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (France)</i>
SIDA	<i>Agence Suédoise Internationale pour le Développement</i>
SNDE	<i>Société Nationale des Eaux (Mauritanie)</i>
SONADER	<i>Société Nationale de Développement Rural (Mauritanie)</i>
SONEDE	<i>Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux (Tunisie)</i>
SS	<i>Suspended Solids</i>
STEP	<i>Station d'épuration</i>
SUVA	<i>Specific Ultraviolet Absorption</i>
SWDE	<i>Société Wallonne Des Eaux (Belgique)</i>
SWICA	<i>Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers</i>
TAC	<i>Titre Alcalimétrique Complet ou alcalinité de l'eau</i>
TDC	<i>Centre de Démonstration Technique</i>
TdR	<i>Termes de Références</i>
TDS	<i>Matières solides dissoutes / Total Dissolved Solids</i>
TF	<i>Lit bactérien / Trickling Filter</i>
TH	<i>Titre Hydrotimétrique ou dureté de l'eau</i>
THM	<i>Composés trihalométhanes</i>
TIC	<i>Total Installed Capacity</i>
TND	<i>Dinar tunisien</i>
TOC	<i>Carbone total</i>
TOX	<i>Composés organohalogénés totaux</i>
TSS	<i>Total Suspended Solids</i>
UF	<i>Ultrafiltration</i>
UFC	<i>Unité de coliformes fécaux</i>
UICN	<i>Union Internationale pour la Conservation de la Nature</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNESCO	<i>Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture / United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UNSGAB	<i>Conseil Consultatif sur l'eau et l'assainissement du Secrétaire Général de l'ONU</i>
UNT	<i>Unité Néphélométrique de Turbidité</i>
USD	<i>Dollar US</i>
USEPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>

VATTEN	<i>Société d'eau et d'assainissement de la ville de Stockholm</i>
VLR	<i>Valeur limite de rejet</i>
V-PDB	<i>Vienna-PeeDee Belemnite</i>
V-SMOW	<i>Vienna-Standard Mean Ocean Water</i>
WC	<i>Toilettes</i>
WCMC	<i>World Conservation Monitoring Centre</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
WOP	<i>Water Operators Partnership</i>

PARTIE I

LA GOUVERNANCE ET LA POLITIQUE DANS LE DOMAINE DE L'EAU

CHAPITRE 1

PARTAGER LE SAVOIR-FAIRE EN VUE DE GENERALISER L'ACCES A L'EAU POTABLE ET A L'ASSAINISSEMENT

*Cas du Partenariat Public Public :
ONEP (Maroc) – SNDE (Mauritanie)*

S. BENSAID*

Office National de l'Eau Potable
Maroc

RESUME

Partant du constat que de nombreux pays du Sud sont encore loin de réaliser les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMDs) dans le domaine de l'eau potable et de l'assainissement (EPA), qui eux-mêmes ne sont qu'une étape intermédiaire vers la généralisation de l'accès à ses deux services vitaux, cet article propose, tout d'abord, d'explorer des mécanismes de partenariat pour contribuer à atteindre ces objectifs. Partant aussi du fait que d'une part le secteur public demeure de très loin le principal gestionnaire des services d'EPA mondialement, et d'autre part l'option du partenariat public privé (PPP) s'essouffle, il apparaît pertinent d'investir davantage dans la mise à niveau des opérateurs publics en activant les leviers du partenariat public public (PuP) construit principalement autour de l'axe Sud-Sud, mais s'appuyant sur un réseau de partenaires publics du Nord. L'objectif direct de ce type de partenariat est de renforcer et de développer les capacités des opérateurs bénéficiaires dans le cadre d'une démarche holistique et durable, embrassant tous les domaines allant de la gouvernance au technique en passant par les aspects organisationnels, de management et de financement, et s'inscrivant dans le long terme. L'objectif final et stratégique est de pouvoir disposer d'opérateurs publics performants au service de la généralisation de l'accès à l'EPA dans leurs pays. En seconde partie, il est présenté un cas pilote concernant le projet de partenariat en cours entre l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) au Maroc et la Société Nationale des Eaux (SNDE)

*Auteur correspondant : BENSAID Samir - Office National de l'Eau Potable (ONEP) – DG de l'Institut International de l'Eau et de l'Assainissement (IEA) - BP Rabat - Chellah. 10000 Rabat, Maroc

Email : sbensaid@onep.org.ma / samir.bensaid@gmail.com – Tél. : (+212) 537 75 99 95 - Fax : (+212) 537 63 91 58

en Mauritanie, avec l'appui d'un important réseau d'opérateurs publics du Nord et du Sud, visant à mettre en œuvre un plan d'action pluriannuel pour le renforcement des capacités de la SNDE pour en faire un outil public performant au service de la réalisation des OMDs en Mauritanie et de la généralisation de l'accès à l'EPA dans ce pays.

Mots clés : Partenariat Public Public ; coopération Sud-Sud ; partage du savoir-faire ; renforcement des capacités ; opérateur public performant ; accès à l'eau potable et à l'assainissement ; Objectifs du Millénaire pour le Développement.

CADRE CONCEPTUEL GENERAL

Le Contexte à l'échelle mondiale et régionale

Au Sommet du Millénaire en Septembre 2000, l'Humanité (représentée par le plus grand rassemblement de dirigeants du monde dans l'histoire des Nations Unies) a adopté la Déclaration du Millénaire visant à réduire l'extrême pauvreté et la création d'une série d'objectifs à l'horizon 2015, nommés les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMDs).

L'un des objectifs des OMDs est directement lié à l'eau potable et à l'assainissement, en particulier l'OMD7, qui vise la réduction de moitié, à l'horizon 2015, du nombre de personnes n'ayant pas accès à ces services vitaux.

Malheureusement, force est de constater que d'après les différents rapports d'évaluation (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2006) que les pays du Sud sont, non seulement loin d'atteindre les OMDs relatifs à l'eau potable et à l'assainissement (EPA), mais ne sont même pas, pour la plupart, sur la bonne voie pour espérer y arriver un jour. Ceci est le cas en particulier des pays de l'Afrique Subsaharienne (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2006).

Ainsi, afin de soutenir les pays du Sud, dont les ressources aussi bien financières que humaines et techniques sont très limitées, dans leurs efforts pour redresser la courbe d'évolution en direction des OMDs relatifs à l'EPA, des solutions ont été préconisées et expérimentées. Parmi celles-ci, la solution consistant à faire participer le privé (communément appelé Partenariat Public Privé – PPP) en lui déléguant la mission du service public dans le but d'assurer les services d'EPA en l'occurrence, a été présentée longtemps, et presque d'une manière dogmatique, comme la solution miracle et unique qui allait résoudre tous les maux.

Les limites de l'option Partenariat Public Privé (PPP)

Aujourd'hui, le constat est que les opérateurs publics continuent à jouer un rôle déterminant et largement prépondérant. En effet, il est enregistré que seul 1 sur 100 nouveaux branchements à l'eau potable (EP) est réalisé dans le cadre d'une gestion privée du service. De plus, Lobina (2007) a rapporté qu'après 15 ans, les investissements consentis par les

opérateurs privés n'ont permis de raccorder que 600 000 foyers en Afrique Subsaharienne et en Asie du Sud et de l'Est (hors Chine), soit moins 1% des personnes qui auraient dû être raccordées pour répondre aux OMDs (Lobina, 2007).

Ceci a d'ailleurs conduit les promoteurs même du concept du PPP, à l'instar de la Banque Mondiale ou de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), à constater que le grand privé international n'a pas été au rendez-vous, faute de taux de rentabilité et de garantie suffisants, puisque les effets d'échelle d'économie ainsi que les risques politiques et économiques dans les pays du Sud ne sont pas de nature à rassurer les actionnaires. L'ouverture d'autres marchés plus juteux, notamment en Chine et en Europe de l'Est, a découragé enfin les plus téméraires d'entre eux. Quant au privé local, celui-ci demeure relativement faible, non suffisamment structuré et surtout rarement pourvu d'une vision stratégique lui permettant d'investir dans un secteur fortement capitalistique et sans doute relativement moins rentable que d'autres secteurs plus juteux (tels que la spéculation immobilière).

Dès 2005, des chercheurs de la Banque Mondiale arrivaient à la conclusion que « en général, on ne note pas de différence statistiquement significative entre le rendement des exploitants publics et privés dans ce secteur [...] il semble généralement que le régime de propriété ne compte pas autant qu'on le prétend parfois. La plupart des rapports comparatifs entre pays ne relèvent pas d'écarts statistiquement notables au niveau des résultats obtenus par les opérateurs publics et privés » (Estache et al., 2005). Plus récemment, l'OCDE, dans une étude réalisée par son Centre de Développement en 2008, concernant 22 tests empiriques et 48 études de cas en Région Méditerranée Sud, arrive pratiquement aux mêmes conclusions, à savoir que la gestion privée des services de l'eau n'est pas synonyme en soi d'efficacité et de performance (Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 2008).

Le renforcement des opérateurs publics : une alternative crédible

Devant les insuffisances et les limites de la solution du PPP, il est apparu clairement qu'investir dans l'amélioration des performances des opérateurs publics se présente comme une option crédible et pertinente pour relever le défi de la généralisation de l'accès à l'eau potable et à l'assainissement.

Le mécanisme « Water Operators Partnership » (WOP)

Dans le même sens, des initiatives ont été lancées, parmi elles celle prise par le Conseil Consultatif sur l'eau et l'assainissement du Secrétaire Général de l'Organisation des Nations Unies (ONU) (UNSGAB), et présentée lors du 4ème Forum Mondial de l'Eau à Mexico, en mars 2006, sous la forme d'un plan d'action dénommé « Hashimoto Action Plan » (HAP) (United Nations Secretary-General's Advisory Board on Water and Sanitation, 2006). Cette solution préconise, comme mesure clé, la mise en place d'un mécanisme de Partenariat Public-Public (PuP) entre les opérateurs : « Water Operators Partnership »

(WOP), basé sur le principe du non profit, en vue d'aider les opérateurs des pays du Sud à mener à bien leur mission de garantir l'accès à l'EPA à leurs usagers-citoyens dans le cadre des OMDs (United Nations Secretary-General's Advisory Board on Water and Sanitation, 2006).

Malheureusement, le processus du WOP a connu et connaît encore quelques difficultés de mise en œuvre et a enregistré à ce titre beaucoup de retard. Ceci est probablement dû à l'absence de vision stratégique sur la nouvelle valeur ajoutée que peut apporter ce type de mécanisme par rapport aux différents mécanismes déjà en place, aussi bien au niveau de la forme et de la démarche qu'au niveau du fond et du contenu.

La création du réseau « Aqua Publica Europea »

Dans ce contexte également, les opérateurs publics deviennent de plus en plus conscients de leur rôle et des enjeux du secteur. La performance est désormais une préoccupation majeure de ces opérateurs pour relever les énormes défis qu'ils ont à affronter. Le renforcement des partenariats et le partage des bonnes pratiques et des expériences sont un outil efficace pour l'amélioration des performances des opérateurs publics.

C'est ainsi que le premier réseau européen d'opérateurs publics, appelé « Aqua Publica Europea », est né à Paris en mars 2008 (www.eaudeparis.fr/cgi/pavillondeleau/aqua_publica.shtml). Dans la charte fondatrice du réseau, les membres fondateurs « entendent œuvrer à l'amélioration constante de la performance des services hydriques dans un esprit de coopération et de partenariat, d'échange d'expériences et de compétences entre services publics d'eau dans la perspective d'un service public européen de l'eau » (Encadré 1).

Les leçons des expériences de partenariat entre opérateurs publics

Face à cette situation, il apparaît nécessaire d'agir pour contribuer à soutenir les pays africains, en l'occurrence, dans leurs efforts pour atteindre les OMDs, et particulièrement ceux en relation avec l'accès à l'EPA.

Pour agir le plus efficacement possible, il y a lieu de tirer les leçons des expériences passées ou en cours en matière de partenariat et capitaliser les avancées enregistrées dans ce domaine, tout en gardant en vue une ligne de conduite claire et nette, consistant à rechercher des solutions adaptées à chaque situation spécifique en évitant les recettes toute faites et les dogmes prédominants.

En effet, le bilan des actions de partenariat (Sud-Sud) de l'ONEP en Afrique sous ses différentes formes (multilatérales, bilatérales ou tripartites) depuis les années 1990 montre que les actions réalisées à ce jour, bien qu'elles soient bénéfiques, restent ponctuelles et globalement insuffisantes au regard des énormes défis que doivent relever les sociétés partenaires d'eau et d'assainissement. Ceci est en partie dû à :

- L'absence de stratégie sur le long terme des projets de développement du secteur dans plusieurs pays africains ;

- L'indisponibilité de ressources techniques et financières durables au niveau des opérateurs publics d'eau et d'assainissement dans ces pays ;
- L'insuffisance également de ressources financières (voire technique dans certains cas) consacrées par la coopération des pays du Sud, relativement développés dans le secteur de l'eau, au profit de ceux moins développés.

Encadré 1 : Aqua Publica Europea

Association européenne pour la gestion publique de l'eau
CHARTRE FONDATRICE (extraits)

Les membres fondateurs d'Aqua Publica Europea souscrivent aux principes suivants :

1. L'eau, bien commun

- a. L'eau, source de toute vie, constitue un droit fondamental, inaliénable, universel et imprescriptible.
- b. L'eau constitue un bien commun, patrimoine de l'humanité. Elle doit être gérée de manière responsable et solidaire.
- c. L'eau est un bien public d'intérêt général qui ne saurait être considéré comme une simple marchandise pouvant faire l'objet de rivalités et d'appropriation privée.

2. Pour un service d'eau public

- a. Les collectivités territoriales doivent pouvoir [...] organiser les services hydriques, conçus comme des services publics d'intérêt général, en constituant des entreprises publiques.
- b. Les membres fondateurs d'Aqua Publica Europea entendent œuvrer à l'amélioration constante de la performance des services hydriques dans un esprit de coopération et de partenariat, d'échange d'expériences et de compétences entre services publics d'eau dans la perspective d'un service public européen de l'eau.
- c. Les membres fondateurs d'Aqua Publica Europea réaffirment clairement leur engagement à travailler en toute transparence dans le cadre des procédures d'achats publics.

3. L'eau, une gestion d'intérêt général

- a. La libéralisation des services hydriques selon les logiques commerciales dominées par des intérêts financiers privés à court terme, voire spéculatifs, doit être rejetée.
- b. La place de l'eau commune dans l'espace public [...] doit être revalorisée.
- c. Les recettes provenant de la tarification des services d'eau doivent être intégralement affectées à leur fonctionnement optimal. La prise en charge financière des coûts inhérents à la sécurité hydrique collective, pour garantir le droit à l'eau pour tous [...] doit en outre faire appel à des mécanismes de solidarité sociale.

4. Pour une approche mondiale

Entreprises et autorités publiques européennes, nous sommes favorables à une politique mondiale de l'eau fondée sur la priorité à l'accès à l'eau potable et aux services sanitaires pour tous les habitants de la Terre. Il s'agit d'une priorité réalisable en l'espace d'une génération. L'heure est à la prise de responsabilité effective quant à la gestion de l'eau comme bien commun et public. Les entreprises et autorités publiques européennes de l'eau sont conscientes de cet enjeu et veulent en devenir des acteurs engagés.

Paris, le 18 Mars 2008

Quant au partenariat Nord-Sud, dont l'essentiel des réalisations s'est également traduit par des actions ponctuelles sous forme de formations, d'expertises ou d'ateliers et de séminaires, celui-ci reste limité par son coût, relativement élevé comparé aux ressources disponibles d'une part, mais aussi aux résultats délivrés, ainsi que par les difficultés d'adaptation des solutions pratiquées dans les pays du Nord à la réalité des pays africains.

Proposition d'un nouveau modèle de partenariat Sud-Sud avec l'appui du Nord

La proposition d'un partenariat Sud-Sud avec l'appui de Nord devrait s'inspirer à la fois de l'initiative initiale du WOP et, à titre d'exemple, de l'expérience du « Twinning », ou jumelage, qui fut mis en place dans les années 1990 entre la société d'eau et d'assainissement de la ville de Stockholm (VATTEN) et deux sociétés similaires des villes de Kaunas (Lituanie) et Riga (Lettonie). La société VATTEN a accompagné les deux sociétés partenaires sur une période de 5 à 10 ans pour les amener à un niveau de performance similaire au sien. Ce partenariat était basé sur le recouvrement des coûts d'intervention de VATTEN sans bénéfices. Le coût des ressources humaines impliquées dans le projet a été couvert par l'Agence Suédoise Internationale pour le Développement (SIDA). Le programme d'investissement a été réalisé par les deux sociétés avec l'assistance de VATTEN. Ce programme a bénéficié de fonds de la Banque Européenne pour la Reconstruction et le Développement (BERD) et de la Banque Européenne d'Investissement (BEI), et a également été financé en partie par les gouvernements des deux pays. Les Institutions Financières Internationales ont supporté le programme de jumelage en fixant des objectifs liés à la protection de l'environnement à travers l'amélioration de la qualité des services de l'eau et la restructuration des opérateurs. L'intervention de VATTEN a permis d'augmenter les performances des deux sociétés grâce à l'amélioration du management, de l'efficacité opérationnelle, du recouvrement total des coûts et du développement institutionnel. Le jumelage a surtout permis aux deux opérateurs letton et lituanien d'être autonomes sur le plan financier et sur le plan managérial (Bjerggaard, 2006).

Les objectifs et les principes directeurs du Partenariat Public Public (PuP)

Il apparaît donc nécessaire, voire urgent, de réfléchir à de nouveaux modèles de partenariat en évitant toute sorte de dogmatisme en la matière. C'est ainsi, face aux limites dont a fait preuve la solution du PPP, en particulier dans les pays du Sud, que le renforcement des performances des opérateurs publics, à travers le développement du PuP ou en activant des mécanismes comme celui du WOP, se présente comme une option crédible et d'actualité.

Dans ce sens, le modèle du PuP proposé aura à viser les deux objectifs suivants : (i) Objectif stratégique : Assurer l'accès à l'EPA pour tous les citoyens. Les OMDs constituent une étape importante et un levier dans ce sens ; (ii) Objectif opérationnel : Renforcer les capacités des sociétés publiques d'eau et d'assainissement dans les pays du Sud (en

Afrique subsaharienne en l'occurrence) pour leur mise à niveau afin qu'elles puissent à terme (moyen terme : trois à cinq ans) assumer pleinement leur mission de service public et constituer un outil performant pour la réalisation de l'objectif stratégique précité.

Pour ce faire, le modèle de partenariat proposé devra être guidé par les principes suivants :

- Le partage du savoir-faire et des expériences. En effet, le savoir dans un domaine aussi vital que l'eau devrait être déclarée patrimoine collectif de l'Humanité, et devrait, par voie de conséquence, être partagé et bénéficier à tous les citoyens du Monde ;
- La durabilité : Par l'adoption d'une approche intégrée et holistique aux niveaux institutionnel, organisationnel, technique et financier dans le cadre d'une vision stratégique à long terme ;
- La rationalisation des ressources de financement disponibles d'un côté par la mise en cohérence des diverses actions et programmes de partenariat et d'un autre côté par une meilleure utilisation du potentiel d'expertise des opérateurs du Sud relativement avancés au service des moins avancés. A ce titre, il y a lieu de rappeler les analyses du modèle de coopération et d'aide prédominants qui montrent qu'il y a nécessité d'harmoniser et de mutualiser les efforts dans ce domaine pour une meilleure efficience. A cet effet et à titre d'illustration, on note l'engagement pris par les différents partenaires dans le cadre des « Forums à Haut Niveau » d'agir pour la « Suppression des doubles emplois dans les efforts des donateurs et rationalisation de leurs activités pour en optimiser la rentabilité » (Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 2005) ;
- La mutualisation des ressources d'expertise aussi bien des sociétés d'eau du Nord que celles du Sud par la mise en place d'un réseau d'experts ;
- Le non profit : En effet, le modèle de partenariat proposé ne peut être utilisé pour réaliser des affaires à caractère commercial et générer des marges de profit.

CAS DU PARTENARIAT PUBLIC PUBLIC SNDE – ONEP

Contexte du Projet

Le 8 septembre 2000, 191 pays, dont la Mauritanie, adoptaient à New York une résolution de l'Assemblée Générale des Nations Unies, appelée Déclaration du Millénaire. La politique mauritanienne en matière d'eau et d'assainissement s'est ainsi fixée comme objectif principal « d'améliorer l'accès à l'eau et à l'assainissement en quantité et qualité à des prix abordables pour tous de façon durable ».

Les objectifs poursuivis à l'horizon 2010 concernent entre autres : (i) Le renforcement et l'extension de la production de l'EP pour atteindre un niveau de consommation de 60 l/j/personne en milieu urbain et une consommation supérieure à 20 l/j/h en milieu rural et semi-urbain ; (ii) Le renforcement et l'extension des systèmes de distribution de l'EP en vue d'atteindre un niveau de desserte en eau de 48% en milieu urbain et un

niveau de couverture de 60% pour le milieu rural et semi-urbain. Ainsi, la réalisation de ces objectifs ambitieux nécessite des moyens humains, techniques et organisationnels appropriés.

Par ailleurs, la Mauritanie a entrepris depuis 2007, et pour une durée de quatre à cinq ans, un important projet d'alimentation en eau potable (AEP) de Nouakchott à partir du fleuve du Sénégal, de façon à faire face aux besoins de développement de la ville à l'horizon 2020, tout en se ménageant une possibilité d'augmenter la capacité pour répondre aux besoins à l'horizon 2030.

Ce projet comprend les installations d'adduction (près de 200 km de conduite), de pompage, de traitement et de stockage nécessaires au transport et à la potabilisation d'un débit de 2,0 m³/s pouvant être porté à 2,6 m³/s. Le coût du projet avoisine les 500 millions US dollars (USD). Ce qui rend encore plus pertinent la mise à niveau et le développement des capacités de la SNDE pour qu'elle soit en mesure de pérenniser ces importantes infrastructures et leurs exploitations dans les meilleures conditions.

Un réseau de partenaires publics au service de la SNDE

Outre le cadre de la convention signée entre l'ONEP et la SNDE, l'ONEP a su mobiliser les partenariats qui le lient, notamment, avec des opérateurs publics d'eau et d'assainissement du Nord, pour mettre en place un large réseau d'opérateurs publics pour soutenir son projet de partenariat avec la SNDE. Le but est de mettre en commun et de mutualiser les ressources et les capacités aussi bien des sociétés d'eau du Nord que celles du Sud par la mise en place d'une plateforme de ressources expertes, au service de la réalisation du programme de renforcement des capacités de la SNDE.

Ce large réseau de partenaires construit autour de l'axe principal constitué par les deux opérateurs partenaires (ONEP et SNDE) apporte ainsi le soutien technique nécessaire, réduit les risques de défaillance d'un partenaire ou d'un autre et permet aussi un partage des connaissances et des expériences.

L'ONEP a su ainsi mettre à profit son succès relatif dans la gestion publique de l'eau au Maroc et le savoir-faire acquis dans ce domaine, à travers, entre autres, les partenariats, spécialement, avec des opérateurs publics du Nord (tels que le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne – SIAAP, Eau de Paris, la Société Wallonne Des Eaux – SWDE, la société Vivaqua), pour les mettre à la disposition d'autres opérateurs publics du Sud. A ce titre, son Centre de Formation (qui fête son 30ème anniversaire) et qui fut transformé tout récemment (en juin 2008) en Institut international de l'Eau et de l'Assainissement (IEA), constitue un outil intéressant au service du renforcement des capacités des opérateurs aux niveaux marocain et régional (Région de l'Afrique de l'Ouest en particulier et la Région Moyen-Orient et Afrique du Nord, dite MENA, regroupant les pays arabes) (Encadré 2).

Encadré 2 : Le succès de la gestion publique de l'Eau au Maroc - Cas de l'Office Nationale de l'Eau Potable (ONEP)

Données générales :

- Production de l'eau potable (EP) : 99% Publique (ONEP + Régies municipales)
- Distribution de l'EP : 70% Publique ; contrairement aux idées reçues, seulement 30% de la distribution sont assurés par un opérateur privé (Casablanca, Rabat, Tanger/Tetouan).

Indicateurs :

Le succès de la gestion publique au Maroc est mesuré essentiellement par les indicateurs suivants :

- Taux d'accès à l'Eau Potable: 100% en milieu Urbain, dont 92% par des Branchements Individuels (BI) et 8% via les bornes fontaines (BF) et 86% en milieu Rural (dont environ le tiers par BI et le reste par BF) ;
- Continuité du service (24h/24h) ;
- Qualité de l'EP répondant aux normes internationales de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ;
- Rendement de distribution supérieur à 75% ;
- Taux de recouvrement (factures) supérieur à 99 %.

Facteurs de succès de la gestion publique de l'Eau au Maroc :

- Valeurs du service public : « Droit à l'Eau pour Tous »
- Planification : Vision à long terme, gestion de la demande, réservation de la ressource.
- Tarification favorable à la généralisation de l'accès à l'eau :
 - Coûts relativement plus bas que ceux du Privé : Par exemple, les prix de l'EP de LYDEC, filiale de Suez à Casablanca, sont en moyenne 30% plus chers que ceux de l'ONEP malgré le facteur d'échelle ;
 - Péréquation territoriale permettant la solidarité entre région (villes/campagnes) ;
 - Tarification progressive garantissant l'accès à l'eau en pénalisant le gaspillage.

D'une manière générale, il est à noter que ce n'est pas par hasard si derrière les rares « success stories » dans la Région se trouvent des opérateurs publics performants, tels que la Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux (SONEDE) et l'office national de l'assainissement (ONAS) en Tunisie ainsi que l'Office national de l'eau et de l'assainissement (ONEA) au Burkina Faso.

Déroulement du programme de renforcement des capacités de la SNDE

La Table ronde du 24 mars 2008 à Rabat

Une table ronde regroupant les différents partenaires du Nord et du Sud ainsi que les bailleurs de fonds a été organisée le 24 mars 2008 à Rabat, afin de valider la démarche globale de ce partenariat. Le comité d'organisation fut conjointement composé de responsables de la SNDE et de l'ONEP.

La table ronde a connu la présence des dirigeants des différents opérateurs partenaires ainsi que des représentants régionaux des divers organismes de coopérations techniques (tels que la Coopération Technique Allemande – GTZ, l'Agence Belge de Coopération au Développement – CTB, l'Agence Espagnole pour la Coopération Internationale – AECL, et

la « Japan International Cooperation Agency » – JICA) et des bailleurs de fond (tels que la Banque Etatique Allemande – KFW, la Banque Africaine de Développement – BAD, l'Agence Française de Développement – AFD et la Banque Mondiale).

Il en est résulté une importante Déclaration de Principe qui a signifié le démarrage du processus de ce Partenariat et du Projet de renforcement des capacités de la SNDE en vue de contribuer à la réalisation des OMDs relatifs à l'eau et l'assainissement en Mauritanie. Cette Déclaration rappelle aussi les grands principes qui régissent ce cadre de partenariat (Encadré 3).

Encadré 3 : Déclaration de principes

Partant du retard inadmissible que connaît l'Afrique, en particulier sa région subsaharienne, dans la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMDs) relatifs à l'eau potable et l'assainissement (EPA), les opérateurs publics d'EPA, réunis à Rabat le 24 mars 2008 :

- Expriment leur volonté à œuvrer en réseau pour mettre en commun leurs expertises et leurs savoir-faire, partager leurs expériences et s'engager dans des actions concrètes d'appui aux opérateurs publics d'eau et d'assainissement de l'Afrique et sa région subsaharienne en particulier.
- Affirment leur volonté de créer une nouvelle dynamique de partenariat dépassant les formes classique de l'aide internationale orientées exclusivement « Nord-Sud » en faveur d'un partenariat axé d'avantage sur le « Sud-Sud » mais ouverte sur le Nord.
- Confirment leur attachement aux principes fondateurs du Partenariat Public Public (PuP) sous ces différentes formes, basés essentiellement sur le non-profit, la transparence, la mise en commun du savoir-faire, la gestion rationnelle des ressources et la gestion durable des services de l'eau potable et de l'assainissement.
- Déclarent, dans le cadre de cette collaboration, porter l'essentiel de leurs efforts aux domaines de la formation et du renforcement des capacités (Formation, assistance technique, coaching,...) des opérateurs publics bénéficiaires, sur la base de plans d'action pluriannuels intégrés couvrant les aspects institutionnel, organisationnel, technique, financier, etc.
- S'engagent, dans ce sens, à soutenir le projet de renforcement de la Société Nationale des Eaux de Mauritanie sur la base d'un plan d'action de 4 à 5 ans à préparer et à présenter lors d'une prochaine rencontre à organiser à Nouakchott dans les mois à venir (fin 2008). A cette occasion, le gouvernement mauritanien est appelé à manifester d'une manière expresse sa volonté d'appui au projet de renforcement de la SNDE en tant que société publique.
- Invitent les autres partenaires publics, opérateurs, agences de coopération technique et banques de développement, en particulier ceux intervenant dans cette région du monde, à participer à cette nouvelle démarche de partenariat, sur la base de projets concrets (en l'occurrence celui de la SNDE) dans un souci de mise en cohérence des programmes et de rationalisation des ressources.

Rabat, le 24 Mars 2008

Signée par les opérateurs publics suivants : Eau de Paris, SIAAP (France), Vivaqua et SWDE (Belgique), ONEA (Burkina Faso), ONEP (Maroc), SNDE (Mauritanie).

En attente de signature : Société Canal de Provence SCP (France) et SONEDE (Tunisie)

Soutenue par : AECL (Agence Espagnole pour la Coopération Internationale) et BID (Banque Islamique de développement).

La première étape du processus a consisté à l'élaboration des Termes de Références (TdR) pour la réalisation d'un diagnostic global de la SNDE, ayant pour objectif l'élaboration d'un plan d'action pluriannuel et multidisciplinaire pour la mise à niveau de la SNDE aux niveaux techniques, organisationnel et institutionnel pour en faire un outil performant capable de prendre en charge la réalisation de ces missions de service public.

Les perspectives

L'étape suivante, découlant du diagnostic général, sera la mise en œuvre du programme de renforcement des capacités pour une période de quatre à cinq ans. Pour ce faire, une seconde table ronde est prévue pour présenter les résultats du diagnostic et du plan de renforcement des capacités proposé aux différents partenaires ainsi qu'aux bailleurs de fonds intéressés dans le but d'examiner ensemble le plan de financement dudit plan d'action.

En fait, les principaux axes du plan d'action concernent principalement des prestations intellectuelles en matière de formation, d'assistance technique et d'accompagnement pour le renforcement des capacités de la SNDE. A cela s'ajoutera probablement une composante « infrastructure », relative à la construction et l'équipement d'un centre de formation professionnelle aux métiers de l'eau.

En somme, ces axes constituant le plan d'action en question s'articulent autour des aspects suivants :

- Aspects organisationnels et ressources humaines : Assistance de la SNDE dans l'élaboration de sa nouvelle organisation, qui est nécessaire pour la réalisation de ses objectifs stratégiques. Un programme de développement des ressources humaines sera réalisé pour accompagner les changements organisationnels ;
- Aspects financiers et commerciaux : La gestion commerciale de la SNDE devra être développée à travers l'amélioration des procédures d'établissement et de collecte des factures, de façon à augmenter les recettes de l'entreprise. En parallèle, une nouvelle structure tarifaire devra être mise en place pour atteindre un recouvrement total des coûts et une autonomie financière ;
- Aspects opérationnels : Ils concerneront principalement l'amélioration des rendements des installations de production et de distribution d'EP, à travers, notamment, la mise à niveau des entités concernées ;
- Communication et sensibilisation : Une attention particulière devra être accordée à la communication et la sensibilisation des usagers, particulièrement à l'économie de l'eau et à sa protection contre la pollution. L'ONEP assistera la SNDE dans l'identification des populations cibles et des thèmes prioritaires à aborder, ainsi que dans l'élaboration des supports de communication.

CONCLUSION

La réussite d'une initiative de cette envergure est largement conditionnée par le soutien politique au plus haut niveau du gouvernement du pays bénéficiaire. Les aspects institutionnels et de gouvernance d'une part et la qualité des ressources humaines et leur organisation d'autre part sont aussi importants, sinon plus, que le financement et la réalisation des investissements et des infrastructures d'eau et d'assainissement.

Pour y arriver, il faudra adopter des objectifs stratégiques et politiques clairs pour la généralisation de l'accès à l'EPA, sortir des sentiers battus et des recettes « prêt-à-porter » et mettre au point une solution concrète et adaptée pour répondre à une situation concrète.

Le but est la mise à niveau et le développement des capacités des opérateurs publics dans les pays du Sud en particulier, en vue d'en faire des outils efficaces et performants au service de la généralisation de l'accès à l'EPA, à travers la promotion de modèles de Partenariat Public Sud-Sud avec le soutien d'un large réseau du Nord, et régis par les principes du partage du savoir-faire et de solidarité.

REFERENCES

Bjerggaard S. (2006) The twinning concept of Stockholm Water Company. Stockholm Vatten Reports, International Projects, janvier 2006, 10 p.

Estache A., Perelman S. et Trujillo L. (2005) Infrastructure performance and reform in developing and transition economies: evidence from a survey of productivity measures. World Bank, Policy Research Working Paper 3514, février 2005.

Lobina E. (2007) Public-Public Partnerships and the United Nations Water Operator Partnerships initiative. PSIRU, Business School, University of Greenwich.

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) (2008) Private sector participation and regulatory reform in water supply: southern mediterranean experience. Development Center, Working Paper 265.

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) (2005) Déclaration de Paris sur l'efficacité de l'aide au développement – Appropriation, harmonisation, alignement, résultats et responsabilité mutuelle. Direction de la coopération pour le développement (DCD-CAD), Forum à Haut Niveau, Paris, France, 28 février-2 mars 2005, 14 p.

Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (2006) Au-delà de la pénurie : pouvoir, pauvreté et crise mondiale de l'eau. Rapport mondial sur le Développement Humain, Programme des Nations Unies pour le développement, New York, USA. ISBN: 2-7178-5323-5, 552 p.

United Nations Secretary-General's Advisory Board on Water and Sanitation (2006) Hashimoto Action Plan – Compendium of Actions, Mars 2006, 15 p.

CHAPITRE 2

SAQAYTI, POUR UNE MEILLEURE RATIONALISATION DE L'UTILISATION DE L'EAU EN LIBRE SERVICE

T. HASCOET*

Veolia Services à l'Environnement Maroc
Rabat, Maroc

O. GILBERT

Veolia Water Afrique Moyen Orient Inde (AMI)

RESUME

Au Maroc, si le raccordement aux services d'eau potable et d'assainissement a considérablement progressé, certains ménages, notamment en milieu urbain ou périurbain, ne peuvent être raccordés individuellement et à court terme au réseau d'eau potable pour des raisons structurelles et/ou financières. Afin que leur accès à ce service essentiel soit tout de même garanti, ces ménages sont généralement alimentés via des bornes fontaines (BF) où l'eau leur est distribuée gratuitement grâce à un financement des communes. Si ces BF constituent une solution provisoire de raccordement, elles ne permettent pas d'assurer une gestion optimale de la ressource, ni son partage équitable. En effet, la gratuité et le libre accès entraînent surconsommations, gaspillages, utilisation de la ressource par des consommateurs qui n'étaient pas initialement ciblés par cette aide et finalement une charge importante pour les communes garantes et donc une contrainte sur la durabilité du service public. En partant de ce constat et en accord avec les recommandations de la communauté internationale et de la société civile, Veolia Environnement Maroc (opérateur de gestion déléguée à Rabat, Tanger et Tétouan) a développé la BF *Saqayti*. Il s'agit d'une BF, dont l'accès est contingenté, par une clé, à une population préalablement désignée au cas par cas par les communes. Cette population a ainsi accès à la borne gratuitement à hauteur d'un forfait mensuel équivalent à ses besoins essentiels. Sous réserve de quelques ajustements, *Saqayti* se conçoit comme un complément novateur à l'offre de branchements sociaux individuels permettant de

* Auteur correspondant : HASCOET Thomas – Veolia Services à l'Environnement Maroc – 19, avenue Ibn Sina, 10000 Rabat, Maroc

Email : Thomas.Hascoet@veoliaservices.ma – Tél. : (+212) 673 08 23 71- Fax : (+212) 537 68 48 66

proposer aux plus démunis une offre complète conforme aux standards internationaux de qualité de service, dans un objectif triplement vertueux : économique, social et environnemental.

Mots clés : Borne fontaine ; prépaiement ; *Saqayti* ; branchements sociaux ; desserte.

INTRODUCTION

Au Maroc, dans les zones urbaines, les autorités s'appuient sur les opérateurs (régies publiques ou opérateurs privés) des services publics d'eau et d'assainissement pour mettre en œuvre leur politique d'accès à l'eau. Ces opérateurs centralisent la demande, assurent la distribution aux habitants de leurs périmètres et sont ainsi les garants, dans la limite de leurs responsabilités et de leurs moyens, d'une gestion durable de la ressource et de son partage équitable. Ceci n'est cependant possible que si les mêmes principes sont appliqués à l'ensemble de la population du périmètre : une des clés réside donc dans l'extension du service public au maximum sur l'ensemble du périmètre de l'opérateur. Des moyens importants ont été déployés ces dernières années pour accroître la desserte en eau potable dans les zones urbaines et périurbaines. Il s'agit notamment de l'un des objectifs prioritaires des contrats de gestion déléguée signés depuis 1997 au Maroc. Cependant, cette extension se heurte encore à de nombreux obstacles structurels (tels que la nature et la géographie des quartiers) et financiers (tels que la lourdeur des investissements). Par ailleurs, des ménages isolés – voire des quartiers entiers – sont parfois encore non desservis. Ainsi, une minorité de ménages (10,5% de la population du périmètre de Veolia Environnement¹ à Rabat, 17,7% à Tanger et 13,1% à Tétouan) ne peut être raccordée individuellement à court terme aux réseaux publics d'eau et d'assainissement.

Afin de leur assurer une desserte en eau potable, plusieurs solutions ont été envisagées par les collectivités, telles que l'installation de BF à accès totalement libre et gratuit. Ce type d'installation montre toutefois rapidement ses limites et les opérateurs, comme les communes, aspirent à développer des moyens leur permettant d'assurer une desserte plus adaptée à une durabilité du service public, à une limitation des gaspillages et à un partage équitable de la ressource, tout en garantissant à ces ménages, souvent les plus pauvres, une source d'alimentation sûre.

Après avoir présenté les différents principes théoriques que devrait satisfaire un système d'alimentation de ce type, cet article aboutira, dans un premier temps, à la présentation d'un nouveau mode de desserte collective novateur : des BF gérées, régulées et à consommation prépayée, nommée *Saqayti*² ; et dans un second temps à l'analyse des premiers retours d'expérience associés.

¹ Au Maroc, Veolia Environnement est opérateur de gestion déléguée des services d'eau, d'assainissement et d'électricité sur les Wilayas de Rabat-Salé, Tanger et Tétouan, depuis 2002.

² *Saqayti* signifie, en langue arabe, « ma fontaine ».

L'EXTENSION DE LA DESSERTE EN EAU POTABLE AU MAROC ET SES OBSTACLES

Au cours des 10 dernières années, l'accès des populations marocaines aux services d'eau potable et d'assainissement a connu une très forte progression. Cependant, des efforts importants restent à réaliser dans les quartiers défavorisés urbains et périurbains, notamment envers les quartiers informels créés spontanément avec l'exode rural. En mai 2005, Sa Majesté Le Roi Mohamed VI a lancé une vaste Initiative Nationale pour le Développement Humain (INDH) dans le but de lutter contre la pauvreté et de favoriser l'amélioration de la qualité de vie de tous. Les collectivités locales, leurs autorités de tutelle et les opérateurs ont profité de cette occasion pour expérimenter des approches novatrices, liant le développement des services d'eau et d'assainissement à la réhabilitation et la restructuration de l'habitat des quartiers défavorisés.

C'est dans ce sens que Veolia Environnement Maroc a signé en 2005 et 2006, en présence de Sa Majesté le Roi Mohamed VI, trois conventions cadre pour la connexion aux réseaux d'eau potable et d'assainissement de près de 100 000 ménages défavorisés des quartiers périphériques de Rabat, Tanger et Tétouan. Près de 500 000 personnes sont ciblées par ce programme. Ces conventions affirment une volonté commune des opérateurs, de leurs autorités déléguées et de tutelle, de se donner les moyens d'accélérer le rythme d'extension de la desserte en eau potable et assainissement, notamment en allouant des financements ad hoc, en ajustant la charge devant être supportée par les familles concernées à l'acceptabilité sociale, et en simplifiant les formalités administratives associées. En effet, les objectifs de ces conventions reviennent quasiment à la contraction sur cinq années de la totalité des branchements sociaux prévus contractuellement sur 25 ans sur ces trois périmètres.

Cependant, si une volonté forte est nécessaire à la réalisation de tels objectifs, elle ne suffit pas car plusieurs difficultés se dressent encore pour une desserte généralisée en eau potable et assainissement. Tout d'abord, le coût des infrastructures à mettre en place est très important (plus de 2 milliards de dirhams marocains – MAD³) pour atteindre les objectifs de raccordement fixés sur Rabat, Tanger et Tétouan) et nécessite la mise en place d'une ingénierie financière novatrice, car plus un quartier est éloigné du réseau principal (ce qui est le cas majoritairement pour les ménages les plus défavorisés), plus le coût de revient d'un raccordement est logiquement élevé. En effet, ce coût de revient doit prendre en compte non seulement le coût de la connexion (branchement) au réseau, mais également le coût de l'extension des réseaux de distribution et de collecte des eaux usées (in site), des travaux structurants pour créer les réseaux de transport d'eau (hors site), ainsi qu'une contribution au coût des infrastructures, telles que les stations de pompage, les réservoirs et les usines de dépollution. En parallèle des conséquences sur le prix du branchement dans l'absolu, ceci entraîne une variabilité considérable de ce

³ 1 dirham marocain (MAD) correspond à 0,11527 dollar US (USD), taux de change du 19 février 2009.

coût de revient selon les zones géographiques (quartiers d'une même ville, villes d'une même région).

Par ailleurs, un grand nombre des quartiers périphériques les plus pauvres, visés par ces objectifs d'extension de desserte, sont installés dans des zones non viabilisées, n'ayant pas fait l'objet d'un plan d'aménagement, et sur des lieux parfois très accidentés et pentus. Ainsi, d'une part leur raccordement nécessite une volonté expresse des autorités de viabiliser et de légitimer ces quartiers, mais d'autre part les coûts associés s'en trouvent également décuplés. Enfin, ce raccordement n'est possible que pour les habitations les moins précaires, car, les investissements associés étant coûteux, ils se doivent d'être durables et ne peuvent donc concerner le raccordement de lots destinés à disparaître à plus ou moins moyen terme.

Les opérateurs désirant raccorder ces ménages se heurtent également à des problématiques foncières, notamment dans des contextes de forte spéculation immobilière touchant de nombreuses grandes villes du Maroc et augmentant considérablement le délai de raccordement.

Les mécanismes mis en place par les autorités et les opérateurs dans le cadre des conventions INDH ont permis de solder plusieurs de ces problèmes en proposant des solutions de financement innovantes, en déterminant et en autorisant l'alimentation d'une série de quartiers prioritaires, en permettant le travail conjoint des principaux acteurs de l'urbanisme et en allégeant les procédures administratives associées. Néanmoins, la définition d'une solution alternative et temporaire d'alimentation en eau potable reste nécessaire à cause de la conjonction de plusieurs obstacles :

- Obstacles d'ordre foncier ;
- Difficultés de coordination avec les nombreux aménageurs ;
- Présence dans certains quartiers d'habitations trop précaires pour bénéficier d'un raccordement durable ;
- Ménages n'ayant pas les capacités financières suffisantes, malgré les efforts mis en œuvre pour diminuer le prix d'un raccordement ;
- Situation juridique ou familiale compliquée des occupants de certains logements ;
- Absence de plans d'aménagement ;
- Et simplement le fait que le programme s'étale sur de longues durées.

C'est pourquoi en complément des offres de branchements sociaux, ces ménages, temporairement exclus du raccordement individuel à l'eau potable, sont généralement obligés de s'alimenter par des BF. L'eau y est desservie gratuitement, sans restriction d'accès ni de volume, puis facturée aux communes par les opérateurs.

Si ce mode de desserte constitue une solution temporaire, il pose cependant plusieurs problèmes. Tout d'abord, l'accès non régulé à un volume illimité entraîne la présence de « consommateurs parasites » (tels que les entrepreneurs et les particuliers bénéficiant d'un raccordement individuel), qui s'y alimentent pour des besoins souvent non domestiques. Ils mobilisent l'accès à ces bornes parfois pendant des heures, de nuit comme de jour,

rallongeant donc la durée de la corvée d'eau pour les ménages qui se voient contraints de s'approvisionner auprès de sources dont la potabilité n'est pas garantie (telles que les puits et les revendeurs d'eau) ou auprès de BF plus éloignées. Ces consommateurs contribuent à une surconsommation rendue possible par l'accès non restreint à un volume illimité. Par ailleurs, les points d'accès sont souvent vétustes, fuyants ou vandalisés, entraînant des fuites d'eau importantes, contraires au souci de préservation du bien commun et de l'environnement. Ainsi, cette absence de moyens de maîtrise des consommations au niveau des BF engendre également des facturations importantes aux communes, difficiles à budgétiser. Ceci a un impact significatif sur le recouvrement des créances associées pour les opérateurs, mettant à mal la durabilité du service public et donc un partage équitable et juste des ressources en eau.

La BF gratuite, qui constitue généralement une solution provisoire partielle pour la desserte des plus pauvres, pose donc des problèmes pour une gestion rationnelle et durable ainsi que pour un partage équitable de la ressource en eau. C'est la raison pour laquelle Veolia Environnement Maroc a mené des réflexions pour définir une solution permettant un accès exclusif garanti pour les plus démunis quelque soit leur niveau de revenu, tout en limitant gaspillages et surconsommations, et qui puisse être un complément à l'offre de branchements sociaux individuels tout en allégeant la charge associée pour les communes.

PRINCIPES ET RECOMMANDATIONS POUR UNE POLITIQUE TARIFAIRE ADAPTÉE À UNE DESSERTE NON INDIVIDUELLE

Dans le cas des BF, comme trop souvent, les expériences de gratuité conduisent à la fois à une insuffisance d'équipement, une dégradation progressive du service, une maintenance déficiente, ainsi qu'à une consommation excessive et donc un stress accru sur la ressource et l'environnement. Une des solutions semble donc être une tarification au moins partielle du service rendu, même pour les plus pauvres, respectant le principe de l'acceptabilité sociale.

D'après Whittington (2006), la tarification de l'eau potable devrait consister en un équilibre entre les quatre objectifs suivants :

1. **Le recouvrement acceptable des coûts** : Les revenus globaux générés par la tarification doivent équilibrer les coûts financiers associés à l'alimentation en eau potable, sans générer de *cash flow*, ni de déficit temporaire pour le service. La desserte en eau via une BF gratuite implique un stress exagéré sur l'équilibre d'une politique tarifaire. Les abus causés, notamment par les « consommateurs parasites », imposent une contrainte sur l'équilibre des flux entre les revenus et les charges associées au niveau du service public. La nouvelle tarification à mettre en place devrait donc viser à rétablir cet équilibre de la politique tarifaire.
2. **L'efficacité économique** : Les tarifs doivent être fixés de manière à signaler au

consommateur final les divers coûts, tels que les coûts financiers et environnementaux, que son choix de consommer impose au reste du système et à son économie. En pratique, dans le cas d'une tarification classique, il s'agirait de faire en sorte que la charge volumétrique soit égale au coût marginal lié :

- a. à la desserte d'un mètre cube supplémentaire à une ville, puis à un particulier ;
- b. au stress que ce mètre cube impose à l'environnement (prix de la rareté de la ressource, incluant notamment les coûts d'opportunité associés à l'utilisation de celle-ci pour des besoins publics, et une estimation du coût environnemental lié au rejet de l'eau usée vers le milieu naturel et au coût éventuel de la collecte et du traitement des eaux usées).

Dans le cas d'une BF, il s'agit de faire prendre conscience au consommateur, par l'établissement d'un mode de tarification ou d'alerte à définir, du coût de sa décision d'ouvrir son robinet pour l'ensemble du système. Cette alerte peut être financière et consister en l'instauration d'un prix, mais peut également consister en la création d'un sentiment de rareté, qui valoriserait l'eau distribuée.

3. **L'équité** : La tarification doit être identique pour les consommateurs similaires et varier entre consommateurs différents. Généralement, il s'agit de faire en sorte que les factures mensuelles reflètent les coûts imposés par le mode de consommation de chacun au service public. Il serait donc légitime, selon ce principe, que les usagers des solutions provisoires et non individuelles en eau potable bénéficient d'une tarification particulière.
4. **L'acceptabilité** : Le tarif doit garantir l'accès à l'eau pour les plus démunis quelque soit leur niveau de revenu et au moins à hauteur de leurs besoins essentiels. Ceci a abouti à des recommandations pour garantir un prix faible, au moins pour les plus démunis pour leur assurer une desserte.

Cependant, l'établissement d'une politique tarifaire pour la desserte en eau potable des plus démunis est souvent sensible. En effet, le passage d'une alimentation gratuite et abondante à une alimentation régulée et tarifiée, si elle constitue une solution à plusieurs des problématiques évoquées dans le cas des BF, doit être amorcé de manière progressive et en accord avec les attentes et les besoins des populations ciblées. Cette tarification spécifique fait l'objet d'âpres débats au sein de la société civile, mais également de recommandations de la part de la communauté internationale (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2006, Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 2008). Les points de vue semblent toutefois converger vers une tarification très réduite, voire une gratuité de l'eau potable à hauteur des besoins essentiels pour les plus défavorisés. Suivant l'idée que tous les citoyens devraient avoir accès à des ressources suffisantes pour leur permettre de satisfaire leurs besoins élémentaires et de vivre dans la dignité, le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) recommande ainsi une allocation gratuite de 20 l d'eau par personne et par jour pour les plus pauvres. Au Maroc, cette allocation s'élèverait donc, pour les zones urbaines et périurbaines des plus grandes villes, à environ 3 m³/mois (moyenne de cinq personnes par ménage). Le PNUD

estime également que les dépenses liées à l'eau potable pour les besoins essentiels ne devraient pas excéder 3% des revenus d'un ménage. Sur le périmètre de l'agglomération de Tanger, une étude socio-économique menée en 2003 (Roger, 2003) a établi le revenu moyen des ménages les plus pauvres à environ 1900 MAD/mois (soit un peu plus de 1 USD/j/habitant). Leurs dépenses pour satisfaire les besoins essentiels ne devraient donc pas excéder 50-60 MAD/mois.

SAQAYTI, UN SYSTÈME DE GESTION DE L'EAU RÉGULÉ ET PRÉPAYÉ POUR LES PLUS DÉMUNIS

C'est sur la base de ces recommandations qu'a été développée la BF *Saqayti*. *Saqayti* est une BF, dont l'accès est contingenté, par une clé, à une population ciblée qui y bénéficie d'un accès exclusif (Figures 1 et 2). La distribution d'eau est conditionnée à l'introduction de cette clé contenant une carte à puce. Cette dernière est créditée d'un volume d'eau prépayé, dont la consommation est enregistrée dans la puce. En cas d'épuisement du solde prépayé, le bénéficiaire doit créditer sa clé au tarif normal⁴ auprès d'une agence commerciale. A chaque accès à la borne, le volume restant au crédit de consommation est indiqué sur un écran incorporé à la structure.



Figure 1. Borne fontaine saqayti installée à Tanger

⁴ Qui demeure préférentiel car les recharges s'effectuent à hauteur de 6 m³ et donc dans la première tranche de tarification, dont le prix de vente est inférieur au prix d'achat par l'opérateur au producteur national, l'Office National de l'Eau Potable (ONEP).



Figure 2. Bornes fontaines *saqayti* de Tanger : la distribution d'eau est conditionnée à l'introduction d'une carte à puce

Cinq BF de ce type ont été installées au Maroc à ce jour sur les communes de Temara, Salé, Tanger et Martil. Préalablement à leur installation, chaque commune, et c'est une des forces de ce nouveau mode de desserte, a identifié et listé les ménages défavorisés qui ne pouvaient avoir accès à un branchement individuel pour des raisons financières, structurelles ou autres (indivision, etc.) et qui nécessitaient un accès à cette installation. Chacun de ces ménages (de 20 à 40, selon le type de borne installée) s'est ensuite vu remettre une clé leur donnant accès à la borne. Actuellement, ces clés sont mensuellement créditées d'un volume de 4 à 6 m³ (environ 30 à 40 l/habitant/j), prépayé par les communes et permettant donc aux bénéficiaires de satisfaire gratuitement leurs besoins essentiels.

Sous cette forme, *Saqayti* permet ainsi de satisfaire aux principes :

1. **De recouvrement** acceptable des coûts : l'équilibre de la politique tarifaire est retrouvé, ou du moins rendu prévisible, en limitant la dotation gratuite mensuelle à un volume prédéfini et à une liste de bénéficiaires restreinte ;
2. **D'efficacité économique** : L'allocation d'un forfait gratuit plafonné et la possibilité pour les bénéficiaires de suivre son évolution favorisent un sentiment de rareté de la ressource. Le consommateur est alerté sur les effets de sa consommation. Ceci,

associé à la transition vers une tarification classique au-delà des 4 à 6 m³ alloués, contribue à donner une valeur à l'eau potable et à signaler les coûts associés aux bénéficiaires ;

3. **D'équité** : cette solution est ciblée vers les populations les plus démunies, ne pouvant être desservies individuellement à court terme et consommant moins de 4 à 6 m³ d'eau potable par mois. Il s'agit donc d'un tarif socialement équitable défini spécifiquement pour des consommateurs particuliers qui ne peuvent être desservis sous un régime classique ;
4. **D'acceptabilité** : L'alimentation des bénéficiaires à hauteur de leurs besoins essentiels (30 à 40 l/personne/j en moyenne alors que le PNUD en recommande 20 l) demeure acceptable car gratuite. Tout en proposant une solution tarifaire adaptée aux plus défavorisés, ce système permet également aux communes de rationaliser leurs dépenses liées à l'eau potable. En effet, elles sont à présent à même de budgétiser de manière précise les dépenses associées aux BF qui ne peuvent plus dépasser le produit du nombre de bénéficiaires par le volume unitaire gratuitement alloué.

En parallèle, les « consommateurs parasites » sont évités, ce qui contribue à la réduction du temps d'attente, conséquemment de la durée de la corvée d'eau et donc à une amélioration de la qualité de vie des ménages ciblés. Cela permet également d'orienter les aides allouées par les communes par l'intermédiaire de la gratuité du service à ceux qui en ont réellement besoin et donc d'affecter ailleurs les ressources budgétaires ainsi économisées. Les consommations abusives sont ainsi évitées et la fermeture systématique des vannes au retrait de la clé évite également les gaspillages au robinet.

Saqayti semble donc être une réponse théoriquement adaptée à la desserte collective et provisoire en eau potable pour les populations ne pouvant être raccordées individuellement. En donnant progressivement une valeur à l'eau potable par sa rareté et en rendant nécessaire un suivi par les ménages de leur consommation, ce système permet également d'amorcer une transition progressive vers une alimentation individuelle. Enfin, l'ensemble permet d'alléger le prélèvement sur la ressource généré par des surconsommations et des gaspillages et donc de préserver l'environnement en visant un objectif triplement vertueux : économique, social, et environnemental.

La première BF de ce type a été installée à Témara en novembre 2006, ce qui a permis de procéder à certains ajustements. Quatre autres bornes ont ensuite été posées au Maroc. Actuellement, les premiers retours d'expérience sont analysés. Une enquête a été réalisée au cours de l'été 2008 auprès de 67% des ménages bénéficiaires de *Saqayti*.

En premier lieu, cette enquête a confirmé l'extrême dépendance de ces ménages vis-à-vis de la BF, puisqu'elle constitue leur unique source d'approvisionnement pour 96% d'entre eux. Cependant, les consommations des *Saqayti* sont en moyenne près de 75% inférieures aux consommations antérieures des BF classiques qu'elles ont remplacées. Les consommations moyennes mensuelles des trois BF remplacées sur le périmètre de Veolia

Environnement Maroc à Rabat sont ainsi passées de 1125 m³/mois à 294 m³/mois⁵ (Figure 3). Cela représente à la fois un prélèvement réduit sur la ressource, mais également des économies substantielles pour les communes qui subventionnent ces consommations.

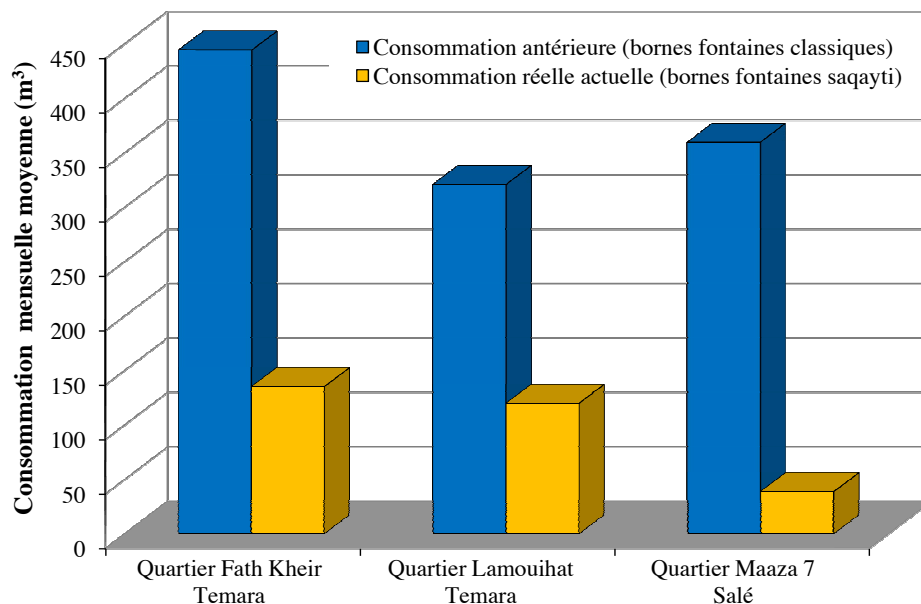


Figure 3. Comparaison des consommations des bornes fontaines classiques avec celles des saqayti qui les ont remplacées

33% des bénéficiaires ont déjà consommé la totalité de leur forfait, mais aucun d'entre eux n'a jusqu'ici re-crédité sa clé, la solidarité entre voisins intervenant actuellement en cas de consommation totale du crédit. D'ailleurs, 77% des ménages bénéficiaires affirment être satisfaits du volume alloué gratuitement ; 6 m³ semblent donc suffisants pour ces ménages et le nombre de foyers soldant entièrement leur forfait pourrait sans doute être diminué en sensibilisant les ménages quant à l'utilisation optimale du volume qui leur est alloué.

Par ailleurs, les ménages bénéficiaires affirment que la durée de la corvée d'eau a été substantiellement réduite : 50% attendent à présent moins de 5 min, contre 17% avant l'installation de *Saqayti*. En complément, le ciblage des bénéficiaires a permis d'optimiser l'emplacement de la borne, et donc de la rapprocher des ménages ciblés par cette aide.

La mise en place d'une politique tarifaire particulière pour les usagers de ces bornes visait à amorcer une transition vers une gestion individualisée de l'eau potable. Dans ce sens, l'une des premières attentes était de responsabiliser le bénéficiaire sur la valeur de l'eau.

⁵ Les bornes fontaines installées à Tanger et à Tétouan sont encore trop récentes pour analyser l'évolution des consommations.

Cet objectif est atteint, puisque 72% affirment suivre de près leur consommation d'eau potable. Il s'agit d'une évolution majeure du comportement de ces ménages puisque ce suivi était impossible et quoiqu'il en soit inutile lorsque la desserte était assurée par des bornes classiques. De plus, 56% des ménages affirment à présent accorder une importance à la notion de gaspillage et 17% utilisent une partie de l'eau non consommée, et qu'ils rejetaient auparavant, pour des usages non alimentaires.

En diminuant les désagréments associés à une desserte non individuelle en eau potable, cette installation contribue à une amélioration sensible de la qualité de vie des habitants, reflétée par un taux de satisfaction global élevé, puisque quasiment tous les ménages affirment être satisfaits de cette installation. Cette satisfaction n'est cependant pas totale (24% seulement affirment être « très satisfaits »). En effet, les inconvénients d'une desserte collective n'ont pas pu être totalement supprimés et beaucoup aspirent ainsi, à terme, à une alimentation individuelle. Si l'emplacement de ces nouvelles installations a été optimisé, de part la géographie même des quartiers (habitations dispersées, situées sur des terrains parfois très accidentés et cahoteux), la corvée d'eau reste pénible et pour certains la distance à la borne est encore importante (32% des ménages demeurent à plus de 200 m de l'installation).

Par ailleurs, des problématiques inattendues, liées aux nouvelles pratiques induites par cette installation, sont progressivement apparues. Tout d'abord, certains ménages, les plus proches de l'installation, s'alimentent à présent à la borne par l'intermédiaire de tuyaux directement branchés sur l'un des robinets et déroulés jusqu'à leur habitation. Si un accord tacite entre les bénéficiaires interdit la monopolisation par ce genre de pratique des deux robinets, celui-ci n'est parfois pas respecté. Ceux qui ne sont pas détenteurs d'un tuyau se plaignent d'un délai d'attente plus long qu'avec leur ancienne source d'approvisionnement, puisque le tuyau, partagé entre plusieurs foyers, peut être branché pendant plusieurs heures. Ainsi, 15% de ces usagers ne disposant pas de tuyau déclarent attendre en moyenne plus d'une heure au niveau des BF. Cette opposition, et le sentiment d'injustice de ceux qui n'ont pas de tuyau, peut parfois être source de tensions. Par ailleurs, la potabilité d'une eau stockée pendant trop longtemps n'est pas garantie. Si l'utilisation de tuyaux permet de retirer un volume important en une seule fois (46% déclarent retirer plus de 150 l d'eau par corvée), de le stocker et ainsi de réduire la fréquence des corvées, il conduit également à l'augmentation de son temps de stockage. 24% des ménages stockent à présent l'eau destinée à la boisson pendant plus de trois jours contre seulement 8% auparavant. Dans ce cas, l'amélioration pratique du mode de desserte en eau pourrait avoir l'effet pervers de contribuer à une détérioration de la qualité de l'eau effectivement consommée par les bénéficiaires. Ainsi, des actions de sensibilisation aux bons usages de l'eau, aux liens entre l'eau, l'hygiène et la santé sont envisagées.

Ces aspects, qui nuancent le succès de cette nouvelle installation en cours de développement, semblent essentiellement dus à son caractère hybride. En effet, bien que

collective, elle a pour objectif d'amorcer une transition vers une gestion individuelle de l'eau. Ainsi, si chacun est à présent responsable de sa consommation, un « délégué » des bénéficiaires pourrait être désigné en cas de problème, de recommandation ou d'usage abusif de cette installation collective pour en faire part à l'opérateur. C'est pourquoi Veolia Environnement Maroc a pour projet de développer une méthode participative de gestion de ces bornes. La nomination d'une personne désignée comme l'interlocuteur de référence à la fois pour les bénéficiaires, mais également pour les opérateurs et les communes qui centraliseraient les problématiques associées aux utilisations abusives, à la maintenance du système, à la recharge des clés, etc. pourrait être une solution à ce problème. Par ailleurs, l'enquête a révélé que les bénéficiaires étaient demandeurs d'informations pratiques sur les bons usages de l'eau et sur l'utilisation optimale du volume de 6 m³ alloué. Suite à cette phase de mise en place du système, Veolia Environnement Maroc envisage également d'accompagner l'installation de *Saqayti* d'une démarche de sensibilisation à une utilisation optimale du forfait alloué et aux bons usages de l'eau. Ceci permettrait d'atténuer les effets collatéraux non attendus de cette installation et d'en faire une opportunité pour améliorer significativement les conditions sanitaires des bénéficiaires.

CONCLUSION

La BF gratuite non gérée, moyen généralement utilisé pour desservir en eau potable de nombreux ménages urbains (souvent les plus pauvres) ne pouvant disposer d'un raccordement individuel au réseau public pour des raisons structurelles (telles que des habitations ou quartiers trop précaires, une absence de plan d'aménagement, des contraintes foncières et une géographie accidentée) ou financières (prix du raccordement), a des impacts non négligeables du point de vue environnemental, social et économique. Au-delà d'une consommation excessive, qui engendre une sollicitation trop importante de la ressource et de l'aide allouée par les communes, le mode de desserte lui-même n'est pas toujours adapté aux ménages ciblés. De ce constat est née *Saqayti*, une solution en phase avec les recommandations de la communauté internationale et de certains membres de la société civile concernant la tarification des services envers les plus démunis pour satisfaire leurs besoins essentiels. Cette innovation permet de conserver un accès gratuit à une eau potable à hauteur des besoins essentiels ciblés vers les populations les plus sensibles, d'améliorer même les conditions de desserte et de limiter les contraintes sur la ressource en eau. Elle permet également d'assurer un meilleur équilibre du service public en réduisant les dépenses des communes et les rendant plus prévisibles, facilitant, *in fine*, les encaissements par les opérateurs dans une logique gagnant – gagnant.

En réduisant les consommations et en garantissant une meilleure affectation des aides allouées à l'alimentation en eau potable pour les plus démunis, *Saqayti* contribue ainsi à une gestion rationnelle et durable et à un partage équitable de la ressource.

Les premiers retours d'expérience montrent que la plupart des objectifs initiaux du système ont été atteints : (i) les consommations ont été réduites en moyenne de près de 75% ; (ii) la gratuité du service pour les plus défavorisés est garantie ; (iii) les conditions de desserte (notamment le temps d'attente et la pénibilité de la corvée d'eau) ont été réduites ; et (iv) les consommateurs acquièrent progressivement des habitudes liées à une alimentation individuelle (telles que la responsabilisation, la conscience de la valeur de l'eau et la conscience du gaspillage).

Comme dans tout système nouveau et en développement, des ajustements sont encore nécessaires pour pérenniser son succès, cependant *Saqayti* apparaît comme un complément novateur à l'offre de branchements sociaux individuels de Veolia Environnement Maroc, permettant de proposer au plus grand nombre une offre complète, conforme aux standards internationaux de qualité de service, et qui répond à un objectif triplement vertueux : économiquement, socialement et environnementalement.

REFERENCES

Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) (2008) Gestion de l'eau : comprendre les enjeux. Disponible sur <www.oecd.org/eau> (consultation en juin 2008).

Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (2006) Au-delà de la pénurie : Pouvoir, pauvreté et crise mondiale de l'eau. Rapport mondial sur le développement humain (HDR) 2006, 552 p.

Roger G. (2003) Les ménages non branchés à Tanger et Tétouan, qui sont-ils ? Où sont-ils ? Rapport interne de Veolia Environnement Maroc dans le cadre du déploiement et de la définition de la politique d'accès aux services, 11 p.

Whittington D. (2006) Pricing Water and Sanitation Services. Human Development Report (HDR) 2006, Occasional paper, Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), 68 p.

CHAPITRE 3

L'EXPERIENCE DU MAROC DANS LE SECTEUR DE L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE EN MILIEU RURAL

N. HOUMY*

Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement
Rabat, Maroc

T. EL AFTI

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE)
Rabat, Maroc

RESUME

Le secteur de l'alimentation en eau potable en milieu rural marocain a accusé des retards importants par rapport au milieu urbain, durant les dernières décennies. Le Programme d'Approvisionnement Groupé en Eau Potable des Populations Rurales (PAGER) a été mis en place en 1995 pour apporter des solutions adéquates et adaptées aux capacités techniques, sociales et économiques des populations rurales. Son objectif était de porter, à moyen terme, le niveau d'accès à l'eau potable du monde rural à un niveau comparable à celui atteint en milieu urbain, avec des moyens simples favorisant l'accès à une eau de qualité et dans des conditions convenables. S'appuyant sur une stratégie de partenariat, basée sur une approche participative, le PAGER a permis d'adapter les projets à la demande sociale, d'amener progressivement les populations, organisées en associations d'usagers et appuyées par les communes rurales, à se prendre en charge, à modifier leur comportement et à jouer un rôle plus actif dans le développement socio-économique de leur communauté. En plus, le PAGER a permis aux services publics de changer leur perception de la conception et de la réalisation de projets d'eau potable. Un grand effort d'adaptation a été opéré au sein des services techniques pour un travail de proximité avec les populations, les élus et les autorités locales. L'exécution du PAGER a permis d'augmenter, de façon remarquable, le taux d'accès à l'eau potable des populations

*Auteur Correspondant : HOUMY Naima – Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement – Rue Hassan Ben-chekroun, Agdal Rabat Maroc
Email : houmy@water.gov.ma / houmynaima@yahoo.fr – Tél. : (+212) 537 68 58 89 - Fax : (+212) 537 77 87 38

rurales, qui est passé de 14% en 1994 à 85% à fin 2007, entraînant dans la foulée une amélioration considérable des conditions de vie des populations rurales bénéficiaires.

Mots clés : Milieu rural ; eau potable ; taux d'accès ; approche participative ; point d'eau aménagé ; borne fontaine.

INTRODUCTION

Les sécheresses répétées durant les années 1980 et 1990 ont eu des répercussions très négatives sur les ressources en eau, mais grâce à la stratégie pertinente de maîtrise de son potentiel hydrique, axée principalement sur la politique de construction des barrages, le Maroc a pu satisfaire dans de bonnes conditions l'alimentation en eau potable et industrielle du milieu urbain. Cependant, l'alimentation en eau potable du milieu rural a connu des retards assez importants. La rareté des ressources en eau et la surexploitation des eaux souterraines ont induit une baisse dans les niveaux d'eau et l'accès à cette ressource est devenu de plus en plus difficile, nécessitant des techniques de forage évoluées et coûteuses et non accessibles par les populations rurales. Le problème de l'approvisionnement en eau potable des populations rurales a commencé à préoccuper sérieusement les autorités marocaines, et c'est en 1987 que le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) a recommandé d'accorder une grande priorité à l'approvisionnement en eau potable du monde rural.

Les études du Schéma Directeur National d'alimentation en eau potable du milieu rural, réalisées entre 1990 et 1994, ont montré que jusqu'en 1994 une grande partie de la population rurale s'approvisionnait en eau à partir de ressources non conformes à la norme nationale de potabilité et seulement 14% de la population rurale était correctement desservie en eau potable. Pour faire face à cette situation, le gouvernement marocain a mis en place, en 1995, le Programme d'Approvisionnement Groupé en Eau Potable des Populations Rurales (PAGER). Le but recherché dans la réalisation du PAGER est la généralisation de l'accès à l'eau potable en milieu rural dans de bonnes conditions, permettant :

- A la femme rurale et à son enfant de ne plus s'occuper des tâches d'approvisionnement en eau ;
- D'augmenter le taux de scolarisation de l'enfant, et en particulier de la petite fille ;
- L'amélioration des conditions sanitaires en milieu rural ;
- La stabilité de la population rurale.

Les systèmes d'alimentation en eau potable réalisés dans le cadre du PAGER sont simples, permettant de réduire les investissements et de faciliter leur gestion et leur entretien. Ces systèmes sont constitués soit de points d'eau aménagés, comprenant un ouvrage de captage d'eau (tels que les puits, le forage, la source ou le métfia¹) et des équipements

¹ Métfia signifie, en langue arabe, citerne de collecte des eaux pluviales.

de pompage et de stockage d'eau, soit de bornes fontaines (BF) par branchement sur les adductions régionales d'eau potable desservant les grandes villes.

Pour garantir la pérennité des projets réalisés, le PAGER s'est appuyé sur une stratégie de partenariat, basée sur une approche participative, ce qui a pu aider les collectivités rurales à réaliser les projets d'eau potable et en assurer une gestion efficace.

L'objet de ce document est de donner un aperçu sur la genèse de ce programme, les conditions de sa mise en œuvre, les résultats atteints, son suivi et son évaluation.

GENESE DU PAGER

Dans le cadre des études du Schéma Directeur National d'alimentation en eau potable des populations rurales, une analyse de la situation de l'approvisionnement en eau potable a été réalisée en se basant sur toutes les données documentaires existantes et sur les résultats d'une enquête détaillée réalisée sur le terrain (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, 1994). Cette analyse a confirmé l'ampleur du problème et la précarité du service de l'eau potable en milieu rural. L'origine principal de cette situation était liée à :

- La structure et la dispersion de l'habitat, qui rendent les coûts des projets élevés et donnent donc une faible rentabilité des investissements par rapport au milieu urbain ;
- Les difficultés de gestion et d'entretien des installations réalisées, qui étaient nombreuses, de petite taille et éparpillées. La gratuité de l'eau produite constituait aussi un obstacle pour leur gestion et leur maintenance par les collectivités locales. En plus, les populations concernées ne s'appropriaient pas ces équipements, elles considéraient que leur gestion et leur entretien étaient du ressort de l'Etat ;
- Des difficultés d'ordre institutionnel : jusqu'en 1994, on relevait la multiplicité des intervenants dans ce secteur sans qu'il y ait une structure qui assure la planification, la coordination, le suivi des opérations et l'encadrement des populations concernées ;
- Des difficultés d'ordre budgétaire, liées à l'insuffisance des ressources financières allouées au secteur.

Cette situation, conjuguée aux effets d'une sécheresse récurrente, a eu des conséquences sur l'amplification de l'exode rural vers les centres urbains et la prolifération des maladies d'origine hydrique, notamment chez les enfants en bas âge, d'autant plus que la femme, à cause des tâches d'approvisionnement en eau, ne disposait pas de suffisamment de temps à consacrer à sa famille. Cette situation avait aussi un impact sur la non-scolarisation des enfants, puisque la tâche quotidienne de l'approvisionnement en eau incombe en grande partie aux femmes et aux enfants.

Les résultats des études du schéma directeur ont permis de tracer les voies pour une amélioration rapide du secteur. Ils ont été approuvés par le CSEC, lors de sa 8^{ème} session, en 1994 (Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, 1994). Les deux recommandations essentielles formulées à l'issue de cette session étaient l'établissement d'un programme permettant la généralisation de l'alimentation en eau potable des populations rurales

dans un délai n'excédant pas 10 années et la définition d'un cadre institutionnel adéquat permettant d'organiser le partenariat entre les collectivités locales, les services de l'Etat et les populations, qui faciliterait un développement rapide du secteur. Ces recommandations ont été traduites, en pratique, par l'élaboration du PAGER.

MISE EN ŒUVRE DU PAGER

Etablissement des programmes d'intervention

Le PAGER a ainsi été mis en place en 1995 pour apporter en matière d'alimentation en eau potable des solutions adéquates et adaptées aux capacités techniques, sociales et économiques des populations rurales. L'objectif de ce programme était de porter le niveau d'accès à l'eau potable du monde rural à un niveau comparable à celui atteint en milieu urbain, mais par des moyens plus simples favorisant l'accès à une eau de qualité et dans des conditions convenables (Figure 1). En effet, il s'agissait de desservir en eau potable un ensemble de 31 000 localités, abritant 12 millions d'habitants, en l'espace d'une dizaine d'années. Le coût d'investissement a été estimé à près de 10 milliards de dirhams marocains (MAD)².



Figure 1. Système d'Alimentation en Eau Potable Rurale (SAEPR) – Douar Lakrouta, Commune rurale Oulad Chbana, Province de Settlat, Maroc

² 1 dirham marocain (MAD) correspond à 0,11527 dollar US (USD), taux de change du 19 février 2009.

Devant ce programme très ambitieux, il a été nécessaire de fixer des priorités. Pour cela, l'enquête partielle, réalisée dans le cadre des études du Schéma Directeur National d'alimentation en eau potable, des populations rurales a été complétée, au début de l'année 1995, par une enquête exhaustive de la quasi-totalité des localités rurales. Les informations collectées ont permis la constitution d'une banque de données regroupant les informations pertinentes relatives aux conditions socio-économiques des localités, à l'état de leur approvisionnement en eau potable et aux besoins en équipements nécessaires à la généralisation de l'accès à l'eau potable en milieu rural.

Ainsi, dans chaque province, le classement des interventions dans les localités rurales a pu être établi sur la base d'une analyse multicritères³, intégrant :

- L'importance de la taille de la population de la localité rurale ;
- L'éloignement des points d'approvisionnement en eau de la localité rurale ;
- La vulnérabilité de la ressource en eau utilisée eu égard au risque de la sécheresse ;
- Les risques de maladies hydriques.

Cette hiérarchisation, validée à l'échelle locale par des commissions provinciales créées spécialement pour le PAGER, présidées par le Gouverneur de la province et comprenant les représentants des collectivités locales, des élus et des services publics techniques concernés, a permis d'arrêter les programmes d'intervention par province.

Schémas directeurs régionaux

Afin d'affiner la connaissance des conditions locales et d'avoir plus de visibilité sur les différentes options de projets à réaliser, des schémas directeurs régionaux pour l'alimentation en eau potable des populations rurales⁴ ont été lancés. Ces études donnent des détails sur les ressources en eau locales à utiliser, les possibilités techniques de réalisation des projets, ainsi que les aspects sociaux liés à la capacité des populations à s'organiser et à payer pour l'eau. Elles présentent également les différents options ou scénarios de projets d'alimentation en eau potable, qui peuvent concerner une localité ou un groupement de localités. Les résultats de ces schémas directeurs ont permis de renforcer le travail des commissions provinciales pour le choix des projets à réaliser.

Cadre organisationnel

Le démarrage du PAGER a nécessité la mise en place d'un cadre organisationnel impliquant plusieurs partenaires :

- Un comité national, présidé par les Secrétaires Généraux des Ministères de l'Intérieur

³ Le tri a été effectué par un programme informatique à la Direction de la Recherche et de la Planification des Eau (DRPE), les programmes d'interventions validés au niveau des provinces constituent les PAGER provinciaux archivés à la DRPE et aux Services Eau (Directions Provinciales de l'Équipement-DPE).

⁴ Les schémas directeurs régionaux englobent des études d'Alimentation en Eau Potable Rurale détaillées au niveau des provinces, ils sont suivis par la DRPE et réalisés soit par les Directions de la Région Hydraulique (DRH) (actuellement les Agences de Bassin Hydraulique-ABH) ou les DPE.

et de l'Équipement, donne les orientations générales, recherche et mobilise les financements, examine et approuve les programmes soumis par les commissions provinciales, évalue l'état d'avancement, et coordonne d'une manière générale les activités du PAGER ;

- Des commissions provinciales, présidées par les Walis⁵ ou les Gouverneurs, et dont le Secrétariat est assuré par les Directions Provinciales de l'Équipement (DPE), qui abritent le service provincial de l'eau, s'occupent de la programmation et du suivi des projets. La réalisation technique des projets est confiée aux DPE et à l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) ;
- Les communes rurales sont les maîtres d'ouvrages et participent à toutes les phases du projet depuis le diagnostic de départ, la discussion des alternatives d'équipement et le choix de la solution optimale jusqu'à la réalisation des ouvrages et la prise en charge de l'exploitation et la gestion des équipements par les associations d'usagers ;
- Des associations d'usagers sont créées par les populations pour participer aux projets et prendre en charge leur exploitation et leur gestion.

Cette organisation a permis de faire des avancées très importantes avec une célérité exceptionnelle, pour l'amélioration du service de l'eau potable en milieu rural. A partir de janvier 2004, la mise en œuvre du PAGER a été confiée à un seul opérateur, qui est l'ONEP. Cet office, qui est le planificateur et le producteur de l'eau potable à l'échelle nationale, représente le principal partenaire des collectivités locales dans le domaine de l'eau potable et de l'assainissement.

Approche participative

Le PAGER a été mis en œuvre selon une approche participative. Le but recherché était de sensibiliser les usagers et de les impliquer activement dans le processus de développement (Figure 2). La démarche consistait à donner aux populations l'opportunité d'exprimer leurs besoins et leur avis sur les propositions techniques et finir par concevoir avec ces populations le projet d'alimentation en eau potable, qui répondrait le mieux à leurs besoins, et qui s'adapterait à leurs capacités financières et organisationnelles. La démarche visait également à faire participer ces populations aux investissements et à les préparer à prendre en charge le fonctionnement et l'entretien des installations mises à leur disposition.

Convention de partenariat

Cette démarche de partenariat était contractuelle, formalisée par une convention passée entre la commune et les populations d'une part et les services de l'Etat d'autre part, définissant les engagements de chacune des parties. Elle définissait également les conditions préalables, qui doivent être remplies avant le démarrage de la réalisation du projet, à savoir la création d'une association d'usagers et la collecte et la mobilisation des contributions financières des populations et des collectivités locales.

⁵ Wali signifie, en langue arabe, préfet.



Figure 2. Séances d'animation des populations rurales

Equipes d'animation

Dans le cadre de la mise en application de cette démarche, les services de l'Etat apportaient toute l'assistance technique nécessaire aux populations et aux communes rurales concernées. Des équipes provinciales d'animation ont ainsi été constituées et formées au sein de chacune des structures territoriales chargées de la mise en œuvre du programme (telles que les DPE) pour effectuer les actions d'animation des populations et de sensibilisation des élus. Ces équipes, composées de trois à quatre techniciens, dont une animatrice, maintenaient avec les populations des contacts permanents pour réussir leur adhésion au projet, concevoir avec elles le projet, les aider à constituer les associations d'usagers et les former à l'exploitation et la gestion ultérieures des installations d'eau potable. Pour faciliter le travail de ces équipes d'animation, un programme de formation leur a été dispensé et des outils de travail ont été élaborés, à savoir des guides et des manuels technico-économiques, des affiches, des dessins plaquettes, des supports audiovisuels de sensibilisation.

Formation des différents intervenants

Un vaste programme de formation, sur les techniques de l'approche participative, a été mené, au profit du personnel chargé de la mise en œuvre du PAGER. Il a concerné aussi bien les techniciens des équipes d'animation que les cadres et chefs des Services Provinciaux de l'Eau.

Pour les responsables, et particulièrement les chefs de service de l'eau chargés de la réalisation des projets, des ateliers de sensibilisation et d'initiation à l'approche participative

et l'animation rurale ont permis à ces cadres, qui étaient auparavant habitués à un travail purement technique, à se familiariser avec les nouvelles méthodes d'animation rurale adoptées par le PAGER et à pouvoir ainsi encadrer et superviser le travail des équipes d'animation.

Des sessions de formation destinée aux équipes d'animation ont permis de les former sur les principes et la démarche du PAGER, les aspects techniques relatifs à la réalisation des systèmes d'alimentation en eau potable en milieu rural et le concept et les outils de l'approche participative. Ces équipes d'animation formées ont joué un rôle essentiel dans la réussite des projets du PAGER.

Les populations ont également bénéficié de ces formations ; des sessions spéciales ont été organisées au profit des associations d'usagers afin de les préparer à la prise en charge du fonctionnement et de l'entretien des installations. Des voyages d'études et d'échange d'expériences ont aussi été organisés entre les associations nouvellement créées et celles disposant d'une longue expérience dans la gestion de projets similaires.

Supports et outils de communication utilisés

Pour faciliter le travail des équipes d'animation, plusieurs supports et outils de travail ont été élaborés. La conception de ces outils, selon les groupes cibles, a été réalisée de la manière suivante :

1. Pour les décideurs, les responsables, les autorités et les élus locaux, des brochures en arabe et en français leur ont été destinées, présentant le PAGER, l'approche adoptée pour sa mise en œuvre et la procédure à suivre pour en bénéficier. Un film vidéo sur le PAGER a également été conçu, illustrant, de façon réelle, l'approche participative grâce à des prises de vues et des interviews réels, effectués lors des interventions des équipes provinciales d'animation du PAGER.
2. Pour les équipes d'animation provinciales, et afin de leur permettre de travailler efficacement avec les populations, un ensemble de documents didactiques a été conçu et mis à leur disposition :
 - Guide de l'animateur du PAGER (Direction Générale de l'Hydraulique et Direction Générale des Collectivités Locales, 2003a), conçu pour aider les équipes d'animation en leur fournissant les éléments de base nécessaires pour entreprendre et suivre, selon une approche participative, tout le cycle de réalisation d'un projet, depuis l'inscription au budget jusqu'au suivi et à l'évaluation de leur fonctionnement et de leur gestion ;
 - Guide technique relatif aux ouvrages de captage (tels que les puits, les forages et les sources), de pompage, de stockage et de distribution de l'eau (Direction Générale de l'Hydraulique et Direction Générale des Collectivités Locales, 2003b) ;
 - Guide technique relatif aux maladies d'origine hydrique ;
 - Guide technique relatif à la Méthode Active de Recherche et Planification Participative (MARPP) ;

- Manuel de vulgarisation technique des systèmes de pompage d'eau en milieu rural (Direction Générale de l'Hydraulique et Direction Générale des Collectivités Locales, 2005a) ;
 - Guide de création et de gestion des associations d'usagers d'eau potable (Direction Générale de l'Hydraulique et Direction Générale des Collectivités Locales, 2005b) ;
 - Guide du calcul du coût du mètre cube d'eau et tarification.
3. Pour les populations, afin de les sensibiliser et les inciter à participer aux décisions, à formuler leurs besoins, leurs priorités et leurs idées, une boîte à images a été conçue (Figure 3). Elle était constituée d'un ensemble de 14 planches de dessins commentés en arabe dialectal, qui expliquaient les thèmes du guide de l'animateur dans un style de communication visuelle, facile à comprendre par les populations. Il a aussi été distribué aux populations des affiches sous forme de planches de dessins, commentées en arabe dialectal, traitant de la relation eau-hygiène-santé et destinées aux enfants et aux femmes.

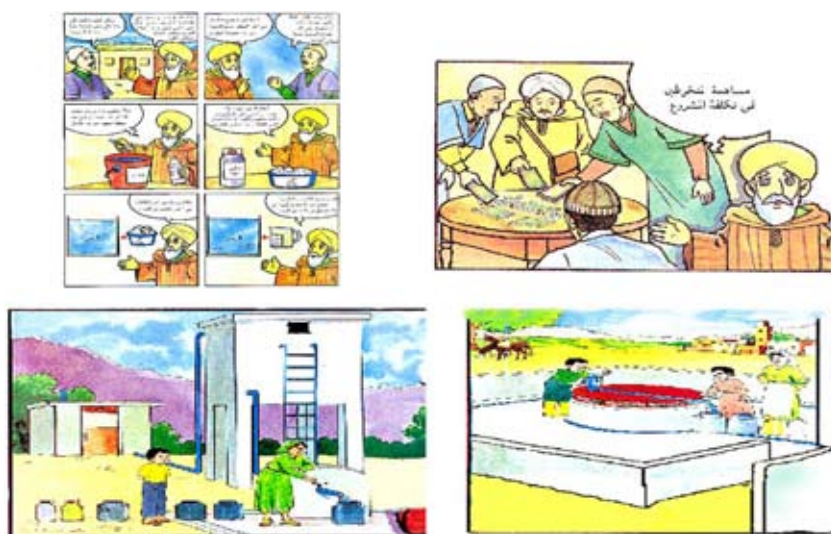


Figure 3. Extrait de la boîte à image utilisée pour sensibiliser la population

Conception technique des projets PAGER

Le PAGER a opté pour des solutions adaptées au contexte des localités rurales par la réalisation de systèmes d'alimentation en eau potable simples constitués par des BF, soit à partir de points d'eau aménagés, soit de piquages sur des conduites régionales de desserte en eau des villes et des centres importants.

Les systèmes sont composés généralement, pour les points d'eau aménagés, d'ouvrages de captage d'eau (tels que les puits, les forages, les sources ou les métfias) (Figure 4),

d'équipements d'exhaure (tels que les pompes thermiques, les pompes solaires ou les pompes électriques) (Figure 5) et d'ouvrages de stockage et de distribution d'eau (tels que les châteaux d'eau, les conduites, les abreuvoirs et les BF) (Figures 6 et 7).



Figure 4. Travaux de forage – Azrou, Province d'Ifrane, Maroc



Figure 5. Pompage solaire – Ksar bouadil, Commune rurale M'cissi, Province d'Errachidia, Maroc



Figure 6. Borne fontaine – Douar Darkaoua, Commune rurale Riah, Province de Settât, Maroc

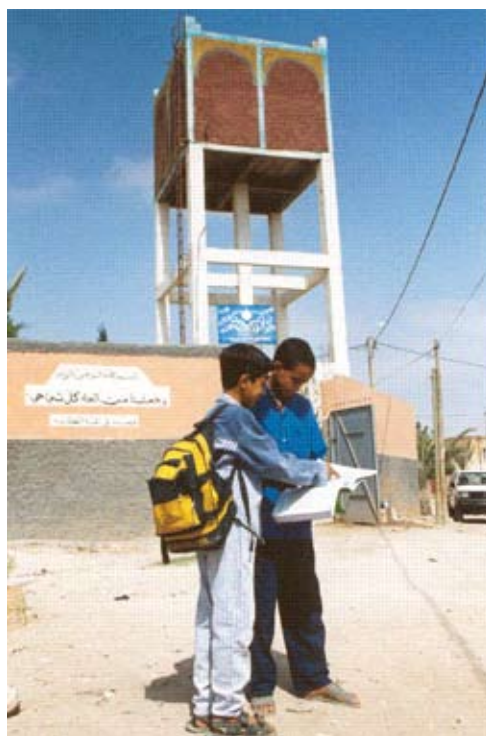


Figure 7. Château d'eau – Douar Ait Ouagmar, Province Chtouka Ait Baha, Maroc

Pour les zones dépourvues de ressources en eau, des BF sont réalisées, par branchement par conduites, sur les adductions d'eau régionales desservant les villes urbaines et les gros centres.

Ces systèmes sont néanmoins évolutifs en branchements individuels. L'objectif initial était de privilégier d'abord l'accès à l'eau potable à la majorité des citoyens ruraux. Ils peuvent entreprendre, par la suite et sous certaines conditions et avec l'appui technique de l'administration, les aménagements nécessaires pour disposer d'une desserte individuelle. En particulier, l'administration s'assurera du respect des normes pour éviter toute nuisance à l'environnement naturel, et notamment aux nappes d'eau souterraines. La mise en place d'un système d'assainissement individuel ou collectif adéquat pour évacuer les eaux représente une condition nécessaire pour la desserte par branchements individuels.

Financement du PAGER

Les projets d'eau potable du PAGER sont financés par les trois parties impliquées, à savoir l'Etat à raison de 80%, les communes à raison de 15% et les associations d'usagers à 5%.

Pour la contribution de l'Etat, en plus du budget général de l'Etat, une partie provient des prêts concessionnels et des dons mobilisés par l'Etat et le reste provient d'un fonds de solidarité nationale, alimenté par une surtaxe instaurée sur les ventes de l'eau aux populations urbaines.

La participation symbolique des populations bénéficiaires, fixée à 5%, représente un engagement et une garantie pour l'adhésion des populations aux projets et ainsi favoriser les conditions de leur durabilité.

Pour faciliter la budgétisation des projets et améliorer la célérité de la réponse aux attentes des populations, un Compte d'Affectation Spéciale (CAS), réservé au PAGER, a été créé dès le démarrage du programme.

Le PAGER a connu un grand succès auprès des bailleurs de fonds, grâce à l'effort qui a été déployé pour faire connaître ce programme à l'échelle internationale. Trois tables rondes avec des bailleurs de fonds ont été organisées, respectivement, à Rabat en fin 1995, à New York en avril 1996 et à Rome en novembre 1997 et ont été à l'origine de la participation fructueuse au financement du PAGER de plusieurs bailleurs de fonds.

RESULTATS DES REALISATIONS

Les réalisations du PAGER ont permis d'augmenter le taux d'accès à l'eau potable de 14% en 1994 (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, 1994 ; Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, 1994), à 40% en 2000, 61% en 2004 (Office National de l'Eau Potable, 2005) et près de 85% en 2007 (Office National de l'Eau Potable, 2008) (Figure 8). Des disparités existent néanmoins entre les régions (Figure 9). En effet, ce taux peut varier, selon les provinces, de 50 à plus de 90%. Les réalisations effectuées dans

le cadre de l'approvisionnement en eau potable des populations rurales ont permis l'approvisionnement de 11,7 millions d'habitants en 2007.

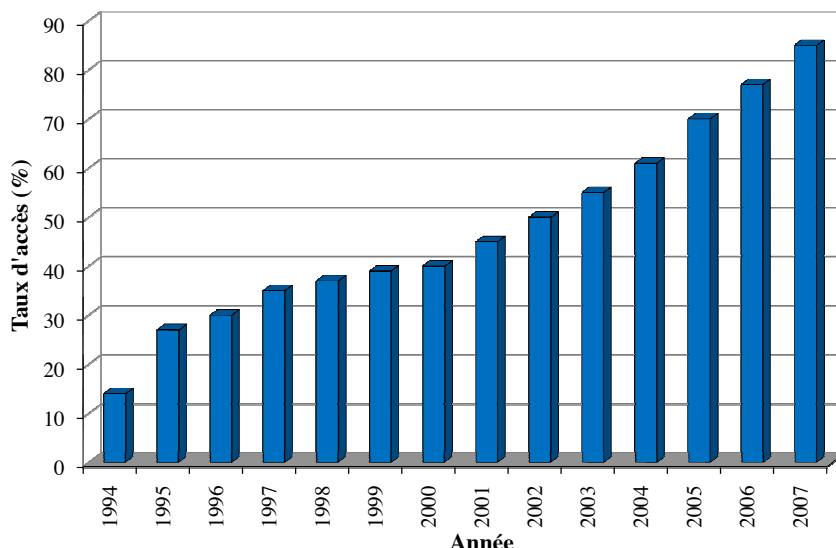


Figure 8. Evolution du taux d'accès à l'eau potable en milieu rural (Source : Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et Office National de l'Eau Potable)

SUIVI EVALUATION

Durant son exécution, le PAGER a fait l'objet de plusieurs évaluations, notamment par les services de l'Etat et les organismes internationaux qui participaient au financement des projets :

- En février 2002, une table ronde d'évaluation à mi-parcours du PAGER a été organisée regroupant tous les intervenants, tels que l'Etat (les services centraux et territoriaux), les bailleurs de fonds, les représentants des collectivités locales, les associations d'usagers d'eau, et les Organisations Non Gouvernementales (ONG). Cette manifestation a été l'occasion d'évaluer les progrès réalisés en matière d'accès à l'eau potable pour les populations rurales et d'analyser les difficultés rencontrées pour la réalisation des projets (Direction Générale de l'Hydraulique, 2001). Les recommandations ressorties de cette table ronde ont permis de dresser un plan d'action, ce qui a pu consolider les acquis et donner un nouvel élan à la mise en œuvre du PAGER (Direction Générale de l'Hydraulique, 2002) ;
- En janvier 2004, date à laquelle l'ONEP a été désigné comme opérateur national du PAGER, une étude de diagnostic du secteur a été élaborée par une équipe d'experts (Office

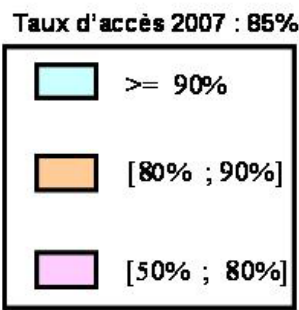


Figure 9. Carte de répartition du taux d'accès à l'eau potable en milieu rural par province (Source : Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau)

National de l'Eau Potable, 2005). Cette étude a été effectuée de façon participative avec les différents intervenants du secteur, et s'est basée sur un diagnostic se référant à des documents bibliographiques et à des enquêtes de terrain. Les enquêtes ont concerné, de façon exhaustive, les aspects institutionnels, de gestion et de maintenance à travers des questionnaires adressés aux communes rurales (1 298 communes rurales), ainsi que les aspects sanitaires, de contrôle et les suivis de la qualité de l'eau (questionnaires adressés aux services du Ministère de la Santé). Les enquêtes spécifiques d'évaluation des projets ont porté sur un échantillon de 1000 localités et ont concerné les aspects techniques (tels que la conception, la réalisation des travaux, le fonctionnement, l'entretien et la maintenance des systèmes et la qualité de l'eau), sociaux et institutionnels. Selon les résultats de cette étude, la population rurale desservie a été évaluée à 8,2 millions d'habitants, soit un taux d'accès national de 61% à fin 2004. Mais le plus important est qu'elle a permis de renforcer le processus de réflexion entamé depuis le démarrage du PAGER, pour ajuster la stratégie et la planification dans ce domaine. Ces évaluations ont permis de mesurer la pertinence, l'efficacité et l'efficience des projets. Des appréciations ont été données sur leur conformité au souhait des populations, l'aspect associatif, la génération d'autres projets. Une évaluation des impacts des projets a été donnée concernant la scolarisation des enfants, l'emploi du temps des femmes, l'hygiène du milieu et l'hygiène corporelle ;

- La plus récente évaluation a été faite à travers l'atelier tenu en février 2008 à Taroudant sur l'approvisionnement en eau potable des populations rurales (Office National de l'Eau Potable et Banque Étatique Allemande, 2008), regroupant les différents intervenants du PAGER (l'Etat et les bailleurs de fonds). Cet atelier a été l'occasion d'échanger les expériences et les informations sur les divers programmes, approches et actions entrepris et d'évaluer les chemins parcourus et les efforts à consacrer pour atteindre les objectifs recherchés avec la plus grande harmonie. Les recommandations de l'atelier se sont axées essentiellement sur la stratégie à adopter pour la pérennisation des projets et du service rendu, y compris les aspects financiers et de recouvrement des coûts. De plus, les questions de tarification et la prise en considération des populations démunies ont été soulignées.

PERRINISATION DES SYSTEMES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE DES POPULATIONS RURALES

L'adoption de l'approche participative a instauré une bonne dynamique de participation de la population au projet PAGER. Les associations d'usagers sont sensibilisées sur les bonnes pratiques techniques et d'utilisation des équipements et de l'eau. Toutefois, il y a des contraintes liées à la sécheresse qui provoque des tarissements des points d'eau réalisés et des problèmes liés aux moyens financiers des associations qui risquent de mettre en péril les efforts de tous les intervenants dans ce domaine. Devant ces problèmes déjà ressentis par la population, les responsables des réalisations des projets et les bailleurs de

fonds ont procédé à des tentatives de solutions qui sont entre autres :

- La création en 2006, par le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, du centre d'assistance d'Agadir dans le domaine de l'eau, qui rend des services non négligeables pour les populations, surtout pendant l'été ;
- L'établissement de concessions entre l'ONEP et le privé, pour assurer la durabilité du service de l'eau potable pour des centres et des localités rurales.

Actuellement, des réflexions sont en cours pour asseoir la solution optimale à la pérennisation des systèmes d'approvisionnement en eau potable. Les axes de cette réflexion concernent :

- La protection des ressources en eau, qui constitue une condition cruciale pour la pérennisation de l'alimentation en eau potable en milieu rural. En effet, les sécheresses répétées et le développement socioéconomique, que connaît le Maroc, ont poussé vers la surexploitation des eaux souterraines. Des réflexions sont en cours pour protéger ces eaux et pour trouver des solutions de substitution capable d'assurer, dans de bonnes conditions, le service de l'alimentation en eau potable en milieu rural ;
- La pérennisation des équipements et la gestion de l'alimentation en eau potable en milieu rural : le centre d'assistance d'Agadir dans le domaine de l'eau, bien qu'il joue un rôle important dans le maintien en service des équipements de quelques ouvrages dans la zone d'Agadir, pose le problème de gratuité du service, ce qui peut entraîner un problème d'équité entre les associations. Ainsi, la gratuité est contre le principe de la pérennisation surtout pour les associations qui ont les moyens financiers.

L'idée ressortie de ces réflexions est de réaliser un projet d'appui aux gestionnaires locaux des systèmes d'alimentation en eau potable en milieu rural. Ce projet comportera une étude à l'échelle nationale, visant à mettre en place un système d'appui aux gestionnaires locaux, consistant à la fois en un plan d'appui et une structure d'appui. A l'issue de cette étude, les tentatives actuelles seront ajustées pour assurer la pérennisation des systèmes d'alimentation en eau potable en milieu rural.

CONCLUSION

Le PAGER a permis d'augmenter de façon remarquable le taux d'accès à l'eau potable des populations rurales au Maroc, qui est passé de 14% en 1994 à près de 85% à fin 2007, entraînant une amélioration considérable des conditions de vie des populations rurales ayant bénéficié des projets PAGER.

Le PAGER a également permis d'instaurer, parmi les populations, une dynamique de participation aux projets, bénéfique au développement rural d'une manière générale. Les projets d'alimentation en eau potable ont ainsi constitué des fers de lance pour d'autres projets de développement rural et permis l'essor de dizaines de petites entreprises dans les diverses branches d'activité (telles que les puits, le génie civil et les équipements en moyen

de pompage). L'ingénierie nationale a été impliquée dans toutes les études générales et de conception des projets du PAGER. Plus de 500 000 journées de travail ont été créées chaque année. De plus, ce programme a connu un véritable succès auprès des populations, de même qu'un engouement particulier auprès des bailleurs de fonds.

C'est ainsi que le Maroc a pu gagner le défi sur la voix de la généralisation de l'accès à l'eau potable, mais un effort supplémentaire reste à être déployé pour renforcer le travail de pérennisation des systèmes d'alimentation en eau potable réalisés. De même, l'amélioration des conditions de vie des populations rurales nécessite davantage d'efforts dans d'autres domaines liés à l'eau, notamment l'assainissement, le renforcement de la mobilisation des ressources locales en eau et la protection contre les inondations.

REFERENCES

Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) (1994) Plan directeur de développement de l'Approvisionnement en eau potable dans le milieu rural (AEPMR). 8^{ème} session du CSEC, 31 janvier et 1^{er} février 1994, Rabat, Maroc.

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE) (1994) Etudes du Schéma directeur national d'approvisionnement en eau potable des populations rurales – Mission I, II et III. Maroc.

Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) (2001) Evaluation à mi-parcours des projets financés par la Banque Mondiale. Rapport de synthèse, 43 p.

Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) (2002) Rapport de synthèse de la table ronde d'évaluation à mi-parcours du PAGER, 60 p.

Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) et Direction Générale des Collectivités Locales (DGCL) (2003a) Guide de l'animateur. Projet « Appui à la mise en œuvre du PAGER » – TCP/MOR/6613 – Financé par Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 143 p.

Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) et Direction Générale des Collectivités Locales (DGCL) (2003b) Dossier de référence, Ouvrage de captage et de distribution de l'eau. Projet « Appui à la mise en œuvre du PAGER » – TCP/MOR/6613 – Financé par Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 101 p.

Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) et Direction Générale des Collectivités Locales (DGCL) (2005a) Manuel de vulgarisation technique des systèmes de pompage d'eau en milieu rural. Projet MOR/96/005, Financé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (Avec l'appui d'Oxfam Québec), 113 p.

Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) et Direction Générale des Collectivités Locales (DGCL) (2005b) Guide de création et de gestion des associations d'usagers de l'eau potable. Projet MOR/96/005, Financé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (Avec l'appui d'Oxfam Québec), 131 p. (en Arabe).

Office National de l'Eau Potable (ONEP) (2005) Etude de diagnostic de l'Alimentation en Eau Potable du monde rural au Maroc. Rapport de synthèse, 36 p.

Office National de l'Eau Potable (ONEP) (2008) Rapport du Conseil d'Administration, juillet 2008.

Office National de l'Eau Potable (ONEP) et Banque Étatique Allemande (KFW) (2008) Rapport de synthèse de l'atelier sur l'alimentation en eau potable du milieu rural. Atelier du 27 au 29 février 2008, Taroudant, Maroc, p. 18.

CHAPITRE 4

LOI 10-95 SUR L'EAU : ACQUIS ET PERSPECTIVES

M. MAKBOUL*

Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement
Rabat, Maroc

RESUME

Les textes relatifs aux ressources en eau au Maroc ont été adaptés dans les années 1920. Ne répondant plus aux exigences d'une gestion moderne et rationnelle de ces ressources, ils ont été abrogés et remplacés en 1995 par la loi 10-95 sur l'eau. Outre la refonte du cadre juridique et institutionnel des ressources en eau, cette loi vise la rationalisation de l'utilisation de l'eau, sa valorisation et sa protection contre la pollution. La mise en application de la loi 10-95 sur l'eau a permis la réalisation d'importants acquis. Ils concernent l'apurement de la situation juridique du domaine public, la mise en place d'un cadre institutionnel permettant aux intervenants de se concerter et de participer à la prise de décision, la consécration de la planification comme moyen de gestion des ressources en eau tant au niveau national qu'au niveau des bassins hydrauliques, la mise en œuvre du principe préleveur-payeur et pollueur-payeur, la protection des ressources en eau contre la surexploitation et la pollution, la fixation des conditions de réutilisation des eaux usées, et la mise en place de dispositions permettant la gestion des phénomènes extrêmes et la lutte contre le gaspillage de l'eau. Malgré l'importance des acquis en matière de modernisation de la gestion des ressources en eau réalisés grâce à la mise en œuvre des outils juridiques et institutionnel de la loi 10-95 sur l'eau, un travail de consolidation et de renforcement desdits acquis est en cours. Ainsi, il est prévu, à court et à moyen terme, de publier ce qui reste des textes d'application de la loi sur l'eau, de renforcer le contrôle lié au respect de ses dispositions et de compléter cette loi par les dispositions relatives, notamment, au rejet des eaux usées en mer et au dessalement.

Mots clés : Loi ; eau ; acquis ; réforme ; modernisation ; gestion ; consolidation.

* Auteur Correspondant : MAKBOUL Mohamed – Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE) – Rue Hassan Ben Chekroun Agdal Rabat Maroc
Email : makboul@water.gov.ma – Tél. : (+212) 537 77 90 19 – Fax : (+212) 537 77 60 81

INTRODUCTION

Le secteur de l'eau au Maroc a vécu un grand jour. C'était le 15 juillet 1995 lorsque les représentants de la Nation (le parlement) ont adopté la loi 10-95 sur l'eau. L'événement est tellement intéressant pour ce secteur, non seulement parce que ce texte novateur refond un dispositif législatif et réglementaire, qui remonte aux débuts du XX^{ème} siècle et qui se présente sous forme de textes épars ne pouvant plus répondre aux besoins de développement socio-économique du pays, mais aussi parce que la loi sur l'eau a insufflé à la politique de l'eau un nouveau souffle et a transformé le secteur de l'eau en un vaste chantier de réformes.

Au vu des changements profonds qu'a connus le Maroc sur les plans sociaux, économiques, organisationnels, et de la situation embarrassante du secteur de l'eau marquée, notamment, par la recrudescence de la sécheresse, l'accroissement de la demande en eau et la pollution de l'eau, l'adoption de la loi 10-95 sur l'eau est en elle-même un acquis d'une grande importance.

Tout d'abord, c'est une loi dont le processus d'élaboration et de finalisation a pris beaucoup de temps. Les enjeux et l'ampleur de la réforme n'ont permis d'arriver à un consensus sur une version définitive du projet de loi qu'au bout de longues discussions pas toujours faciles.

Ensuite, l'adoption à l'unanimité et la promulgation de cette loi traduisent une volonté de la part des institutions politiques du Maroc à aller de l'avant dans la mise en œuvre de la réforme du secteur de l'eau, dont la loi 10-95 sur l'eau constitue l'épine dorsale.

Au lendemain de la publication de la loi sur l'eau au Bulletin Officiel (Bulletin Officiel, 1995), les pouvoirs publics se sont employés à mettre en œuvre les principes et les objectifs de cette loi ce qui, après 13 ans d'application, a permis de réaliser un certain nombre d'acquis.

L'objectif de cet article est de présenter les principaux acquis ainsi que les perspectives d'avenir de la loi marocaine 10-95 sur l'eau.

ACQUIS

L'apurement de la situation juridique du Domaine Public Hydraulique (DPH)

Le domaine public de l'État a été défini par le dahir du 1er juillet 1914 (Bulletin Officiel, 1914). Ce texte ne distinguait pas le Domaine Public Hydraulique (DPH) des autres domaines, tels que le domaine public maritime, portuaire ou routier. C'est la loi 10-95 sur l'eau qui a précisé la consistance du DPH et affirmé solennellement, dès son premier article, que « l'eau est un bien public ». Ainsi, à l'exception des eaux sur lesquelles des droits acquis ont été reconnus et les eaux de pluie accumulées artificiellement sur les propriétés privées, toutes les eaux, quelles soient superficielles ou souterraines, font

partie du DPH. Font aussi partie de ce DPH l'assiette foncière de ces eaux ainsi que les ouvrages hydrauliques.

Deux instruments juridiques ont été prévus par la loi 10-95 sur l'eau pour permettre au gestionnaire du DPH de concrétiser sur le terrain cette distinction. Il s'agit de la reconnaissance des droits acquis sur l'eau et la délimitation.

La reconnaissance, comme moyen de préservation des droits acquis sur l'eau, était prévue par le dahir du 1^{er} août 1925 sur le régime des eaux (Bulletin Officiel, 1925). Avec la loi 10-95 sur l'eau, la reconnaissance est devenue un outil pour mettre fin aux revendications interminables de droits sur l'eau, qui gênent la mise en place d'une gestion planifiée et d'un contrôle efficace de l'utilisation des ressources en eau. Ainsi, la loi 10-95 sur l'eau oblige toute personne physique ou morale qui prétend avoir des droits de propriété, d'usage ou d'usufruit sur le DPH de faire valoir ces droits dans un délai de cinq ans, à compter de la date de publication de cette loi. Aucune suite favorable ne peut être réservée aux demandes de reconnaissance si elles ne sont pas accompagnées de pièces justifiant l'acquisition desdits droits avant la publication du dahir du 1^{er} août 1925 sur le régime des eaux ou pour les zones où ce texte n'est pas applicable à la date de récupération de ces dernières par le Royaume.

De plus, afin de lutter contre les pratiques malsaines en matière d'exploitation des droits reconnus sur l'eau, un délai de cinq ans, à compter de la date de publication de la loi 10-95 sur l'eau, a été fixé aux titulaires de droits sur l'eau qui n'ont pas de fonds agricoles pour céder ces droits à des propriétaires de fonds agricoles. Si, au terme de ce délai, cette cession n'a pas eu lieu, l'Etat procède à l'expropriation desdits droits.

La délimitation du DPH figurait également parmi les dispositions du dahir du 1^{er} août 1925 sur le régime des eaux (Bulletin Officiel, 1925). En se basant sur le niveau atteint par les eaux avant le débordement, cette délimitation ne permettait pas de fixer les limites des berges des cours d'eau avec précision, et par conséquent, les limites réelles du DPH. Pour dépasser les difficultés de mise en œuvre de cette méthode, le décret n° 2-97-489 du 4 février 1998 portant application de l'article 5 de la loi 10-95 sur l'eau a mis en place une nouvelle méthode plus pratique (Bulletin Officiel, 1998a). Elle consiste en la délimitation des berges des cours d'eau par le niveau atteint par les eaux de crue à une certaine fréquence. Cette dernière est fixée à la suite d'une étude hydrologique et hydraulique. La fréquence retenue par le projet de délimitation d'un cours d'eau fait l'objet de concertations avec les administrations concernées avant d'être approuvée par arrêté du Ministre Chargé de l'Eau et publiée au Bulletin Officiel.

Grâce à la mise en application des dispositions de la loi 10-95 sur l'eau, relatives à la reconnaissance des droits sur l'eau et à la délimitation du DPH, d'importants progrès ont été réalisés sur la voie de l'apurement de la situation juridique des biens relevant de ce domaine. Si ces progrès sont notables, il reste, néanmoins, à surmonter des difficultés liées, notamment, à l'insuffisance des moyens humains et financiers qui retardent cet apurement.

L'institutionnalisation de l'approche participative

Le volet institutionnel occupe une place très importante dans la loi 10-95 sur l'eau. L'intérêt accordé aux aspects institutionnels de la gestion des ressources en eau traduit la nouvelle vision adoptée par les pouvoirs publics pour faire face aux défis auxquels le secteur de l'eau est confronté. L'Etat, les établissements publics, les collectivités locales, les collectivités ethniques, les associations des usagers de l'eau, les associations professionnelles et scientifiques et les établissements d'enseignement supérieur sont tous concernés par la problématique de l'eau et doivent, par conséquent, unir leurs efforts pour que le pays puisse relever le défi de la satisfaction des besoins en eau des générations actuelles et futures. Des institutions de dialogue et de concertation, qui permettent de faire converger ces efforts, ont été mises en place en vertu de la loi 10-95 sur l'eau. Il s'agit du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC), des Agences de Bassin Hydraulique (ABH) et des Commissions Préfectorales et Provinciales de l'Eau (CPPE).

Le CSEC est une institution nationale. Il existait déjà lorsque la loi 10-95 sur l'eau a été publiée en 1995. Il a tenu, depuis sa création en 1981, huit réunions pour débattre de sujets aussi importants que variés, tels que les plans directeurs d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIREs), la pollution de l'eau, l'économie de l'eau ou la loi 10-95 sur l'eau.

La loi 10-95 sur l'eau a consolidé cet acquis que constitue le CSEC en lui conférant une base légale et en renforçant ses attributions et sa composition. Elle l'a chargé de formuler les orientations générales de la politique nationale de l'eau et du climat. Ainsi, il doit examiner et donner son avis sur la stratégie nationale en matière de connaissance du climat et de son impact sur les ressources en eau, le plan national de l'eau (PNE) et les PDAIREs, en accordant une importance particulière à la répartition de l'eau entre les secteurs usagers, aux transferts d'eau et aux dispositions de valorisation et de protection des ressources en eau.

Concernant la composition de ce conseil, la loi 10-95 sur l'eau prévoit qu'il soit constitué :

- Pour moitié, de représentants de l'Etat et des établissements publics placés sous sa tutelle intervenant dans le secteur de l'eau pour produire l'eau potable (EP), l'eau d'irrigation et l'hydroélectricité ;
- Pour moitié, de représentants des usagers de l'eau, des assemblées préfectorales ou provinciales, des établissements d'enseignement supérieur et de la recherche scientifique et de l'ingénierie nationale.

D'après le décret n° 2-96-536 du 20 novembre 1996 (Bulletin Officiel, 1996), relatif à la composition et au fonctionnement du CSEC, le nombre total des membres s'élève à 140. Les réunions du CSEC sont tenues sous le haut patronage de SA MAJESTE LE ROI et la présidence effective du Premier Ministre. Le CSEC dispose d'un comité permanent chargé de préparer l'ordre du jour du conseil et le suivi de la mise en œuvre de ses recommandations.

S'agissant des ABH, il y a lieu d'indiquer que leur création par la loi 10-95 sur l'eau s'inscrit dans le cadre de la politique de décentralisation et de déconcentration administrative engagée par les pouvoirs publics. En matière d'administration de l'eau, le législateur marocain considère que l'unité géographique, le bassin hydraulique, est l'espace naturel le mieux adapté pour appréhender et résoudre les problèmes de gestion des ressources en eau, de réaliser une solidarité régionale effective entre les usagers et d'associer ces derniers à toute prise de décision relative à l'eau.

Les ABH sont des établissements publics dotés de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Elles ont pour mission de gérer, de planifier et de développer les ressources en eau au niveau des bassins hydrauliques. Elles peuvent accorder des aides financières et l'assistance technique à toute personne physique ou morale engageant des investissements d'aménagement ou de protection des ressources en eau.

Les ABH sont administrées par des conseils d'administration, qui sont composés de représentants de l'Etat, des établissements publics placés sous sa tutelle et produisant de l'EP, de l'eau d'irrigation ou de l'hydroélectricité et des chambres d'agriculture, de commerce et d'industrie, des assemblées préfectorales ou provinciales, des collectivités ethniques et des associations d'usagers. C'est grâce à cette catégorie de membres que les conseils d'administration des ABH ne constituent pas de simples comités interdépartementaux et ne ressemblent donc pas aux conseils d'administration des autres établissements publics.

Sept ABH sont opérationnelles : il s'agit de l'ABH de l'Oum Er-Rbia qui a vu le jour en 1999 et des ABH de la Moulouya, du Loukkos, du Sebou, du Bou Regreg et de la Chaouia, du Tensift et du Souss-massa, créés en 2000.

Pour ce qui est des CPPE, leur création par la loi 10-95 sur l'eau avait pour objectif de permettre aux institutions locales de jouer un rôle plus important dans la gestion des ressources en eau. A cet effet, les CPPE participent à l'établissement des PAIDREs que doivent élaborer les ABH, encourageant l'action des communes en matière d'économie d'eau et de protection des ressources en eau contre la pollution. De plus, les CPPE entreprennent des actions de sensibilisation du public à la protection et la préservation des ressources en eau.

La CPPE est présidée par le Gouverneur de la préfecture ou de la province et composée de 13 membres, dont des représentants de l'Etat, des établissements publics chargés de produire de l'EP, de l'eau d'irrigation et de l'énergie hydroélectrique (tels que l'Office National Eau Potable – ONEP, l'Office National de l'Electricité – ONE et les Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole – ORMVA), le président de l'assemblée préfectorale ou provinciale, le président de la chambre de l'agriculture, le président de la chambre du commerce et de l'industrie, trois représentants des conseils communaux et un représentant des collectivités ethniques. Toutes les provinces et préfectures ont mis en place leurs commissions.

Il convient de souligner, en dernier lieu, que vu l'importance du rôle que joue l'autorité gouvernementale chargée de l'eau au niveau de ces institutions (elle assure la présidence du comité permanent et du secrétariat du CSEC, exerce la tutelle sur les ABH, et assure le secrétariat des CPPE), les compétences de cette autorité, notamment en matière de mobilisation des ressources en eau, d'établissement du PNE, de délimitation du DPH, et afin de réunir toutes les conditions nécessaires à la mise en œuvre de la réforme du secteur de l'eau initiée par la loi 10-95 sur l'eau, un Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau a été créé en 2002.

La planification de l'utilisation des ressources en eau

En consacrant une partie de ses dispositions à la planification de l'utilisation des ressources en eau (articles 15 à 19), la loi 10-95 sur l'eau a comblé un vide juridique concernant un aspect essentiel de la gestion de l'eau. Elle vise la mise en place d'une planification concertée, cohérente et souple tant à l'échelon du bassin hydraulique qu'à l'échelon national. A cet effet, elle prévoit deux documents de planification : le PNE et le PDAIRE.

Le PNE est établi pour une durée de 20 ans par le Ministère chargé de l'Eau sur la base des résultats et des conclusions des PDAIREs. Il a comme objectifs de fixer les priorités nationales en matière de mobilisation et d'utilisation des ressources en eau, d'établir le programme et l'échéance de réalisation des aménagements hydrauliques à l'échelle nationale, de définir les mesures d'accompagnement d'ordre, notamment économique, financier, réglementaire, organisationnel, et de sensibiliser et d'éduquer les populations, nécessaires à sa mise en œuvre.

Le PDAIRE, quant à lui, est établi pour chaque bassin ou ensemble de bassins par l'ABH pour une durée de 20 ans. Son objectif principal est la gestion des ressources en eau du bassin, incluant les eaux d'estuaires, en vue d'assurer, quantitativement et qualitativement, les besoins en eau, présents et futurs, des divers usagers des eaux du bassin. A cet effet, il doit définir, entre autre, l'évaluation et l'évolution quantitative et qualitative des ressources hydrauliques et des besoins dans le bassin, le plan de partage des eaux entre les secteurs usagers et les opérations nécessaires à la mobilisation, à la protection et à la restauration des ressources en eau.

Le PNE et le PDAIRE sont approuvés par décret après avis du CSEC. Mais avant d'arriver à ce stade, ces documents doivent être élaborés en concertation avec les parties concernées. A ce propos, le décret n° 2-05-1534 du 24 novembre 2005 relatif aux conditions et modalités d'élaboration et de révision des PDAIRE et du PNE, stipule que des réunions (Bulletin Officiel, 2007), présidées par les Walis¹ des régions et auxquelles participent les Gouverneurs des préfectures et des provinces, les représentants des conseils régionaux, provinciaux et préfectoraux, des associations des usagers de l'eau, des associations professionnelles et des services régionaux et provinciaux de l'administration et des

¹ Wali signifie, en langue arabe, préfet.

établissements publics concernés, sont organisées, à l'initiative de l'ABH durant toute la phase préparatoire du PDAIRE en vue :

- D'examiner les termes de référence et la méthodologie de réalisation des études nécessaires à la préparation du plan ;
- De suivre la réalisation des études ;
- D'examiner les résultats des différentes phases d'élaboration du plan ;
- De prendre en compte les objectifs et les orientations des différents plans sectoriels.

Après cette phase, le PDAIRE est soumis à l'avis des Ministères chargés de l'Intérieur, des Finances, de l'Agriculture, de la Santé, de l'Energie et des Mines, du Commerce et de l'Industrie, de l'Artisanat, de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, ainsi qu'à l'examen du conseil d'administration de l'agence.

Ce décret prévoit en ce qui concerne le PNE que ce dernier doit faire l'objet de concertations dans le cadre du Comité Permanent du CSEC. Ce comité, composé de représentants des autorités gouvernementales membres du CSEC, d'un représentant des ABH et de représentants de l'ONEP, de l'ONE et des ORMVA, est chargé, entre autres, de l'examen et de la validation des termes de référence de l'étude du PNE, de l'organisation, au terme de chaque phase de l'étude, des réunions de concertation, de veiller au respect des articulations entre les actions du PNE et des différents plans et stratégies de développement économique et social et de l'examen du rapport du PNE à présenter au CSEC.

La régularisation des prélèvements d'eau non autorisés

Pour permettre au gestionnaire des ressources en eau de maîtriser et de rationaliser l'utilisation de ces ressources, la loi 10-95 sur l'eau a soumis à déclaration tous les prélèvements d'eau existants avant sa publication. Pour les prélèvements d'eau non autorisés, cette déclaration vaut comme demande d'autorisation et est instruite comme telle sous réserve des dispositions des articles 6 et 8 de la loi 10-95 sur l'eau relatifs, respectivement, aux droits acquis sur l'eau et aux seuils de prélèvement d'eaux souterraines.

Le décret n° 2-07-96 du 16 janvier 2009 fixant la procédure d'octroi des autorisations et des concessions relatives au DPH (Bulletin Officiel, 2009) fixe, aux usagers de l'eau du DPH, un délai de trois ans à compter de la date de publication de ce décret pour présenter leurs déclarations. Cette disposition s'applique aussi aux prélèvements réalisés entre cette date et la date de publication de la loi 10-95 sur l'eau.

La valorisation du Domaine Public Hydraulique (DPH)

L'eau est l'un des principaux facteurs de production. Sa mobilisation et sa mise à la disposition des usagers par l'Etat nécessitent des investissements de plus en plus lourds.

Pour que l'Etat puisse continuer à assurer le service public de l'eau, le législateur lui a permis de récupérer une partie des coûts de l'eau à travers un système de redevances. Ce système a été mis en place pour la première fois par le dahir du 1^{er} août 1925 sur le régime des eaux (Bulletin Officiel, 1925). Ce système n'étant pas applicable à tous les prélèvements, il a fallu attendre la promulgation de la loi 10-95 sur l'eau pour que tous les utilisateurs du DPH, qu'ils soient publics ou privés, soient, désormais, soumis au paiement de la redevance. Le recouvrement de la redevance de prélèvement d'eau est effectué tant auprès du propriétaire que de l'exploitant des installations de prélèvement, qui sont conjointement et solidairement responsables du paiement de cette redevance.

Les redevances du DPH constituent la principale ressource financière des ABH. Elle sont utilisées par ces dernières pour financer leurs programmes de développement et de protection du DPH, ainsi que pour octroyer des aides financières aux personnes entreprenant des actions d'aménagement du DPH, d'économie d'eau ou de dépollution des ressources en eau.

Les taux de redevances de prélèvement d'eau pour l'irrigation, l'alimentation en EP des populations, la production de l'énergie hydroélectrique, l'usage industriel ainsi que les redevances de déversement des eaux usées sont fixées au niveau national par arrêtés conjoints des Ministres compétents. Ces redevances peuvent faire l'objet de révisions sur propositions des ABH.

Les autres redevances d'utilisation du DPH, tels que l'occupation temporaire et l'extraction de matériaux de construction des lits des cours d'eau, sont fixées par les conseils d'administration des ABH.

La protection des ressources en eau

La protection des ressources en eau, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, n'était pas totalement absente dans la législation marocaine. Les quelques dispositions qui existaient étaient dispersées dans différents textes relatifs à des domaines comme l'urbanisme, les établissements insalubres, incommodes ou dangereux. Ces dispositions étant insuffisantes et inefficaces pour cerner le phénomène de la pollution hydrique, il a fallu prévoir une protection globale, permettant de stopper l'épuisement des ressources en eau et la détérioration de leur qualité. En vu d'atteindre cet objectif, la loi 10-95 sur l'eau a mis en place un certain nombre d'outils.

Pour la protection des ressources en eaux contre la surexploitation, la loi 10-95 sur l'eau prévoit la délimitation de périmètres de sauvegarde ou d'interdiction. Les périmètres de sauvegarde sont délimités dans les zones où le degré d'exploitation des eaux souterraines risque de mettre en danger les ressources en eau existantes. A l'intérieur de ces périmètres sont soumis à autorisation préalable toute exécution de puits ou de forages, tous travaux de remplacement ou de réaménagement de puits ou de forages et toute exploitation d'eaux souterraines, quelque soit le débit à prélever. Les périmètres d'interdiction sont

délimités dans les zones où le niveau des nappes ou la qualité des eaux sont déclarés en danger de surexploitation ou de dégradation. Dans ces périmètres, les autorisations et les concessions de prélèvement d'eau ne sont délivrées que lorsque l'eau prélevée est destinée à l'alimentation humaine ou à l'abreuvement du cheptel.

Concernant la protection des ressources en eau contre la pollution, la loi 10-95 sur l'eau prévoit l'établissement de zones de protection et un régime d'autorisation de déversement. Les zones de protection sont de trois types : zone de protection immédiate, zone de protection rapprochée et zone de protection éloignée. Ces zones sont établies autour des points d'eau destinés à l'alimentation publique. A l'intérieur de ces zones, les activités susceptibles de porter atteinte à la qualité de l'eau sont soit interdites, soit réglementées. Ces zones ainsi que les périmètres de sauvegarde et d'interdiction sont établies par décrets. Le régime de l'autorisation prévu par l'article 52 de la loi 10-95 sur l'eau s'applique à tout déversement, écoulement, rejet, dépôt direct ou indirect dans une eau superficielle ou une eau souterraine susceptible d'en modifier les caractéristiques physique, chimique, biologique et/ou bactériologique. L'autorisation de déversement est délivrée par l'ABH après enquête publique de 30 jours. Elle fixe les conditions de déversement, les valeurs limites de rejet de la pollution à ne pas dépasser et les redevances de déversement à payer par l'attributaire de l'autorisation. Pour les déversements existants à la date de publication de la loi 10-95 sur l'eau, ils doivent faire l'objet d'une déclaration auprès de l'ABH concernée. Ces déclarations valent de demandes d'autorisation et sont instruites comme telles.

La réglementation de l'utilisation des eaux usées

Avec la diminution continue des apports en eau et une demande en eau qui ne cesse d'augmenter, le recours à la réutilisation des eaux usées pour combler une part du déficit en eau commence à s'imposer. Dans certaines régions du pays, l'irrigation avec des eaux usées se fait déjà. Tenant compte de cet état de fait et de la nécessité de réglementer le recours à ces eaux, le législateur a introduit au niveau de l'article 57 de la loi 10-95 sur l'eau des dispositions d'une grande importance. Cet article dispose que les conditions d'utilisation des eaux usées sont définies par l'administration, que toute utilisation des eaux usées est soumise à autorisation de l'ABH et que tout utilisateur des eaux usées peut bénéficier du concours financier et de l'assistance technique de l'ABH si l'utilisation qu'il fait des eaux usées est conforme aux conditions fixées par l'administration et a pour effet de réaliser des économies d'eau et de préserver les ressources en eau contre la pollution.

L'article 84 de cette loi interdit l'utilisation des eaux usées à des fins agricoles, lorsque ces eaux ne correspondent pas aux normes fixées par l'administration.

Le décret n° 2-97-875 du 4 février 1998 relatif à l'utilisation des eaux usées (Bulletin Officiel, 1998b), portant application de l'article 57 sus mentionné, stipule respectivement dans ses articles 2 et 3 que : « Aucune eau usée ne peut être utilisée si elle n'a pas été préalablement

reconnue épurée sous réserve des dispositions de l'article 15 ci-dessous » et que « En aucun cas les eaux usées mêmes épurées ne peuvent être utilisées à la boisson, à la préparation, au conditionnement ou à la conservation de produits ou denrées alimentaires. L'utilisation des eaux usées épurées ne peut être autorisée pour le lavage et le refroidissement des récipients et autres objets destinés à contenir des produits ou denrées alimentaires, ou à servir à leur préparation, leur conditionnement ou leur conservation ».

De plus, l'article 15 de ce décret prévoit que « les utilisateurs des eaux usées à la date de publication du présent décret disposent d'un délai de cinq ans pour se conformer aux dispositions du présent décret ».

En ce qui concerne l'octroi de l'autorisation d'utilisation des eaux usées, ce décret dispense les recyclages internes non interdits par l'article 3 précité pour l'obtention de cette autorisation. Celle-ci est délivrée sur la base d'une demande indiquant l'origine et l'usage prévu des eaux usées, et accompagnée de documents dont, entre autres, une étude indiquant la qualité des eaux usées épurées à utiliser, un plan du système d'épuration des eaux usées, une étude d'impact sur l'hygiène et la salubrité publique. Cette demande, ainsi que la demande de l'aide financière, sont examinées par deux commissions, présidées par le directeur de l'ABH et composées des représentants des départements ministériels concernés.

La prévention des phénomènes extrêmes

La loi 10-95 sur l'eau n'a pas omis de prévoir certaines dispositions pouvant permettre la prise de mesures pour atténuer les effets néfastes de la sécheresse et des inondations qui sont devenues assez fréquentes au Maroc, notamment durant les deux dernières décennies du XX^{ème} siècle.

En cas de sécheresse entraînant une pénurie d'eau, l'administration a le droit de déclarer l'état de pénurie d'eau dans la zone sinistrée et édicter des réglementations locales et temporaires ayant pour objet d'assurer en priorité l'alimentation en eau des populations et l'abreuvement des animaux. Ces réglementations peuvent, aussi bien dans les zones soumises à irrigation qu'à l'extérieur de ces zones, prévoir des restrictions concernant l'usage de l'eau à des fins urbaines et industrielles, l'interdiction de mettre en eau de nouvelles exploitations, la réduction des superficies irriguées, et l'interdiction de certaines cultures d'été.

Pour éviter les inondations, la loi 10-95 sur l'eau soumet à autorisation tout aménagement susceptible de gêner, dans les terrains submersibles, l'écoulement des eaux d'inondation, à l'exception des aménagements de protection des habitations et des propriétés attenantes. Elle permet à l'ABH d'exiger des propriétaires riverains des cours d'eau de construire des digues pour protéger leurs propriétés contre les débordements de ces cours d'eau. L'ABH est aussi chargée de réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations.

La loi 10-95 sur l'eau attribue également un rôle aux collectivités locales dans la protection contre les inondations dans la mesure où celles-ci peuvent bénéficier du concours de l'ABH lorsqu'elles entreprennent, en partenariat, des projets de réalisation des infrastructures nécessaires à la protection contre les inondations.

Economie de l'eau

Les contraintes majeures dans le domaine de l'eau portent sur la difficulté d'assurer l'adéquation entre la demande en eau, notamment agricole, et les possibilités de mobilisation des ressources en eau. Le faible niveau de satisfaction de cette demande n'incombe pas uniquement à la rareté de la ressource, mais également aux modes d'irrigation à faible efficience.

La loi 10-95 sur l'eau, qui vise la rationalisation de l'utilisation des ressources en eau, a pris en compte cette situation en mettant en place des dispositions permettant la maîtrise de la demande en eau. Ainsi, elle permet à l'administration de prescrire la modification des systèmes d'irrigation mis en place ou tout mode d'arrosage déjà pratiqué dans le but de réaliser des économies d'eau ou de mieux valoriser les ressources en eau compte tenu des cultures annuelles existantes.

PERSPECTIVES

Grâce à la publication de la loi 10-95 sur l'eau, des acquis importants ont été réalisés dans le domaine de l'eau dans le sens d'une gestion moderne intégrée, décentralisée et participative des ressources en eau, qui a pour objectif d'assurer une disponibilité en eau suffisante, en quantité et en qualité, au profit de l'ensemble des usagers, conformément aux aspirations d'un développement économique et social harmonieux.

Toutefois, ces acquis demeurent insuffisants pour atteindre cet objectif. Ils doivent être consolidés et renforcés par la réalisation d'autres acquis. A cet effet, il est prévu :

- De parachever le dispositif réglementaire nécessaire à la mise en application de l'ensemble des dispositions de la loi 10-95 sur l'eau à travers la publication de textes d'application. La majorité de ces textes sont constitués d'arrêtés conjoints relatifs aux valeurs limites de rejet (VLR) des eaux usées, aux coefficients spécifiques de pollution et aux rendements des dispositifs d'épuration. La publication de ces arrêtés permettra aux ABH de commencer le recouvrement des redevances de pollution, et par conséquent de contribuer aux efforts de dépollution des eaux ;
- D'activer l'apurement de la situation juridique du DPH à travers la mise en place des moyens financiers permettant de soutenir la cadence de réalisation des études techniques nécessaires à la délimitation du DPH ;
- De renforcer le respect des dispositions de la loi 10-95 sur l'eau et de ses textes d'application pour réduire les utilisations non-conformes à ces textes. A cet effet, les procédures d'octroi des autorisations d'utilisation du DPH seront allégées, et le rôle de

la police de l'eau sera renforcé par des moyens humains et matériels supplémentaires, ainsi que par l'instauration d'un système de gratification ;

- De renforcer la décentralisation en procédant à la couverture des bassins hydrauliques qui ne sont pas gérés par des ABH. Il s'agit des bassins du Guir-Ziz-Gheris, du Draa et de Sakia El Hamra et de l'oued² Eddahab, dont les ressources en eau continuent à être gérées par les services du département chargé de l'eau. La mise en place de ces agences, dont la création est en cours, permettra d'unifier et d'harmoniser les approches et les outils de gestion des ressources en eau au niveau national ;
- De réviser à la hausse les redevances d'utilisation de l'eau pour améliorer le recouvrement du coût de mobilisation des ressources en eau, infléchir la demande en eau et renforcer les moyens financiers des ABH. Ces moyens permettront aux ABH de participer à la réalisation de deux programmes importants relatifs à l'économie de l'eau et à l'assainissement liquide ;
- De revoir la loi 10-95 sur l'eau pour y enlever les zones d'ombre et les incohérences, combler ses lacunes, notamment en ce qui concerne les rejets d'eaux usées en mer, renforcer la concertation et la participation à travers l'élargissement de la composition du CSEC et de son comité permanent à l'ensemble des intervenants et l'institutionnalisation des comités de bassin.

CONCLUSION

La publication de la loi 10-95 sur l'eau, en 1995, a été qualifiée d'événement majeur et de tournant décisif dans l'histoire de l'eau au Maroc. Si la politique de l'eau d'avant 1995 a permis de réaliser d'importants acquis, notamment grâce à la politique des barrages, qui a permis d'irriguer 1 million d'hectares et de contribuer à l'approvisionnement des populations en eau, la nouvelle politique de l'eau, dont la loi 10-95 sur l'eau constitue la pierre angulaire, vise, à travers une nouvelle façon de faire face aux défis de l'eau, à réaliser de nouveaux acquis. Ces acquis concernent les aspects juridiques, institutionnels, économiques et financiers, organisationnels et environnementaux de la gestion des ressources en eau. Avec ces acquis, le secteur de l'eau au Maroc a accompli des avancées en matière de renouvellement et de modernisation des outils de sa politique de l'eau.

Cependant, malgré l'importance des acquis réalisés, des efforts considérables sont à déployer pour les consolider et améliorer davantage l'efficacité de la nouvelle politique de l'eau. Ces efforts doivent, d'une part, cibler un comportement respectueux de la loi 10-95 sur l'eau et ses textes d'application à travers, à la fois, la sensibilisation des usagers de l'eau et la dissuasion, et d'autre part, évaluer les insuffisances de cette loi à la lumière de l'expérience de l'application de ses dispositions et procéder aux adaptations nécessaires.

² Oued signifie, en langue arabe, rivière.

REFERENCES

Bulletin Officiel (1914) B.O. n° 89 du 10 juillet 1914 : Dahir du 7 chaabane 1332 (1er juillet 1914) sur le domaine public dans la zone du Protectorat Français de l'Empire Chérifien.

Bulletin Officiel (1925) Dahir du 11 moharrem 1344 (01 août 1925) sur le régime des eaux.

Bulletin Officiel (1995) B.O. n° 4325 du 20 septembre 1995 : Dahir n° 1-95-154 du 18 rabii I 1416 (16 août 1995) portant promulgation de la loi n° 10-95 sur l'eau.

Bulletin Officiel (1996) B.O. n° 4436 du 5 décembre 1996 : Décret n° 2-96-536 du 8 rejab 1417 (20 novembre 1996) relatif à l'agence du bassin hydraulique de l'Oum-Er-Rbia.

Bulletin Officiel (1998a) B.O. n° 4558 du 5 février 1998 : Décret n° 2-97-489 du 6 chaoual 1418 (4 février 1998) relatif à la délimitation du domaine public hydraulique à la correction des cours d'eau et à l'extraction des matériaux.

Bulletin Officiel (1998b) B.O. n° 4558 du 5 février 1998 : Décret n° 2-97-875 du 6 chaoual 1418 (4 février 1998) relatif à l'utilisation des eaux usées.

Bulletin Officiel (2007) B.O. n° 5562 du 20 septembre 2007 : Décret n° 2-05-1534 du (24 novembre 2005) relatif aux conditions et modalités d'élaboration et de révision des plans directeurs d'aménagement intégré des ressources en eau et du plan national de l'eau.

Bulletin Officiel (2009) B.O. n° 5706 du 5 février 2009 : Décret n° 2-07-96 du 19 moharrem 1430 (16 janvier 2009) fixant la procédure d'octroi des autorisations et des concessions relatives au domaine public hydraulique.

CHAPITRE 5

LA LOI 10-95 SUR L'EAU : APPORTS ET LIMITES

B. NADIR*

Université Mohammed V Rabat Souissi
Rabat, Maroc

RESUME

La Maroc s'est engagé dans une importante réforme de son cadre législatif et réglementaire relatif aux ressources en eau. Il s'est doté de la loi 10-95 dont ses principales dispositions s'articulent autour des principes généraux de protection, à savoir ceux de la domanialité publique, ceux de l'interdiction et de l'autorisation préalable et ceux de la répression. La présente loi prévoit des instruments juridiques économiques et préventifs ainsi que des documents de planification obligatoires et d'institutions décentralisées concrétisées par la création des agences de bassin pour assurer une gestion efficiente du Domaine Public Hydraulique (DPH). En dépit de la combinaison par la loi 10-95 sur l'eau de ces divers instruments, le secteur de l'eau connaît des contraintes et des difficultés pour assurer sa relève. Ceci est dû à certaines limites et insuffisances de la loi 10-95, qui se manifestent essentiellement d'une part dans la faible prise en compte des préoccupations environnementales dans la gestion des ressources en eau ainsi que dans l'approvisionnement en eau potable et dans la gestion de l'assainissement, et d'autre part l'ampleur des tâches et des missions confiées aux agences de bassin sans mesures d'accompagnement et de coordination.

Mots Clés : Domaine Public Hydraulique ; réglementation ; pollution ; eaux usées ; eau potable ; objectifs de qualité ; agences de bassin ; limites.

* Auteur correspondant : Pr. NADIR Bouchra – Université Mohammed V Rabat Souissi, Rabat, Maroc
Email : nadirym@yahoo.fr – Tel. : (+212) 661 95 61 27

INTRODUCTION

L'eau est indispensable à la vie et aux activités humaines. Les préoccupations de santé et de développement social et économique nécessitent de livrer à chaque être humain une quantité suffisante d'eau. Un être humain a besoin de 25 à 30 l/j pour satisfaire les besoins fondamentaux en eau pour son usage personnel et domestique. L'eau est un droit humain.

En 2002, l'Organisation des Nations Unies (ONU) a déclaré, dans l'observation générale n° 15 du Comité sur les droits économiques, sociaux et culturels, que « le droit à l'eau consiste en un approvisionnement suffisant, physiquement accessible et à un coût abordable, d'une eau salubre et de qualité acceptable pour les usages personnels et domestiques de chacun. » (Conseil Economique et Social des Nations Unies, 2003). L'eau est avant tout un bien social, économique et environnemental, mais soumis aux exigences du marché, donc l'eau n'est pas un bien marchand comme les autres (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2000).

Les aléas climatiques, qu'il s'agisse de sécheresses récurrentes, de pénuries chroniques ou d'inondations dévastatrices, exacerbent le caractère vital de l'eau (Sironneau, 1998) qui devient un enjeu de politique nationale. Pour cela, le Maroc s'est engagé dans une importante réforme de son cadre législatif et réglementaire relatif aux ressources en eau. Ainsi, il s'est doté de la loi 10-95 sur l'eau (Bulletin Officiel, 1995), dont l'objectif est de mettre en place une politique nationale de l'eau basée sur une vision prospective qui tient compte d'une part de l'évolution des ressources et d'autre part des besoins nationaux en eau. Elle vise, en outre, la valorisation des ressources en eau et la rentabilisation des investissements y afférents.

Le but pour le Maroc est donc d'assurer une gestion durable de l'eau. La question de la répartition de l'eau est abordée en même temps que la question de sa qualité. Les ressources en eau doivent être réparties en vue de satisfaire, dans l'ordre, les exigences de la santé, de l'alimentation en eau potable de la population, de l'agriculture, de la pêche continentale, de l'industrie, de la production d'énergie et du tourisme. Le présent article a pour objectif de savoir si la loi 10-95 sur l'eau est à même de relever ce défi. Ainsi, dans une première partie, les principales dispositions de la loi 10-95 sur l'eau sont exposées et analysées et dans une seconde partie, les insuffisances et les limites de cette loi sont explorées afin de déterminer les obstacles entravant la relève du secteur de l'eau.

LE CADRE JURIDIQUE ET INSTITUTIONNEL DE L'EAU

La réglementation de l'eau repose sur le dahir n° 1-95-154 du 16 août 1995 portant la promulgation de la loi n°10-95 sur l'eau ainsi que sur ses décrets et ses arrêtés d'application (Bulletin Officiel, 1995). La gestion de l'eau est conçue selon les principes généraux de protection des ressources hydrauliques. En général, deux séries de mesures juridiques

peuvent être relevées : les mesures concernant l'aspect quantitatif de l'eau et les mesures ayant trait à la protection qualitative de l'eau. Pour assurer cette protection, une planification et des moyens préventifs et financiers ont été mis au point. Sur le plan institutionnel, des innovations ont été introduites en vue d'assurer une gestion décentralisée de l'eau et de renforcer la consultation.

Le régime juridique général

Le régime juridique général comporte les principes généraux de protection de l'eau, en l'occurrence le principe de la domanialité publique, ceux de l'interdiction et de l'autorisation préalable et celui de la répression. Cette réglementation générale apparaît comme le moyen le plus sûr pour protéger l'eau, car elle détermine clairement les objectifs à atteindre et les moyens à les employer.

La domanialité publique

Contrairement à la loi française, qui a choisi le critère de la navigabilité et de flottabilité des cours d'eau pour définir le domaine public fluvial, la loi marocaine a retenu la seule considération de la nature physique de l'eau, sans tenir compte de l'usage qui peut en être fait. C'est ainsi qu'à partir de 1914 les ressources en eau ont été domanialisées. Le dahir de 1914 relatif au domaine public le définit sans distinction entre ses composantes hydraulique, maritime et routière (Bulletin Officiel, 1914a). L'article 1 de la loi 10-95 définit l'eau comme étant un bien public appartenant à toute la collectivité et dont l'appropriation privée ne peut exister que dans les cas prévus par la loi.

Pour éviter toute contestation sur les limites du Domaine Public Hydraulique (DPH), l'article 2 de la loi 10-95 sur l'eau a procédé à une énumération exhaustive des éléments constitutifs des eaux domaniales ainsi : « Font partie du Domaine Public Hydraulique au sens de la présente loi :

- a- Toutes les nappes d'eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines, les cours d'eau de toutes sortes et les sources de toutes natures ;
- b- Les lacs étangs et sebkhas¹ ainsi que les lagunes, marais salants et marais de toute espèce ne communiquant pas directement avec la mer. Sont considérés comme faisant partie de cette catégorie les parcelles qui sans être recouvertes d'une façon permanente par les eaux, ne sont pas susceptibles en année ordinaire d'utilisation agricole, en raison de leur potentiel en eau ;
- c- Les puits artésiens, les puits et abreuvoirs à usage public réalisés par l'Etat ou pour son compte ainsi que leurs zones de protection délimitées par voie réglementaire. Ces zones sont constituées d'une zone immédiate intégrée au Domaine Public Hydraulique et éventuellement d'une zone rapprochée et d'une zone éloignée qui ne sont soumises qu'à des servitudes ;

¹ Sebkhah signifie, en langue arabe, marais salant temporaire.

d- Les canaux de navigation d'irrigation ou d'assainissement affectés à un usage public ainsi que les terrains qui sont compris dans leurs francs-bords et dont la largeur ne doit pas excéder 25 m pour chaque franc-bord ;

e- Les digues, barrages, aqueducs, canalisations, conduites d'eau et séguia² affectés à un usage public en vue de la défense des terres contre les eaux, de l'irrigation, de l'alimentation en eau des centres urbains et agglomérations rurales ou de l'utilisation des forces hydrauliques ;

f- Le lit des cours d'eau permanents et non permanents ainsi que leurs sources, celui des torrents dans lesquels l'écoulement des eaux laisse des traces apparentes ;

g- Les berges jusqu'au niveau atteint par les eaux de crues, dont la fréquence est fixée par voie réglementaire pour chaque cours d'eau ou section de cours d'eau et, surfaces couvertes par les marées de coefficient 120 ;

h- Les francs-bords à partir des limites des berges :

1. Une avec une largeur de 6 m, sur les cours d'eau ou sections de cours d'eau définies : la Moulouya de son embouchure jusqu'à ses sources, le Sebou de son embouchure jusqu'à ses sources, le Loukkos de son embouchure jusqu'à ses sources, l'Oum-Er-Rbia de son embouchure jusqu'à ses sources et le Bou Regreg de son embouchure jusqu'au barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah.
2. La deuxième avec une largeur de deux m, sur les autres cours d'eau ou sections de cours d'eau. »

La domanialité publique sur les eaux continentales empêche l'Etat de vendre ou de céder la pêche sur les eaux. L'eau est en effet imprescriptible et inaliénable. Seul un déclassement ou la disparition des indices naturels peuvent définitivement faire échapper l'eau de la domanialité publique. Dans ces cas-là, le sort de l'étendue d'eau concernée revient à l'Etat dans son domaine privé.

Néanmoins, l'inaliénabilité du DPH ne s'oppose pas à ce que l'Etat qui en a la garde la surveillance et la gestion, concède à des particuliers ou à des sociétés dans les dépendances de ce domaine, des droits privatifs (droits acquis) ou privilégiés de jouissance compatibles avec sa destination. En effet, l'Etat peut concéder l'eau moyennant la délivrance d'une autorisation individuelle ou de concession.

Les principes de l'interdiction et de l'autorisation préalable

L'utilisation et l'exercice des activités dans les eaux continentales se fait au moyen d'un principe général suivant lequel toute activité est interdite sauf autorisation. Deux types d'autorisation sont prévus par la loi 10-95 sur l'eau : les autorisations destinées à se procurer de l'eau et les autorisations de déversement.

² Séguia signifie, en langue arabe, canal d'irrigation à ciel ouvert.

Les autorisations pour se procurer de l'eau

La loi 10-95 fixe, dans son article 38, les opérations consistant à se procurer de l'eau du DPH et qui sont soumises à autorisation. Il s'agit notamment :

- Des travaux de recherche d'eaux souterraines ;
- Du creusement des puits et de la réalisation de forages d'une profondeur supérieure à celle fixée par l'administration ;
- Des travaux de captage des eaux de sources ;
- De l'établissement d'ouvrages sur le DPH, à condition qu'ils ne polluent pas les eaux, n'entravent par leur écoulement et ne soient pas construits pour une durée de plus de cinq ans ;
- Des prélèvements des eaux superficielles, quelque soit le débit prélevé ;
- De l'exploitation des bacs et passages sur les cours d'eau ;
- De l'extraction de matériaux du DPH ;
- Du curage, de l'approfondissement de l'élargissement et du redressement des cours d'eau ;
- Des excavations à une distance inférieure à 10 m des francs-bords des cours d'eau et des canaux.

La procédure d'octroi des autorisations est fixée par le décret du 4 février 1998 (Bulletin Officiel, 1998a). L'Agence de Bassin Hydraulique (ABH) doit donner suite à la demande d'autorisation ou de concession dans un délai de 15 jours après la fin des opérations de l'enquête. Les titulaires d'ouvrages de prise d'eau, rejets d'eau, ou autres ouvrages hydrauliques sur le domaine public, sont assujettis à des taxes ainsi qu'à des redevances et des droits fixés pour toute autre emprise ou usage de ce domaine.

L'arrêté d'autorisation peut prévoir un certain nombre de clauses ayant trait à la protection et au contrôle de l'eau, comme la clause intervenant dans un but d'hygiène publique. Ainsi, le permissionnaire est tenu d'éviter la formation de mares stagnantes et de gîtes de moustiques anophèles et propagateurs du paludisme.

Les autorisations de déversement

La réglementation des déversements est soumise par principe au régime de l'autorisation. L'article 52 de la loi 10-95 sur l'eau soumet tout déversement, rejet, écoulement ou dépôt dans les eaux, qui modifie leurs caractéristiques, à une autorisation délivrée par l'ABH qui procède à une enquête avant de la délivrer.

En outre, l'article 53 de la présente loi oblige les auteurs des déversements existants avant cette loi de régulariser leur situation par une déclaration faite à l'ABH qui procèdera aux modifications nécessaires pour tenir compte des prescriptions de la loi et de ses textes d'application, notamment aux valeurs limites de rejet (VLR). Une VLR correspond à la valeur limite d'un paramètre indicateur de la pollution, qui ne doit pas être dépassée dans le sens de la détérioration de la qualité de l'eau. Conformément au décret du 24 janvier

2005 (Bulletin Officiel, 2005a), les caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques de tout déversement doivent être conformes aux VLR.

Les VLR sont fixées pour les industries de la pâte à papier, du papier et du carton, pour les rejets domestiques, et pour les rejets des industries du sucre (Bulletin Officiel, 2005b,c,d). A la fixation des VLR se trouvent aussi mêlés divers départements, tel que le Département de l'Eau et de l'Environnement, dont la mission est de veiller à la protection des ressources en eau contre la pollution, et le Département de l'Industrie, du Commerce et de la Mise à Niveau qui a pour préoccupation essentielle de préserver les intérêts économiques des entités composant le secteur, dont ils assurent la tutelle.

Sachant que les utilisateurs des eaux usées peuvent bénéficier du concours financier de l'Etat et de son assistance technique, en contrepartie, tout déversement des eaux usées donne lieu au paiement d'une redevance. C'est le principe du pollueur-payeur qui sert de moyen pour financer les actions de préservation des ressources en eau en faisant supporter directement aux pollueurs le coût des mesures de restauration de la qualité des eaux entretenues par les pouvoirs publics. Cependant, le décret du 24 janvier 2005 relatif aux déversements (Bulletin Officiel, 2005a), qui n'a été publié que presque 10 ans après l'adoption de la loi, remet en cause certaines dispositions de l'article 53 de la loi 10-95. En effet, alors que la loi vise tous les déversements qui existent à la date de sa publication (20 septembre 1995), le décret vise ceux qui existent à la date de sa propre publication et non autorisés. Il restreint par conséquent le champ d'application de l'article 53 de la loi sur l'eau en ne soumettant, parmi les déversements existants, que ceux qui ne sont pas autorisés, sans préciser ni le type d'autorisation (tel qu'une autorisation d'établissement classé, d'exploitation minière ou d'occupation temporaire), ni l'autorité qui doit la délivrer (Chaouni, 2005).

La répression

Des mesures répressives sont prévues pour assurer le contrôle du DPH. En effet, la loi 10-95 prévoit des sanctions pénales, allant jusqu'à un emprisonnement de 1 à 12 mois, ainsi que l'acquittement d'amendes (Articles 110, 111, 112 et 118 de la loi 10-95). De plus, la loi 10-95 a notablement renforcé et diversifié le système des sanctions administratives en s'inspirant, dans une large mesure, du système existant en matière d'installations classées. Il en est ainsi de la révocation de l'autorisation à toute époque, sans indemnité en cas d'inobservation des conditions qu'elle comporte, de la fermeture des prises d'eau, de la suspension ou de l'arrêt définitif de travaux, de la démolition de tous les travaux réalisés sans autorisation ou contrairement à la réglementation sur les eaux, de retrait de l'autorisation d'exploiter et de vendre les eaux concernées et de faire payer une redevance supplémentaire, du paiement d'amende de 500 à 2000 dirhams marocains (MAD)³ en cas d'utilisation excessive de produits chimiques ou organiques en agriculture ou en cas d'excès dans les périmètres équipés par l'Etat. A cet égard, il est utile de noter

³ 1 dirham marocain (MAD) correspond à 0,11527 dollar US (USD), taux de change du 19 février 2009.

que l'article 18 de la loi 10-95, seul article qui traite de la pollution agricole est formulé en des termes vagues et imprécis pour définir une infraction. Plusieurs questions restent en suspens : à partir de quel niveau il y a épandage excessif ? Qui en décide ? Comment désigner l'exploitant responsable de l'épandage excessif ? (Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau, 2006a).

En tout état de cause, ce sont les officiers de la police judiciaire, ainsi que les agents commissionnés par l'ABH qui constatent les infractions.

Les instruments de gestion prévus par la loi 10-95

La loi 10-95 prévoit de nouveaux instruments de gestion pour assurer la protection et la gestion rationnelle des ressources en eau, incluant non seulement les aspects quantitatifs mais aussi qualitatifs de l'eau.

Les instruments économiques

Les instruments économiques marquent le passage de l'interdiction à l'incitation et encouragent la participation de tous les acteurs à la protection de l'eau et de l'environnement.

La loi 10-95 sur l'eau reconnaît les principes de gestion par la demande pollueur-payeur et utilisateur-payeur. En effet, les ABH sont admises à percevoir des redevances auprès des usagers de l'eau, correspondant aux prélèvements (Article 37 de la loi 10-95⁴) et aux déversements, aux écoulements, aux dépôts et aux rejets (Article 52 de la loi 10-95⁵).

Redevances pour l'utilisation de l'eau

Les modalités de fixation et de recouvrement de la redevance pour l'utilisation de l'eau du DPH sont arrêtées par le décret du 4 février 1998 (Bulletin Officiel, 1998b). La redevance est calculée en fonction du volume d'eau prélevée exprimé en m³, ou en fonction de l'énergie hydroélectrique produite exprimée en kWh. Le taux de cette redevance est fixé par arrêté conjoint du Ministre de l'Intérieur, du Ministre des Finances et de la Privatisation et du Ministre chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement du 24 décembre 2003 (Bulletin Officiel, 2003). Lorsque l'eau du DPH est utilisée pour l'approvisionnement en eau des populations, le taux de la redevance est fixé à 0,04 MAD/m³ d'eau prélevée. Ce taux est appliqué d'une manière progressive (Bulletin Officiel, 2003).

⁴ Article 37 de la loi 10-95 : « toute personne physique ou morale utilisant les eaux du DPH est soumise au paiement d'une redevance pour utilisation de l'eau. »

⁵ Article 52 de la loi 10-95 : « aucun déversement, écoulement, rejet, dépôt direct ou indirect dans une eau superficielle ou une nappe souterraine susceptible d'en modifier les caractéristiques physiques [...] ne peut être fait sans autorisation préalable accordée, après enquête par l'agence de bassin. Cette autorisation donne lieu au paiement des redevances dans les conditions fixées par voie réglementaire. »

Il faut observer que la régulation des tarifs de l'eau est davantage portée par des préoccupations sociales (telles que la minimisation de l'impact des hausses des prix de l'eau sur l'indice des prix de la consommation) que par une réelle volonté de recouvrement des coûts ou de recherche d'efficacité (Banque Mondiale, 2004). L'eau potable fait partie de la liste des produits et des services, dont les prix sont réglementés et/ou homologués. La loi n° 06-99 du 5 juin 2000 sur la liberté des prix et de la concurrence (Bulletin Officiel, 2002a) prévoit les dispositions visant la réglementation des prix permettant de protéger les consommateurs contre les abus de position dominante des monopoles de droit ou de fait (Machichi, 2004). C'est la raison pour laquelle les prix de l'eau sont fixés par l'administration après consultation du conseil de la concurrence (Machichi, 2004).

D'autres redevances sont prévues par la loi, relatives à toutes les utilisations du DPH, autres que les prélèvements d'eau et les déversements d'eaux usées. C'est le cas notamment des extractions de matériaux dans le DPH, des occupations temporaires du DPH (telles que les constructions au bord des rivières, les constructions de barrages collinaires et l'exercice de la pisciculture dans les eaux du DPH) ou de l'exercice des activités de loisirs.

Redevances pour pollution

Les taux de redevances applicables aux déversements des eaux usées et définissant l'unité de pollution sont désormais fixés par l'arrêté conjoint du 12 juin 2006 (Bulletin Officiel, 2006) et ce conformément au décret du 24 janvier 2005 relatif aux déversements, écoulements, rejets et dépôts directs ou indirects dans les eaux superficielles ou souterraines (Bulletin Officiel, 2005a). L'ABH utilise les redevances de pollution pour financer les actions et les opérations destinées à réduire la pollution des eaux. C'est l'application du principe pollueur-payeur, selon lequel le pollueur doit être tenu pour responsable de la dégradation de l'environnement, dont il est à l'origine, ce qui implique qu'il y ait réparation. L'énoncé de ce principe doit beaucoup aux théories économiques libérales néoclassiques, consistant à internaliser les effets externes (coûts et bénéfices sociaux ou/et écologiques des activités économiques) (Romi, 1999). En d'autres termes, le principe pollueur-payeur vise à inclure les coûts liés à la protection de l'environnement dans les coûts de production de l'entreprise et par ce biais, à inciter le producteur et le consommateur à adopter un comportement plus favorable à la défense de l'environnement (Vial, 2006).

L'institution des redevances pour pollution incite les pollueurs à disposer de leurs propres équipements d'épuration, et dans ce cas-là ils bénéficient de l'assistance technique de l'Etat.

Les mesures incitatives

Les mesures incitatives constituent des aides accordées aux personnes qui investissent dans le domaine de la dépollution de l'eau. Ces aides peuvent consister en des aides financières ou à une assistance technique. Grâce à ces mesures incitatives, les ABH se démarquent des anciennes directions régionales hydrauliques. L'action des ABH ne se

limite pas aux fonctions de police et de surveillance de la qualité des eaux, mais elles cherchent à se légitimer auprès des acteurs de l'eau, par des actions concrètes d'appui technique et/ou de cofinancement (Banque Mondiale, 2004). L'article 20 de la loi 10-95 sur l'eau, fixant les compétences des ABH, prévoit que l'administration fournit toute aide financière aux personnes publiques ou privées après leurs demandes, soit pour prévenir la pollution des eaux, soit pour aménager l'utilisation du DPH. Cependant, la loi n'a pas fixé la nature de ces aides (avances ou emprunts)⁶, laissant le soin de déterminer les modalités d'octroi de ces aides au conseil d'administration de chaque ABH (Conseil National de l'Environnement, 2007). Enfin, la loi 10-95 a fixé limitativement les cas où l'Etat peut accorder son concours financier ; il s'agit de l'utilisation des eaux usées épurées prévue par l'article 57 de la loi 10-95, et de l'irrigation avec les eaux de nappe pour freiner sa remontée (Article 83 de la loi 10-95). L'ABH peut également offrir son assistance qui consiste en un service rendu aux pollueurs pour les aider à assurer le bon fonctionnement de leurs installations d'épuration, par exemple en proposant son assistance à la réalisation d'ouvrages de mobilisation de l'eau pour leur garantir une plus grande fiabilité.

L'élaboration de ces outils économiques est en mesure d'inciter les entreprises à mieux intégrer la dimension environnementale dans leur gestion. Mais faute de moyens financiers adéquats, cette mission n'a été entamée par aucune ABH (Conseil National de l'Environnement, 2007). D'où la nécessité d'assurer un concours financier permanent par l'Etat aux ABH en vue de couvrir les coûts des missions qu'il délègue aux ABH dans le cadre d'un contrat-programme (Conseil National de l'Environnement, 2007).

Par ailleurs, les instruments juridiques et économiques sont complétés par des mesures préventives visant la préservation des ressources en eau.

Les instruments préventifs de lutte contre la pollution des eaux

La loi 10-95 prévoit certaines actions à entreprendre par les ABH. Elles consistent à assurer le contrôle de la pollution des eaux et d'appliquer la réglementation relative aux normes de qualité et aux VLR.

Le contrôle de la pollution

Divers moyens sont prévus pour lutter contre la pollution des eaux (Nadir, 2008a) :

- L'inventaire du degré de pollution ;
- L'institution des zones de protection ;
- Les mesures d'urgence en cas de pollution accidentelle ;
- Les normes de qualité.

⁶ Un projet de décret concernant la manière d'octroyer les aides financières par les ABH est en cours de préparation par le Ministère de l'Aménagement du Territoire de l'Eau et de l'Environnement et le Ministère de Finances et de la Privatisation.

Les eaux usées et les projets d'assainissement

Les articles 52 et 54 de la loi 10-95 interdisent de rejeter des eaux usées ou des déchets solides, d'effectuer tout épandage ou enfouissement d'effluents et tout dépôt de déchets susceptibles de polluer par infiltration les eaux souterraines ou par ruissellement les eaux de surface, afin d'en modifier les caractéristiques physico-chimiques ou bactériologiques sans autorisation préalable accordée, après enquête, par l'ABH (Bulletin Officiel, 1998c). Les eaux usées ne peuvent donc être déversées qu'après avoir été traitées. De plus, le niveau d'épuration doit être conforme au respect des normes de rejet.

L'article 57 de la loi 10-95 dispose que l'administration définit notamment les conditions d'utilisation des eaux usées et d'obtention de l'autorisation de la réutilisation de ces eaux usées. Ainsi, elles peuvent être réutilisées pour l'irrigation, l'arrosage des espaces verts et le lavage. Toutefois, leur qualité doit être rendue compatible avec les exigences de l'usage envisagé. Ainsi, la réutilisation des eaux usées à des fins agricoles est interdite lorsque ces eaux ne respectent pas les normes fixées par voie réglementaire (Article 84 de la loi 10-95). En outre, un contrat peut être signé entre le gestionnaire du traitement tertiaire (Ministère de l'Agriculture) et l'agriculteur pour garantir la qualité des eaux usées épurées en agriculture.

Toutefois, limiter strictement le niveau d'épuration au respect des normes de rejet n'est pas en harmonie avec le caractère intégré attribué à la réutilisation des eaux usées. En effet, les eaux usées épurées au stade du respect des normes de rejet pourraient être utilisées de façon détournée pour l'irrigation non restrictive (Office National de l'Eau Potable et Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003a). Cela est en principe autorisé que si les effluents subissent un traitement supplémentaire générant des eaux épurées conformes aux normes de réutilisation récemment publiées.

Concernant les rejets industriels, le dahir du 25 août 1914 place les établissements insalubres, incommodes ou dangereux sous le contrôle et la surveillance de l'autorité administrative (Bulletin Officiel, 1914b). Ces établissements sont en fait classés en trois catégories, selon les risques qu'ils présentent. Les promoteurs des établissements de classe 1 et 2 sont tenus de demander une autorisation administrative avant d'entamer leurs activités. Ceux de la classe 3 doivent présenter une déclaration.

La procédure impose alors la réalisation d'une enquête « *commodo et incommodo* » à la diligence de l'autorité locale pour la classe 2 et de l'administration chargée des Travaux Publics pour la classe 1. L'autorisation peut être refusée dans l'intérêt de l'hygiène ou de la commodité publique ou encore subordonnée à des modifications de l'emplacement choisi ou des dispositions prévues initialement.

De plus, une convention peut être signée par l'industriel et l'exploitant de la station d'épuration fixant les seuils de rejet.

Des contraintes réglementaires empêchent la concrétisation et la pérennisation des projets intégrés de collecte et de réutilisation des eaux usées. Elles tiennent en carence

ou à la non application des normes de rejet industriels et domestiques (Office National de l'Eau Potable et Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003b), amplifiée par l'absence d'une vision futuriste pour l'intégration de la composante « réutilisation des eaux usées » dans les projets d'assainissement. Des limites organisationnelles tiennent également à l'absence d'une gestion intégrée Collecte-Traitement-Réutilisation et de procédures standardisées à l'échelle nationale de la conception jusqu'à la concrétisation (Office National de l'Eau Potable et Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003a).

En somme, l'ensemble de ces dispositions préventives, aussi efficaces soient-elles, ne sauraient se concevoir sans l'instauration de mesures institutionnelles chargées de les mettre en œuvre.

L'organisation de la gestion de l'eau

L'organisation de la gestion de l'eau est articulée autour d'un certain nombre d'institutions décisionnelles et consultatives (Nadir, 2008b). Le Maroc est divisé en 10 bassins géohydrologique⁷, dont celui des provinces sahariennes⁸ (Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau, 2006b). Actuellement, sept ABH sont opérationnelles : Oum rbiaa, Sebou, Tensift, Souss massa, Bouregreg et de la Chaouiya, Loukkos, Moulouya. Chaque bassin fait l'objet d'une planification de la gestion des ressources en eau.

La pertinence de la gestion décentralisée de l'eau : les ABH

La gestion durable des ressources en eau doit prendre en compte le cycle de l'eau à l'échelle du bassin hydrographique, seule unité géographique permettant d'avoir une vision globale des processus complexes des hydrosystèmes et des interactions avec l'environnement et l'utilisation humaine (Réseau International des Organismes de Bassin, 2000). C'est dans ce cadre que le législateur marocain a été conduit à ériger le bassin, cadre hydrographique naturel, en unité institutionnelle. Ainsi, la loi 10-95 sur l'eau a créé des ABH, établissements publics dotés de la personnalité morale et de l'autonomie financière (Article 20 de la loi 10-95). Elles ont pour mission d'évaluer, de planifier et de gérer les ressources en eau au niveau des bassins hydrauliques. Elles peuvent accorder des prêts, des aides et des subventions à toute personne engageant des investissements d'aménagement ou de préservation des ressources en eau. Leurs ressources sont constituées notamment de redevances recouvrées auprès des usagers et des utilisateurs de l'eau, d'emprunts, de subventions et de dons.

⁷ Bassin du Moulouya du Loukkos, Tangérois et côtiers Méditerranéens du Sebou, bassin du Boureg reg côtiers Atlantiques de Casablanca, Bassin du Tensift, Bassin du Sous et massa, Bassin du draà, Bassins du Guir, Ziz et Rheris et Bassin du Sahara.

⁸ Du point de vue administratif, le bassin est réparti entre 6 provinces dépendant de trois régions : (i) Région de Laayoune-Boujdour- SaquiaElhamra avec les provinces de Laayoune et de Boujdour ; (ii) Région oued Eddahab- laguira avec les provinces de l'Oued Eddahab et d'Assaouira ; (iii) Région Guelmim Smara avec la province de Smarar et de la partie de la province de Tan Tan située au Sud de l'Oued Draa.

Chaque ABH est administrée par un conseil d'administration, composé pour un tiers des représentants de l'Etat, pour un quart des représentants des établissements publics produisant de l'eau potable, de l'eau d'irrigation ou de l'hydro-électricité (tels que l'Office National Eau Potable – ONEP, les régies, les Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole – ORMVA et l'Office National de l'Electricité – ONE) et pour le reste des représentants des chambres d'agriculture, de commerce et d'industrie, des assemblées préfectorales ou provinciales, des collectivités ethniques et des associations d'usagers. Ce système de représentation n'est pas vraiment décentralisé et ne fait que renforcer l'emprise de l'Etat, en contradiction avec l'objectif de décentraliser la gestion de l'eau assigné par la loi 10-95 sur l'eau.

D'autres structures ont également été créées en vue d'une plus large concertation, telles que le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) et les commissions préfectorales et provinciales de l'eau.

La planification, instrument de gestion intégrée des ressources en eau

La loi 10-95 institue une planification obligatoire de toutes les ressources en eau. Le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE) et le plan national de l'eau (PNE) fixent des objectifs en termes de quantité et de qualité et les actions à mener pour les atteindre. Ils font le bilan des besoins et des investissements dans le secteur. Ils sont élaborés par l'ABH et approuvés par décret après avis du CSEC (Bulletin Officiel, 1997). Ils peuvent être révisés tous les cinq ans, sauf circonstances exceptionnelles exigeant une modification de son contenu avant cette période.

Le PDAIRE organise pour une période de 20 ans une gestion cohérente de l'eau dans le périmètre concerné. Toute autorisation ou concession prévue, ayant pour objet l'utilisation ou l'exploitation du DPH, ne peut être accordée que si elle est compatible avec les objectifs définis par le dit plan (Article 18 de la loi 10-95).

Le PNE est élaboré à partir des résultats et des conclusions des plans directeurs d'aménagement des bassins hydrauliques. Il doit définir notamment :

- Les priorités nationales en matière de mobilisation et d'utilisation des ressources en eau ;
- Le programme et l'échéance de réalisation des aménagements hydrauliques à l'échelle nationale ;
- Les mesures d'ordre économique, financier, réglementaire et organisationnel en vue de la sensibilisation et d'éducation des populations en matière d'économie et de protection des ressources en eau ;
- Les conditions de transfert des eaux des bassins excédentaires vers les bassins déficitaires.

Ces documents de planification constituent des instruments juridiques opposables et de protection intégrée, puisqu'ils poursuivent une pluralité d'objectifs, dont la protection des ressources en eau.

En dépit de la combinaison par la loi 10-95 sur l'eau entre divers instruments juridiques économiques et préventifs, il faut observer que ceux-ci n'ont pas permis d'éviter la gestion défectueuse des ressources en eau. Il en découle une sorte d'ineffectivité de la réglementation en la matière. Ceci est dû à certaines limites et insuffisances de la loi 10-95, qui vont être explicitées dans les développements suivants.

LES LIMITES DE LA LOI 10-95 SUR L'EAU

Malgré les apports de la loi 10-95 sur l'eau, il faut admettre qu'ils n'ont pas abouti à une gestion efficace des ressources en eau. Il est en effet frappant de constater deux phénomènes majeurs : d'une part, l'insuffisance de prise en compte des préoccupations environnementales dans la gestion des ressources en eau ainsi que dans l'approvisionnement en eau potable et dans l'assainissement, d'autre part, l'ampleur des multiples objectifs complexes concédés aux ABH en l'absence de mesures d'accompagnement et de mécanismes de coordination et de concertation solides.

Les insuffisances de prise en compte des préoccupations environnementales et des services d'eau potable et de l'assainissement

L'un des objectifs déclarés de la loi 10-95 sur l'eau est d'assurer une gestion globale des ressources en eau ainsi que l'accès à l'approvisionnement en eau potable et l'assainissement.

Les insuffisances de prise en compte des préoccupations environnementales dans la gestion du DPH

L'apport essentiel de la loi 10-95 sur l'eau consiste dans la mise en place d'une protection qualitative et quantitative de l'eau selon une approche de gestion globale de l'eau. Cependant, certains éléments composant l'écosystème hydraulique ne sont pas pris en compte.

La loi 10-95, sous ses allures unificatrice, n'a pas embrassé l'ensemble des questions entourant la problématique sur l'eau.

La loi exclut de son champ d'application les zones humides qui sont d'une richesse insoupçonnable. En effet, les zones humides assurent la synthèse écologique entre la terre et l'eau. En reléguant les niveaux de l'eau et en ralentissant leur écoulement, elles épargnent aux humains bien des catastrophes naturelles (Union Internationale pour la Conservation de la Nature, 1985). Pourtant, la politique agricole en place ne fait que reculer les zones humides en les conquérant pour pouvoir s'étendre (Mekouar, 1988). Le respect des zones humides exige une large intégration des préoccupations écologiques dans le milieu rural. Ainsi, la vision de l'aménagement rural intégré doit être globale « ne se limitant pas à l'aspect agricole » (Caudal-Sizaret, 1993), mais intégrant la protection de l'environnement sur la base d'une collaboration entre toutes les instances concernées

par l'aménagement du territoire, la gestion des zones rurales y compris sylvicoles, et par la protection de l'environnement.

L'unicité n'est pas aussi prise en compte dans la définition de la ressource en eau, entre les eaux internes et les eaux du littoral (Tazi Sadeq, 2006). L'écologie soutient qu'il n'existe pas ou peu de frontière dans la nature comme pour le rivage de la mer, les rives d'un cours d'eau et même d'étendues d'eau comportant plusieurs successions de milieux où l'on pourrait reconnaître des couches de population végétale et animale. Ainsi, les diverses catégories de zones humides riches en espèces végétales et animales sont exclues du champ d'application de la loi sur l'eau ainsi que les zones côtières.

La prise en compte des données naturelles n'est toutefois pas facile. Cette remarque vaut pour autant pour la superficie et l'importance du système aquifère que pour sa situation. Une nappe phréatique peut se trouver sous un fleuve ou à sa proximité. Il peut aussi arriver qu'un cours d'eau, ou qu'un lac, disparaisse sous terre pour ressurgir ailleurs selon un aspect qui peut aller du simple filet d'eau à une autre formation hydrique plus importante.

Devant ces lacunes, il est possible de proposer une piste de réflexion dans le sens de la consécration des notions d'écosystème hydraulique et de patrimoine commun. Ces dernières devraient guider toute gestion en utilisant systématiquement toutes les données écologiques ayant une influence sur le milieu hydraulique (Lebriero, 1998). Le droit de la domanialité, pour protecteur qu'il soit, ne concerne guère que le plan d'eau et dans la meilleure des hypothèses, ses abords les plus immédiats (alluvions et plages lorsqu'elles sont effectivement établies). Il demeure étranger, en principe, aux lacs et aux autres formations des zones humides en tant qu'ensemble naturel et écologique (avec les roselières, les marais, ou les massifs boisés qui l'entourent, les affluents qui l'alimentent, etc.). Le milieu lacustre constitue indéniablement une richesse nationale, d'un point de vue tant social qu'économique et écologique (Davignon, 1979). Dans tous les cas, l'ensemble des utilisations de l'espace devront être pris en compte.

Dans le même ordre d'idée, la loi 10-95 ne fait aucune obligation pour la tenue d'une étude d'impact sur l'environnement (EIE), qui est justement l'instrument qui permet de faire l'inventaire de tous les intérêts de protection de l'environnement à prendre en considération. Dans la pratique administrative, l'EIE est limitée aux grands ouvrages hydrauliques, en particulier les barrages, et non à tout le bassin hydrographique et aux nappes phréatiques. Certes, la loi n° 12-03 du 12 mai 2003 sur les EIE est venue au secours de la loi 10-95. Elle dresse une liste des projets auxquels l'EIE est soumise. Cependant, certains projets d'aménagement sont exclus de l'exigence de l'EIE. Cette dispense est subordonnée à l'élaboration d'une simple étude des répercussions sur le DPH (Nadir, 2008b).

Les insuffisances de prise en compte des services d'eau potable et de l'assainissement

Les services d'eau potable et de l'assainissement restent au delà des attentes des populations citadines et rurales. De grandes disparités entre le milieu urbain et rural sont constatées, notamment dans l'approvisionnement de l'eau potable et de l'assainissement (Nadir, 2008b). De plus, au sein d'une même ville subsiste une ségrégation sociale dans l'approvisionnement de l'eau potable entre la médina, la ville moderne et les quartiers périphériques précaires et clandestins (Tazi Sadeq, 2006). Néanmoins, de louables efforts sont entrepris pour intégrer la gestion de l'eau dans l'habitat régulier (Allain-El Mansouri, 1996). Cependant, les quartiers défavorisés, où vivent les pauvres, sont exclus du bénéfice du raccordement individuel parce que le coût de l'accès au service est cher. Dans certains de ces quartiers, des bornes fontaines (BF) ont été mises en place et participent à l'intégration des néo-citadins à la ville.

Depuis la décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement lancée sous l'impulsion de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (1981-1990), à l'issue du Plan d'action de Mar del Plata adopté au cours de la Conférence des Nations Unies sur l'eau, tenue en 1997, l'accent a été mis sur la desserte des quartiers précaires et le difficile passage de l'accès à l'eau potable par la mise en place de branchements dits sociaux. Cette démarche d'élargissement de l'offre de desserte en eau potable s'est heurté à un double obstacle : la faible solvabilité d'une proportion importante⁹ des populations urbaines, mais aussi une résistance culturelle et psychologique, car l'eau n'est pas perçue, en général, dans les milieux populaires au Maroc, comme un bien marchand mais comme un bien social (De Miras et Le Tellier, 2005).

Au cours de ces dernières années, de profondes évolutions sont intervenues : une certaine « marchandisation » de ces services a conduit à de profondes mutations, avec des transferts vers le secteur privé. Il s'agit nécessairement de services publics industriels et commerciaux. Les communes responsables de la fourniture de l'eau et des services d'assainissement dans leur circonscription décident des modes de gestion de ces services par voie de régie directe, de régie autonome, de concession ou de toute autre mode de gestion déléguée aux services publics (Bulletin Officiel, 2002b). Mais, la gestion déléguée à des concessionnaires privés¹⁰ constitue le mode le plus envisagé par les communes. L'eau « bien social » paraît menacer par la logique de la marchandisation et du principe « eau bien économique ». La société concessionnaire, interpellée à payer à son juste prix, voit ses charges augmenter, ce qui ne manquera pas d'avoir des répercussions au niveau de la capacité des usagers à payer le prix. En effet, le prix de l'eau ou le prix des services rendus aux usagers devient de plus en plus cher et une partie des personnes est exclue du bénéfice de raccordement des services d'eau potable et d'assainissement. A cela s'ajoute

⁹ La part de la population vivant en dessous du seuil de pauvreté au Maroc est estimée selon les sources entre 13 et 20% de la population totale.

¹⁰ Les concessionnaires d'eau potable au Maroc sont : (i) Lyonnaise des Eaux de Casablanca (LYDEC) du groupe Suez Environnement, à Casablanca, créée en 1997 ; (ii) REDAL du groupe VEOLIA WATER, à Rabat, créée en 1999 ; et (iii) Société des Eaux et de l'Electricité du Nord (Amendis) du groupe VEOLIA WATER, à Tanger.

la défaillance des autorités publiques à orienter le contrôle des activités humaines liées à la gestion des ressources.

Quant à l'assainissement liquide, l'ONEP s'est vu attribuée la mission de la mise en œuvre de l'assainissement dans les communes, lorsque la gestion de ces services lui est confiée par délibération du conseil communal (Bulletin Officiel, 2000). Néanmoins, l'assainissement demeure un problème.

Malgré la construction de logements sociaux, près d'un citoyen sur 10 vit dans un habitat insalubre (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2007). Quelques chiffres révèlent l'état défavorable de ce secteur :

- Taux de raccordement : 70% de la population, en 2002, est desservie par un réseau d'assainissement, mais seulement 8% de la population est raccordée à une station d'épuration. La moitié des eaux domestiques collectées est ainsi déversée dans la mer. Le reste est rejeté dans le réseau hydrographique ou épandu sur les sols.
- Volume d'eau traité : 0,04 km³/an pour 0,65 km³/an produit (moyenne pour la période 1998-2002) (Office International de l'Eau, 2007). Face à l'ampleur du déficit de desserte de la population en réseau d'assainissement, le Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement a lancé un programme national d'assainissement liquide et d'épuration des eaux usées (PNA) (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 2007). Ce programme permettra d'atteindre un taux de raccordement global au réseau de 80% en milieu urbain et de rabattre la pollution domestique de 60% en 2010 et 80% en 2015 (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 2007). D'ailleurs, le projet de réforme de la loi 10-95 et de ses décrets d'application envisage d'inscrire les programmes d'assainissement liquide et d'épuration d'eaux usées parmi les priorités lors de la répartition des enveloppes budgétaires du secteur de l'eau (El Badraoui et Oubalkace, 2006).

Si des efforts ont été entrepris en milieu urbain, notamment pour la généralisation de l'eau potable et de l'assainissement, la situation de l'approvisionnement en eau potable des populations rurales souffre d'un sérieux retard qui handicape lourdement le développement économique et social du milieu rural : 14,3% seulement de la population rurale étant desservie en eau à travers des équipements publics en bon état et en fonctionnement. De plus, le reste de cette population a recours à des moyens traditionnels avec, pour l'essentiel, une exploitation défectueuse des équipements et une qualité de l'eau non contrôlée (Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, 1994).

La domanialité publique de l'eau aurait pu constituer un moyen généralisant l'accès à l'eau potable aussi bien au monde urbain que rural, notamment avec les nouvelles mesures de dépollution rapprochant ainsi l'équipement des villes et des campagnes. La protection des ressources hydriques par l'Etat, en tant que propriétaire du domaine public, n'est pas seulement une question de quantité mais aussi une question de qualité. Il est certain que si l'eau est source de vie, elle est aussi source de mort en dehors des normes de la

qualité exigée pour les utilisateurs éventuels. Il est pertinent de souligner que le monde rural n'est pas soumis à la même rigueur des normes de potabilité de l'eau que le monde urbain (Idrissi, 2001).

C'est dans ces conditions que les pouvoirs publics ont élaboré une stratégie de développement de l'eau potable en milieu rural (Programme d'Approvisionnement Groupé en Eau Potable des Populations Rurales-PAGER) (Idrissi, 2001), facilitée par l'existence de la loi 10-95 sur l'eau. L'objectif était d'atteindre un taux d'accès à l'eau potable en milieu rural de 80% à l'horizon de 2010, contre 14% en 1994. Depuis janvier 2004, l'alimentation en eau potable des populations rurales est entièrement sous la responsabilité de l'ONEP. Le bilan des réalisations de l'ONEP, entre 2003-2006, concernant l'accès à l'eau potable en milieu rural, est passé de 50% en 2002, à 61% en 2004, à 70% en fin 2005, et à 77% en fin 2006 (Office National de l'Eau Potable, 2007). Ces performances ont été possibles grâce à un saut net enregistré au niveau de l'investissement annuel, réalisé par l'ONEP, qui est passé d'une moyenne de 200 millions de MAD en 2002 à plus de 1150 millions de MAD en 2006, avec un investissement global de l'Office d'environ 3 milliards de MAD sur la période 2003-2006, touchant une population additionnelle de 3,2 millions d'habitants, répartie sur environ 5000 localités. En outre, l'ONEP est intervenu, pendant la même période, pour l'amélioration des conditions de desserte de 111 nouveaux petits centres ruraux, regroupant 428 000 habitants (Office National de l'Eau Potable, 2007).

Par ailleurs, depuis septembre 2000, l'ONEP est chargé de l'assainissement des centres, dont elle assure la distribution en eau. Les communes transfèrent cette responsabilité à l'ONEP progressivement. Aujourd'hui, l'ONEP gère le service d'assainissement d'une trentaine de petits centres. Il assure aussi l'assistance technique de toute commune qui en fait la demande. Sur les 311 centres urbains marocains, 204 gèrent ce service eux-mêmes. Il n'y a pas de service d'assainissement en milieu rural.

En vue de développer l'assainissement liquide non collectif en milieu rural, une intervention dans ce secteur est en synergie avec l'Initiative Nationale pour le Développement Humain (INDH), qui vise à s'attaquer au déficit social, dont souffrent les communes rurales les plus démunies, notamment par la généralisation de l'accès aux équipements et aux services sociaux de base. C'est ainsi que l'Agence Belge de Coopération au Développement (CTB) accorde une attention particulière au volet social dans ses interventions, qui se concentrent dans la zone comprenant le Souss-Massa-Draa et le Tafilalet, dans le Sud (Coopération Belge au développement, 2006).

En définitive, le droit à l'eau, tel qu'il est reconnu par les instruments internationaux et la Déclaration de Marrakech de 1997, devrait permettre d'orienter les pratiques de gestion déléguée à cet égard. Le rôle de l'Etat est d'aider les collectivités à mieux maîtriser la gestion de leurs services d'eau et d'assainissement par un encadrement réglementaire plus précis et par des moyens d'expertise et de conseil mis à leur disposition. Beaucoup d'améliorations peuvent être attendues.

L'évaluation des modes d'intervention dans le secteur de l'eau

Une première série de constats porte sur l'ampleur des tâches confiées aux ABH dans la protection et la gestion du DPH. Une deuxième série de constats porte sur l'absence d'une politique visant des objectifs de qualité. Enfin, du fait de l'intervention de plusieurs organes dans la gestion de ce secteur, on assiste à un chevauchement des compétences et à des conflits d'attribution, et surtout à un manque de coordination.

Les ABH : pouvoirs et risques

Les ABH sont chargées de diverses missions, aussi bien économiques que juridiques. L'article 20 de la loi 10-95 en fixe les attributions. Ainsi, l'ABH est chargée :

- D'une mission de planification décentralisée à l'échelle du bassin versant : élaborer le plan d'aménagement intégré des ressources en eau relevant de sa zone d'action et de veiller à l'application du PDAIRE à l'intérieur de sa zone d'action ;
- D'une mission de protection quantitative et qualitative de l'eau : à cet égard, les ABH rencontrent des difficultés majeures à s'attaquer aux origines des pollutions diffuses, agricole, industrielle, et domestique ainsi qu'au nombre indéterminé de pollueurs, amplifiés par le vide juridique sur la possibilité des ABH d'exercer les droits reconnus à la partie civile pour les faits portant préjudice direct ou indirect aux intérêts qu'elles ont pour objet de défendre ;
- De missions administratives consistant en la délivrance des autorisations et des concessions d'utilisation du DPH et de rejet ;
- D'une mission de police et de surveillance des eaux ;
- De mettre en œuvre les principes pollueur-payeur et utilisateur-payeur en prévoyant les redevances d'utilisation et de déversement ;
- De fournir toute aide financière et toute prestation de service, notamment d'assistance technique, aux personnes publiques ou privées qui en feraient la demande, soit pour prévenir la pollution des ressources en eau, soit en vue d'un aménagement ou d'une utilisation du DPH ;
- D'une mission de maîtrise d'ouvrage, en réalisant les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations ;
- A cela s'ajoutent d'autres missions prévues par les textes d'application, comme la proposition des fréquences de crue.

L'extension de leurs compétences dans de multiples directions risque de placer les ABH en concurrence avec d'autres organes et établissements intervenant dans le secteur de l'eau, en particulier les ORMVA, les collectivités locales, le département de l'environnement, les agences urbaines, les régies et les sociétés concessionnaires. De plus, l'ampleur des tâches dévolues aux ABH nécessite des moyens financiers et techniques adéquats importants, dont ne sont pas dotés les ABH pour la réalisation effective de leurs attributions.

De plus, les ABH rencontrent des difficultés pour le recouvrement des redevances fixées à des niveaux économiquement et politiquement acceptables. En outre, s'ajoute le problème de la répartition inégalitaire des charges entre redevables au profit de l'agriculture et de l'industrie, et au détriment des usages domestiques.

La gestion décentralisée de l'eau a produit un paradoxe sur la propriété de l'eau. La propriété publique est entre les mains de l'Etat qui ne délègue la gestion que pour mieux contrôler les étendues d'eau avec leur environnement. L'Etat s'est déresponsabilisé de la gestion en transférant les compétences aux ABH sans instaurer des mesures d'accompagnement qui assureraient le succès de la gestion décentralisée de l'eau. Pour remédier à cela, les ABH doivent être dotées de moyens financiers accrus et l'Etat est censé avoir un rôle prépondérant pour économiser la ressource en eau, assurer la sécurité et la production d'eau potable et lutter contre les inondations.

La nécessité d'accélérer la mise en œuvre d'une politique concernant les objectifs de qualité

L'article 56 de la loi 10-95 précise dans son 5^{ème} alinéa que « l'administration définira les spécifications techniques et les critères physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques auxquels les cours d'eau, sections de cours d'eau, canaux, lacs ou étangs devront répondre ». Tel est le fondement légal des objectifs de qualité. Ces spécifications et ces caractéristiques sont fixées par arrêtés des Ministres chargés de l'Eau et de l'Environnement, après avis de ceux de l'Agriculture, de la Santé, de l'Industrie et de l'Energie et des Mines (Bulletin Officiel, 1998d).

Ces objectifs de qualité n'ont jusqu'à présent été fixés pour aucun cours d'eau, canal, lac ou étang (Chaouni, 2005). Concrètement, fixer un objectif de qualité, c'est connaître les usages de l'eau et les vocations du cours d'eau appelé à les satisfaire ; c'est choisir, après concertation, un compromis chiffré entre la qualité de la rivière et l'implantation des industries polluantes. Fixer un objectif de qualité nécessite que l'on établisse le programme de travaux qu'il exige, assorti d'une estimation de leur coût et il faut donc, pour atteindre l'objectif, avoir l'assurance des disponibilités des diverses sources de financement aux échéances prévues. Enfin, fixer un objectif de qualité implique d'avoir mis au point l'outil réglementaire qui permettra de procéder à la révision des actes administratifs, des autorisations des rejets existants et, le moment venu, de délivrer de nouvelles autorisations tenant compte de l'ensemble des déversements polluants précédemment autorisés (Bady, 1979).

Donc, définir des objectifs de qualité suppose un climat de concertation, de conciliation entre la volonté de lutter contre la pollution et les réalités économiques et sociales. Le Maroc est appelé à poursuivre les efforts de lutte contre la pollution et d'asseoir une politique de concertation envisagée davantage comme une obligation qu'une démarche volontariste. Pour mener à bien ce processus, une plus large concertation s'impose. Outre les administrations et les élus, les industriels, les agriculteurs, les pêcheurs ou tout autre organisme doivent prendre part dans ce processus de concertation.

Le manque de coordination dans le secteur

La multiplicité des organes administratifs exerçant une compétence dans le domaine de l'eau n'est pas condamnable en soi, lorsque leur action converge vers la réalisation des objectifs d'une politique de l'eau définie par les hautes instances. Elle revêt cependant des aspects négatifs, lorsque la coordination entre les différents organes est mal assurée, ce qui est de nature à amoindrir les effets des actions entreprises. Ainsi, que ce soit au niveau central ou au niveau local, des organes disposent de compétences directes ou indirectes dans le domaine de l'eau sans une coordination préalable de leur action. De plus, ceci est amplifié par la non-clarification des rapports de l'administration centrale avec l'administration locale et la faible capacité des services locaux à mettre en œuvre les réformes.

Les règles de coordination ne sont pas définies, pas plus que les critères pour une telle coordination et les agents autorisés à prendre des initiatives. C'est ainsi qu'on assiste au manque d'échange et d'expérience, et surtout à la fragmentation des responsabilités entre les différentes institutions sectorielles en matière de mise en valeur des ressources en eau. Or, la préservation et la protection de l'eau en général, malgré ses différentes composantes, constituent une unité qui implique, impérativement, la détermination d'une stratégie globale appelant des actions complémentaires et cohérentes de la part de tous les départements ministériels et autres concernés.

CONCLUSION

À l'issue de l'examen des principales dispositions de la loi 10-95 sur l'eau, il s'avère que l'œuvre n'est pas encore achevée et que la tâche la plus importante qui reste à accomplir est de :

- Faire sortir les mesures réglementaires concernant les objectifs de qualité, qui assureront d'une manière efficace la qualité des eaux, ainsi que les mesures destinées à lutter contre la pollution des eaux souterraines par épandage excessif de produits chimiques ou organiques.
- Surmonter les difficultés de coordination et d'application de la loi et de ses décrets d'application. Dans ce cadre et suite au débat national sur l'eau, il importe d'accomplir un effort de sensibilisation de tous les usagers sur l'existence de cette loi et de ses décrets d'application, qui doit être entrepris surtout au niveau régional et local. D'autre part, il est impératif de parachever rapidement la parution de tous les textes d'application non encore publiés et de désigner, dès à présent, une commission qui se chargera d'analyser les possibilités d'actualisation de cette loi.
- Clarifier et préciser les responsabilités et les compétences de chacune des entités intervenant dans le secteur (telles que les ministères, les collectivités locales, les offices et les sociétés concessionnaires).

Le renouveau de la loi 10-95 ne peut être qu'à ce prix : prendre en compte toutes les préoccupations écologiques, économiques et sociales de la composante eau et œuvrer pour l'application de la loi par une large concertation.

REFERENCES

Agence Belge de Coopération au Développement (CTB) (2006) Projet de Programme Indicatif de Coopération (PIC) 2006-2009. Version 06/12, Annexe au procès-verbal de la 17^{ème} session de la commission mixte belgo-marocaine de coopération au développement, 19 décembre 2005, Bruxelles, Belgique. Disponible sur <www.dgci.be/fr/pays_partenaires/maroc/depliant_maroc_fr.pdf>.

Allain-El Mansouri B. (1996) L'histoire hydraulique de Rabat- Salé : De la logique communautaire à la logique individualiste. Dans « Eau : Gestion de la rareté », Tome 1, Ed. Imp. Najah El Jadida, Rabat, ISBN : 9981-9884-1-3, p. 113-126.

Bady J.F. (1979) Protection des cours d'eau et domanialité publique fluviale. Thèse de Doctorat en Droit, Université de Pau et Pays de l'Adour.

Banque Mondiale (2004) Secteur de l'eau et de l'assainissement. Royaume du Maroc, Note de politique, rapport n° 29 994 MOR.

Bulletin Officiel (1914a) B.O. n° 89 du 10 juillet 1914 : Dahir du 7 chaabane 1332 (1er juillet 1914) sur le domaine public dans la zone du Protectorat Français de l'Empire Chérifien.

Bulletin Officiel (1914b) B.O. n° 97 du 7 septembre 1914 : Dahir du 3 chaoual 1332 (25 août 1914) portant sur la réglementation des établissements insalubres, incommodes ou dangereux.

Bulletin Officiel (1995) B.O. n° 4325 du 20 septembre 1995 : Dahir n° 1-95-154 du 18 rabii I 1416 (16 août 1995) portant promulgation de la loi n° 10-95 sur l'eau.

Bulletin Officiel (1997) B.O. n° 4532 du 6 novembre 1997 : Article 2 du décret n°2-97-223 du 21 joumadall 1418 (24 octobre 1997) relatif à la procédure d'élaboration et de révision des plans directeurs d'aménagement intégré des ressources en eaux et du plan national de l'eau.

Bulletin Officiel (1998a) B.O. n° 4558 du 5 février 1998 : Décret n° 2-97-487 du 6 chaoual 1418 (4 février 1998) fixant la procédure d'octroi des autorisations et des concessions relatives au domaine public hydraulique.

Bulletin Officiel (1998b) B.O. n° 4558 du 5 février 1998 : Décret n° 2-97-414 du 6 chaoual 1418 (4 février 1998) relatif aux modalités de fixation et de recouvrement de la redevance pour utilisation de l'eau du domaine public hydraulique.

Bulletin Officiel (1998c) B.O. n° 4558 du 5 février 1998 : Article 2 du décret n°2-97-875 du 6 chaoual 1418 (4 février 1998) relatif à l'utilisation des eaux usées.

Bulletin Officiel (1998d) B.O. n° 4558 du 5 février 1998 : Article 9 du décret n° 2-97-787 du 6 chaoual 1418 (4 février 1998) relatif aux normes de qualité des eaux et à l'inventaire du degré de pollution des eaux.

Bulletin Officiel (2000) B.O. n° 4828 du 7 septembre 2000 : Article 2 du dahir n° 1-00-266 du 2 joumada I 1421 (1^{er} septembre 2000) portant promulgation de la loi n° 31-00 modifiant le dahir n° 72-103 du 18 safar 1392 (3 avril 1972) relatif à l'Office de l'eau potable.

Bulletin Officiel (2002a) B.O. n° 5014 du 20 Juin 2002 : Loi n°06-99 du 2 rabii I 1421 (5 juin 2000) sur la liberté des prix et de la concurrence

Bulletin Officiel (2002b) B.O. n° 5058 du 21 novembre 2002 : Article 39 du dahir n° 1-02-297 du 25 rejab 1423 (3 octobre 2002) portant promulgation de la loi n° 78-00 portant charte communale.

Bulletin Officiel (2003) B.O. n° 5178 du 15 janvier 2004 : Arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre des finances et de la privatisation et du ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement n° 2283-03 du 29 chaoual 1424 (24 décembre 2003) relatif aux redevances d'utilisation de l'eau du domaine public hydraulique pour l'approvisionnement en eau des populations.

Bulletin Officiel (2005a) B.O. n° 5292 du 17 février 2005 : Décret n° 2-04-553 du 13 hija 1425 (24 janvier 2005) relatif aux déversements, écoulements, rejets, dépôts directs ou indirects dans les eaux superficielles ou souterraines.

Bulletin Officiel (2005b) B.O. n° 5448 du 17 août 2006 : Arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement et du ministre de l'industrie, du commerce et de la mise à niveau de l'économie n° 1606-06 du 29 joumada II 1427 (25 juillet 2006) portant fixation des valeurs limites spécifiques de rejet des industries de la pâte à papier, du papier et du carton.

Bulletin Officiel (2005c) B.O. n° 5448 du 17 août 2006 : Arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement et du ministre de l'industrie, du commerce et de la mise à niveau de l'économie n° 1607-06 du 29 joumada II 1427 (25 juillet 2006) portant fixation des valeurs limites spécifiques de rejet domestique.

Bulletin Officiel (2005d) B.O. n° 5448 du 17 août 2006 : Arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement et du ministre de l'industrie, du commerce et de la mise à niveau de l'économie n° 1608-06 du 29 joumada II 1427 (25 juillet 2006) portant fixation des valeurs limites spécifiques de rejet des industries du sucre.

Bulletin Officiel (2006) B.O. n° 5440 du 20 juillet 2006 : Arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement, du ministre des finances et de la privatisation, du ministre de l'industrie, du ministre du tourisme, de l'artisanat et de l'économie sociale n° 1180-06 du 15 joumada I 1427(12

juin 2006) fixant les taux de redevances applicables aux déversements des eaux usées et définissant l'unité de pollution.

Caudal-Sizaret S (1993). La protection intégrée de l'environnement en droit public français. Thèse de Doctorat d'Etat en Droit, Université Jean Moulin – Lyon III, France.

Chaouni M. (2005) La loi sur l'eau et le droit à l'eau, une interprétation de la réglementation de l'eau à l'usage des utilisateurs et des gestionnaires des ressources en eau. Ed. ANZAR Conseil.

Conseil Economique et Social des Nations Unies, 2003. Questions de fond concernant la mise en œuvre du pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels. Observation générale n° 15 (2002) – Le droit à l'eau (art. 11 et 12 du Pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels). Comité des Droits Économiques, Sociaux et Culturels, 29^{ème} session, p. 11-29 novembre 2002, Genève, Suisse.

Conseil National de l'Environnement (2007) Programme national de l'assainissement liquide et le recyclage des eaux usées, N°5, 28 p. (En Arabe).

Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) (1994) Plan directeur de développement de l'Approvisionnement en eau potable dans le milieu rural (AEPMR). 8^{ème} session du CSEC, 31 janvier et 1^{er} février 1994, Rabat, Maroc.

Davignon J.F. (1979) La condition juridique des lacs : domanialité publique et protection de la nature. Actualités juridiques – Droit administratif (AJDA), n° 11, s.3 vd.

De Miras C. et Le Tellier J. (2005) Le Maroc et inclusions sociales urbaines : l'Etat providentiel monarchique face au marché. Università luav di Venezia, Dipartimento di Pianificazione, in actes du colloque N-AERUS Inclusion urbaine : politiques publiques et pratiques sociales, 16-17 sept. 2005, Lund, Suède, p. 58-68. Disponible sur <www.n-aerus.net/web/sat/workshops/2005/papers/15.pdf>.

El Badraoui M.H. et Oubalkace M. (2006) Réorientation de la politique nationale de l'eau : Vers une gestion intégrée, décentralisée et participative privilégiant la préservation quantitative et qualitative, et la gestion intégrée offre-demande en eau. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement (MATEE), COMMUNICATION – Groupe de travail « Prise en compte de la Gestion de la demande en eau (GDE) dans les politiques de l'eau ». Disponible sur <www.planbleu.org/publications/atelier_eau_saragosse/Poleau_10_MA_39_Oubalkace_final_FR.pdf>.

Idrissi A.N. (2001) Les aspects juridiques et institutionnels de l'approvisionnement de l'eau potable dans le milieu rural Marocain. Thèse de Doctorat en droit public, Faculté de Droit de Casablanca.

Lebriero S. (1998) Les eaux douces domaniales dans le droit français contemporain, contribution sur les rapports entre la protection de l'environnement et la domanialité publique. Thèse de Doctorat en droit, Tomes 1 et 2, Université de la Réunion.

Machichi M.D.A. (2004) Concurrence : droits et obligations des entreprises au Maroc. Eds. Eddif L'économiste, Casablanca, ISBN : 9981-09-067-0, 485 p.

Mekouar M.A. (1988) Droit agriculture, environnement : Stimuler la production dans le respect de la nature. Dans le recueil d'études en droit écologique : environnement, société et développement, Ed. Casablanca : Afrique Orient, p. 89-109.

Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement (MATEE) (2007) La lettre du développement durable. Bulletin d'information du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement n° 26 – 5^{ème} session du Conseil National de l'Environnement, 25 avril 2007, Rabat, Maroc.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2000. La directive cadre européenne sur l'eau – Une nouvelle ambition pour la politique de l'eau. Directions Régionales de l'Environnement, Directive du 23 octobre 2000.

Nadir B. (2008a) Le dispositif juridique de lutte contre la pollution des eaux : efficacité et limites. *Rev. Marocaine d'Administration Locale et de Développement*, N° 81-82, 81-97.

Nadir B. (2008b) Domanialité et environnement : cas des eaux et forêts. Ed. Idgle impr. Al Maarif, Rabat, ISBN : 9954-26-528-7, 360 p.

Office International de l'Eau (OIEau) (2007) L'eau dans le monde – Des fiches « pays » sur la gestion de l'eau. Disponible sur <http://www.oieau.fr/international/pays/OIEau_Maroc.pdf>.

Office National de l'Eau Potable (ONEP) (2007) L'alimentation en eau potable du monde rural : une prouesse Marocaine. Disponible sur <www.ime-eau.org/images/publicationsweb/ArticleONEP.pdf>.

Office National de l'Eau Potable (ONEP) et Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2003a) Epuration et réutilisation des eaux usées : Lignes d'orientation pour les études de mise en œuvre des projets intégrés de collecte. Rapport de mission. Convention UTF/MOR/023/MOR, N° 43/DI/FAO/2004, 19 p.

Office National de l'Eau Potable (ONEP) et F Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2003b) Quel système de gestion des projets d'épuration et de réutilisation des eaux usées. Atelier. Compte rendu, Convention UTF/MOR/023/MOR, N°42/DI/FAO/2004, 22 p.

Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (2007) Les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) au Maroc. Disponible sur <<http://www.pnud.org.ma/omd.asp>>.

Réseau International des Organismes de Bassin (RIOB) (2000) L'eau dans les rivières : développer les organismes de bassin dans le monde. Annexe 2, Forum Mondial de l'eau, Vision 2025 du RIOB. Gestion intégrée des ressources en eau, Programme associé : Création et renforcement des organismes de bassin. Atelier du RIOB, 20 mars 2000, La Haye, Pays-Bas. Disponible sur <http://www.riob.org/ag2000/gwp6verf_an2.htm>

Romi R. (1999) Droit et administration de l'environnement. Ed. Montchrestien, 3^{ème} Edition, ISBN: 978-2-7076-1160-4, 528 p.

Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau (2006a) Identification des dispositions de la loi sur l'eau et de ses textes d'application relatives à la protection des ressources en eau, contre la pollution et évaluation du degré de leur applicabilité. Octobre 2006, 23 p.

Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau (2006b) Etat des lieux des ressources en eau au niveau du bassin hydraulique du Sahara (Utilisation et problématiques posées). Débat National sur l'Eau « L'avenir de l'eau, l'affaire de tous ». Novembre 2006, Région hydraulique du Sahara Laayoune, Maroc, 26 p.

Sironneau J., 1998. Le droit international de l'eau existe-il ? Évolution et perspective pour la résolution des conflits d'usages. Congrès International de Kaslik, Liban, 18-20 juin 1998.

Tazi Sadeq H. (2006) Du droit de l'eau au droit de l'eau au Maroc et ailleurs. Ed. EDDIF, Casablanca, ISBN : 9981-896-95-0, 473 p.

Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) (1985) Dossier spécial sur les zones humides. Bulletin de l'UICN. N°25.

Vial C. (2006), Protection de l'environnement et libre circulation des marchandises. Thèse, Université Montpellier 1, Ed. Bruylant, Collection « Droit de l'Union européenne. Thèses », vol. 3, 620 p.

CHAPITRE 6

NATIONAL WATER POLICY REVIEW AND MANAGEMENT OF WATER SCARCITY IN LIBYA

O.M. SALEM*

General Water Authority (GWA)
Tripoli, Libya

ABSTRACT

Libya is a North African country with a surface area exceeding 1.5 million km², covering a great part of the Sahara desert, characterized by high temperature, high evaporation rates and extremely low precipitation. Limited surface water resources occur in the Northern plains and mountains and are partly controlled by a number of dams and reservoirs. A great bulk of the water used for domestic, industrial and agricultural purposes, originates from the five main groundwater basins. Only the Northern basins are however partly renewed. The national water balance shows a deficit in excess of 1 billion m³ per year and is expected to grow even further, driven by the ever growing demand as a result of population growth and improving standard of living. Overexploitation of groundwater aquifers has led to the evolution of chronic phenomena, such as sea water intrusion along the coastal aquifers and gradual lowering of the water table and piezometric levels elsewhere and will consequently lead to the depletion of the country's precious water reserve. Other issues and problems related to water resources include a relatively low standard of service with regard to domestic water supply and sanitation, low agricultural output, increasing salinity and pollution of groundwater, and low efficiency in water use, especially for the agricultural and domestic sectors. A water policy aiming at reducing the water budget deficit and preventing further water quality deterioration has been adopted and an action plan is being implemented which will consider among other steps redefining the priorities of water use, enhancing the contribution of non-conventional water resources, defining future supply options and in particular inter-basin water transfer and desalination of sea water, improve water use efficiency, reconsidering agricultural

* Auteur correspondant : SALEM Omar – General Water Authority (GWA) – P.O. Box 5332, Tripoli, Libya
Email : osalem@gwalibya.org – Tél. : (+218) 21 487 2024 – Fax : (+218) 21 487 2323

policies and practices, investing in capacity building and institutional reforms, improving legislations, water pricing, and controlling population growth.

Key words: Groundwater basins; water balance; water policy; seawater intrusion; desalination; non-conventional resources.

RESUME

La Libye est un pays d'Afrique du Nord avec une superficie dépassant 1,5 millions de km², couvrant une grande partie du désert du Sahara, caractérisée par de hautes températures, des taux d'évaporation élevés et des précipitations extrêmement faibles. Les ressources limitées en eau de surface se répartissent dans les plaines et les montagnes au Nord du pays et sont en partie contrôlées par un certain nombre de barrages et de réservoirs. L'eau utilisée à des fins domestiques, industrielles et agricoles provient, en grande partie, des cinq principaux bassins hydrogéologiques. Généralement, seulement les bassins du Nord sont en partie rénovés. Il est attendu que l'équilibre national de l'eau montre un déficit supérieur à 1 milliard de m³ par an et augmente encore, dû à la demande toujours croissante en raison de la croissance démographique et du meilleur niveau de vie de la population. La surexploitation des nappes souterraines a mené à l'évolution des phénomènes chroniques, tels que l'intrusion d'eau de mer le long des aquifères littoraux, l'abaissement progressif de la nappe phréatique et des niveaux piézométriques, ce qui mènera, par conséquent, à l'épuisement des réserves en eau du pays. D'autres issues et problèmes liés aux ressources en eau incluent le niveau de service relativement bas en ce qui concerne l'approvisionnement et l'assainissement des eaux domestiques, un rendement agricole faible, l'augmentation de la salinité et de la pollution des eaux souterraines, et la faible efficacité de l'utilisation de l'eau, particulièrement au niveau des secteurs agricoles et domestiques. Une politique de l'eau visant à réduire le déficit budgétaire lié à l'eau et à prévenir davantage la détérioration de la qualité de l'eau a été adoptée et un plan d'action a été mis en application. Ce plan d'action considérera, entre autres, la redéfinition des priorités de l'utilisation de l'eau, l'augmentation de la contribution des ressources en eau non conventionnelles, la définition des futures options d'approvisionnement, et en particulier le transfert interbassin de l'eau et le dessalement de l'eau de mer, la reconsidération des politiques et des pratiques agricoles, l'investissement dans le renforcement des capacités et les réformes institutionnelles, l'amélioration des législations, le prix de l'eau, et le contrôle de la croissance démographique.

Mots clés: Bassin hydrogéologique ; bilan hydrique ; politique de l'eau ; intrusion d'eau de mer ; dessalement ; ressources non conventionnelles.

INTRODUCTION

Libya is a North African country with a surface area of over 1.5 million km², forming a great part of the Sahara desert. It enjoys a Mediterranean coast of about 2000 km. In general, Libya has a flat surface area gently sloping Northward. Few mountains of low to medium altitudes mark the North Western (NW) and North Eastern (NE) as well as the Central and Southern parts of the country.

Only 2% of the surface area is considered suitable for agricultural activities, the rest is either a gravelly or sand dune desert, salt marshes (sabkhas) or mountains. Irrigated agriculture is currently estimated at around 400 000 ha, while dry farming occupies an area of 1.4 million ha.

The climate varies widely from North to South, influenced by the Mediterranean sea and the Sahara desert (Figure 1). The following climatic zones are present:

1. **Mediterranean – subtropical**: limited to a small area in the Jabal Akhdar (NE);
2. **Semi-Mediterranean**: covering a small strip along the Mediterranean coast (NW and NE);
3. **Steppe**: covering the southern slopes of Jabal Nafusa and Jabal Akhdar;
4. **Desert**: covering the greater part of the country Southward.

According to the last census in 2006, the total Libyan population is 5.673 million. Geographically, the Libyan population is concentrated along the coastal belt and in few inland cities and oases. In fact, over 50% of the total population lives in the Gefara plain and Jabal Nafusa making the density over 120 inhabitants/km². In the Central and Southern parts of the country, the population density is below 1 inhabitant/km².

In comparison with previous censuses, a decline in the rate of population growth from 4.21% in 1984 to 2.86% in 1995 and 1.83% in 2006. This decline is of great significance as it reflects a certain degree of public awareness, which could lead to a more effective control of the use of natural resources. Table 1 shows one of the scenarios of future Libyan population.

Surface water resources are very limited and contribute less than 3% of the current water resources in use. This is due to the fact that Libya does not have perennial rivers, with surface runoff very limited to the winter floods following intensive rainfall storms. Such flow is estimated at around 80 million m³ (Mm³)/yr in Jabal Akhdar, 77 Mm³/yr in Jabal Nafusa and 30 Mm³/yr in the Hamada area. Heavy rainfall events, though not very frequent, could produce major floods in the winter months of October to February. They play a major role in the replenishment of the Quaternary and Tertiary aquifers in Northern Libya and in maintaining flow of several small and medium size springs.

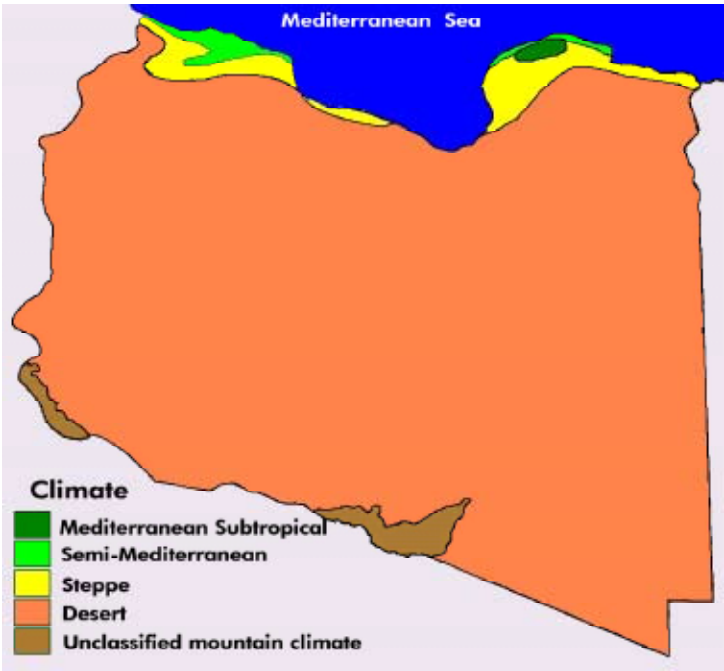


Figure 1. Map of Libya presenting the different climate zones

Table 1. Population Growth (Salem, 1996)

Year	2006	2010	2015	2020	2025
Population (10 ⁶)*	5.7	7.0	9.0	10.0	11.0

**Including non-Libyan population.*

Libya has in the past few years managed to control a great part of its surface runoff. Hundreds of small size dams and reservoirs were constructed for the purpose of harvesting rainwater and for soil conservation (Figure 2). For flood control and protection of population centers and agricultural fields, 18 major dams were also constructed. The total reservoir capacity of these dams is in the order of 375 Mm³ but their average annual storage capacity is only 61 m³. Water stored behind these major dams is used for the supply of agricultural areas, industrial projects, and in few cases for domestic use. More dams are planned for construction during the coming years. They will total around 20 dams, which will raise the annual storage to around 110 Mm³.

Libya also has a great number of natural springs, many of which are of good quality water. Their discharge varies from less than 1 l/s to over 10 l/s. Few springs are, however, of much higher discharges, namely Ayn Zayana, Ayn Kaam, Ayn Dabbousia and Ayn Tawargha. A major program for the rehabilitation and use of the springs is underway.



Figure 2. Picture of a check dam constructed in Libya

Surface water resources are therefore not expected to add considerably to the water supply of Libya. In fact, if we consider that only that portion of the surface runoff that reaches the sea as a "loss", then even the planned projects, such as the additional dams and reservoirs, will contribute only little to the overall water balance.

Being an arid zone country, Libya depends heavily on groundwater, which accounts for more than 97% of the water in use. In the past, groundwater was easily extracted through large diameter dug wells, using traditional tools since water levels were very near to the surface. However, starting from the early sixties and coinciding with the oil boom, groundwater extraction rates accelerated rapidly and the use of centrifugal and submersible pumps became necessary to cope with the lowering water table. Groundwater resources are divided into two major categories: renewable and non-renewable. The renewable groundwater resources are those retained in the Northern aquifers of the Gefara plain, Jabal Akhdar and parts of the Hamada and Central zone area (Figure 3). The non-renewable groundwater resources are those belonging to the great sedimentary basins of the Kufra, Murzuk, Sarir and the Hamada (Figure 3). These basins are occupying the Southern part of the country and fall under severely arid conditions. Rare events of heavy showers producing local runoff do take place especially at the Haruj Mountains (Center), the Tibesti Mountains (South) and Aweinat mountains (West). These events may cause local recharge, which is of minor importance in comparison with total storage values and aquifer losses.

In this paper, an attempt to analyse the water situation in Libya in view of the present and future demand is presented. As the water balance deficit is expected to grow much bigger in the coming decades, a water policy was introduced and adopted in recent

years. If properly implemented, the new policy could lead to a considerable reduction in the water deficit and prolong the lifetime of the vulnerable groundwater resources.



Figure 3. Schematic map presenting the main groundwater basins of Libya

REVIEW OF CURRENT SITUATION

Water use

Despite the scarcity of water resources, consumption is in the rise as a result of better economic conditions, urbanization, and improving standards of living. Irrigated agriculture is expanding in the North as well as in the oases and along wadies. At present it is estimated that between 350 000 and 400 000 ha are under irrigation. Their water requirement varies from less than 7000 m³/ha to over 25 000 m³/ha, depending on the location, type of crop and irrigation method. On the other hand, domestic water use varies from less than 150 liters per capita per day (l/c/d) in small rural settlements to over 500 l/c/d in major cities.

Agricultural Use

Agriculture is and will continue to be the major water consumer. In 2006, agricultural water use was approximately 3.8 billion m³, which represents about 78% of the current water demand and despite the use of pressurized irrigation techniques in practically all farming areas, application rates are still among the highest in the world. This is mainly due to the unsuitable climatic and soil conditions. Different scenarios can be presented for the estimation of future water demand by the agricultural sector. A reasonable one is that shown in Table 2.

Efficiency of the applied irrigation systems is in the order of 40 to 60% for surface irrigation, 60 to 75% for sprinkler irrigation and >80% for localized (micro) irrigation. Efficiency is expected to be further improved by expansion on localized irrigation. In fact, few factories producing micro irrigation equipments are already in operation.

Table 2. Estimation of future agricultural water use

Year	2006	2010	2015	2020	2025
Irrigated area (1000 ha)	400	450	480	500	530
Water demand (10 ⁶ m ³)	3860	4342	4632	4825	5114

Domestic use

In Libya, 85% of the population live in urban centers, varying in size from 5000 to over 1 000 000 inhabitants, and depend for their domestic water supply on municipal sources with house connections. Different surveys were conducted to determine the average water consumption per capita (PolSERVICE, 1985) which was found to range from 150 to over 500 l/c/d depending on the size of city, location, and age of network.

In rural areas, people depend to a certain extent on private water supply sources, usually through wells, rainwater reservoirs and springs. The average per capita consumption falls between 100 and 150 l/c/d.

Domestic water consumption rates are generally increasing in time as a function of income. For future estimate of domestic water use, an average per capita consumption of 280 l/d can be assumed. The obtained figures are shown in Table 3.

Table 3. Estimation of future domestic water consumption

Year	2006	2010	2015	2020	2025
Population (million)	5.7	7.0	9.0	10.0	11.0
Domestic Water Consumption (Mm ³)*	582	715	920	1022	1124

*Mm³: Million cubic meter

Industrial Use

Industry is the least water consumer among other sectors with a present share of about 10%. A large number of industries depend on private sources for water supply, including desalination of seawater, as in the case of chemical, petro-chemical, steel, textile and other industries. In 2006, the total industrial water use was estimated at 500 Mm³/yr, 75% of which is used in the oil production activities. A moderate increase in water use for industrial and oil production activities is foreseen for the future (Table 4).

Table 4. Estimation of future industrial water use

Year	2006	2010	2015	2020	2025
Water use (Mm ³)	500	550	580	600	630

Water balance

In order to evaluate the water resources available for use in Libya, it is necessary to analyze the conventional and non-conventional sources including the non-renewable groundwater resources. The latter are those resources contained in the large sedimentary basins of the Southern half of the country, which could contribute to the development schemes by allowing an acceptable rate of water level decline without exposing them to serious deterioration in quality. Accordingly, a calculated volume of the non-renewable resources could be safely used within a reasonable time scale. Several factors control the "rate of mining" of the groundwater aquifers, among which, accessibility, quality, cost of production, and use.

In Libya, the volume of water potentially available for use is estimated at 3820 Mm³ of which 170 Mm³ is surface water, 650 Mm³ is annual recharge to groundwater aquifers and 3000 Mm³ is an acceptable depletion rate of the non-renewable aquifers. The latter value is independently determined for each basin on the basis of its hydrogeological characteristics and total reserve. Table 5 summarizes the available water resources in the country. The data presented in Table 5 are expected to change in time as a result of improvement in the state of knowledge on the aquifer conditions. Table 6 shows the overall water balance projected for the year 2025.

Table 5. Available water resources in Libya (General Water Authority, 2006)

Source	Potentially available water (Mm ³ /yr)
Surface Water*	170
Renewable Groundwater	650
<u>Non-renewable Groundwater</u>	
-Gefara Plain**	25
-Jabal Akhdar**	25
-Kufra and Sarir***	1300
-Hamada**	150
-Murzuk***	1500
Total	3820

*Not totally controlled

**In addition to the renewed volume

***Estimated for a minimum of 50 years

It should be noted that the values presented in Table 6 are conservative estimates as far as demand is concerned; and is by no means representing the state of self-sufficiency in basic food production.

Table 6. Estimation of the water balance in Libya*

Year	2006	2010	2015	2020	2025
Supply (Mm ³)	3820	3820	3820	3820	3820
Demand (Mm ³)	4942	5607	6132	6447	6868
Balance (Mm ³)	-1122	-1787	-2312	-2627	-3048

**Supply from non-conventional sources, such as desalination and wastewater treatment, is not considered, but it could considerably increase the total water supply and reduces deficit.*

Water Availability

The calculated per capita share of the renewable water resources is among the lowest in the area, declining from 144 m³ in 2006 to only 75 m³ by the year 2025 (Table 7).

Table 7. Estimation of the per capita water share of renewable water in Libya

Year	2006	2010	2015	2020	2025
Per Capita Share (m ³)	144	117	91	82	75

The large deficit in the water balance is fulfilled through over-exploitation of the coastal aquifers in the first place as well as from the inland aquifers. This has already introduced major problems, such as sharp decline in water levels, and increase in salinity.

The seawater intrusion front along the NW coast is advancing at an alarming rate and has already invaded 10 km inland in the Tripoli region. The effect of this encroachment is not only irreversible but also affecting about half of the Libyan population and more than half the irrigated agriculture.

Water sector policy

Policy issues and problems

The main issues facing the water sector can be briefly presented and analyzed as follows:

Supply – Demand imbalance

Libya is subdivided into five water zones representing the major groundwater basins or aquifer systems. It is therefore necessary to define the water balance for each basin

separately (Table 8). The uneven distribution of population and the intensive agricultural activities in the coastal plains make the gap between supply and demand much wider in the Gefara and Jabal Akhdar plains in addition to certain areas of the Murzuq basin which are witnessing fast growing irrigation under severe climatic conditions.

The imbalance between supply and demand is expected to grow much wider in the future, especially for the Northern basins. The immediate remedies already considered include inter-basin water transfer, desalination and wastewater treatment. Other complementary solutions cover legislative measures, water pricing, and public awareness.

Table 8. Water Balance per Libyan Basin for 2006 (General Water Authority, 2006)

Basin	Gefara Pain	Jabal Akhdar	Hamada Hamra	Kufra & Sarir	Murzuk	Total
Population (million)	2.66	1.51	1.09	0.15	0.29	5.7
Area (km ²)	18 000	145 000	215 000	700 000	350 000	
Total Water Use (Mm ³)	1082	387	313	970	2190	4942
Water supply (Mm ³)	273	288	459	300	1500	3820
Balance (Mm ³)	-809	-99	146	330	-690	-1122

Standard of service

In Libya, water for irrigation is mainly obtained from groundwater through drilled wells ranging in depth from less than 100 m to over 1000 m. Around 60% of the population is served by municipal water networks, with metered house connections. The source of municipal water is usually from well fields and in very few cases from desalination plants. Few cities are witnessing water supply shortages forcing people to buy potable water from private vendors, usually in the form of truck-mounted cisterns. A number of sewage treatment plants, covering practically most major cities have been constructed. Their total design capacity is in the order of 600 000 m³/d. Few plants are however in operation, with an estimated output of 190 000 m³/d, used primarily for fodder and fruit tree irrigation in nearby projects. Generally, water supply, distribution and sewage treatment systems are inadequate and many factories, institutions and individuals still depend on private supply sources. In the near future, domestic water supply will be fully secured from conveyed water from the "Great Man-made River Project" (GMRP) well fields in Sarir Kufra, Ghadames and Murzuk basins in addition to newly planned desalination plants. Major coastal cities, such as Tripoli, Benghazi, Sirte, and Misrata, are already supplied by GMRP water.

Economic importance of the water sector

Water plays a vital role in agricultural and industrial activities, which are responsible for the employment of over 37% of the active manpower. However, agriculture's contribution to the Gross Domestic Product (GDP) is only 7.7%, and is far from securing self sufficiency in major food items, such as cereals, meat, oil, dairy products, legumes and to a lesser degree vegetables and fruits. This role is expected to diminish even further in future as a result of water scarcity and quality deterioration.

Water quality indicators

About 0.6 million km² or the equivalent of 40% of the total area of Libya is underlain by high salinity aquifers of up to 5 g/l. This salinity is either naturally occurring or caused by sea water intrusion. Figure 4 shows the development of sea water intrusion around Tripoli



Figure 4. Seawater intrusion evolution

The sudden increase in salinity obliged many institutions, such as hospitals, colleges, army camps, company compounds, hotels, and several industries to install desalination units. The cost of operation and maintenance of wells, pumps, house connections, and other equipments is alarmingly increasing. On the other hand, groundwater pollution, though very rare in sandstone aquifers, is reported in several locations in the karstic carbonate aquifers of the Jabal Akhdar. The source of pollution, in several cases, is the direct disposal of sewage in wadi beds and depressions, the spread of unlined dump sites, cesspools and in certain cases the uncontrolled disposal of industrial waste. Pollution as a result of intensive agricultural activities is still rare; nevertheless, high nitrate concentrations are reported in shallow groundwater aquifers underlying agricultural projects in the South, as well as in shallow aquifers in highly populated areas.

Efficiency of use

Sprinkler and drip or localized irrigation are commonly adopted irrigation methods. Their average efficiencies are estimated at 60-75% and over 80%, respectively. In large scale irrigation projects using central pivots, the efficiency is slightly lower. Although, no tendency for over irrigation is reported, application rates per hectare are still among the highest in the region due to unsuitable climatic and soil conditions. The national average of application is 9645 m³/ha and varies according to crop type and location. For example, average requirements for wheat is 4110 m³/ha in the North and 8500 m³/ha in the South, and that for fruit trees from 7000 to 15 000 m³/ha. For Alfalfa the rate is between 18 000 and 32 000 m³/ha and for summer vegetables it ranges from 6000 to 10 000 m³/ha, while for winter vegetables the rate is between 4000 and 6000 m³/ha.

In the municipal sector, distribution losses are estimated at 15 to 30% and the per capita water consumption is fairly high, compared to other North African countries with similar social, economical and climatic conditions.

In industry, water use is limited and is therefore better controlled.

Sewage treatment is facing serious difficulties in terms of operation and maintenance and despite the great number of plants built, only few are operating with medium to high efficiency.

At house level, water use could be further reduced by at least 30% if certain measures are adopted, including the introduction of more efficient appliances, elimination of leakage, and the introduction of public awareness programmes.

Policy objectives

The main objectives of the water policy are to reduce the deficit in the water budget and to prevent water quality deterioration.

Policy action plan

Several actions have already been considered and will be given further attentions in the future. They include, among other steps, the following:

Priority of use

The Libyan Water Law sets the order of priorities in licensing for the use of water resources in the following order (Article 8 of Law No.3 of 1982):

1. Domestic use;
2. Agricultural purposes, preferably cultivation of food crops;
3. Industrial purposes and mining.

To secure continuous supply of domestic water under the prevailing scarcity conditions and growing demand, certain aquifers must be fully dedicated for this purpose, in particular, the renewable shallow aquifers in the highly populated zones in the North and the fresh water aquifers in the oases.

Contribution of non-conventional water resources

The contribution of desalination and wastewater treatment plants represents only 39% and 32% of their installed capacity, respectively. It is, therefore, necessary not only to restore the production capacity of the constructed plants but also to invest in additional plants during the next decades. If 50% of domestic water use is considered feasible for treatment, then by the year 2025, Libya should be able to produce around 400 to 600 Mm³/yr of treated wastewater that can effectively enhance the irrigation water supply. On the other hand, desalination could close the gap in the domestic water supply deficit.

Future supply options

Future water supply will originate from two main sources: (i) inter-basin water transfer from large sedimentary basins in the South and (ii) sea water desalination. The conveyance of groundwater through large diameter pipelines for thousands of kilometers to bring more than 6 Mm³/d of good quality water to the affected areas in the North is in the final stages of implementation. This water will secure domestic water supply for a great number of cities including Tripoli and Benghazi. The project is planned to last for a minimum of 50 years, during which a great effort should be placed on the development of additional desalination projects. On the long range, however, inter-basin water transfer is not at all feasible for technical and economical reasons.

Resource development

Full control of surface water resources could be realized by the construction of twenty more dams and hundreds of ground reservoirs. The necessary studies and designs for these projects have already been completed. The total harvested water could then be raised to a maximum of 120 to 150 Mm³. The construction of more dams should, however, be treated with care to avoid possible negative effects on groundwater replenishment. Additional development of the groundwater resources beyond the planned schemes of the GMRP could only be considered if confirmed by further detailed investigations in co-ordination with neighboring countries.

Water resources assessment

In order to define the geometry, extension, hydraulic properties, water quality, behavior and long term reaction of the groundwater aquifers in response to proposed exploitation schemes, detailed studies and continuous monitoring should be conducted. Although a great part of the country is covered by reconnaissance, semi-detailed or detailed studies, more work needs to be done to improve the state of knowledge. Evaluation of the current water potential, assessment of recharge, losses, groundwater extraction and assessment of sources and extent of pollution requires the establishment of data bases, Geographic Information Systems (GIS) and running of mathematical models for each of the major basins. Heavy investment on the establishment of monitoring networks for groundwater levels, water quality and surface water should be programmed over the coming years.

Efficient use of water

Raising the efficiency of water distribution and use, particularly in the agricultural and domestic sectors, would result in an overall saving of around 1.5 billion m³/yr. This requires monitoring of municipal networks for leak detection and repairs, introduction of high efficiency irrigation systems, and the organization of extension campaigns to educate farmers on efficient irrigation practices.

Agricultural policy

Previously conducted master plans recommended the reduction of pumped groundwater for irrigation in seriously affected zones and called for import of agricultural products particularly those of high water consumption rates. Although self sufficiency in basic food items is set as a priority among agricultural policies of the country, a re-assessment of the national food security policy along with an evaluation of the role of agriculture in the economy is highly recommended. Large scale irrigation projects to produce cereals were realized under poor climatic and soil conditions. Located deep in the desert, these state-run projects succeeded in augmenting production but at a relatively high cost and extremely high rates of water application. Other high water consuming crops are still produced extensively in the Southern part of the country, including alfalfa, tomatoes, water melons, onions and other crops. Upon completion of the GMRP, such cropping patterns must be altered and replaced by production under more suitable conditions in the North, with great savings in the quantity of water used. Other changes in the agricultural practice may include the expansion on greenhouse production for vegetables, banning exports, and application of water rationing.

Capacity building

Capacity building in the form of education and training of personnel, institutional reforms and enforcing water legislations has witnessed good progress in recent years. At local level, training courses are provided by national training centers. Academically, three levels of training are offered at intermediate, high and university levels, along with participation in internationally organized training courses and academic studies. A skill gap analysis is needed for the preparation of a human resources development and implementation program.

Institutional aspects

In Libya, water resources development, management and use are the concern of three main departments, namely the General Water Authority (GWA), the General Authority for Housing and Utilities and the Secretariat of Electricity, Water and Gas. GWA was formed in 1972 and was initially entrusted with:

- Proposing the general water policy;
- Conducting studies and research to ensure optimum utilization of available resources;

- Processing applications for water use and deciding on size, location and conditions of use;
- Proposing water legislations;
- Supervising water exploitation projects.

Additional tasks were added later to the activities of GWA to cover the fields of dam construction, soils, irrigation and drainage. GWA is currently under the general supervision of the Secretariat of Agriculture. Non-conventional water resources, such as desalination, wastewater treatment and domestic supply, are controlled by the Secretariat of Electricity, Water and Gas and the General Authority for Housing and Utilities, two public companies recently formed. The first one is in charge of desalination and the second is in charge of water and wastewater¹. In order to enhance the water sector governance it is necessary to establish a National Water Council and upgrade GWA's reporting relationship.

Legislative actions

Libya is among the first few countries in the region with modern water legislations. The first water law was issued in 1965, and was later superseded by Law No.3 of 1982. The latter clearly defines the ownership of water, responsibility of control and management, licensing for drilling, exploitation and use, pollution control, and penalties.

Under the Law No.3 of 1982, water is a public ownership and can only be exploited by a license which defines the amount and duration of use. A region that witnesses over-exploitation resulting in heavy drawdown and deterioration in quality is declared a prohibited zone for further development.

The polluter pays principle is clearly stated in the water law along with necessary protective measures.

Complementary legislations that are directly or indirectly related to water conservation are in force including the Environmental Protection Law, the Water Well Drilling Law, the Economic Crimes Law, the Protection of Ranges and Forests Law, the Agricultural Inspection Law, the Law of Tribal Lands and Wells. In addition, several Decrees and Decisions by the General People's Committee and the Secretariat of Agriculture were issued.

Despite the fact that water legislations in Libya are satisfactory and cover all aspects of water conservation and protection, their implementation is still inadequate despite the establishment of a special police force and courts to deal with agricultural and water violations. A systematic review of the current legislations should however be carried out and necessary changes introduced.

¹ In March 2009, a Secretariat for Utilities was established and the Secretariat for Electricity, Water and Gas was cancelled. The new Secretariat will be responsible for domestic water supply, water treatment and possibly desalination.

Water pricing

Assigning a value for water is strongly recommended as an effective tool for water saving. In Libya, domestic water supply is subject to an ascending charge. The billing system is still inefficient and water for irrigation is currently obtained free of charge from private sources. Although GMRP water is metered and charged to the end-users, this process must also include all privately developed water supplies, and be based on the right of use approach which gives GWA the power to allocate a fixed amount of water for each farmer based on the size of farm, type of crop, location and other considerations.

Population growth control

Population growth control is the key to success for any planning operation. Under a scarce and diminishing water resources situation, the population size becomes an important factor in estimating future water demand. Until recently, the general policy was to encourage a high population growth rate to cope with the fast growing economy, which requires more skilled manpower to implement the ambitious development plans. This tendency should now be reversed and central planning bodies are required to preach lower rates of population growth. Appropriate measures for birth control need to be taken and public awareness campaigns frequently organized. It should however be admitted that population growth rates are witnessing a gradual decrease during the last few decades.

International commitments

Libya does not share any surface water resources with neighboring countries, but does, however, share groundwater basins with Egypt, Sudan, Chad, Algeria and Tunisia. Development of these groundwater basins was limited in the past, but could become more and more intense in the future. Regional mechanisms for exchange of technical data and implementation of joint programs for the rational use of these non-renewable water resources were established. As a result of such coordination, joint studies covering the entire basins were executed using national and international funds. These studies include the setting of common data bases, GIS, hydrogeological maps and mathematical models for the Nubian sandstone aquifer between Libya, Egypt, Sudan and Chad and the Continental Intercalaire aquifer between Libya, Algeria and Tunisia.

CONCLUSION

Libya is already facing a critical water shortage which could lead to a serious crisis in the future. The country is increasingly depleting its precious groundwater resources, most of which are non-renewable. Imbalance between supply and demand, low standard of service, water quality deterioration, inefficiency of use and institutional and administrative difficulties are among the various problems of the water sector. Certain actions have been taken to overcome these problems. They include legislative measures, inter-basin

water transfer and development of non-conventional resources. Further actions should include upgrading of water use efficiency, development of potential natural resources, improvement of irrigation systems and agricultural practices, introduction of water pricing, emphasis on application of legislative measures, and most important public awareness and population growth control.

REFERENCES

- General Water Authority (GWA) (2006) The Status of Water Resources in Libya, Tripoli. 75 p.
- PolSERVICE. (1985) Tripoli Region – Regional Plan 2000. Final Report (TF-1). Secretariat of Utilities. Tripoli, Lybia.
- Salem, O. (1996) Management of the Diminishing water Resources of Libya. Paper submitted to the Workshop on the Role of Industry in the Development and Rational Use of Water Resources in the Arab Region. UNIDO. Amman, Jordan, 13-15 May 1996.

PARTIE II

LES EAUX DOUCES ET DE SURFACE

CHAPITRE 7

CARACTERISATION DES EVENEMENTS EXTREMES EN TUNISIE ET POSSIBILITES DE LA MAITRISE DES EXCEDENTS POUR UNE GESTION DURABLE DE LA RESSOURCE

H.L. FRIGUI*

Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE)
Tunis, Tunisie

S. TOUZI

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau – Institut National Agronomique de
Tunisie
Tunis, Tunisie

RESUME

En raison de sa position géographique, la Tunisie est soumise à l'influence de deux climats, méditerranéen au Nord et saharien au Sud, qui sont à l'origine d'une variabilité spatio-temporelle des ressources en eau. Ces conditions font en effet que la ressource est rare et inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. De ce fait, les risques d'abondance ou d'insuffisance en eau constituent deux phénomènes courants du climat du pays et ont nécessité une gestion intra et inter annuelle permettant le stockage du surplus hydrique pendant les années excédentaires et son utilisation pendant les années de sécheresse. Jusqu'à aujourd'hui, la Tunisie a réussi, à travers sa politique de mobilisation et de transferts interrégionaux des ressources en eau, à satisfaire les demandes en eau de tous les secteurs, notamment en périodes de déficit. Cependant, et à l'horizon 2030, les demandes en eau, sans cesse croissantes, se rapprocheront des ressources mobilisées réduisant ainsi la marge de sécurité entre offre et demande. Pour que l'eau ne constitue pas un facteur limitant au développement, les experts préconisent un effort supplémentaire en termes

* Auteur correspondant : Dr. FRIGUI Hassen Lotfi – Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) – 43 rue de la Manoubia, 1008 Montfleury, Tunis, Tunisie
Email : hfrigui@yahoo.fr – Tél. : (+216) 71 391 851 / (+216) 71 560 000 – Fax : (+216) 7139 1549

de gestion par la demande ainsi que le recours aux ressources non conventionnelles. Dans le présent article, les apports des événements de crues exceptionnels et leur récurrence seront évalués, invitant ainsi à mener une réflexion autour de la maîtrise de ces apports et leur prise en considération dans les bilans hydriques à long terme.

Mots clés : Variabilité ; irrégularité ; inondation ; sécheresse ; gestion ; maîtrise ; extrême ; bilan.

INTRODUCTION

La Tunisie, en raison de sa situation géographique entre la Méditerranée et le Sahara, est un pays aride sur la majeure partie de son territoire. Cette aridité, conjuguée à la variabilité du climat méditerranéen, fait de l'eau une ressource à la fois rare et inégalement répartie dans le temps et dans l'espace.

La rareté des ressources en eau, la variabilité et l'irrégularité de sa répartition d'un côté, et l'augmentation des besoins en eau de l'autre ont exigé une attention particulière de la part des gestionnaires quant à l'identification, la mobilisation et la rationalisation de la desserte de la ressource en eau. C'est ainsi qu'un effort considérable a été consacré par les gestionnaires de l'eau en Tunisie pour la mobilisation des eaux aussi bien de surface que souterraines ; ce qui a permis jusqu'en 2006 de mobiliser 91% du total des ressources mobilisables (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2006). En ce qui concerne les eaux de surface, la mobilisation a été effectuée moyennant la construction de 26 grands barrages, 190 barrages collinaires et 812 lacs collinaires, ayant une capacité totale de 2200 millions de m³ (Mm³), représentant 88% des ressources mobilisables en eau de surface.

A travers sa stratégie de mobilisation, la Tunisie a pu accroître continuellement son offre en eau et répondre ainsi aux demandes exprimées, que ce soit en agriculture irriguée ou bien dans les autres secteurs de développement, comme l'industrie, le tourisme ou le développement urbain en général.

Cependant, les études prospectives et stratégiques réalisées pour le compte du Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques, dont l'étude de 1998, s'accordent toutes sur le rapprochement entre ressources mobilisées et demandes en eau à l'horizon 2030. Aussi, la mobilisation des ressources conventionnelles tend vers ses limites. Afin de continuer à répondre aux nouveaux besoins et en vue de satisfaire le développement socio-économique des générations futures, les experts préconisent un effort supplémentaire en termes de gestion par la demande ainsi que de recours aux ressources non conventionnelles.

Dans le présent article, nous nous interrogeons quant à la limite des ressources conventionnelles mobilisables. En particulier, nous nous intéressons aux volumes apportés lors des crues dites exceptionnelles. Quel potentiel en eau représentent-elles ?

Leur maîtrise pourrait-elle offrir une ressource supplémentaire à considérer dans les futurs bilans hydriques ?

Dans la première partie, l'historique de l'occurrence des événements extrêmes, sécheresses et inondations, sera retracé, à partir du VI^{ème} siècle. Dans la deuxième partie, la variabilité pluviométrique sera caractérisée à travers le pays en considérant trois stations supposées représentatives des trois régions de la Tunisie : le Nord, le Centre et le Sud. Ensuite, dans la troisième partie, l'effet de cette variabilité pluviométrique sur l'avènement des crues et des inondations sera analysé. Enfin, les apports annuels moyens seront évalués pour les différentes périodes de retour pour conclure sur les potentialités en ressources en eau exceptionnelles et ouvrir des perspectives et des pistes de recherche en termes de leur maîtrise.

EVENEMENTS EXTREMES

Selon l'historique des données pluviométriques en Tunisie (obtenues dans les ouvrages, les journaux, et via les observations diverses et les mesures), le pays a connu :

- Pendant la période de 707 à 1640, 25 périodes de sécheresses et 8 périodes d'inondations ;
- Entre 1640 et 1758, aucune sécheresse et trois inondations ;
- De 1758 à 1900, quatre sécheresses et deux inondations ;
- Et de 1900 à nos jours, on compte 20 sécheresses contre 14 inondations.

Les événements extrêmes observés en Tunisie durant la période 707-2003 sont reportées sur la Figure 1.

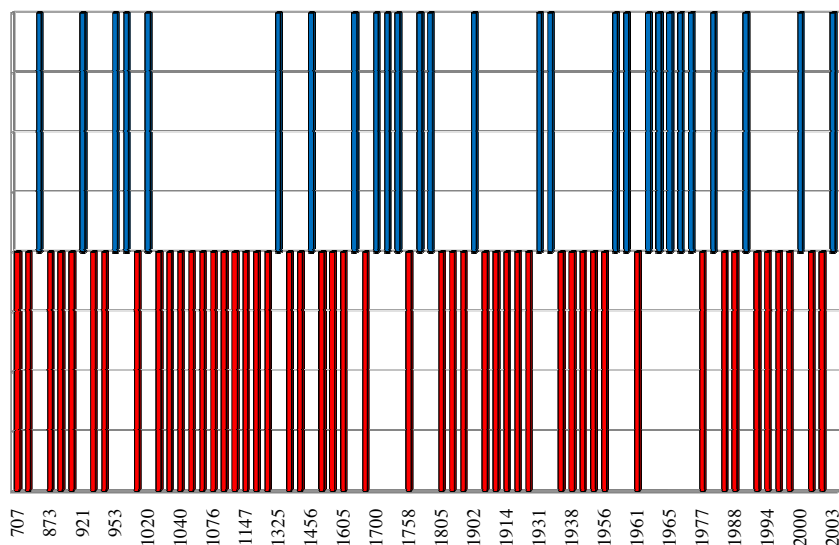


Figure 1. Inondations (en bleu) et sécheresses (en rouge) en Tunisie

Le nombre de sécheresses est en général supérieur au nombre d'inondations, et en se limitant à ce dernier siècle, 34 phénomènes extrêmes ont été recensés, ce qui correspond à une année exceptionnelle (très sèche ou très humide) environ une fois sur trois années observées. Pour ces phénomènes extrêmes, sécheresses et inondations, et en raison de la grande variabilité et la forte irrégularité, aucune idée de périodicité ou de fréquence cyclique ne peut être avancée. Il y a lieu tout simplement de remarquer que ces événements extrêmes ont été plus fréquents en intensité et en extension au cours de ces quatre dernières décennies¹.

PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE REGIONALE

D'après l'expérience vécue en Tunisie, une année sèche ou humide correspond à un déficit ou un excédent de l'ordre de 30 à 50% par rapport à la moyenne. Une année est considérée de forte sécheresse ou de forte humidité si le déficit ou l'excédent dépasse 50% (Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques, 1999). Pour notre analyse, nous distinguons à travers la Tunisie trois régions naturelles caractérisées par des conditions climatiques, hydrologiques, géomorphologiques et géologiques relativement homogènes : le Nord, le Centre et le Sud (Figure 2).

Variabilité pluviométrique

Les séries d'observations de la base de données de la Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE) pour trois stations (Direction Générale des Ressources en Eaux, 2004a,b) ont fait l'objet d'un traitement et d'une analyse statistique afin d'étudier la variabilité pluviométrique (Tableau 1). Les trois stations choisies correspondent chacune à une région naturelle du pays :

- Tunis Manoubia, représentant la région du Nord ;
- Kairouan, représentant le Centre du pays ;
- Medenine, représentant le Sud du pays.

Le coefficient de variation (C_v) traduit le degré de dispersion des valeurs de la pluviométrie annuelle par rapport à la moyenne. Il est respectivement de 0,27 pour la station de Tunis Manoubia, 0,39 pour la station de Kairouan et 0,52 pour la station de Medenine.

Ce coefficient est donc plus faible au Nord du pays, où la pluviométrie annuelle est plus régulière. Pour cette région et pour une série d'observations portant sur 119 ans à la station de Tunis Manoubia, 15% des années ont été considérées sèches avec un déficit pluviométrique annuel compris entre 30 et 50% par rapport à la moyenne de la période, alors que seulement une seule année a été extrêmement très sèche (1%) avec un déficit supérieur à 50%. Le minimum enregistré pendant cette période est de 220 mm (années 1947-48), avec un déficit de 52%. Le maximum enregistré pendant cette période est de 807 mm (années 1958-59), soit un excédent de 77%.

¹ Les événements extrêmes enregistrés durant ces 4 dernières décennies ont eu lieu en 1969, 1973, 1975, 1982, 1987-89, 1989-90, 1990-91, 1992-1994, 1995-96, 2002-03 et 2003-04.

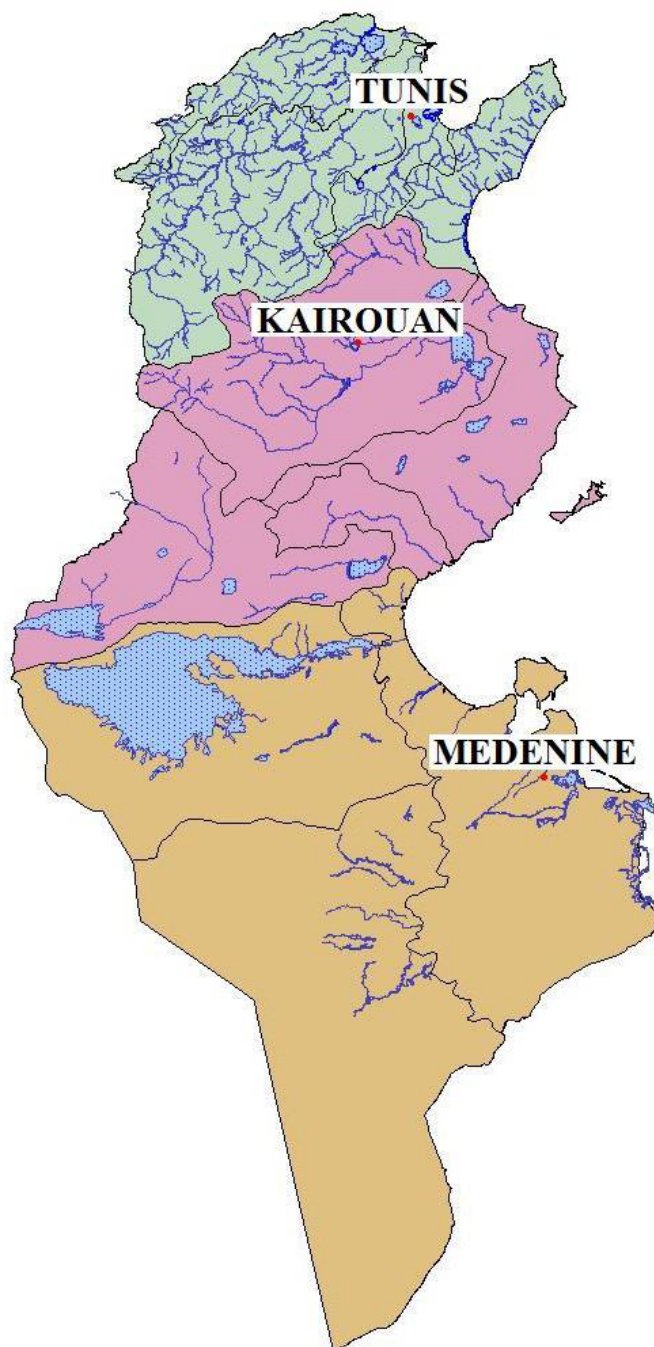


Figure 2. Les trois grandes régions naturelles de la Tunisie

Tableau 1. Caractéristiques statistiques de la pluviométrie moyenne annuelle

Région	Pluviométrie (mm)			Coefficient de variation (Cv)	Coefficient d'asymétrie (Cs)	N*	E (± %)**
	Moyenne	Max	Min				
Tunis	456	807	220	0,27	0,32	119	2,5
Manoubia							
Kairouan	305	642	107	0,39	0,75	91	4
Medenine	154	550	37	0,52	2,15	103	5

*N = Nombre d'années ou taille de l'échantillon ;

**E = Représente l'erreur sur la moyenne calculée par la formule $C_v / \sqrt{N} \times 100$

Pour la région du Centre et pour une série d'observations portant sur 91 ans à la station de Kairouan, 6% des années observées sont considérées comme des années très sèches, où il a été enregistré un déficit pluviométrique supérieur à 50%. Les années ayant un déficit compris entre 30 et 50% représentent 21% et sont qualifiées d'années sèches. Les années 1950-51 correspondent au déficit le plus important, évalué à 65% par rapport à la moyenne annuelle, avec une pluviométrie de 108 mm uniquement. Le maximum enregistré pendant cette période est de 642 mm (années 1958-59), soit un excédent de 110%.

A la station de Medenine, dans la région Sud du pays et pour une série de 103 années d'observations, 13% des années observées enregistrent un déficit compris 30 et 50% par rapport à la pluviométrie moyenne annuelle, alors que 12% des années enregistrent des déficits supérieurs à 50%. En 1935-36, la pluviométrie était de 37 mm, soit un déficit de 76% par rapport à la moyenne. Le maximum enregistré pendant cette période est de 550 mm (années 1958-59), soit un excédent de 257% par rapport à la moyenne annuelle.

Persistance pluviométrique

Concernant la succession et la persistance de la sécheresse ou de l'humidité (Frigui, 2008), il y a lieu de remarquer que :

- Pour la station de Tunis Manoubia et durant la période 1887-2005, 11 années hydrologiques² de sécheresse isolée et deux périodes de deux années hydrologiques successives de sécheresse (1987/1988 et 1993/1994) ont été enregistrées. Aucune succession de trois années n'a été enregistrée alors qu'une seule séquence de quatre années successives a été observée au cours de la période 1944- 47. En ce

² Dans les régions semi-arides à arides, l'année hydrologique s'étale de septembre à août.

qui concerne les épisodes humides, neuf années hydrologiques humides isolées ont été observées et deux périodes de deux années successives humides ont été enregistrées (1952/1953 et 2003/2004). Aucune succession de plus de deux années successives n'a été enregistrée.

- Pour la station de Kairouan et pour une période de 91 ans d'observations (1915-2005), il y a autant d'années sèches isolées qu'humides. Trois successions de deux années hydrologiques de sécheresse ont été enregistrées en 1939/1940, 1980/1981 et 1987/1988, et aucune succession de trois années de sécheresse n'a été enregistrée. Par contre, quatre années successives de sécheresse ont été enregistrées au cours de la période de 1943-46. Trois successions de deux années hydrologiques humides ont été enregistrées en 1916/1918, 1931/1933 et 1972/1974.
- A Medenine, il y a autant d'années sèches isolées que d'années humides, trois périodes de deux années successives de sécheresse (1904/1905, 1910/1911 et 1996/1997) et d'humidité (1931/1932, 1974/1976 et 1986/1988) ont été enregistrées. Il y a eu deux périodes successives de trois années hydrologiques sèches (1963/1965 et 1999/2001) et trois séquences de deux années hydrologiques humides (1931/1933, 1974/1976 et 1986/88).

La mémoire historique du pays témoigne de l'agressivité des ces événements secs qui dépassent l'échelle régionale et prennent un caractère généralisé marquant ainsi profondément l'économie du pays. Les années 1937/1938, 1947/1948, 1960/1961, 1987/1988 et 1993/1994 ont été parmi les plus sévères (Frigui, 2002). Notamment, les deux premières périodes ont engendré la famine et ont été gravées dans la mémoire de la population. Elles ont été désignées, dans le langage courant, par les années du riz.

Les deux dernières sécheresses n'ont pas engendré des grandes conséquences socio-économiques pour une simple raison qu'elles ont été observées après la mise en place d'une infrastructure importante de mobilisation et de gestion de la ressource.

La sécheresse ou l'humidité, telles qu'elles ont été définies, ne sont que des phénomènes normaux et courants en Tunisie. Les séquences des années sèches et humides isolées sont presque proches. Les séquences de deux années consécutives sont observées partout dans les différentes régions du pays, mais les séquences de trois et quatre années sont rares, notamment pour les années humides.

Tendances pluviométriques régionales

Pour situer une année pluviométrique dans une longue série de données pluviométriques, l'écart proportionnel à la moyenne est utilisé. Cette valeur diffère de la pluviosité en soustrayant 1 de cet indice de pluviosité :

$$\text{Ecart proportionnel à la moyenne} = (P_i / P_m) - 1 \quad (1)$$

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances : si la somme de ces indices croît, la tendance est humide, au contraire si la somme décroît la tendance est plutôt sèche.

La Figure 3 illustre d'une façon sommaire les cumuls des écarts des totaux pluviométriques annuels à la moyenne inter annuelle, en fonction des années correspondantes pour les trois stations pluviométriques considérées dans cette étude.

Trois tendances peuvent être déduites de la Figure 3 :

- Une première tendance globale sèche couvrant la première moitié de ce siècle coupée par des séquences humides plus au moins courtes jusqu'en 1950 pour Tunis Manoubia et Kairouan et jusqu'en 1968-69 pour Medenine ;
- Une deuxième tendance globale humide plus au moins longue selon la station : de 1950 à 1984 pour Tunis Manoubia, de 1950 à 1979 pour Kairouan et de 1968-69 à 1990 pour la station de Medenine ;
- Une troisième séquence des années à tendance sèche coupée par des années plus au moins humides que la Tunisie est en train de vivre actuellement.

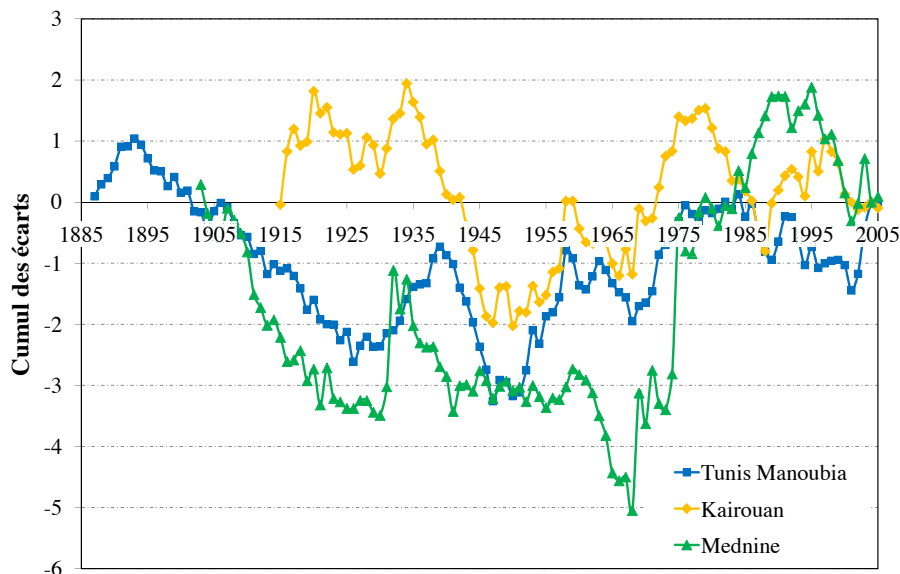


Figure 3. Indice de pluviosité

CRUES ET INONDATIONS

En raison de la répartition pluviométrique évoquée, le réseau hydrographique tunisien présente des cours d'eau permanents et d'autres intermittents. Les cours d'eau permanents sont localisés essentiellement dans la région du Nord de la Tunisie et leur régime est assez régulier.

Dans les régions du Centre et du Sud, bien que les cours d'eau soient généralement temporaires, ils jouent un rôle hydrologique remarquable. Ils constituent en effet d'énormes canalisations qui recueillent les eaux de ruissellement d'impluviums considérables et qui

alimentent de grands aquifères souterrains. En plus, les crues de ces cours d'eau peuvent atteindre des proportions catastrophiques pouvant engendrer des dégâts importants dans les zones inondables.

La Tunisie a connu plusieurs périodes d'inondations dévastatrices observées au XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, telles que celles de 1902, 1931, 1932, 1958, 1959, 1962, 1964, 1965, 1969, 1973, 1982, 1990 et 2003 (Frigui, 2002³).

Bien que toutes les inondations observées auparavant aient eu un impact favorable pour l'ensemble du système hydraulique du pays (tel qu'au niveau du stockage et de la recharge), des volumes importants n'ont pas pu être maîtrisés et ont été déversés dans la mer ou dans les exutoires naturels, empêchant ainsi toute exploitation de ces volumes en eau (Khanfir, 1998).

La crue de l'automne 1969 reste la plus importante dans la région du Centre du pays, et plus particulièrement au niveau des bassins versants du Zeroud et Merguellil. Sa période de retour est d'environ 150 ans. Les apports totaux ont été estimés à 3 milliards de m³, ce qui dépasse largement les volumes mobilisables en eau de surface estimés en 2006 à 2,2 milliards de m³.

Outre le gâchis de la ressource, qui atteint la mer ou les exutoires naturels, il y a lieu de rappeler que chaque inondation peut provoquer des dégâts. Les plus catastrophiques ont été celles liées à la crue de 1969 qui a touché 300 000 personnes, dont 500 morts, 7000 logements détruits et des dégâts évalués à 12% du Produit National Brut (PNB). Les fortes pluies de mars 1973 ont provoqué des crues exceptionnelles dans le Nord du pays. Les apports ont été estimés à 1 milliard de m³ au niveau de la Mejerda. La période de retour est supérieure à la centennale. Les épisodes pluvieux exceptionnels de janvier 1990 étaient focalisés dans la région de Meknessy et Sidi Bouzid. Ils étaient moins intenses à l'Est et au Sud du pays (Khanfir, 1998).

La dernière crue la plus spectaculaire, qui s'est produite le long de l'oued⁴ Mejerda et de ses principaux affluents, est survenue suite aux pluies importantes des mois de janvier et février 2003. En dépit de la présence de l'arsenal des infrastructures de rétention tout le long de l'oued, plus d'1 milliard de m³ d'eau s'est échappé vers la mer (Bouzaiane et Frigui, 2003), ce qui constitue l'équivalent de l'apport annuel de ce principal cours d'eau de la Tunisie, la Mejerda.

Plus récemment en octobre 2007, et plus particulièrement pendant la journée de 13 octobre, une crue causant des dégâts matériels et humains s'est produite sur des petits bassins versants au niveau de la région de Sabbelet Ben Ammar dans le Nord du pays (Frigui

³ Résultats actualisés à partir de Frigui (2002) et des données hydrométriques et hydrauliques des derniers annuaires annuels établis par la Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE, 2004a,b) et la Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH, 2004).

⁴ Oued signifie, en langue arabe, rivière.

et Ben Mansour, 2007). Ce qui prouve encore une fois que les inondations en Tunisie sont un phénomène naturel et fréquent et que chaque cours d'eau, indépendamment de sa grandeur et de la région où il se localise, est susceptible d'enregistrer des tels événements extrêmes.

Pour illustrer le caractère stochastique de ces phénomènes extrêmes et leur occurrence aléatoire à travers les régions et les bassins versants indépendamment de leur taille, du pays et à travers les années, le Tableau 2 retrace les débits maximums enregistrés par le réseau tunisien d'observations hydrologiques sur les différents cours d'eau du pays.

Tableau 2. Débits maxima (Q_{\max}) et spécifiques (q_{\max}) enregistrés sur les différents cours d'eau⁵

Région	Secteur hydrologique	Cours d'eau	Nom de la station	Q_{\max} (m^3/s)	S^* (km^2)	q_{\max} ($m^3/s/km^2$)	Année
Nord	Extrême-Nord	Joumine	Mateur GP7	273	1096	0,249	1973
		Joumine	El Arima	600	301	1,99	1982
		Doumis	G P 11	64	56	1,14	1964
		Joumine	Jebel Antra	570	234	2,44	1962
		Maden	Jebel Boubrima	478	145	3,30	1962
		Meleh	Ouechtata Zouara	743	315	2,36	1966
		Mellila	Hammam Bourguiba	239	83	2,88	1996
		Kebir	Tabarka	535	165	3,24	1976
		Barbar	Joueouda	849	108,6	7,82	1996
		Metrif	Station	62	13	4,77	1973
		Ben Hassine	Station	100	43,9	2,28	1971

⁵ Les auteurs ont exploités les résultats du travail de Frigui (1995) et les ont actualisés avec leur propre traitement statistique tout en ayant recours aux observations éditées dans les derniers annuaires hydrologiques de la DGRE depuis 1995.

Région	Secteur hydrologique	Cours d'eau	Nom de la station	Q_{\max} (m ³ /s)	S^* (km ²)	q_{\max} (m ³ /s/km ²)	Année
Nord	Cap-Bon Méliane	Miliane	Tuburbo Majus	1500	748	2,01	1969
		Miliane	Madelaine	1946	1300	0,686	1964
		Miliane	Cheylus	1148	1800	1,57	1969
		Kebir	Sidi Aouidet	1280	228	5,61	1969
		Bou Arada	Bou Arada	630	102	6,18	1973
		El Bey	Pont Route	300	464	0,646	1986
		El Abid	Pont Route	380	81	4,69	1996
		El Oudiane	Jaugeage	321	68	4,72	2000
		El Hma	Amont	101	14,5	6,96	1973
		El Baten	Bir Boureugba	586	68	8,62	1986
	Mejerda	Rarai	Rarai Supérieur	250	91,2	2,74	1996
		Rarai	Rarai Plaine	830	370	2,24	1973
		Mellègue	Mellègue K13	4770	9000	0,53	1988
		Rmel	Sidi Abdallah	1500	684	2,19	1995
		Sarrat	Pont Route	1220	1520	0,80	2001
		Haidra	Sidi Abdelkader	564	328	1,72	1995
		Tessa	Sidi Medien	3800	1952	1,95	1995
		Rhezala	Fernana	373	137	2,72	1985
		Siliana	Ouzafa	1160	390	2,97	1969

Région	Secteur hydrologique	Cours d'eau	Nom de la station	Q_{\max} (m ³ /s)	S^* (km ²)	q_{\max} (m ³ /s/km ²)	Année
Nord	Mejerda	Mkhachbia	Aval	863	106	8,14	1999
		Mejerda	Ghardimaou	2370	1490	1,59	1973
		Mejerda	Jendouba	2420	2414	1,00	1973
		Mejerda	Bou Salem GP6	3180	16 483	0,193	1973
		Mejerda	Slouguia	3500	20 995	0,167	1973
		Mejerda	Medjez El Bab	3500	21 000	0,167	1973
Centre	Centre et Sud	Merguellil	Haffouz	2900	675	4,30	1969
		Skhira	Kef El Labiodh	548	188	2,92	1997
		Hathob	Ain Saboun	1765	813	2,17	1969
		Hathab	Khanguet Zazia	1530	2200	0,695	1969
		Zeroud	Sidi Saad	17 000	8650	1,96	1969
		Negada	Bled Lassoued	1860	5290	0,352	1990
		Chaffar	Pont Voie Ferree	1130	236	4,79	1969
		Sidi Salah	Sidi Salah	1100	211	5,21	1973
Sud	Centre et Sud	Zita	Telemen	132	3,2	41,2	1973
		El Hammam	Telepherique	460	735	0,626	1977
		JIR	Barrage	381	146	2,61	1989
		Koutine	Oum Zessar	1470	276	5,33	1978
		Sidi Aich	Sidi Aich	2650	1780	1,49	1969

*S : Superficie du cours d'eau considéré

A titre indicatif et pour pouvoir situer la fréquence du débit enregistré par rapport à une période de retour centennale, le Tableau 3 présente les valeurs repères des débits maxima pour une récurrence de 100 ans et pour différents bassins versants des différents secteurs hydrologiques du pays (Frigui, 1995).

Tableau 3. Débits maxima repères ($Q_{1\%}$ en m^3/s) pour différents bassins versants

Secteur	Surface (km^2)						
	50	100	200	500	1000	2000	5000
Extrême Nord	205	300	430	710	1020	1470	2400
Mejerda	330	465	645	990	1375	1900	2930
Cap Bon-Meliane	340	505	745	1245	1840	2710	4530
Centre et Sud	680	1010	1490	2490	3670	5410	9040

APPORTS ANNUELS MOYENS

L'écoulement annuel moyen en tant qu'indice de ressources en eau d'une région est une caractéristique relativement stable ou très peu variable, et sa connaissance est importante dans le cadre de la gestion des ressources en eau.

Variabilité des apports annuels moyens

Une analyse des apports portant sur les séries des 45 valeurs annuelles (1960-2005) observées respectivement sur les trois grandes régions naturelles et l'ensemble du pays a permis d'aboutir aux résultats donnés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques statistiques des apports annuels en Mm^3

Région	Moyenne	Max	Min	Cv	Cs	R*	Erreur (\pm %)
Nord	2286	6713	675	0,63	1,69	9,94	9,45
Centre	257	3415	35	1,92	6,19	97,6	28,6
Sud	204	2295	10	2,04	4,13	230	30,4
Tunisie	2747	11320	780	0,69	2,66	14,5	10,3

*R : rapport entre les valeurs extrêmes

La variabilité des apports annuels pour la région du Nord est moins accentuée. En effet, le coefficient Cv est seulement de 0,63, alors que pour le Centre et le Sud, ce coefficient est de 1,92 et de 2,04, respectivement. Le rapport entre les valeurs extrêmes (R) pour le Nord est d'environ 10, il atteint environ 100 dans le Centre et dépasse les 200 dans le Sud.

Ces valeurs traduisent nettement l'irrégularité des apports dans les différentes régions du pays et plus particulièrement dans les régions du Centre et du Sud.

L'erreur de l'évaluation des apports pour l'ensemble du pays est d'environ $\pm 10\%$ pour la région du Nord et d'environ $\pm 30\%$ pour le Centre et le Sud du pays.

Apports annuels moyens pour différentes périodes de retour et analyses des résultats

Les résultats de l'ajustement statistique des apports annuels pour les différentes régions du pays sont donnés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Apports en Mm³ pour les différentes périodes de retour

Région	Période	Période de retour (ans)					
		2	5	10	20	50	100
Nord	Sèche	1940	1200	936	761	603	517
	Humide	1940	3130	4020	4950	6240	7290
Centre	Sèche	163	91	69	57	46	41
	Humide	163	309	439	589	823	1030
Sud	Sèche	78	30	20	15	12	11
	Humide	78	236	400	668	871	1025
Tunisie	Sèche	2330	1460	1140	931	742	637
	Humide	2330	3720	4760	5820	7310	8510

En période sèche et pour l'ensemble du pays, les apports caractéristiques s'évaluent à 637 Mm³ pour une récurrence de 100 ans, 742 Mm³ pour une récurrence de 50 ans, 931 Mm³ pour une récurrence de 20 ans, 1140 Mm³ pour une récurrence de 10 ans et 1460 Mm³ pour une récurrence de cinq ans. En période humide et pour l'ensemble du pays, les apports caractéristiques s'évaluent à 8510 Mm³ pour une récurrence de 100 ans, 7310 Mm³ pour une récurrence de 50 ans, 5820 Mm³ pour une récurrence de 20 ans, 4760 Mm³ pour une récurrence de 10 ans et 3720 Mm³ pour une récurrence de cinq ans.

La variabilité des apports en eau de surface est donc très grande ; une année sur deux, le volume des apports disponibles ne dépasse pas 2330 Mm³, soit 420 Mm³ en moins par rapport à la moyenne inter annuelle pour l'ensemble du pays (2750 Mm³). Ainsi, pour pouvoir disposer de la valeur moyenne, une année sur deux, la capacité de stockage doit permettre une gestion inter annuelle de 420 Mm³ d'eau.

Une année sur 10 et en période sèche, les volumes des apports sont de 1140 Mm³, soit un déficit d'environ 60% par rapport aux apports moyens. Une année sur 10 et en période humide, les volumes des apports sont de 4760 Mm³, soit un excédent d'environ 2000 Mm³ par rapport aux apports moyens.

Par ailleurs, la capacité de mobilisation actuelle des ressources en eau dans les infrastructures hydrauliques mises en place (telles que les barrages, les barrages collinaires et les lacs collinaires) s'élève à environ 2200 Mm³ (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2006), ce qui correspond à une ressource non maîtrisée de plus de 2000 Mm³, en considérant une période de retour de 10 ans. Cette ressource, qui actuellement s'écoule vers la mer ou vers les exutoires naturels, comme les sebkhas⁶, pourrait constituer un potentiel énorme à exploiter. Un effort pour la maîtrise de ces apports exceptionnels devrait être consenti dans le futur vu l'importance des volumes en question. En effet, ces efforts pourraient être couronnés par la mise à la disposition du gestionnaire de l'eau de l'équivalent du total de la ressource mobilisée dans les infrastructures hydrauliques réalisées durant les cinq dernières décennies.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

En Tunisie, les risques d'abondance ou d'insuffisance d'eau, telles qu'elles ont été définies, ne sont qu'un phénomène normal et courant dû au climat du pays. Ils ont conditionné une gestion intra et inter annuelle permettant le stockage de l'excès hydrique pendant les années excédentaires et son utilisation pendant les années de sécheresse.

Grâce à sa tradition enracinée dans le temps et à sa volonté politique, la Tunisie a réussi à satisfaire la demande des différents secteurs pendant les périodes d'abondance et de garantir le minimum nécessaire des besoins en eau pendant les périodes de pénuries.

Avec des ressources en eau proches de la saturation, due à une évolution croissante de la demande, et pour subvenir aux besoins et préserver les droits des générations futures, la Tunisie doit continuer cette politique et la consolider, surtout au niveau de la mobilisation, de l'économie de l'eau et de la préservation des ressources en quantité et en qualité.

Les nouvelles ressources en eau de surface peuvent provenir non seulement des eaux non conventionnelles, mais aussi par la maîtrise des événements exceptionnels pendant les années humides (telle que la prise en considération des fortes crues dans la mobilisation, la réduction des déversements et le rapprochement au maximum des volumes régularisables de celles mobilisables).

Pour les crues d'une fréquence décennale, le volume d'eau non maîtrisé est presque équivalent à celui mobilisé. D'où l'intérêt de mener une réflexion sérieuse pour la maîtrise des apports des événements exceptionnels. Entre autres, il s'avère judicieux d'examiner les possibilités de transfert et de stockage des eaux de surface excédentaires dans les

⁶ Sebkhah signifie, en langue arabe, marais salant temporaire.

nappes phréatiques surexploitées. Aucune idée et technique pour la maîtrise des eaux excédentaires ne sont à exclure avant de faire l'objet d'une étude de faisabilité technique et d'évaluation du rapport coût/bénéfice à moyen et long terme.

REFERENCES

Bouzaiane S. et Frigui H.L. (2003) Crues et inondations dans la basse vallée de la Mejerda en janvier. Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie.

Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH) (2004) Fichiers des bilans annuels des barrages, 1954-2004. Direction Générale des Etudes et des Travaux Hydrauliques, Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie.

Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE) (2004a) Annuaire hydro-pluviométrique, 1969-2004. Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie.

Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE) (2004b) Fichiers pluviométriques, 1969-2004. Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie.

Frigui H.L. (1995) Débits maxima de projet, Apport moyen annuel et Apport solide en Tunisie. Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE), Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie.

Frigui H.L. (2002) Approche méthodologique sur l'évaluation de l'écoulement moyen interannuel. Statistique des bilans des bassins versants des grands barrages en Tunisie. Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE), Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie.

Frigui H.L. et Ben Mansour H. (2007) Note sur l'épisode pluviométrique du 13 octobre 2007 au niveau de Sebbelet Ben Ammar. Délégation de Kalaat El Andalous Gouvernorat de l'Ariana.

Frigui H.L. (2008) Les événements extrêmes en Tunisie, sécheresses et inondations. Colloque Gestion des Extrêmes, Institut Méditerranéen de l'Eau (IME), Tunis, Tunisie, 24 avril 2008.

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH) (1999) Guide pratique de gestion de la sécheresse en Tunisie, approche méthodologique. Tunis, Tunisie.

Khanfir R., El Echi M.L., Louati M.E., Marzouk A., Frigui H.L., Alouini A. (1998) Eau 21 : Stratégie du secteur de l'eau en Tunisie à long terme – 2030. Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (MARH), Tunis, Tunisie, 89 p.

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) (2006) Rapport national de l'état de l'environnement 2006. Tunis, Tunisie, 199 p.

CHAPITRE 8

L'ALGERIE : PLUS D'UN SIECLE DE DESENVASEMENT DES BARRAGES

B. REMINI*

Université Saad Dahlab-Blida – Faculté des sciences de l'ingénieur – Département
des sciences de l'eau et de l'environnement

Université de Biskra – Département d'Hydraulique – Laboratoire en hydraulique
souterraine et de surface (LARHYSS)
Algérie

W. HALLOUCHE

Université Saad Dahlab-Blida – Faculté des sciences de l'ingénieur – Département
des sciences de l'eau et de l'environnement

Université de Biskra – Département d'Hydraulique – Laboratoire en hydraulique
souterraine et de surface (LARHYSS)
Algérie

B. ACHOUR

Université de Biskra – Département d'Hydraulique – Laboratoire en hydraulique
souterraine et de surface (LARHYSS)
Algérie

RESUME

Dans le présent article, il est mis en évidence les techniques de désenvasement des barrages pratiquées en Algérie depuis l'existence du premier grand barrage (construit en 1846). Les résultats obtenus durant un siècle et demi d'exploitation ont montré que la surélévation des digues (lorsqu'elle est possible) est une solution efficace pour les grands barrages. Le dragage des barrages s'avère une nécessité pour les barrages de petite et moyenne retenue qui sont à l'état très avancé de la sédimentation. La technique de soutirage des courants de densité appliquée au niveau des barrages d'Ighil Emda, d'Erraguenne et de l'oued El Fodda a donné des résultats très encourageants. En effet,

* Auteur correspondant : Pr. REMINI Boualem – Université Saad Dahlab – Blida, BP 270, Blida, 9000 Algérie
Email : reminib@yahoo.fr – Tél./Fax : (+213) 25 43 39 40

la durée de vie du barrage d'Ighil Emda a été multipliée par trois et celle de l'oued d'Erraguenne par deux. Malheureusement, cette méthode n'a pas eu toute l'importance qu'elle méritait pour se développer et se généraliser sur l'ensemble des barrages, malgré la présence des courants de densité dans plusieurs barrages.

Mots clés : Algérie ; barrage ; envasement ; érosion ; dévasement ; soutirage ; dragage ; surélévation.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro-transport (Rampon, 1990). L'érosion des bassins versants est très répandue dans la région du Maghreb, puisque toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer un tel processus : les irrégularités climatiques, la faible densité du couvert végétale, la nature des sols qui est peu résistante à l'écoulement et la violence des crues. En effet, la région enregistre les valeurs les plus élevées de la planète. Plusieurs exemples témoignent de la gravité du problème. En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint la valeur de 5000 t/km²/an sur le bassin versant de l'oued¹ Agrioum (à l'Est de l'Algérie) (Demmak, 1982). Dans les bassins versants de Martil, de l'Ouergha, de Lakhdar et de la Tessaout au Maroc, le taux d'érosion dépasse 2000 t/km²/an (Badraoui et Haji, 2001). En Tunisie, l'érosion hydrique dégrade les terres cultivables. Au total, 1,2 millions d'hectares sont gravement affectés par l'érosion dans le Nord et le Centre de la Tunisie, soit 25% de la superficie totale des terres (Bouزيد, 1991).

Le taux d'érosion spécifique a été évalué à 180 millions de tonnes de sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du Nord algérien (Demmak, 1982). Une partie de cette masse se dépose dans les 57 grands barrages de l'Algérie et le dépôt sédimentaire dans ces barrages est alors évalué annuellement à 45 millions de m³ (Mm³) (Hallouche, 2007). Le volume de vase estimé en 2006 était de 1,1 milliards de m³, soit un taux de comblement de 17% (Hallouche, 2007).

Face à ce problème, les services d'hydraulique ont déployés d'énormes efforts depuis plusieurs années. Ainsi, différents moyens techniques de lutte ont été expérimentés en Algérie, ce qui a donné comme résultats le prolongement de la durée de vie de plusieurs barrages.

L'objectif de cette étude est de faire un constat sur l'état des méthodes techniques de lutte contre l'envasement, à savoir la surélévation des digues, la réalisation des barrages de chasse et le soutirage des sédiments par les pertuis de vidange.

¹ Qued signifie, en langue arabe, rivière.

EVOLUTION DE L'ENVASUREMENT DES BARRAGES

Avant l'indépendance (1962)

Selon Rene (1980), l'érosion s'est développée du fait de la déforestation massive et du ruissellement généralisé durant l'époque coloniale. D'énormes quantités de terre arrivent annuellement dans les retenues. Par conséquent, la sédimentation dans les barrages pose des problèmes de maintenance et la réduction rapide de la capacité de stockage. Le premier barrage construit en Algérie, en 1846, est le barrage de Sig. Il a été abandonné faute de son envasement rapide. En 1957, les barrages d'Algérie d'une capacité de 900 Mm³ avaient accumulé près de 200 Mm³ (Valembos et Migniot, 1975). En 1962 (date de l'indépendance), l'Algérie comptait 16 grands barrages en exploitation d'une capacité de 1,3 milliards de m³ (Figure 1). Le suivi de l'évolution de l'envasement dans ces réservoirs depuis 1962 a montré que les dépôts sédimentaires s'accumulaient progressivement dans les 16 barrages pour atteindre en 2006 (derniers levés bathymétriques) un volume de 492 Mm³ de vase, soit une perte de capacité de 38%.

Après l'indépendance (après 1962)

En 1890, il existait en Algérie neuf barrages, d'une capacité de 61 Mm³ et un volume de vase de 2,7 Mm³. Cette capacité a atteint 1 milliard de m³ en 1962. A partir de cette date, le nombre de barrages a augmenté considérablement. Ainsi, en 2006, l'Algérie présentait une capacité de 6,8 milliards de m³. Le volume total a été multiplié par 7 en 45 ans. Le volume de vase a augmenté de 5,5 fois par rapport à celui de 1962, pour atteindre en 2006 le volume de 1,1 milliards de m³ (Remini et Hallouche, 2007) (Figure 2).

Il existe actuellement 57 grands barrages en exploitation (Figure 3) qui, tous à des degrés divers, s'ensavent progressivement chaque année de 45 Mm³, ce qui représente une perte de capacité annuelle égale à 0,65% de la capacité totale.

Il est donc constaté que l'incidence de l'envasement peut être importante, puisqu'un cumul de 1,1 milliards de m³ s'est déposé en 2006 dans les réservoirs de ces barrages, l'équivalent d'une perte de 16% de la capacité totale. De plus, il est possible de remarquer qu'il ne faut pas exagérer l'importance du phénomène et que le taux d'envasement de 0,65%/an signifie que les barrages peuvent durer 140 ans. Il faut donc bannir l'idée trop couramment admise que l'envasement condamne les barrages en Algérie. C'est un phénomène important, mais il faut se garder de le considérer comme une donnée fondamentale de l'hydraulique en Algérie et que toute étude hydrotechnique doit prendre en considération ce paramètre. Il est à signaler que le taux d'envasement a beaucoup augmenté au début des années 2000, surtout dû à la sécheresse qui a sévit l'Algérie durant les années 1990, suivie des années humides. Cette alternance d'années sèches et humides a provoqué une forte érosion des bassins versants. En effet, les années 1990 (sèches) ont été caractérisées par une faible couverture végétale et des sols disséqués et ameublés. Par contre, les années 2000 ont été caractérisées par des pluies intenses et dévastatrices pour les sols.

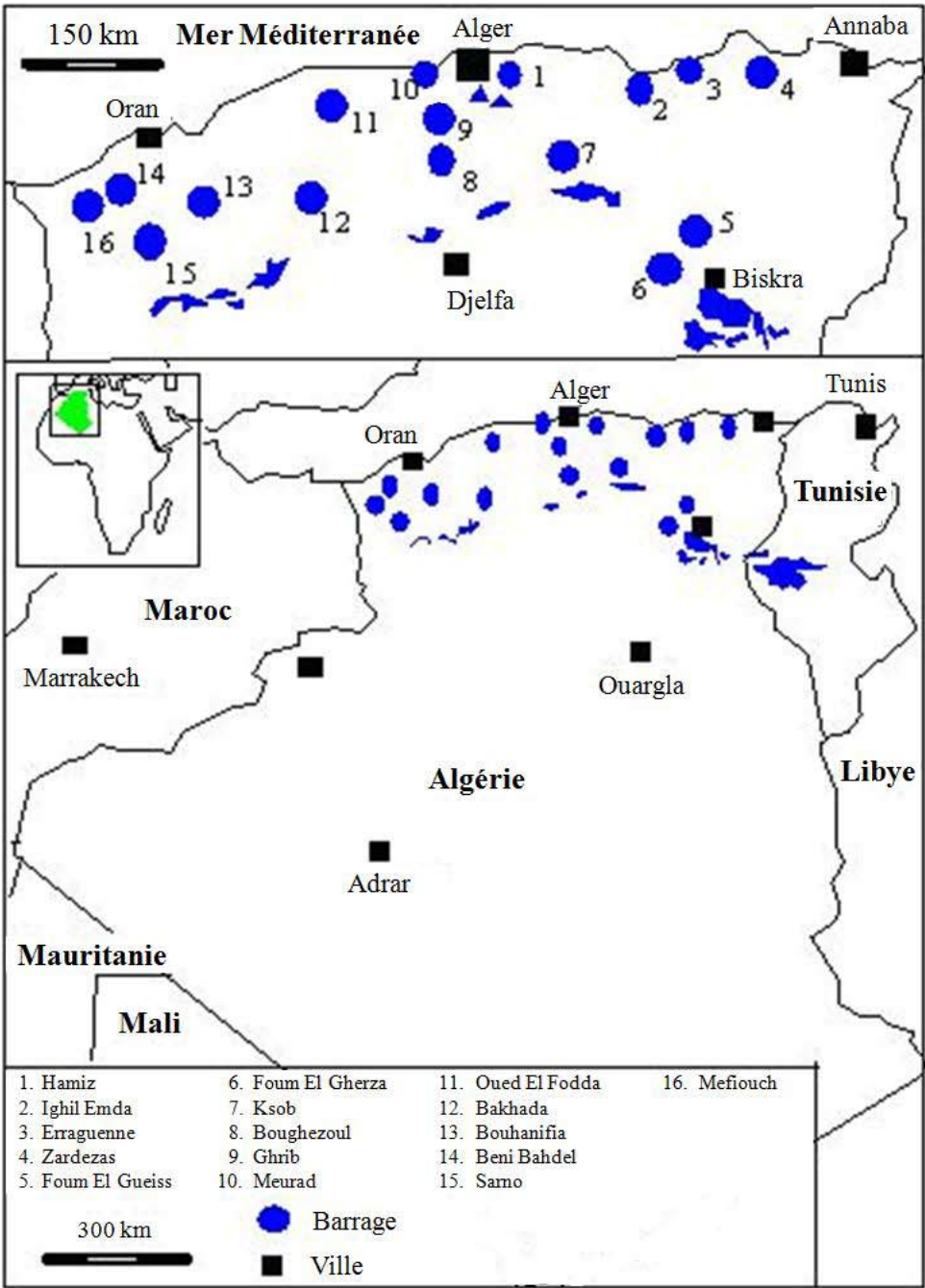


Figure 1. Situation des premiers barrages en exploitation depuis 1962

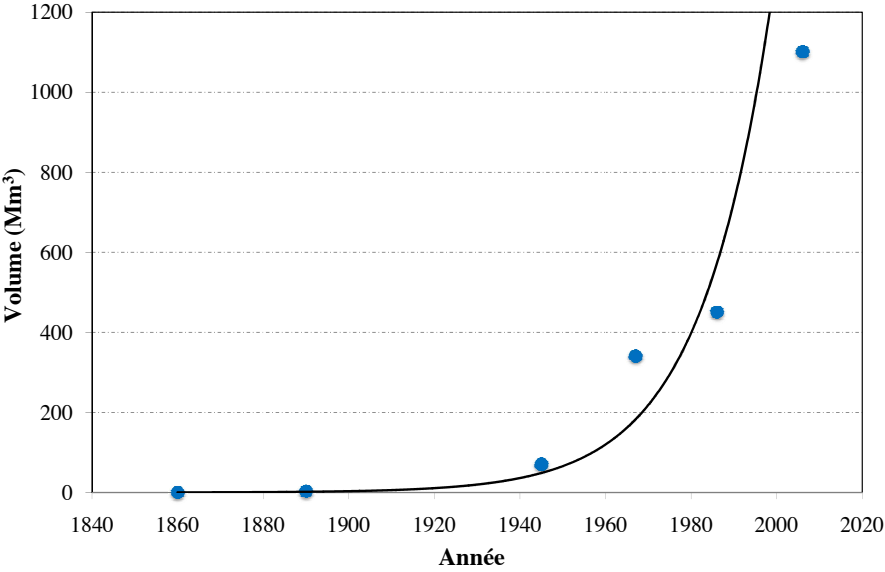


Figure 2. Evolution dans le temps de l’envasement des barrages en Algérie (Remini et Hallouche, 2007)

En conséquence, les crues de ces cinq dernières années, qui ont été violentes et brutales, sont la cause d’une forte ablation de la couche superficielle du sol. Il a été constaté que, d’après les derniers levés bathymétriques effectués en 2005 et 2006 par l’Agence Nationale des Barrages (ANB) sur les grands barrages, le taux d’envasement de certains barrages a considérablement augmenté par rapport à celui de 1986 (Tableau 1).

Tableau 1. Taux d’envasement déduit par les levés de 1986 et 2004 (Source : données de l’Agence Nationale des Barrages)

Barrage	Taux d’envasement annuel 1986	Taux d’envasement annuel 2004
SMBA (Tiaret)	1	1,3
Djorf Torba (Bechar)	1,3	2,6
Ksob (Msila)	0,3	0,6

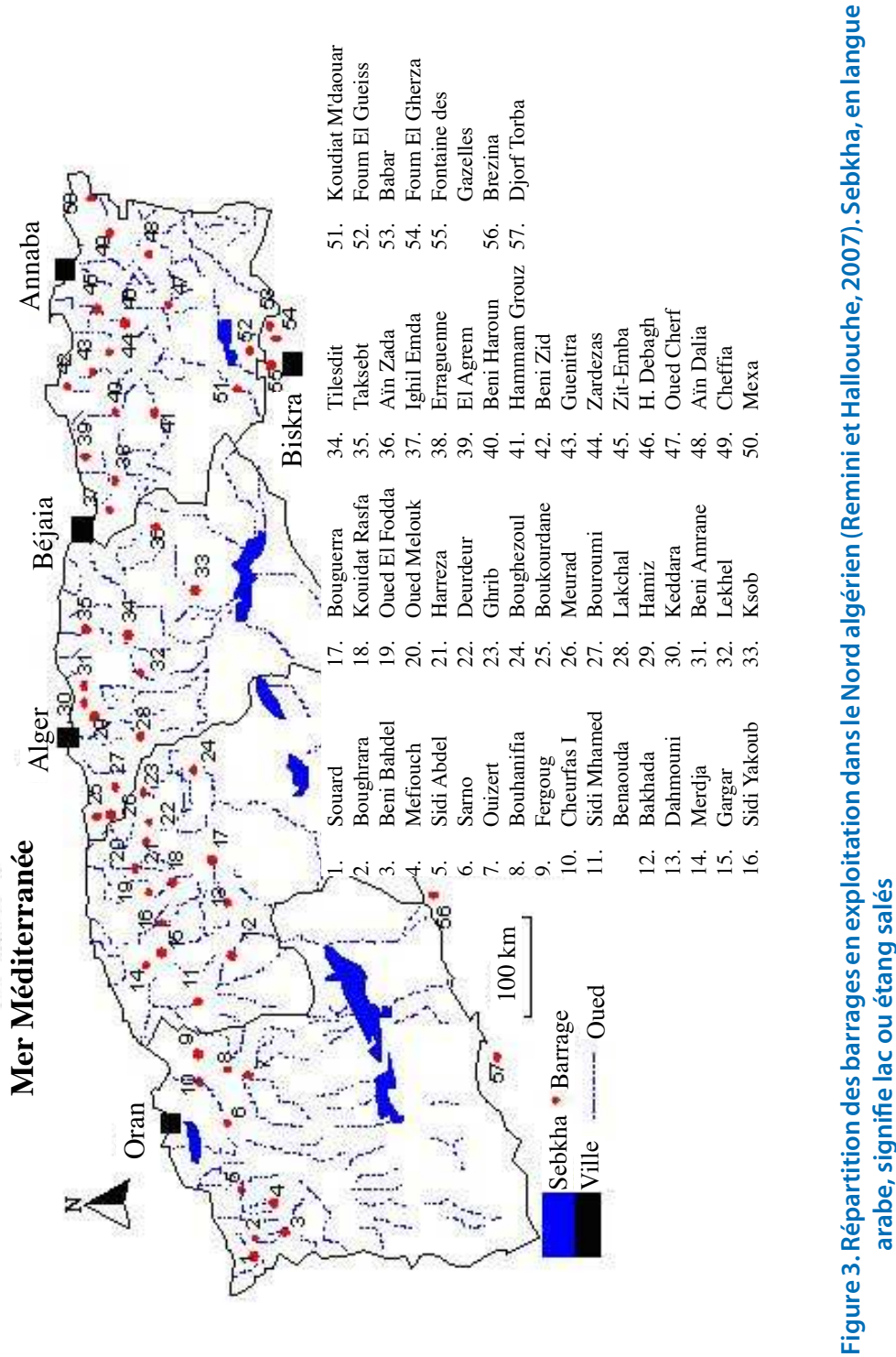


Figure 3. Répartition des barrages en exploitation dans le Nord algérien (Remini et Hallouche, 2007). Sebkha, en langue arabe, signifie lac ou étang salés

Suite à la mise en exploitation de 26 nouveaux barrages, dont celui de Beni Haroun qui est le plus grand barrage de l'Algérie (capacité de 960 Mm³), la capacité de stockage a doublé en 20 ans, en passant de 3,2 milliards de m³ en 1986 à 6,8 milliards de m³ en 2006. Cette augmentation de la capacité a forcément entraîné une augmentation du volume de vase. Pour le seul barrage de Beni Haroun, le dépôt annuel de sédiments a été estimé à 9 Mm³. Pour le moment, le taux d'envasement est évalué à 3,5 Mm³ de vase par année, puisque sa capacité actuelle ne dépasse pas 350 Mm³.

Sur les 57 barrages en exploitation, 18 barrages sont fortement menacés par l'envasement, puisque le taux de comblement dépasse 55% de leur capacité totale (Figure 4). Quatre barrages (Zardezas, Foug El Gherza, Fergoug et Ksob) sont en phase de dévasement par la technique de dragage (Remini et Hallouche, 2004). Les barrages Beni Amrane, Ghrib et Foug El Gueiss font actuellement l'objet d'une surélévation de leur digue dans le programme entamé depuis 2000 par l'ANB.

LES TECHNIQUES DE DEVASMENT UTILISEES

Dans une région à un fort taux d'érosion, tel que l'Algérie, lorsque l'envasement d'un barrage atteint un seuil critique, trois choix se posent aux barragistes : le dévasement du barrage, l'abandon progressif de l'aménagement et la réalisation d'un nouveau barrage. Le dévasement par dragage et la surélévation de la digue restent les meilleurs moyens pour faire face au comblement rapide des retenues. L'abandon d'un barrage est une mauvaise solution, surtout sur le plan social. Jusqu'à aujourd'hui, cinq barrages ont fait l'objet d'un déclassement (Tableau 2). La réalisation d'un nouveau barrage de même taille que celui abandonné et sur le même cours d'eau pose généralement le problème de site. En Algérie, deux barrages ont été remplacés (Tableau 3).

Pour accroître la durée de vie des barrages en Algérie, les différentes techniques utilisées sont la surélévation de la digue, le dragage et l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidanges (chasses et soutirage des courants de densité).

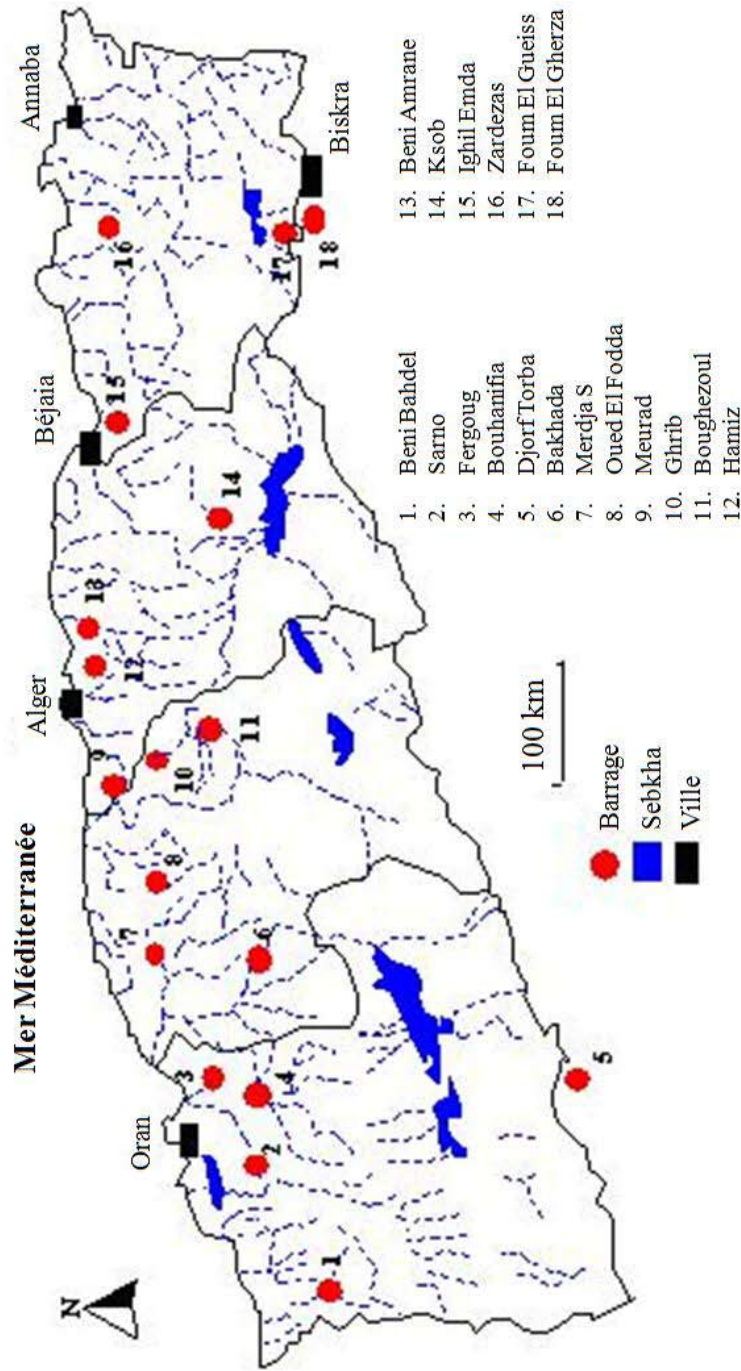


Figure 4. Situation géographique des barrages les plus menacés par l'envasement (Remini et Hallouche, 2007)

Tableau 2. Les barrages abandonnés en Algérie (Source : données de l'Agence Nationale des Barrages)

Barrage	Année de mise en service	Capacité initiale (Mm ³)
Fergoug II (Mascara)	1871	30
Sig (Mascara)	1846	1
Cheurfas I (Bel Abbès)	1882	14,4
Magoum (Mascara)	1887	1
Saint Lucien (Tlemcen)	1871	1
Tlelat (Bel Abbès)	1860	0,73
Djidiouia (Béjaia)	1877	0,70

Tableau 3. Anciens barrages remplacés par un nouveau barrage (Source : données de l'Agence Nationale des Barrages)

Barrage	Ancien Barrage	Année de mise en eau	Capacité (Mm ³)
Ancien	Fergoug II (Mascara)	1871	30
Nouveau	Fergoug III (Mascara)	1970	18
Ancien	Cheurfas I (Bel Abbès)	1882	14,4
Nouveau	Cheurfas II (Bel Abbès)	1992	82

Surélévation des barrages

L'une des techniques de lutte contre l'envasement, et par conséquent permettant de prolonger la durée de vie d'un barrage, est la surélévation de la digue. L'Algérie est parmi les premiers pays du monde à pratiqué cette technique. Cette méthode consiste, lorsque le taux de comblement est avancé, à élever la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve complémentaire pour compenser la perte du volume occupé par la vase. Depuis 1946 (date de la réalisation du premier barrage), neuf barrages ont fait l'objet d'une surélévation (Figure 5).

Durant 160 ans d'exploitation (1846-2006), environ 94 Mm³ ont été récupérées par la surélévation des digues appliquées sur les neuf ouvrages. La surélévation des digues s'est accélérée à partir de 1962, à partir de quand environ 50 Mm³ de capacité ont été récupérées (Figure 6). Cette valeur reste encore minime par rapport au fort taux d'envasement.

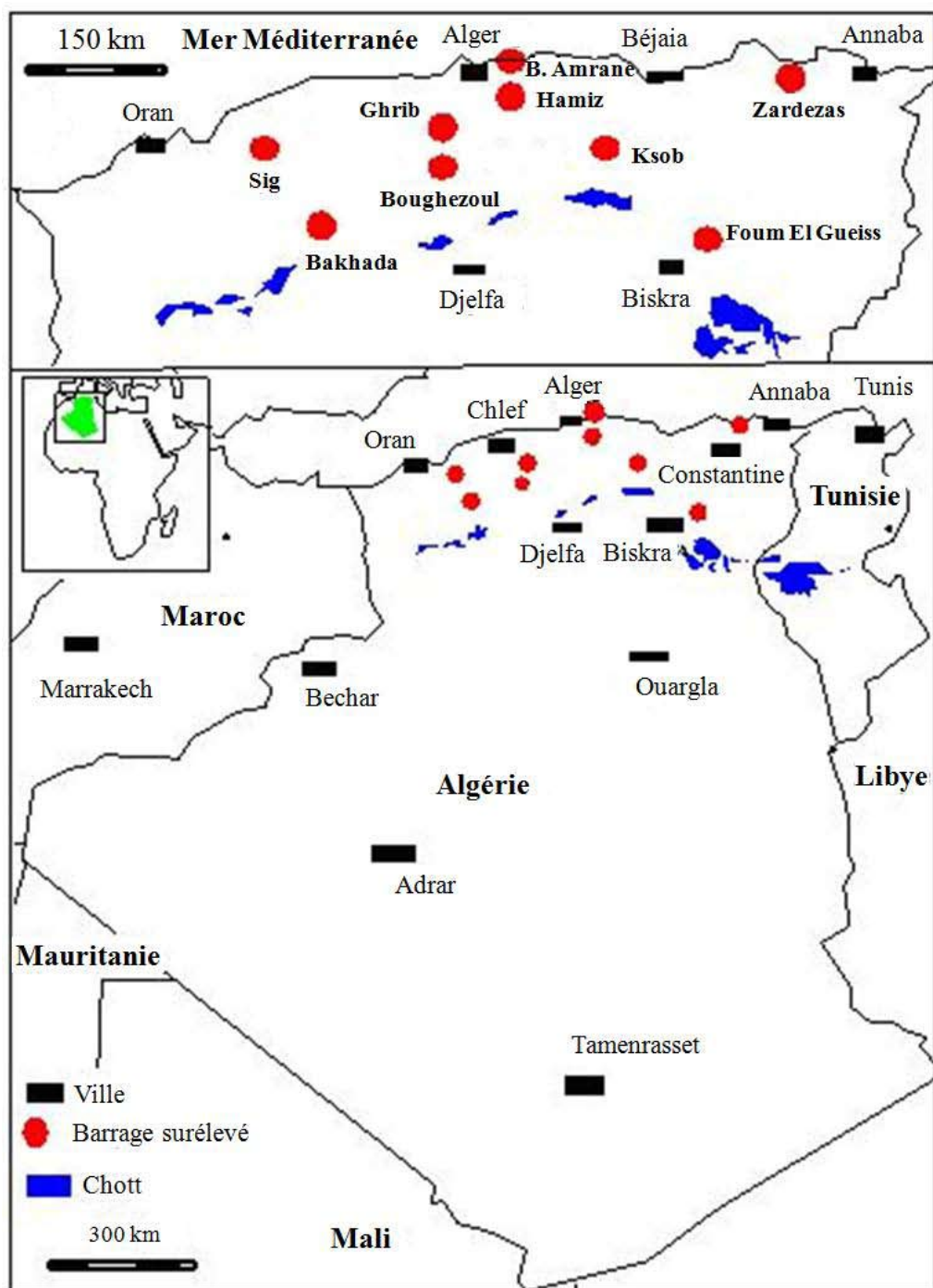


Figure 5. Situation des barrages surélevés (Remini, 2008). Chott est une zone humide située en bordure d'une sebkha

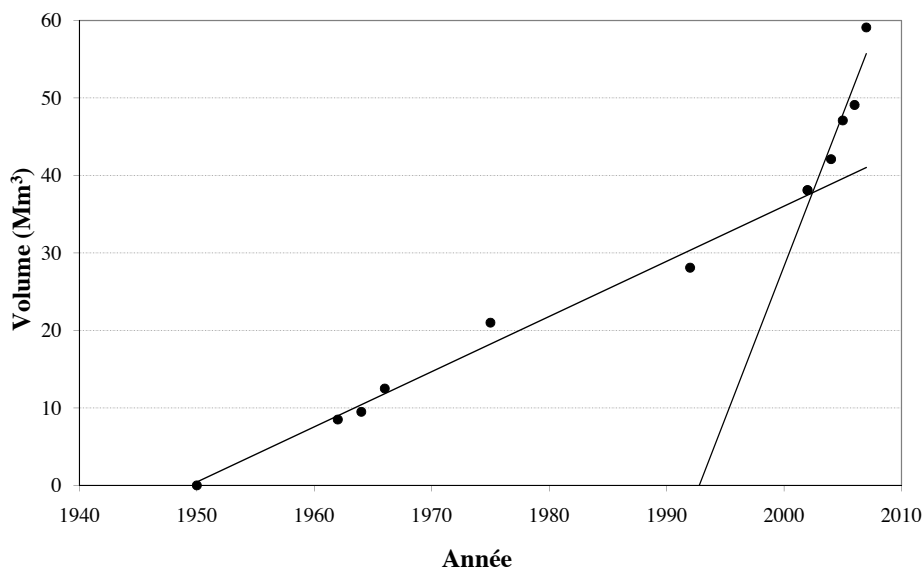


Figure 6. Capacités récupérées par la surélévation des digues de barrages (Remini, 2008)

Dragage des barrages

Lorsqu'un barrage est au stade avancé de l'envasement, le dragage de la retenue s'avère l'ultime recours, surtout lorsqu'il y a peu de sites favorables à la réalisation de nouveaux ouvrages. En Algérie, huit barrages ont fait l'objet d'un dévasement par dragage durant le demi-siècle dernier (Figure 7).

La première drague refouleuse utilisée en Algérie est celle appelée « Lucien Dumay ». Elle a été utilisée durant la période 1958-1969 pour le dragage des barrages de Cheurfas (10 Mm³ de vase), de Sig (2 Mm³ de vase), de Fergoug II (3,1 Mm³ de vase) et de Hamiz (8 Mm³ de vase). La deuxième drague refouleuse, baptisée « Rezoug Youcef », a été acquise en 1988 et utilisée durant la période 1989-1992 pour le dévasement du barrage Fergoug III, d'un volume de 7 Mm³ de vase. De 1993 à 2002, elle a servi pour extraire un volume de 10 Mm³ de la retenue du barrage des Zardezas (Figure 8). Actuellement, deux autres dragues ont participé au dévasement des barrages de Foug El Gherza (4 Mm³ pour la première tranche) (Figure 9), Merdja sidi Abed (5 Mm³), Ksob (4 Mm³) et Fergoug III (7 Mm³) (Figure 10). La Figure 11 présente l'évolution dans le temps des capacités récupérées par le dragage des barrages. Le volume cumulé dévasé depuis 1958 (date du premier dévasement) jusqu'en 2007 avoisine 60 Mm³ de vase. Le désenvasement s'est seulement accéléré depuis 2001, année de forte sécheresse qui a frappé l'Algérie.

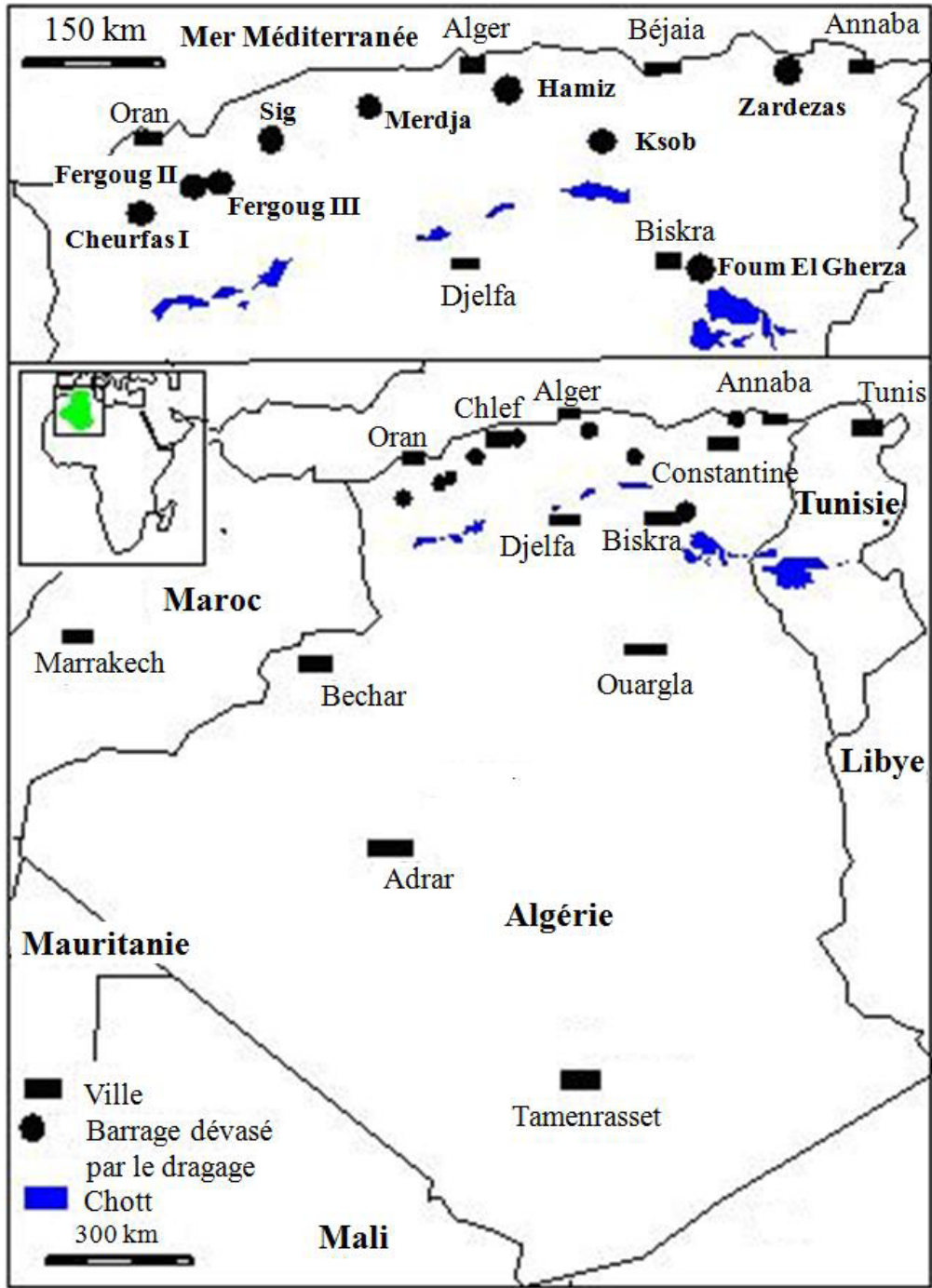


Figure 7. Situation des barrages dévasés par le dragage



Figure 8. Dragage de la retenue du barrage de Zardezas en 1993 (Cliché de l'Agence Nationale des Barrages, 2006)



Figure 9. Opération de dragage au niveau de la retenue de Fergoug en 2005 (Cliché de Benfetta – 2005)



Figure 10. Evacuation de 4 Mm³ de vase de la retenue de Foug El Gherza pendant 18 mois (Cliché de l'Agence Nationale des Barrages de Biskra – 2006)

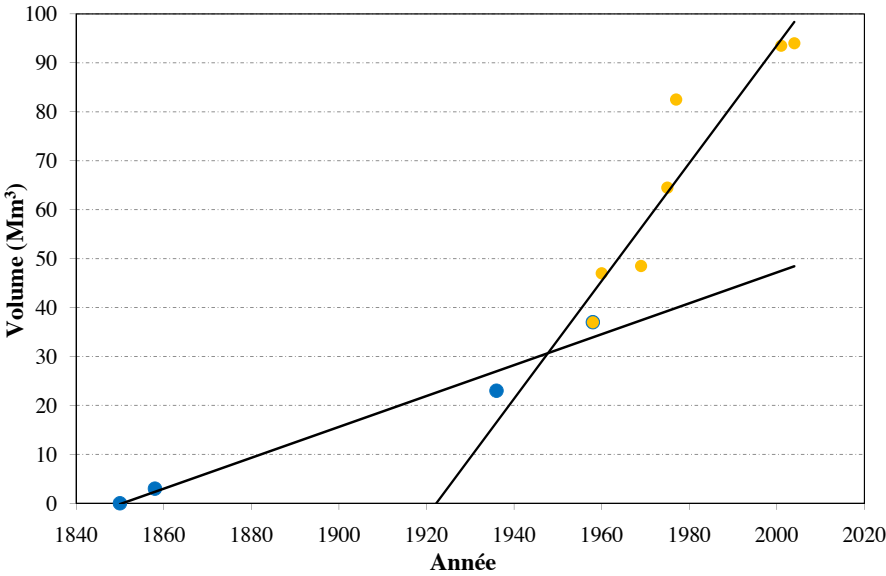


Figure 11. Capacités récupérées par le dragage des barrages (Source : données de l'Agence Nationale des Barrages)

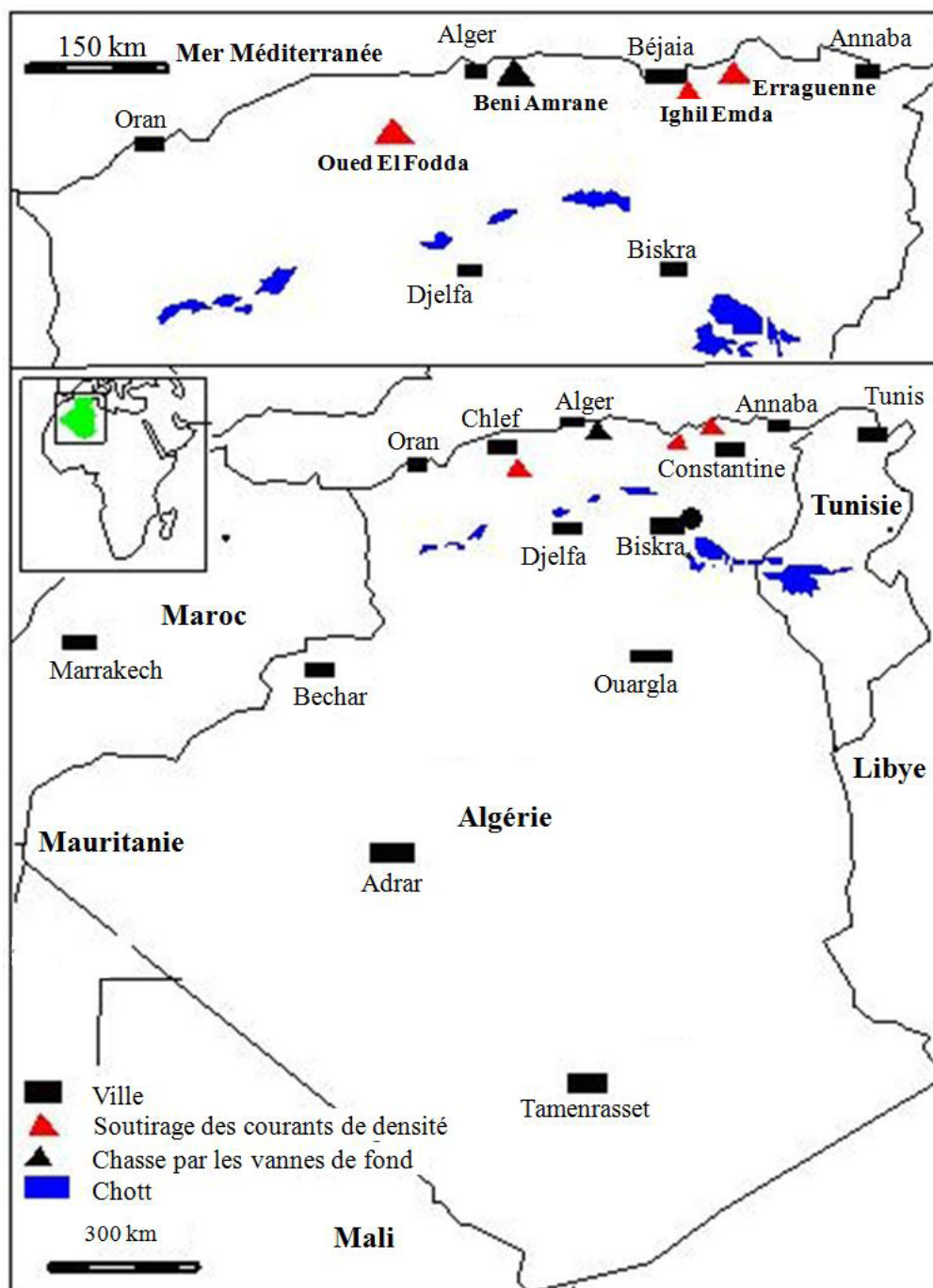


Figure 12. Situation des barrages dans lesquels est pratiquée les chasses ou le soutirage des courants de densité

Le soutirage des courants de densité et les chasses périodiques

Il est possible de réduire le taux d'envasement par l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange. Seulement, pour avoir de très bons résultats, il faut maîtriser les mécanismes de la sédimentation dans les barrages. Il y a trois méthodes : la vidange annuelle du barrage plus connue sous le nom de « chasse à l'espagnole », l'ouverture périodique des vannes de fond, et le soutirage des courants de densité. La première technique n'est pas une solution efficace dans une région aride ou semi aride, puisqu'elle consiste à vider le barrage au début de l'automne (en laissant les vannes ouvertes) et attendre les premières crues qui enlèvent, sans difficulté, les vases non encore consolidées. La deuxième technique, correspondant à l'ouverture périodique des vannes de fond, n'est pas efficace, mais elle est indispensable pour enlever les dépôts vaseux près des pertuis de vidange. Elle est pratiquée uniquement dans le barrage de Beni Amrane (Figure 12). Enfin, le soutirage des courants de densité par les vannettes de dévasement reste le moyen le plus efficace dans une telle région, à condition que les courants de densité soient bien maîtrisés. Elle est actuellement appliquée dans les barrages d'Ighil Emda, de l'oued El Fodda et d'Erraguene (Figure 12).

Les « chasses à l'espagnole » : cas du barrage de Beni Amrane

La technique de « chasse à l'espagnole » est appliquée au barrage de Beni Amrane. Ce dernier d'une capacité de $15,6 \text{ Mm}^3$ a été doté de six vannes de fond (Figure 13). Environ 3 Mm^3 de vase ont été évacués durant la période 1988-2000 (Figure 14), avec un rendement de 26% du total des sédiments entrants.



Figure 13. Six vannes de fond du barrage de Beni Amrane (Cliché de Remini – 2000)

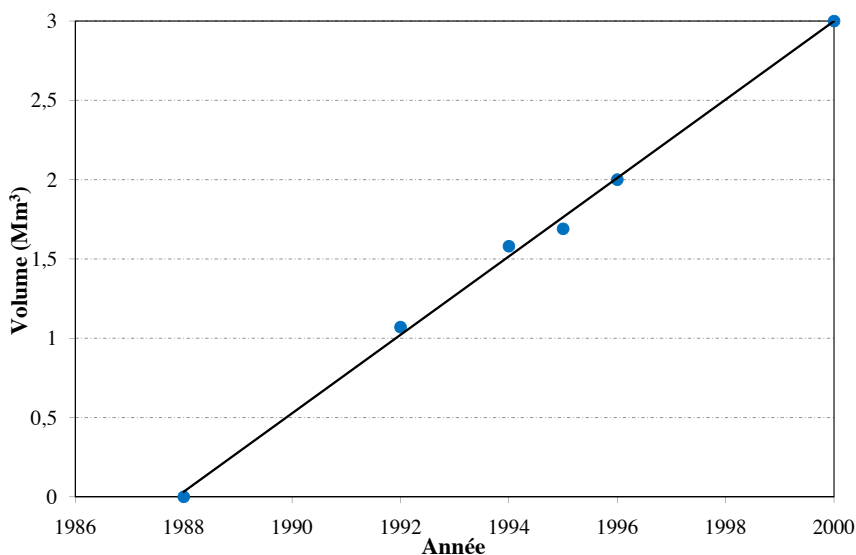


Figure 14. Barrage de Beni Amrane – Evolution de la quantité de vase chassée par les vannes de fond durant la période 1988-2000 (Source : données de l'Agence Nationale des Barrages)

Soutirage des courants de densité

La majorité des retenues en Algérie présentent les conditions favorables à l'apparition des courants de densité. En effet, la forte concentration en sédiments dans les cours d'eau, surtout en période de crues, et la forme géométrique (de type canal) donnent naissance aux courants de densité à l'entrée de la retenue et peuvent se propager jusqu'au pied du barrage (Remini et Hallouche, 2004). L'ouverture des vannettes dans le moment opportun peut évacuer une forte quantité de sédiments.

Les premières tentatives d'évacuation des sédiments par la vanne de fond en utilisant les courants d'eau boueuse ont été effectuées, sans succès, dans le barrage de l'oued El Fodda en 1937 et en 1939, puisqu'en 1948 les vannes de fond ont été complètement obturées (Remini, 2007).

Pour tenter de résoudre le problème de l'obturation de la vanne de fond en 1948 (et qui se trouve actuellement sous 45 m de vase), cinq vannettes de dévasement ont été installées dans ce barrage en 1961 (Figure 15). La retenue avait initialement une capacité de 228 Mm³ en 1932, qui a été ramenée progressivement à 127 Mm³ en 1994, mais en l'absence de soutirage cette capacité aurait été inférieure et réduite à 82 Mm³. Ainsi, une quantité de vase évaluée à 45 Mm³ a été évacuée durant la période 1961-1994 (Remini, 1997 et 2007).



Figure 15. Vannettes de dévasement du barrage de l'oued El Fodda (Cliché de Remini – 2006)

Le barrage d'Ighil Emda a été mis en service à partir de septembre 1953. Il est probablement parmi les premiers dans le monde à être équipé d'un dispositif approprié au soutirage, constitué de huit vannettes de faible diamètre et de trois vannes de dégrèvement (Duquennois, 1954 et 1955). La retenue avait initialement une capacité de 156 Mm^3 en 1953, qui a été ramenée progressivement à 96 Mm^3 en 2000, mais en l'absence de soutirage cette capacité aurait été bien inférieure, soit 49 Mm^3 . Ainsi, une quantité importante évaluée à 47 Mm^3 a été évacuée en 44 ans d'exploitation.

Le barrage d'Erraguene a été équipé d'un système de soutirage composé de quatre vannettes de dévasement et de deux vannes de dégrèvement. Une quantité de vase évaluée à 9 Mm^3 a été évacuée en 30 années d'exploitation (1962-1992) (Remini, 1997).

La quantité de vase soutirée par les vannettes de dévasement en utilisant les courants de densité au niveau de ces trois barrages (Erraguene, oued El Fodda et Ighil Emda) a évolué, depuis 1953, pour atteindre un volume de 100 Mm^3 en 2000 (Figure 16).

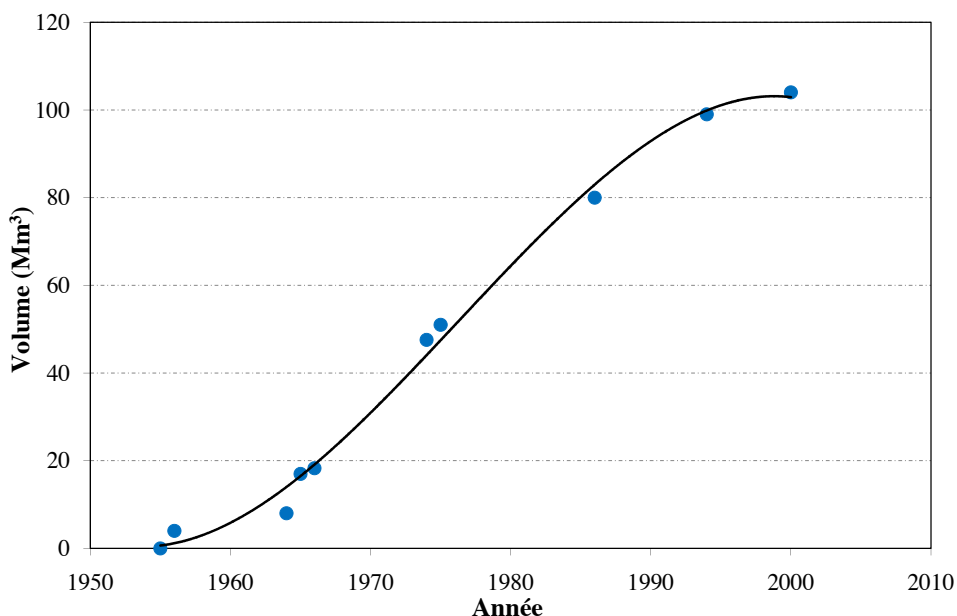


Figure 16. Evolution dans le temps de la quantité de vase soutirée par les vannettes de dévasement des barrages

CONCLUSION

Il ressort de cette étude que les méthodes de désenvasement les plus pratiquées en Algérie, depuis la réalisation du premier grand barrage en 1846, sont la surélévation de la digue, le dragage des retenues, les chasses périodiques et le soutirage des courants de densité. Elles ont permis de récupérer une capacité de 260 Mm³ durant les 45 années d'exploitation, valeur jugée moyenne par rapport au volume de vase cumulé en 2004, qui dépassait 1 milliard de m³, soit un taux de désenvasement égal à 26%.

Le soutirage des courants de densité reste le moyen le plus efficace dans les régions arides, à condition qu'il soit bien maîtrisé. Les résultats obtenus par les soutirages au niveau des barrages d'Ighil Emda et d'Erraguenne ont montré qu'ainsi leurs durées de vie ont pu être doublées.

Pour les barrages en réalisation, il faudrait aménager dès maintenant leurs bassins versants et concevoir les pertuis de dévasement spécialement pour le soutirage des courants de densité. Le nombre de vannettes doit être déterminé en fonction de la concentration des particules fines que draine le cours d'eau principal et qui débouche dans la retenue. De plus, à l'aval du barrage, la vase évacuée par les pertuis de vidange ou par dragage doit être utilisée dans différents domaines, tels que le domaine agricole, industriel et artisanal. Quant à l'eau perdue, elle doit être utilisée pour la réalimentation de la nappe. Cependant, les nouveaux barrages construits depuis les années 1960 ne sont pas munis

d'une batterie de vannettes de dévasement (de 40 cm de diamètre), malgré l'existence des courants de densité dans les retenues de barrages en Algérie.

REFERENCES

Rene A. (1980) L'eau en Algérie, L'Eau en Algérie de l'impérialisme au développement (1830-1962) Editions Office des publications universitaires. 388 p.

Badraoui A. et Hajji A. (2001) Envasement des retenues de barrages. *Rev. Int. La Houille Blanche*, 6-7, 72-75.

Bouزيد A. (1991) L'expérience de la Tunisie dans la protection des sols et des barrages. Séminaire national sur l'érosion et l'envasement des barrages. Alger, 1-3 décembre.

Demmak A. (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Pierre et Marie Curie. Paris XI, 323 p.

Duquennois H. (1954) Sédimentation et soutirage des vases au barrage d'Ighil Emda. Electricité et Gaz d'Algérie, compte rendu n°1, 6 p.

Duquennois H. (1955) Lutte contre la sédimentation des barrages réservoirs. Electricité et Gaz d'Algérie, rapport août, p. 13-18.

Hallouche W. (2007) Prévision du transport solide et sédimentation des barrages. Thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 105 p.

Rampon A. (1990) Erosion hydrique et sédimentation dans les barrages. Informations techniques Cemagref, n° 78, note 6, 1-7.

Remini B. (1997) Envasement des retenues de barrages en Algérie. Importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage. Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique d'Alger, mars, 342 p.

Remini B. et Hallouche W. (2004) La sédimentation des barrages en Algérie. *Rev. Int. La Houille Blanche*, 1, 1-5.

Remini B. et Hallouche W. (2007) Studying sediment. Water Power and Dam Construction. Octobre, p. 42-45.

Remini B. (2007) Evolution de l'envasement du barrage de l'Oued El Fodda. *Rev. Eau énergie air*, 1, 75-78.

Remini B. (2008) La surélévation des barrages – une technique de lutte contre l'envasement-Exemples algériens. *Rev. Int. La Houille Blanche*, 5, 103-108.

Valembos J. et Migniot C. (1975) Rejets des produits de dragages à l'aval d'un barrage sur l'Oued Hamiz. *Rev. Int. La Houille Blanche*, 2-3, 155-172.

PARTIE III

L'EAU ET L'AGRICULTURE

CHAPITRE 9

MANGROVES IMPLANTATION IN COASTAL ARID COUNTRY

M. AURIOL

Expert consultant en génie environnemental
Rabat, Maroc

Y. FILALI-MEKNASSI*

Bureau Multipays de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) à Rabat
Maroc

A. ZEGGAF TAHIRI

Expert international, Manzanar Mangrove Foundation
Nouakchott, Mauritanie

ABSTRACT

Mangroves, halophytic (salt-tolerant) plants, contribute a rich genetic diversity, provide home and food for a wide variety of species and act as a buffer zone between terrestrial and marine ecosystems. Moreover, mangrove ecosystems have important direct and indirect economic, ecological and social values to man. Most commonly they occur within tropical and subtropical sheltered coastal areas subjected to tidal influences. However, mangroves occur naturally along arid coastlines. The objective of the paper is firstly to introduce the characteristics of mangrove ecosystems and their values for local communities, and then to present a case study regarding the restoration of mangroves and the implantation of mangroves swamps in an arid country, Mauritania.

Key words: Mangrove; values to man; implantation; arid region; Mauritania.

* Auteur correspondant : Dr. FILALI-MEKNASSI Youssef – Spécialiste de programme pour les Sciences Exactes et Naturelles
Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat – 35 Av. du 16 Novembre, B.P. 1777, Rabat, Maroc
Email : y.filali-meknassi@unesco.org – Tél. : (+212) 537 67 03 72/74 – Fax : (+212) 537 67 03 75

RESUME

Les mangroves, plantes halophiles (tolérant au sel), contribuent une riche diversité génétique, fournissent habit et nourriture à une large variété d'espèces et agissent en tant que zone-tampon entre les écosystèmes terrestres et marins. De plus, les écosystèmes de mangroves renferment d'importantes valeurs économiques, écologiques et sociales pour les hommes. Le plus généralement les mangroves se situent dans les régions abritées tropicales et subtropicales le long des côtes soumises aux influences des marées. Cependant, les mangroves peuvent se trouver naturellement le long des littoraux arides. L'objectif de cet article est tout d'abord de présenter les caractéristiques des écosystèmes de mangroves et leurs valeurs pour les communautés locales, et ensuite d'exposer une étude de cas concernant la restauration des mangroves et l'implantation de champs de mangroves dans un pays aride, la Mauritanie.

Mots clés : Mangrove ; valeurs pour l'Homme ; implantation ; région aride ; Mauritanie.

INTRODUCTION

Mangrove ecosystems are heterogeneous habitats with an unusual variety of animals and plants adapted to the environmental conditions of highly saline, frequently inundated, soft bottomed anaerobic mud (Macintosh and Ashton, 2002).

The diversity of mangroves is high, but the variety of mangrove ecosystems also makes it difficult to produce general guidelines for conservation and management of mangroves because each system is unique (Macintosh and Ashton, 2002). Indeed, mangrove ecosystems have complex trophic structures, and organisms exhibit unique physiological, morphological, and behavioral adaptations to environmental conditions characteristic of the land-sea interface (United States Geological Survey, 2006).

They are typically woody trees or shrubs taller than 0.5 m in height, and inhabit the intertidal margins of low-energy coastal and estuarine environments over a wide range of latitude (Duke et al., 1998). They normally occupy the zone between mean sea level and high tide, growing on a variety of substrates including volcanic rock, coral, fine sands and muddy sediments (Morrisey et al., 2007).

Mangroves play multi-faceted role in the environment (Northern Territory Government, 2002) and provide valuable goods and services for many local communities (Ravilious et al., 2005). That is why, in order to answer to the problem of world hunger through the use of salt water agriculture the Manzanar Project implants mangrove forests on coastal desert areas. First of all, that allows these local peoples, who are facing famine, to feed themselves, but more importantly build a self-sufficient economy with available resources.

The main objective of the paper is to present the values of mangrove ecosystems for developed countries in arid regions. Thus, firstly a general introduction to mangroves (biodiversity, distribution, conservation, values of mangroves) is detailed, and then a case study on Mauritania, a large arid country, is presented to introduce the Manzanar Project.

MANGROVE BIODIVERSITY AND CONSERVATION

Definition

Mangroves are a diverse group of unrelated trees, palms, shrubs, vines and ferns. They are highly specialised plants that have developed unusual adaptations to the unique environmental conditions in which they are found (Northern Territory Government, 2002). There are around 80 species of mangroves found throughout the world (Saenger et al., 1983).

Mangroves can be divided into two distinct groups: "true mangroves" or "exclusive mangroves" and "mangrove associates" or "non-exclusive mangroves" (McKee, 1996; Northern Territory Government, 2002; Macintosh and Ashton, 2002).

According to Tomlinson (1986), the following criteria are required for a species to be designated as a true mangrove:

1. Complete fidelity to the mangrove environment;
2. Plays a major role in the structure of the community and has the ability to form pure stands;
3. Morphological specialization for adaptation to the habitat;
4. Physiological specialization for adaptation to their habitat;
5. Taxonomic isolation from terrestrial relatives.

True mangroves are the largest group, around 60 species (Saenger et al., 1983).

So, the remaining 20 plant species considered to be mangroves are referred to as mangrove associates. These plants are not restricted to the typical mangrove environment and are often found within drier, more terrestrial areas (Northern Territory Government, 2002; Macintosh and Ashton, 2002).

Thus, mangrove is a non-taxonomic term used to describe a diverse group of plants that are all adapted to a wet, saline habitat. Mangrove may typically refer to an individual species. Terms such as mangrove community, mangrove ecosystem, mangrove forest, mangrove swamp, and mangal are used interchangeably to describe the entire mangrove community (McKee, 1996).

Mangrove communities and species

Mangroves generally cover the intertidal zone so they interact with aquatic, inshore, upstream and terrestrial ecosystems. They support a diverse flora and fauna of marine,

freshwater and terrestrial species and they are exposed to varying human impacts at different intensities. Consequently the structure, productivity and functions of mangroves are also highly variable (Robertson and Alongi, 1992; Saenger and Snedaker, 1993), making it impossible to define a typical mangrove community or ecosystem (Macintosh and Ashton, 2002).

Mangrove species vary greatly regionally and with response to environmental factors (McLeod and Salm, 2006). In fact, the structure of mangrove communities varies under the influences of substrate, position and salinity. Mangroves can be shrub-like or form closed forest over 30-m tall (Queensland Government, 2006). For example, in North-Eastern Queensland, the humid tropics with high rainfall produce taller (up to 40 m), highly productive, closed canopy mangrove forests; areas that are drier have increased water and salinity stress and produce shorter (1-5 m), lower productivity, open canopy mangroves (State of the Marine Environment Report for Australia, 2000). Generally, mangroves found on arid coastlines and high latitude mangroves have fewer species than tropical mangroves (United Nations Environment Programme, 1994).

Several classifications have been proposed through the times. Lugo and Snedaker (1974, quoted by McLeod and Salm, 2006) identified six physiographic types of mangrove stands:

- **Riverine mangroves:** they occur along rivers and streams and are flooded by daily tides. They are the most productive of mangrove communities because of the high nutrient concentrations associated with sediment trapping (Ewel et al., 1998);
- **Fringe mangroves:** they occur along protected coastlines and islands and the exposed open waters of bays and lagoons. They are periodically flooded by tides and are sensitive to erosion. They often have well developed root systems and are important for protecting coastlines;
- **Basin forests:** they are located inland in depressions channeling terrestrial runoff toward the coast. They are irregularly flushed by tides and are sensitive to flooding. They often serve as nutrient sinks for both natural and anthropogenically enhanced ecosystem processes and are often important sources of wood products (Ewel et al., 1998);
- **Overwash mangroves:** they are subtidal to intertidal marine-dominated systems that are often located on isolated islands. They are typically inundated on each tidal cycle. Their productivity is similar to fringe mangroves;
- **Scrub mangroves:** they are commonly found in extreme environments. Height is often limited and nutrients and freshwater may be limiting factors that affect growth. Tidal inundation is infrequent;
- **Hammock mangroves:** they occur on slightly raised ground caused by the accumulation of organic peat over a depression. They experience infrequent tidal flushing.

Cintron et al. (1985, quoted by McLeod and Salm, 2006) have consolidated these mangrove types into three categories: riverine, fringing (including overwash), and basin (including dwarf and hammock).

Then, Woodroffe (1990) divided mangroves into three types based on dominant physical processes: river-dominated (sediment brought in by rivers), tide-dominated (sediment brought in by tides), and carbonate settings (sediment is largely produced in situ, either as reef growth, calcareous sediment, or mangrove peat). More recent classification systems have been based on nutrient limitation (Feller, 1995) or energy regimes (Twilley, 1995, quoted by McLeod and Salm, 2006).

In addition, the Table 1 (modified from Tomlinson, 1986) gives the number of mangroves species in each listed plant genus and family, indexed in two distinct categories: dominant and minor species (Table 1).

Distribution

Mangrove ecosystems are estimated to cover 181 000 km² worldwide (Spalding et al., 1997).

Most commonly they are found in the tropics and sub-tropics on river banks and along coastlines subjected to tidal influences, being unusually adapted to anaerobic conditions of both salt and fresh water environments. They have adapted to muddy, shifting, saline conditions. They produce stilt roots which project above the mud and water in order to absorb oxygen.

The best developed mangroves grow along humid sheltered tropical coasts, for example in the delta systems of major rivers like the Ganges, Mekong and Amazon, and coastlines protected by large land masses, for example Madagascar, the Indonesian Archipelago and Papua New Guinea. Indonesia, Brazil, Australia and Nigeria have 43% of the world's mangroves and each has between 25% and 60% of the mangroves in their respective regions (Asia, Americas, Australasia and West Africa) (Spalding et al., 1997).

Mangroves also occur naturally along arid coastlines, for example in Saudi Arabia, Yemen and Northern Africa, and along the West coast of Australia and North-Eastern coast of Brazil (Macintosh and Ashton, 2002).

McKee (1996) introduces two centers of mangrove diversity: the Eastern group (Australia, Southeast Asia, India, East Africa, and the Western Pacific) where the total number of species is approximately 40 and the Western group (West Africa, Caribbean, Florida, Atlantic South America, and Pacific North and South America) where the number of species is only eight.

Table 1. Main mangrove species (Adapted from Tomlinson, 1986)

	Family	Genus	Number of species	Common name
Dominant species	<i>Avicenniaceae</i> or <i>Verbenaceae</i> *	<i>Avicennia</i>	9	Black mangrove
	<i>Combretaceae</i>	<i>Conocarpus</i>	1	Buttonwood,
		<i>Laguncularia</i>	11	White mangrove
		<i>Lumnitzera</i>	2	
	<i>Areaceae</i>	<i>Nypa</i>	1	Mangrove palm
	<i>Rhizophoraceae</i>	<i>Bruguiera</i>	6	Red mangrove
		<i>Ceriops</i>	2	
		<i>Kandelia</i>	1	
		<i>Rhizophora</i>	8	
	<i>Sonneratiaceae</i>	<i>Sonneratia</i>	5	Mangrove apple
Minor species	<i>Acanthaceae</i>	<i>Acanthus</i>	1	-
		<i>Bravaisia</i>	2	-
	<i>Bombacaceae</i>	<i>Camptostemon</i>	2	-
	<i>Cyperaceae</i>	<i>Fimbristylis</i>	1	-
	<i>Euphorbiaceae</i>	<i>Excoecaria</i>	2	-
	<i>Lecythidaceae</i>	<i>Barringtonia</i>	6	-
	<i>Lythraceae</i>	<i>Pemphis</i>	1	-
	<i>Meliaceae</i>	<i>Xylocarpus</i>	2	-
	<i>Myrsinaceae</i>	<i>Aegiceras</i>	2	-
	<i>Myrtaceae</i>	<i>Osbornia</i>	1	-
	<i>Pellicieraceae</i>	<i>Pelliciera</i>	1	-
	<i>Plumbaginaceae</i>	<i>Aegialitis</i>	2	-
	<i>Pteridaceae</i>	<i>Acrostichum</i>	3	-
	<i>Rubiaceae</i>	<i>Scyphiphora</i>	1	-
	<i>Sterculiaceae</i>	<i>Heritiera</i>	3	-

*Family allocation disputed

Thus, various physical, environmental and climatic factors, including temperature, salinity and rainfall, are important key determinants that have a strong influence over the growth, survival and distribution of mangroves (McKee, 1996; Duke et al., 1998; Macintosh and Ashton, 2002). For instance, mangroves are not tolerant of freezing temperature and survive in substrate salinities ranging from fresh water alongside rivers to hypersaline ponds and mudflats (McKee, 1996). In fact, most mangroves can grow in freshwater (Tomlinson, 1986; Ball, 1988). However, they do not develop in strictly freshwater habitats because of competition from freshwater species. Salinity is thus important in eliminating other vascular plant species that are not adapted for growth in a saline habitat (McKee, 1996).

At the national and local level, many other factors influence the distribution of mangroves including soils, tides, geomorphology, mineral availability, soil aeration, winds, currents and wave action (Robertson and Alongi, 1992).

Blasco (1984, quoted by Duke et al., 1998) reported four classification groups depending on precipitation and temperature:

1. Warm humid areas where 90% of the world's mangroves are found, notably from South Mexico to Colombia, in the Caribbean, North Brazil, and from South East Asia to North Queensland (Australia);
2. Sub-humid areas where mangroves are occasionally found, such as East Africa, India, South Queensland (Australia), Mexico and Venezuela;
3. Semi-arid areas where mangroves are rarely found, usually close to major river mouths, such as the Indus Delta (Pakistan), Gujarat (India), the Western and Northern Territory provinces of Australia, and Ecuador;
4. Arid areas where mangroves are practically unknown, except where there are winter rains, for example along the Ethiopian and Egyptian coastlines of the Red Sea, the Persian Gulf and the Gulf of California.

In addition, the worldwide human interference in mangrove areas is probably the single most considerable factor that affects the mangrove distribution pattern at all scales and causes substantial changes in both physiognomy and species composition (Dahdouh-Guebas and Koedam, 2001; Macintosh and Ashton, 2002). Indeed, mangrove ecosystems have been severely damaged by human activities including overexploitation of forest resources by local communities, urban and tourism developments, agriculture, development of shrimp aquaculture, salt production operations, diversion of freshwater for irrigation, and influxes of pollutants (United Nations Environment Programme, 1994; Ravilious et al., 2005; Morrissey et al., 2007). Worldwide loss of mangrove habitat has been substantial (Morrissey et al., 2007) and Rönnbäck et al. (1999) estimated that whereas 75% of the world's tropical coasts were once fringed by mangroves, the current figure is 25%. Additionally, over the last 20 years, approximately 35% of the world's mangrove forest area has been lost (Valiela et al., 2001). Nevertheless, activities that contribute to this depletion continue (Radhika, 2006). The greatest human threat to mangroves is the establishment of shrimp aquaculture ponds. Because mangroves are often viewed as wastelands, many

developing countries are replacing these forests with agricultural land and/or shrimp aquaculture production (Franks and Falconer, 1999). According to Primavera (1997), shrimp aquaculture accounts for the loss of 20 to 50% of mangroves worldwide.

Mangroves values

In the past mangroves were often portrayed as having little value and their removal was seen as a sign of progress. Vast tracts of mangroves across the world have been destroyed as they were perceived as useless (Queensland Government, 2007). However, the importance of mangrove forests in maintaining crucial ecosystem functions and providing storm buffers has become more evident after the tsunami that ravaged parts of Asia in December 2004 (Radhika, 2006).

Ecological Significance

Today, most ecologists view the mangrove communities as unique and highly productive, ecologically important systems (McKee, 1996; Northern Territory Government, 2002; McLeod and Salm, 2006; Queensland Government, 2007). Several major roles of mangrove swamps are recognized:

- Mangroves contribute to soil formation and help stabilize coastlines by trapping sediment;
- Mangroves act as filters for upland runoff;
- Mangrove systems serve as permanent and temporary habitats and breeding, nursery and feeding areas for a vast array of marine organisms, such as fish, crabs, oysters, and other invertebrates and wildlife, such as birds and reptiles. Research has shown that the abundance and diversity of marine fauna found throughout mangrove areas is quite high. Studies in Darwin Harbour (Australia), for example, have identified around 36 species of crustaceans and 31 species of molluscs (Northern Territory Government, 1997b).
- Mangroves produce large amounts of detritus that may contribute to productivity in offshore waters. In fact, Queensland Government (2007) reported that Every square meter of mangrove plants produces about one kilogram of litter (mainly leaves, twigs, bark, fruit and flowers) every year;
- Mangroves allow the filtering and trapping of pollutants;
- Mangroves help to absorb carbon in the atmosphere.

Economic and social values

In addition to these ecologically important roles, mangrove forests possess important direct and indirect economic and social attributes that are specifically important to humans (McKee, 1996; Macintosh and Ashton, 2002; Northern Territory Government, 2002).

Wells et al. (2006) reported that the annual economic value of mangroves, determined by the cost of the products and services they provide, has been estimated to be 200 000-900 000 USD/ha. Furthermore, other studies have estimated that 75% of the commercial

fishery catch in Queensland is dependent on mangrove ecosystems (Queensland Government, 2007).

However, Macintosh et Ashton (2002) considered that mangrove ecosystems have consistently been undervalued, usually because only their direct goods and services have been included in economic calculations (e.g. forestry resources), but this represents only a minor part of the total value of mangroves. In fact, although the non-market values and off-site functions are not easily quantified, they have been shown to be significant (Macintosh and Ashton, 2002).

Table 2 summarizes all these values, from the direct market values to the indirect non-market values.

Table 2. The application of economic valuation to mangroves (Macintosh and Ashton, 2002)

		Location of Goods and Services	
		On-site or Direct use	Off-site or Indirect use
Valuation of Goods and Services	Marketed	Usually included in economic analysis, e.g., poles, charcoal, woodchips, fuelwood, and timber.	May be included in economic analysis, e.g. fish and shellfish caught in adjacent waters.
	Non-marketed	Seldom included in economic analysis, e.g., medicinal uses, fish nursery areas, feeding grounds for estuarine fish and shellfish, wildlife sanctuaries, biodiversity attributes, educational and research uses.	Usually ignored, e.g., nutrient flows to estuaries, buffer against storm damage, erosion control.

For instance, McKee (1996) reported that mangrove communities serve as protection for coastal communities against storms, such as hurricanes. Indeed, it has been suggested that the large loss of lives (300 000-500 000 lives) in Bangladesh during the 1970 typhoon was partly due to the fact that many of the mangrove swamps protecting those populated coastal regions had been removed and replaced by rice paddies.

Moreover, mangrove forests are also important in terms of aesthetics and tourism. Many people visit these areas for sports fishing, boating, bird watching, snorkeling, and other recreational pursuits (McKee, 1996).

Conversely, if managed incorrectly, removal of mangroves can result in shoreline erosion and mobilisation of marine sediments. This can cause sedimentation resulting in the shallowing of estuaries and waterways and a reduction in water quality. It can also lead

to exposure of potential acid sulfate soils. When exposed to oxygen in the air these soils may react to produce sulfuric acid. This can cause substantial damage to the natural environment and physical and economic damage to the built environment (Northern Territory Government, 2002).

A novel approach: the Manzanar Project

The Manzanar Project was begun by Dr. Gordon Sato, in 1983, at the Salton Sea in California and is a search for answers to the problem of world hunger through the use of salt water agriculture.

The objective is to create whole new forests of mangrove trees in vast areas of the world where mangrove trees do not grow at the present time. Thus, what Manzanar Project is aiming to do is to allow people living in a harsh environment, such as a desert, become self-sustaining by creating a sustainable economy.

To date, the Manzanar Project researches allowed to (Sato et al., 2005):

- Show that mangrove trees can be grown in desert intertidal areas where they do not normally grow by providing them with phosphorus, nitrogen, and iron, because sea water is deficient in these elements, and mangroves only grow where these elements are provided by fresh water runoff from land;
- Develop ways to deliver the fertilizer in the correct needed amount so as to avoid waste and minimize the danger of fertilizer runoff;
- Learn to sundry the seeds of *Avicennia marina* to produce a stable grain-like product that can serve as animal food several months after harvesting;
- Learn that mangrove foliage and seeds are an inadequate diet for sheep because they are able to produce lambs but cannot produce the milk to feed them. By supplementing the mangrove material with a small amount of fish meal produced from fish wastes the sheep are able to produce lambs and milk (Figure 1).

Thus, with simple experiments, the Manzanar Project shows how to produce food and money for poor people where it did not seem possible. Whereas mangroves only grew on 15% of Eritrean coastline, with this method about 700 000 mangrove trees, chiefly *Avicennia marina*, were planted and are growing successfully in the tree-less mud flats of Eritrea (Sato et al., 2005) and potentially many millions more can grow (Figure 2).

Then, the Manzanar Project studies developed a second way of producing food and wealth in poor coastal countries: the bottom of the food chain in the ocean is micro-organisms, mainly algae, which grow very slowly by depending on sunlight for photosynthesis. From the mangrove experiences, nitrogen, phosphorus and iron were added to seawater and then sugar, which allowed a rapid growth of *bacillus megatherium* or the heterotrophic algae, *tetraselma chui*, and these in turn fed to filter feeders, such as brine shrimp or shellfish. The brine shrimp are then fed to fish. Thus, we are able to convert a low cost commodity like sugar to a nutritious food with high economic value.

Therefore, the Manzanar Project developed a novel approach based on the creation of mangrove forests to combat hunger and poverty and to create a cost-effective sea water agriculture in many regions of the world (Sato et al., 2005).



Figure 1. Sheep eating mangrove foliage (Source: Manzanar Project)



Figure 2. Mangrove forest where none existed before (Source: Manzanar Project)

COUNTRY CASE STUDY: MAURITANIA

Mauritania: An arid country

Saenger et al. (1983, quoted by John and Lawson, 1990) estimated the area covered by mangrove forest in West Africa (Senegal to Angola) as 27 110 km², but as no figures are given for certain countries, such as Ivory Coast, Ghana and Togo, this estimate may be regarded as minimal.

Along the West African coast, mangroves in Mauritania reach their Northernmost distribution (Dahdouh-Guebas and Koedam, 2001).

Mauritania situation

Mauritania, in the Western region of the continent of Africa, is a desert country characterized by an arid climate. Indeed, four-fifths of the country has an annual rainfall of less than 200 mm and this very low rainfall is accompanied by a high rate of evaporation. Half the population still depends on agriculture and livestock for a livelihood, even though many of the nomads and subsistence farmers were forced into the cities by recurrent droughts in the 1970s and 1980s.

Mangrove distribution in Mauritania

Mangrove communities are somewhat limited in extent in Mauritania, but those that do occur represent the Northernmost and the most arid mangrove systems on the Atlantic coast of Africa (Spalding et al., 1997).

There are two centers of mangrove distribution, one along the Senegal River Delta, which has a sahelian climate, the other further North around Cape Timirist and the Banc d'Arguin National Park. The last one comprises desert, coastal swamps, small islands and shallow coastal waters (Dahdouh-Guebas and Koedam, 2001). These two areas are separated by a coastline consisting of sandy beaches backed by a high ridge and exposed to strong wave action (Spalding et al., 1997).

In the Senegal River Delta *Rhizophora racemosa* is dominant along the creeks and *Avicennia germinans* covers the back swamps, possibly with some specimens of *Conocarpus erectus*. The Northern stands consist of a few hundred hectares of pure *Avicennia germinans*, and may well be relict from an estuarine past (Spalding et al., 1997).

Trees are dwarfed, rarely exceeding 2 m in height, and the stands may be in decline as levels of recruitment are very low. The mangroves have also declined considerably in the Senegal Delta, a fact which has been related to (Spalding et al., 1997):

- Over-exploitation for firewood and boat construction by local populations;
- Increased grazing pressure by camels and goats, combined with reduced flooding, both of which can be related to the sahelian droughts;
- And the increased salinity of the river basin as a result of the construction of the Dama dam near the Senegal River mouth.

The Manzanar project in Mauritania

Nouakchott

Nouakchott is the capital since 1957 and by far the largest city of Mauritania. Located on the Atlantic coast of the Sahara desert, it lies on the West coast, on the Atlantic Ocean, although with the exception of Nouakchott Wharf and a deep water port, the coastal strip is mostly left empty and allowed to flood.

The Manzanar Project in Nouakchott aims to grow mangroves in the vicinity of the city by pumping the seawater for the irrigation (Figures 3, 4 and 5). The plantation is exactly located at the autonomous port of Nouakchott said "Port of Friendship" (PAN-PA). The project started in January 2008 and concerns a plantation surface of 1 to 4 hectares depending on the funds availability.

The mangrove specie used in the project is *Avicennia Germinans*. The mangroves were planted from dry land seeds (nearly 100 to 200 m far from the sea). They are irrigated by untreated seawater through motor-driven pumps. Only biological fertilizers are used, such as fish manure and wastes, very abundant at the fish market in Nouakchott. The project also experiments to introduce other halophytic plants, such as *Spartina Maritima*, *Nitraria retusa*, and *Sesuvium portulacastrum*, which can constitute other sources of food for the cattle and provide new source of income for the farmers.

In less than one year, the mangrove swamp already reached a height from 40 to 60 cm. At the start, a daily irrigation was adopted. Currently, the irrigation system was decreased to twice per week. During the second year and on a small part of the mangrove swamp no more irrigation or very little will be experienced.

To date, the Manzanar Project in Nouakchott has been successful and shows to the political decision makers that it is possible to make the desert green by using seawater as irrigation source.



Figure 3. Growing *Avicennia Germinans* inland at Nouakchott Seaport, Mauritania
(Source: Manzanar Project)



Figure 4. Water pumps for Seawater Irrigation at Nouakchott Seaport, Mauritania
(Source: Manzanar Project)



Figure 5. Mangroves plantation and digging channels at Nouakchott Seaport, Mauritania
(Source: Manzanar Project)

Diawling National Park

Diawling National Park, contiguous with Djoudj National Park in Senegal, on the opposite bank of the river, includes a lagoon which is fed by brackish water from a tributary of the Senegal river, significant estuarine and intertidal areas, saline flats and a small area of mangroves, as well as dunes, alluvial plains and an interconnecting network of rivers lakes and ponds. Average annual rainfall is estimated to 300 mm (BirdLife International, 2008).

Until the early 1960s the lower delta of the Senegal river was an area of extraordinary biodiversity and ecological richness and a large population of nomadic herders and settled farmers and fishermen. However, following the construction of the Diama dam at the river mouth in 1986 and the Mantali dam in Mali in 1990, the delta has dramatically changed.

The dams were to supply irrigation water for agriculture to the Senegal river valley as well as creating hydroelectric power and increasing the navigable distance of the river. A large number of problems have, however, ensued (BirdLife International, 2008):

- Irrigated crops have proved economically unviable;
- Increasing soil salinity is a prevalent problem;
- And the non-agricultural activities associated with the area have suffered.

Thus, livestock have had less access to water and grazing, fish stocks have declined, woodlands have been lost and water-table recharge was hampered. There have also been numerous social and health problems (BirdLife International, 2008).

In 1994, the International Union for Conservation of Nature (IUCN) started a programme to rehabilitate the delta, working in collaboration with the management of Diawling National Park, created in 1991 (BirdLife International, 2008).

One of the Diawling National Park restoration projects, in collaboration with United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), the National Park Directorate, the Manzanar Project and the Non Governmental Organization (NGO) "Agir Contre la Pauvreté", concerns the rehabilitation of the current mangrove forests of the Diawling National Park (Figure 6) and the plantation of new areas.

The project in the Diawling National Park began in January 2009 and will cover a surface of three-four hectares. The mangrove specie used in the project is *Avicennia Germinans*.



Figure 6. Mangrove forest in the Diawling National Park, Mauritania (Source: Manzanar Project)

CONCLUSION

Mangrove communities' loss have principally been attributed to anthropogenic pressures, such as over-harvesting for timber and fuel-wood production, intensive aquaculture, mining, pollution and damming of rivers that alter water salinity levels.

The consequences of these losses are diverse and concern, for instance, wildlife habitats disappearance, decline of fishery resources and coastal erosion.

Nowadays, the restoration and the plantation of mangroves is becoming very important, because governments throughout the world recognized the great ecological, economic and social values of mangroves and thus are showing commitments towards sustainable use of mangrove areas.

The Manzanar Project, by growing mangrove forest where none existed before, wants to allow people living in a harsh environment, such as a desert, become self-sustaining by creating a sustainable economy. The Manzanar Project developed a successful method to grow mangroves in arid regions by using seawater with fertilizer.

In Mauritania, the Northernmost mangrove systems on the West Africa, the implantation of mangrove communities around cities could be a chance for the local population in social and economic terms. Mangrove forest is a simple solution to arid agriculture, without the necessity to fresh water, and local poverty.

REFERENCES

- BirdLife International (2008) BirdLife's online World Bird Database: the site for bird conservation. Version 2.1., Cambridge, UK: BirdLife International. Available: <<http://www.birdlife.org>> (accessed 6/4/2009).
- Dahdouh-Guebas F. and Koedam N. (2001) Are the northernmost mangroves of West Africa viable? – a case study in Banc d'Arguin National Park, Mauritania. *Hydrobiologia*, 458, 241-253.
- Duke N.C., Ball M.C. and Ellison J.C. (1998) Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. *Global Ecol. Biogeogr. Lett.*, 7, 27-47.
- Ewel K.C., Twilley R.R. and Ong J.E. (1998) Different kinds of mangrove forests provide different goods and services. *Global Ecol. Biogeogr. Lett.*, 7, 83-94.
- Feller I.C. (1995) Effects of nutrient enrichment on growth and herbivory of dwarf red mangrove (*Rhizophora mangle*). *Ecol. Monographs*, 65, 477-506.
- Franks T. and Falconer R. (1999) Developing procedures for the sustainable use of mangrove systems. *Agric. Water Manage.*, 40, 59-64.
- Macintosh D.J. and Ashton E.C. (2002) A Review of Mangrove Biodiversity Conservation and Management. Centre for Tropical Ecosystems Research, University of Aarhus, Denmark, 86 p.
- McKee K.L. (1996) Mangrove Ecosystems: Definitions, Distribution, Zonation, Forest Structure, Trophic Structure, and Ecological Significance. In: Mangrove ecology: A Manual for a Field Course. Manual prepared for the Mangrove Education and Training Program for Belize. Eds Feller I.C. and Sitnik M., Smithsonian Institution, Washington, D.C. (USA)
- McLeod E. and Salm R.V. (2006) Managing mangroves for resilience to climate change. IUCN Resilience Science Group Working Paper Series – N° 2, The World Conservation Union (IUCN), Gland, Switzerland, 66 p.
- Morrisey D., Beard C., Morrison M., Craggs R. and Lowe M. (2007) The New Zealand mangrove: review of the current state of knowledge. Auckland Regional Council Technical Publication (ARCTP) N°. TP325, 162 p.
- Northern Territory Government (2002) Mangrove Management in the Northern Territory. Northern Territory Government, Department of Infrastructure, Planning and Environment. 51 p.
- Primavera J.H. (1997) Socioeconomic impacts of shrimp culture. *Aquacult. Res.*, 28, 815-827.
- Queensland Government (2006) Wetland management profile: Mangrove wetlands. Ecosystem Conservation Branch, Environmental Protection Agency (EPA), 33 p.

Queensland Government (2007) Moreton Bay Marine Park Zoning Plan review: Habitat information: Mangroves. Environmental Protection Agency (EPA), Information sheet 00246_0307, 2 p.

Radhika D. (2006) Mangrove Ecosystems of Southwest Madagascar: An Ecological, Human Impact, and Subsistence Value Assessment. *Trop. Resour. Bull.*, 25, 7-13.

Ravilious et al. (2005) Implementing an Interoperable Global Mangrove Dataset. Proceedings of 25th Annual ESRI International User Conference, July 25–29, 2005, 10 p.

Rönnbäck P., Troell M., Kautsky N. and Primavera J.H. (1999) Distribution pattern of shrimps and fish among *Avicennia* and *Rhizophora* microhabitats in the Pagbilao mangroves, Philippines. *Estuarine Coastal and Shelf Sci.*, 48, 223-234.

Sato G., Fisseha A., Gebrekiros S., Karim H.A., Negassi S., Fischer M., Yemane E., Teclemariam J. and R. Riley (2005) A novel approach to growing mangroves on the coastal mud flats of Eritrea with the potential for relieving regional poverty and hunger. *Wetlands*, 25, 776-779.

Spalding M.D., Blasco F. and Field C.D. (1997) World Mangrove Atlas. 2nd Edition, Eds International Society for Mangrove Ecosystems (ISME), International Tropical Timber Organization (ITTO) and United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), Okinawa, Japon, 178 p.

State of the Marine Environment Report for Australia (2000) The Marine Environment – Technical Annex: 1. Compiled by Zann L.P., Great Barrier Reef Marine Park Authority.

Tomlinson P.B. (1986) The botany of mangroves. 1st edition, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 419 p.

United Nations Environment Programme (UNEP) (1994) Assessment and monitoring of climatic change impacts on mangrove ecosystems. UNEP Regional Seas Reports and Studies, Report N° 154.

United States Geological Survey (USGS) (2006) Nutrient Controls on Biocomplexity of Mangrove Ecosystems. Fact sheet 2004-3124, 3 p.

Valiela I., Bowen J.L. and York J.K. (2001) Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments. *BioSci.*, 51, 807-815.

Wells S., Ravilious C. and Corcoran E. (2006) In the front line: Shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs. United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), Cambridge, UK, 33 p.

Woodroffe C.D. (1990) The impact of sea-level rise on mangrove shoreline. *Prog. Phys Geogr.*, 14, 483-502.

CHAPITRE 10

L'AGRICULTURE IRRIGUEE AU MAROC FACE A LA RARETE DES RESSOURCES EN EAU

A.B.S. EL GUEDDARI

Administration du Génie Rural au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime
Maroc

M. ARRIFI*

Administration du Génie Rural au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime
Maroc

RESUME

Le présent article se propose d'étudier la problématique de la rareté des ressources en eau au Maroc et ses répercussions sur le développement de l'agriculture irriguée, ainsi que les voies pour y faire face. En effet, les ressources en eau ont connu durant ces dernières décennies une diminution importante en raison de la sécheresse qui sévit depuis plus de 25 ans. A cela s'ajoute d'autres contraintes, notamment la répartition très inégale des ressources en eau entre les différentes régions du pays, l'accroissement de la demande, l'utilisation peu efficiente et peu valorisante de l'eau et la dégradation de la qualité des ressources. Le secteur de l'agriculture irriguée, qui subit en premier les conséquences négatives de la diminution des ressources en eau, souffre d'un déficit permanent en matière de fourniture d'eau d'irrigation. Par ailleurs, la surexploitation des ressources en eau souterraines a engendré une situation alarmante des nappes phréatiques, menaçant ainsi d'importants investissements consentis par les privés pour l'irrigation à partir de ces nappes. Face à cette situation, l'Etat a décidé de revoir son action dans le domaine d'économie d'eau en irrigation, qui a été jusqu'ici importante mais peu concluante. Ainsi, un programme national d'économie et de valorisation de l'eau en irrigation a été mis en œuvre pour la reconversion des systèmes d'irrigation existants à l'irrigation localisée sur

* Auteur correspondant : ARRIFI El Mahdi – Chef de Service à l'Administration du Génie Rural au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime – Avenue Hassan II, B.P. 1069, Rabat, Maroc
Email : arrifi.mahdi@gmail.com – Tél. : (+212) 537 69 00 98 – Fax : (+212) 537 69 62 00 15

550 000 ha durant 15 ans. C'est un programme volontariste qui sera réalisé moyennant les investissements directs de l'Etat et les subventions publiques octroyées dans ce domaine aux agriculteurs. Sa réalisation devrait permettre de valoriser plus d'1 milliard de m³ d'eau actuellement en déperdition, d'augmenter les rendements des cultures qualitativement et quantitativement et de protéger les ressources en eau et l'environnement.

Mots clés : Sécheresse ; eau ; irrigation ; agriculture ; localisé ; reconversion ; économie ; valorisation.

INTRODUCTION

Si la rareté des ressources en eau ou leur limitation est une caractéristique intrinsèque du climat du Maroc, ce phénomène semble connaître une accentuation au cours des dernières décennies marquées par des sécheresses plus fréquentes, au point que l'effet de ces sécheresses sur le volume des précipitations, des ruissellements et sur le potentiel mobilisable devient de plus en plus sensible.

Conjugué à la pression démographique croissante, au développement urbain en plein essor, aux développements touristique et industriel très exigeants en eau, en termes de volume et de déficit, à l'utilisation peu efficiente de l'eau et à la dégradation de la qualité des ressources, ce phénomène de limitation des ressources interpelle tous les acteurs à œuvrer dans le sens d'une gestion rigoureuse des ressources en eau du pays.

L'affectation des ressources en eau est désormais au centre d'enjeux très importants, voire même déterminants pour l'avenir de certaines activités, notamment l'agriculture irriguée qui souffre d'un déficit permanent en matière de fourniture d'eau d'irrigation avec un taux de satisfaction des besoins à partir des barrages ne dépassant guère les 60% en moyenne, en plus de la rareté croissante des ressources en eau souterraines suite au rabattement important des nappes phréatiques, pouvant aller jusqu'à 3 m/an à cause de la surexploitation.

Avant d'examiner les solutions adéquates pour faire face à cette situation, notamment l'économie d'eau en irrigation qui devra constituer un défi important à relever, il convient d'abord d'analyser ce phénomène de rareté et de limitation des ressources en eau souterraines, qui s'est accentué durant ces dernières décennies et ensuite de dégager les conséquences sur l'agriculture irriguée, notamment en matière de satisfaction des besoins en eau. Enfin, l'attention sera portée sur la politique à mettre en œuvre en matière d'économie d'eau en irrigation et les instruments et les moyens à mobiliser, ainsi que les résultats escomptés.

LES RESSOURCES EN EAU AU MAROC : UN CONTEXTE CONTRAIGNANT

La diminution croissante des ressources en eau au Maroc se confirme par les niveaux du potentiel et de la mobilisation de ces ressources, qui ont été revus à la baisse à l'occasion des récentes études d'actualisation des Plans Directeurs d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) des bassins hydrauliques et d'élaboration du Plan National de l'Eau (PNE). En effet, selon les publications du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement (2006) à l'occasion du débat national sur l'eau, si le potentiel des ressources en eau renouvelables était pendant longtemps estimé à 30 milliards de m³, il est actuellement évalué à seulement 22 milliards de m³. De même, le potentiel des ressources en eau mobilisables, qui était estimé à quelques 21 milliards de m³, est aujourd'hui évalué à 17,5 milliards de m³, dont 13,5 milliards de m³ d'eau de surface et 4 milliards de m³ d'eau souterraine. Les ressources en eau mobilisées ont été actualisées à quelques 13,5 milliards de m³, dont 10 milliards de m³ d'eau superficielle et 3,5 milliards de m³ d'eau de nappe, alors qu'elles étaient évaluées à près de 16 milliards de m³ (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 2006).

En effet, les simulations hydrauliques effectuées dans le cadre de l'étude du PNE et de récentes études d'actualisation des PDAIRE montrent une diminution des volumes régularisés de près de 30% par rapport à ceux prévus par les anciens plans directeurs. Cet écart serait plus accentué au niveau des bassins du Bouregreg, de l'Oum Er Rbiâ et du Sebou ; il serait respectivement de 46%, 45% et 38%. Le Tableau 1 présente, pour les différents bassins hydrauliques du pays, l'écart entre les volumes régularisables à l'horizon 2020 évalués dans le cadre des études récentes et ceux calculés lors de l'élaboration des plans directeurs des différents bassins hydrauliques.

Ainsi, les ressources en eau renouvelables ne dépassent pas actuellement en moyenne les 730 m³/habitant/an, alors qu'elles étaient évaluées à 1150 m³/habitant/an en 1990 et à 2560 m³/habitant/an en 1960. Pour les ressources en eau mobilisables, le ratio est de 570 m³/habitant/an (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 2006). Ainsi, le Maroc se situe d'ores et déjà dans la catégorie des pays à stress hydrique chronique et frôle la pénurie hydrique.

Cette rareté quantitative est aggravée par une répartition très inégale des ressources en eau entre les différents bassins du pays. En effet, plus de 80% des ressources en eau mobilisables sont situées dans le Nord et le Centre du pays. Les bassins du Loukkos, Sebou et Oum Er-Rabiâ assurent à eux seuls près de 66% des ressources en eau naturelles globales et plus de 70% des ressources mobilisables de surface (Tableau 2).

Tableau 1. Différence entre les volumes d'eau régularisables par les barrages à l'horizon 2020 selon les études récentes et les plans directeurs des bassins hydrauliques

Bassins	Volume d'eau (m ³)		Ecart (%) [(1)-(2)]/(1)
	Plans Directeurs (1)	Etudes récentes (2)	
Oum Er-Rbià	3950	2190	45
Sebou	4467	2748	38
Loukkos, Tangérois et Côtiers Méditerranéens	1077	867	19
Moulouya	1042	884	15
Bouregreg	662	358	46
Tensift	725	615	15
Souss-Massa	615	576	6
Sud Atlasique	974	974	-
Total	13 512	9212	32

Tableau 2. Importance des ressources en eau renouvelables (naturelles) par bassin et type de ressource

Bassin	Superficie (km ²)	Eau de surface		Eau souterraine		Total	
		Mm ³ /an	%	Mm ³ /an	%	Mm ³ /an	%
Loukkos, Tanger et Côtiers Méditerranéens	12 800	3600	20,0	190	4,6	3790	17,1
Moulouya, Figuig, Kert, Isly et Kiss	76 664	1610	8,9	512	12,5	2122	9,6
Sebou	40 000	5600	31,1	1300	31,7	6900	31,2
Bou Regreg et Chaouia	20 470	847	4,7	120	2,9	967	4,4
Oum Er Rbia et El Jadida-Safi	48 070	3447	19,1	405	9,9	3852	17,4
Tensift et Ksob-Igouzoulen	24 800	872	4,8	520	12,7	1392	6,3
Souss-Massa et Tiznit-Ifni	27 880	626	3,5	370	9,0	996	4,5
Draa	88 640	700	3,9	350	8,5	1050	4,7
Guelmim	9960	72	0,4	22	0,5	94	0,4
Ziz, Rhéris, Guir, Bouaanane et Maidar	58 841	626	3,5	300	7,3	926	4,2
Sahara	302 725	25	0,1	16	0,4	41	0,2
Total	710 850	18 025	100	4105	100	22 130	100

Mm³ : Million de mètre cube

En plus de cette variabilité spatiale, la variabilité temporelle est une caractéristique contraignante des ressources en eau du Maroc. Ainsi, il est difficile ou presque impossible de déceler la moindre similitude entre deux campagnes agricoles successives, au point qu'au niveau d'un même site hydrologique, les apports annuels enregistrent des différences notables (Figure 1).

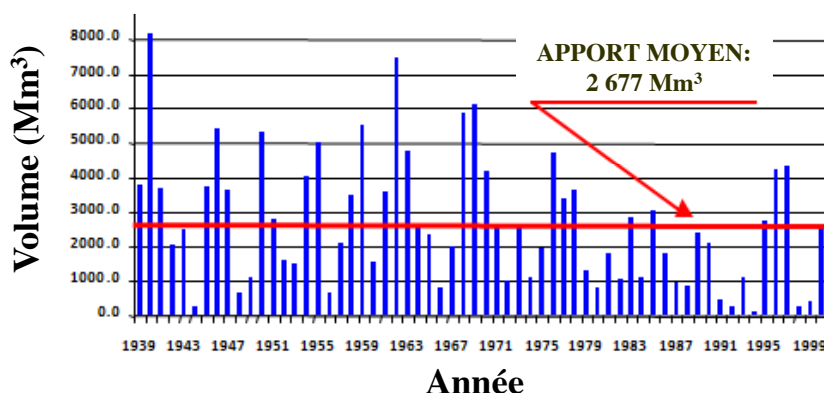


Figure 1. Variabilité annuelle des apports au niveau du barrage Al Wahda

La situation devient alarmante avec l'accroissement quasi-exponentiel de la demande en eau suite au développement socio-économique du pays, engendrant ainsi des situations de conflit entre les différents secteurs usagers. Cela s'aggrave davantage suite à des problèmes de taille liés principalement à la sous-valorisation des ressources en eau mobilisées, au gaspillage de l'eau dû à l'insuffisance de l'efficacité de son utilisation aussi bien dans le secteur de l'eau potable et industrielle que celui de l'irrigation, notamment au niveau de la parcelle, à la surexploitation des eaux souterraines, à la dégradation de la qualité des ressources en eau, au retard important dans l'assainissement et le traitement des eaux usées, et à l'insuffisance notable dans l'aménagement des bassins versants.

Par conséquent, au cours des prochaines années, la disponibilité des ressources en eau, en quantité et en qualité acceptables pour assurer un niveau d'utilisation satisfaisant, constituera pour le Maroc un défi majeur à relever. Relever ce défi revient à opérer les affectations des ressources à même de conserver l'équilibre existant entre les différentes activités économiques, à développer leurs moyens de façon à valoriser au mieux les ressources en eau qui leur sont affectées, à œuvrer à la conservation et à la préservation des ressources par l'épuration et le recyclage des effluents, et enfin ne pas hésiter à recourir, dans la recherche de cet équilibre nécessaire au développement du pays, aux ressources non conventionnelles.

L'IRRIGATION ET LA RARETE DES RESSOURCES EN EAU

Si les réalisations du Maroc dans le domaine d'extension des superficies irriguées sont impressionnantes et ont permis d'atteindre plus de 1 458 100 ha, dont 1 016 700 ha grâce aux investissements publics et 441 400 ha grâce aux efforts privés (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, 2006), la sauvegarde, le développement et la durabilité de ce patrimoine requièrent, dans les conditions de rareté des ressources en eau évoquées ci-dessus, la maîtrise de la demande en eau d'irrigation, l'économie d'eau et sa valorisation.

Il est vrai que l'agriculture irriguée de part sa nature est le premier utilisateur des ressources en eau avec des allocations pouvant atteindre jusqu'à 80% de ces ressources (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, 2006), mais ce sous-secteur joue un rôle incontestablement stratégique dans la sécurité alimentaire et le développement économique et social du pays, puisqu'il contribue substantiellement à l'amélioration quantitative et qualitative de la production agricole, au développement de l'agro-industrie et à d'autres services, à la création de l'emploi, au développement rural et à l'amélioration des conditions de vie des populations bénéficiaires. En effet, les zones irriguées, qui ne constituent en fait que 16% de la superficie agricole utile, assurent en moyenne 45% de la valeur ajoutée agricole, pouvant atteindre jusqu'à 75% en année de sécheresse, interviennent pour 75% des exportations agricoles et assurent un tiers d'emploi en milieu rural (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritime, 2006). Ces performances ont été confirmées par une étude réalisée par la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) sur l'évaluation macro-économique de l'agriculture irriguée au Maroc (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 2004). Selon cette étude, l'agriculture irriguée a un poids relatif important vis-à-vis de la totalité du secteur agricole et au sein de l'économie nationale. En effet, en année climatique moyenne, la production à l'hectare est près de sept fois plus importante dans l'irrigué que dans le bour¹. La valeur ajoutée générée par l'irrigation en termes de production végétale représente plus de 51% de la valeur ajoutée de l'ensemble de la production végétale. En outre, la valeur ajoutée générée par l'ensemble de l'agriculture irriguée est près de 40% de la valeur ajoutée agricole totale. De plus, l'agriculture irriguée a des effets dynamiques considérables sur l'économie nationale, supérieurs à ceux de l'industrie. En effet, pour la même augmentation de production, la valeur ajoutée générée par l'industrie dans l'économie nationale est inférieure de 27% à celle induite par l'agriculture irriguée, pour une année climatique moyenne (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 2004).

De plus, l'idée de « grand consommateur d'eau » est dans la pratique très relative puisque l'irrigation est le premier secteur qui subit de plein fouet les conséquences négatives de la diminution des ressources en eau, et se trouve frappé de restrictions chaque fois que les apports d'eau au niveau des ouvrages de mobilisation sont déficitaires par rapport aux prévisions. En effet, depuis près de 25 ans, un déficit permanent est enregistré en matière de fourniture d'eau d'irrigation à partir des barrages par rapport aux prévisions des PDAIRE (Figure 2). Ce déficit se creuse davantage durant les années de sécheresse. Globalement, il est estimé que le taux de couverture des besoins en eau de l'agriculture irriguée ne dépasse pas en moyenne 60%. Dans beaucoup de cas, la situation est encore plus grave et a tendance à devenir de plus en plus alarmante. Cela apparaît nettement avec l'analyse des bilans hydrauliques de certains bassins, comme l'Oum Er Rbiâ, le Tensift, le Souss-Massa. En effet, d'après une étude sur les ressources en eau dans la région de Marrakech

¹ Bour signifie, en langue arabe, zones d'agriculture pluviale.

réalisée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2008a), pour le bassin de l'Oum Er Rbiâ, le bilan de la branche oued² Lakhdar, durant la période 1993-94/2004-05, montre un taux de couverture des besoins en irrigation, pour les périmètres de la Tessaout Aval, le N'Fis, les secteurs Centraux et la Petite et Moyenne Hydraulique (PMH) Lakhdar, ne dépassant pas, en moyenne, 36%, avec un minimum de 15% durant de la campagne 2001-02. De même, pour la branche oued Laâbid, ce taux se situe, en moyenne et pour la période 1996-97/2005-06, à 42% et 56% des besoins de la Tessaout Aval et des Beni Moussa, avec des minimums de 20% et 8%, respectivement. Dans le bassin du Tensift, les fournitures d'eau à l'agriculture au niveau de la branche du N'Fis ont varié pendant les 10 dernières années entre 54% et 20% et se situent en moyenne à 39% (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2008a). C'est dire à quel point l'agriculture irriguée souffre des conséquences d'un contexte hydraulique particulièrement contraignant.

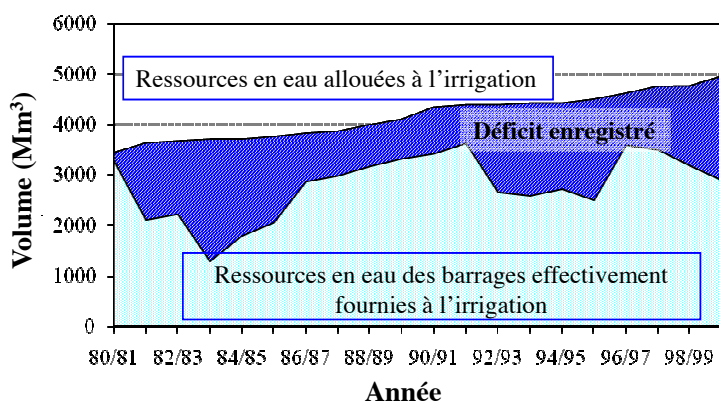


Figure 2. Evolution du déficit enregistré dans les dotations en eau des périmètres d'irrigation à partir des barrages par rapport aux prévisions

Par ailleurs, la surexploitation des ressources en eau souterraines constitue une sérieuse menace pour la durabilité de l'irrigation dans beaucoup de régions. Il est estimé qu'actuellement 16 nappes utilisées pour l'irrigation connaissent un déficit aiguë, suite au rabattement excessif qu'elles connaissent et qui a atteint jusqu'à 3 m/an en moyenne durant les 20 dernières années, comme c'est le cas de la nappe du Saïss, ou 2 m/an pour la nappe du Souss (Figure 3 et Tableau 3) (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 2006).

D'importants investissements, consentis par les privés, pour l'irrigation de 405 000 ha à partir des eaux de puits ou de forages sont ainsi menacés par cette évolution défavorable des ressources en eau souterraines (Tableau 4).

² Oued signifie, en langue arabe, rivière.

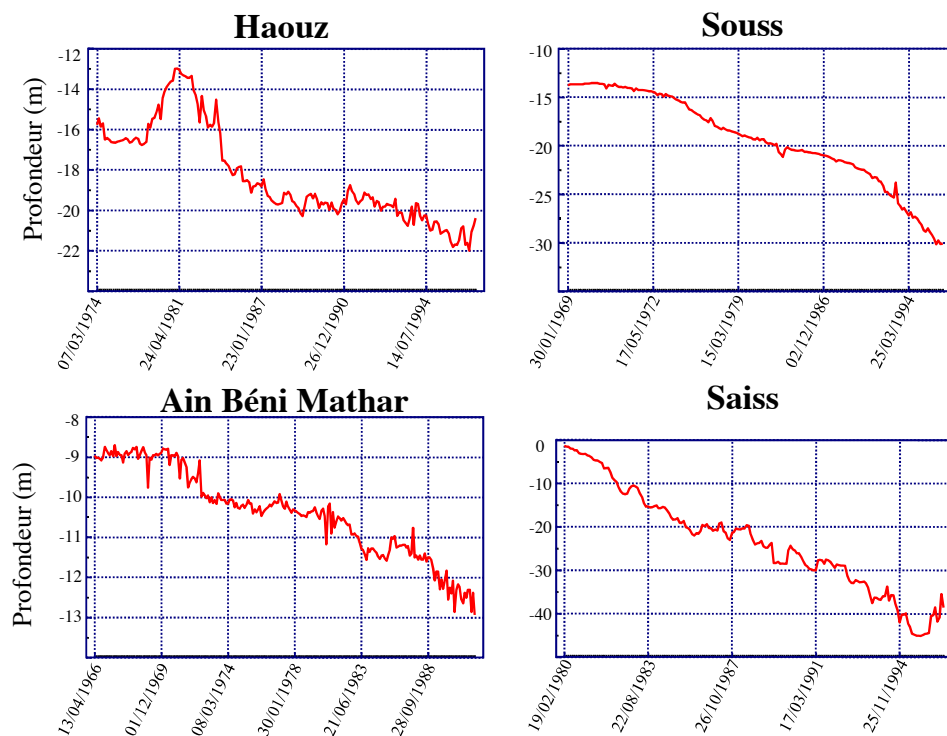


Figure 3. Evolution des niveaux piézométriques de quelques nappes

Tableau 3. Baisse des niveaux piézométriques de quelques nappes (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 2006)

Nappe	Baisse durant les 20 dernières années (m)	Baisse annuelle moyenne (m/an)
Souss	40	2
Haouz	30	1 à 2
Saïss	60	3
Ain Beni Mathar	40	2

Tableau 4. Superficies équipées de puits et forages par les privés

Nappe	Superficie équipée
Souss	88 000
Haouz	82 000
Gharb	67 000
Saïss	38 000
Berrechid-Chaouia	29 000
Oriental	21 000
Tadla	16 000
Sahel	13 000
Autres nappes	51 000
Total	405 000

Dans ce contexte de rareté des ressources en eau et face aux exigences de développement et aux impératifs d'ouverture économique, la pérennité de l'agriculture irriguée ne peut être assurée, voire renforcée, que par une utilisation rationnelle et une meilleure valorisation de l'eau dans le cadre d'une gestion durable des systèmes d'irrigation.

L'ECONOMIE D'EAU EN IRRIGATION : UN SOUCI PERMANENT ET UN DEFI A RELEVÉ

En fait, le souci d'économie d'eau d'irrigation au Maroc ne date pas d'hier, cela remonte déjà aux années 1970 avec la réalisation des premiers périmètres collectifs équipés en aspersion pour connaître une extension rapide dans les Doukkala, le Loukkos, la Moulouya, le Souss-Massa et le Gharb. Mais ce choix a été vite remis en cause en raison du coût très élevé du pompage que nécessite la mise en pression de l'eau, coût devenu très rapidement insupportable suite à la hausse rapide des prix de l'énergie.

Ensuite, avec la création du Fonds de Développement Agricole en 1986, l'Etat a instauré des subventions à l'aménagement hydro-agricole et foncier des propriétés agricoles pour des taux allant de 10 à 30%, selon les travaux et les équipements réalisés (17% en moyenne du coût des projets), cela en plus de l'exonération, à partir de 1982, des droits et des taxes applicables à l'importation de certains équipements et matériels destinés à l'irrigation (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2008b).

Parallèlement, un intérêt grandissant a été accordé à la gestion, aux réhabilitations et à la maintenance des infrastructures d'irrigation dans les périmètres collectifs d'irrigation, aussi bien au niveau de la grande hydraulique que de la PMH. Des programmes

structurants et d'envergure, tels que les deux Projets d'Amélioration de la Grande Irrigation (PAGI-1 et PAGI-2), le projet Management des Ressources de Tadla (MRT), les projets de réhabilitation de la PMH (tels que le PMH-1 et le PMH-2) et le Projet de Réhabilitation de la Grande Irrigation (PRGI), ont été conduits et réalisés pour améliorer le rendement global du secteur irrigué tant sur le plan managérial que sur le plan de l'efficacité des réseaux d'irrigation. Les résultats ont été encourageants et ont permis au secteur irrigué d'occuper, au moins jusqu'à ce jour, une place de choix dans le développement agricole du pays et d'assurer le rôle de locomotive qui lui a été assigné, peut-être pas de manière optimale, mais avec des progrès et des améliorations substantiels constants.

En fait, malgré que l'efficacité des systèmes d'irrigation ait toujours été une préoccupation constante du modèle d'aménagement hydro-agricole mis en œuvre, tant au niveau de la conception qu'au niveau des principes et des règles d'exploitation des réseaux d'irrigation, cette efficacité est restée en deçà des attentes et révèle une insuffisance qui appelle à être corrigée.

Les investigations conduites à ce sujet montrent que le problème de l'efficacité des systèmes d'irrigation au Maroc se pose principalement au niveau de l'application de l'eau à la parcelle. En effet, si les diagnostics réalisés à présent affichent tous une certaine satisfaction quant à l'état des réseaux de distribution et de leur rendement, ils sont alarmants quant aux pertes d'eau à la parcelle, notamment dans le cas de l'irrigation de surface (telle que la submersion, la Robta³).

Selon les chiffres du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes (2006), le mode d'irrigation de surface concerne globalement 81,1% des terres aménagées, alors que l'aspersion et l'irrigation localisée n'en concernent, respectivement, que 9,4% et 10,5% (Tableau 5). Or, d'après le document du plan d'action pour l'amélioration de l'efficacité de l'eau dans les systèmes d'irrigation, édité par le Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Eaux et Forêts (2002), pour l'irrigation de surface, hormis l'état des équipements et les pratiques des irrigants, les pertes d'eau intrinsèques à ce mode sont de l'ordre de 40% des volumes délivrés en tête de réseau, ce qui correspond à une efficacité globale nominale de 60%. De même pour l'aspersion, cette efficacité nominale est de 80% (Tableau 6).

En pratique, dans la plupart des périmètres de Grande Hydraulique par exemple, l'efficacité globale (réseau et parcelle) est estimée à 40% en moyenne pour l'irrigation de surface et à 60% pour l'irrigation par aspersion, soit des écarts de près de 20% par rapport aux performances fixées initialement dans le cadre des projets (Tableau 6) (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, 2002).

³ La Robta est une technique traditionnelle d'irrigation de surface largement utilisée par l'agriculteur marocain. Elle consiste en un bassin rectangulaire contenant plusieurs billons sur lesquels sont installées des cultures sarclées. C'est une technique qui occasionne d'importantes pertes d'eau par percolation.

Si pour les réseaux externes de transport et de distribution de l'eau d'irrigation, l'efficacité est relativement satisfaisante, avec un manque à gagner de cinq points de rendement par rapport aux projections, c'est au niveau de la parcelle que se situe donc le principal gisement d'économie d'eau dans les systèmes d'irrigation. Le Tableau 6 montre que des gaps importants d'efficacité à la parcelle de l'ordre de 20% et de 15%, respectivement, pour l'irrigation gravitaire et l'aspersion sont à rattraper.

Tableau 5. Importance des superficies équipées par type d'irrigation et par mode d'irrigation (en hectares) (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, 2006)

Type d'irrigation	Mode d'irrigation			
	Gravitaire	Aspersion	Localisée	Total
Grande Hydraulique	533 887	113 808	34 905*	682 600
Petite et Moyenne Hydraulique (PMH)	327 230	6900	-	334 130
Irrigation Privée (en dehors des périmètres déjà aménagés par l'Etat)	306 157	17 038	118 235	441 430
Total	1 167 274	137 746	153 140	1 458 160

**Initialement aménagés par l'Etat pour l'irrigation gravitaire et/ou l'aspersion et reconvertis par les agriculteurs à l'irrigation localisée*

Tableau 6. Comparaison des efficacités constatées et projetées (Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, 2002)

Mode d'irrigation	Efficacité réalisée (%)	Objectif (%)	Ecart (%)
<u>Surface</u>			
Réseau	80	85	5
Parcelle	50	70	20
Globale	40	60	20
<u>Aspersion</u>			
Réseau	85	95	10
Parcelle	70	85	15
Globale	60	80	20

Le mode d'irrigation étant déterminant dans l'efficacité d'utilisation de l'eau à la parcelle, il n'en demeure pas moins que d'autres facteurs sont aussi importants, tels que la sous tarification et le sous recouvrement des redevances d'eau d'irrigation au niveau de certains périmètres d'irrigation, la dégradation des équipements d'irrigation dans d'autres périmètres et les mauvaises pratiques et la mauvaise maîtrise quasi générale des techniques et des méthodes d'application de l'eau d'irrigation à la parcelle.

Certes, les mesures d'amélioration des pratiques et des techniques d'irrigation existantes (telles que le surfaçage, la confection de billons, la confection de calants et le nivellement au laser), conjuguées aux réajustements tarifaires et aux efforts de réhabilitation des équipements hydro-agricoles déployés pendant les deux dernières décennies, ont permis d'apporter des améliorations et de véhiculer une certaine sensibilité des usagers au problème de la rareté de la ressource. Cependant, elles ne constituent pas, de part les limites intrinsèques qui les caractérisent, une réponse aux impératifs de rationalisation et aux objectifs à atteindre dans ce domaine. C'est pourquoi, il a été envisagé de convertir au mode d'irrigation localisée le maximum de superficie d'irrigation de surface. C'est ainsi que les pouvoirs publics ont pris des mesures incitatives pour encourager l'utilisation de ces techniques d'irrigation économes en eau, notamment pour les plantations et les cultures sarclées.

L'INCITATION A L'ECONOMIE D'EAU D'IRRIGATION

La politique d'incitation comporte l'octroi de subventions financières à l'équipement en systèmes d'irrigation localisée et l'assistance technique des agriculteurs pour le choix des technologies, la conception et la réalisation de leurs systèmes d'irrigation.

D'après une publication du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2008b) sur l'économie et la valorisation de l'eau en irrigation, les taux de subvention couvraient jusqu'à 2002 en moyenne près de 17% du coût total des projets économes en eau. La promulgation en 2002 de l'arrêté n°1994-01 du 09/11/2001, relatif aux subventions accordées aux projets d'irrigation localisée (Bulletin Officiel, 2002), a permis de relever ces taux à 30 et 40% suivant l'état des ressources en eau dans chaque bassin hydraulique du pays, tout en élargissant l'assiette de ces subventions à toutes les composantes du projet depuis la mobilisation des ressources en eau, la construction des bassins de stockage jusqu'à la distribution de l'eau à la parcelle.

L'instauration de ce système d'incitation a été suivie par la mise en œuvre en 2002 d'un programme national de développement de l'irrigation localisée visant l'aménagement, à moyen terme, par les agriculteurs d'une superficie nouvelle de 114 000 ha d'irrigation localisée, dont 110 000 ha de reconversion des systèmes d'irrigation existants. La superficie équipée en irrigation localisée à la veille du lancement de ce programme était de quelques 98 000 ha.

Selon le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2008b), plus de cinq ans après son lancement, ce programme n'a pas pu atteindre les objectifs escomptés. En effet, environ 44 000 ha seulement ont été équipés de systèmes d'irrigation localisée à la fin de 2006, soit près de 39% de l'objectif fixé, correspondant à un rythme d'équipement moyen annuel de près de 8800 ha, rythme insuffisant eu égard aux impératifs d'économie d'eau dictés par le contexte hydraulique du pays et en raison des enjeux économiques et sociaux liés à l'économie d'eau en termes de valorisation et de durabilité des ressources en eau et des investissements réalisés.

La situation est beaucoup plus critique lorsqu'on sait que 75% des 44 000 ha réalisés l'ont été dans le cadre du système d'incitation instauré depuis la création du Fonds de Développement Agricole en 1986. Ceci est dû principalement à la complexité des procédures et des conditions d'octroi des subventions telles que prévues dans le cadre du système de 2002.

Par ailleurs, la capacité des agriculteurs à faire face au financement des investissements nécessaires à l'équipement de leurs exploitations en systèmes d'irrigation localisée est faible, même avec les incitations de l'Etat. Les coûts d'investissement de la première installation d'un système d'irrigation localisée sont de l'ordre de 36 000 dirhams marocains (MAD)⁴ par hectare, voire 60 000 MAD en cas de recours aux bassins de stockage d'eau.

Pour mieux soutenir les efforts des agriculteurs et accélérer le rythme d'équipement en techniques d'irrigation localisée, le gouvernement a procédé fin 2006 au relèvement du taux de subvention à 60% du coût des aménagements et à son uniformisation sur l'ensemble du territoire national. En outre, les procédures d'octroi des subventions ont été révisées dans le sens de leur simplification. Ces efforts ont été poursuivis en 2008 par l'instauration du guichet unique.

Ceci est d'autant plus important que les pouvoirs publics ont décidé de mener une politique volontariste et efficace dans le domaine d'économie d'eau en irrigation. En effet, un nouveau programme de développement de l'irrigation localisée, baptisé Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI), a été élaboré et identifié. Il a pour objectif d'équiper 550 000 ha supplémentaires en systèmes d'irrigation localisée à l'horizon 2022.

LA NECESSITE D'UNE POLITIQUE VOLONTARISTE : PNEEI

La consistance du PNEEI

L'étude du PNEEI élaborée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2007) souligne que ce programme se veut ambitieux, volontariste et holistique. Il place l'agriculteur et l'amélioration de son revenu agricole au centre des préoccupations et

⁴ 1 dirham marocain (MAD) correspond à 0,11527 dollar US (USD), taux de change du 19 février 2009

se base non seulement sur la reconversion des techniques d'irrigation peu efficaces, mais aussi sur la revue et l'amélioration de tout le processus de mise en valeur agricole et de valorisation de la production, c'est-à-dire de l'amont (pour le choix des cultures et l'amélioration des techniques culturales) à l'aval agricole (au niveau de l'organisation, du partenariat, de la commercialisation et de l'agro-industrie).

Ainsi, selon Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2007), ce programme consiste en la conversion massive de l'irrigation de surface et par aspersion à l'irrigation localisée, particulièrement dans les périmètres de grande hydraulique et dans les aires d'irrigation privée. Le programme sera réalisé sur une période de 15 ans et portera sur la conversion à l'irrigation localisée d'une superficie de l'ordre de 550 000 ha, soit un rythme d'équipement de près de 37 000 ha/an. Cette superficie se compose comme suit :

- Périmètres de grande hydraulique : 395 090 ha avec un taux de conversion allant de 4% pour Ouarzazate à 81% pour le Tadla ;
- Irrigation privée : 160 000 ha correspondant à 50% de la superficie irriguée gravitairement dans les zones d'irrigation privée.

Pour ce faire, le PNEEI est divisé en cinq composantes principales :

- Les modernisations collectives (217 940 ha en grande hydraulique), y compris la mise à niveau des réseaux d'irrigation et leur modernisation pour faciliter la reconversion aux techniques d'irrigation économes en eau (telles que les réseaux basse pression, la densification de réseaux sous pression et l'aménagement de bassins) ;
- Les modernisations individuelles (337 150 ha, dont 177 150 ha au niveau des périmètres de grande hydraulique et 160 000 dans les zones d'irrigation privée) ;
- La valorisation agricole : il s'agit notamment de l'amélioration de la mise en valeur agricole et de l'aval agricole pour une meilleure valorisation de l'eau (telle que la révision des assolements, le partenariat avec l'agro-industrie pour le développement de nouvelles filières, le contrat de culture, la labellisation et les produits de terroir) ;
- Le renforcement de l'appui technique par le développement d'un conseil de proximité en matière de conception des systèmes d'irrigation localisée et d'appui à l'amélioration de la productivité ;
- Les mesures d'accompagnement.

Avec la réalisation de ce programme, la superficie équipée en irrigation localisée atteindra près de 700 000 ha, soit 50% de la superficie équipée pour l'irrigation.

Les leviers du PNEEI

A l'instar de tous les programmes de développement agricole, dans lesquels l'agriculteur joue un rôle central, le PNEEI s'appuiera sur une série de leviers pour atteindre ses objectifs : les leviers macro-économiques (tels que le taux de changes, le taux d'intérêts, les tarifs douaniers et la fiscalité) ; les leviers financiers (tels que les subventions et autres incitations financières et la tarification de l'eau) ; la gestion de la demande en eau (telle

que le contrôle et la limitation des volumes) ; les leviers réglementaires (tels que les cultures consommatrices, les techniques d'irrigation et les autorisations de pompage) ; et les leviers institutionnels (tels que la gouvernance, la démocratisation, la décentralisation et la promotion du partenariat public-privé).

Le coût du PNEEI

Le coût global du PNEEI est estimé à 37 milliards de MAD sur 15 ans, dont 30 milliards de MAD pour les investissements physiques (60% pris en charge par l'Etat et 40% par les agriculteurs) et 7 milliards de MAD pour les composantes liées à la vulgarisation, les mesures d'accompagnement et les imprévus financiers et physiques.

Les effets attendus du PNEEI

Les principaux effets attendus du PNEEI concernent :

- Une économie d'eau variant de 30 à 50% et permettant de réduire les déficits enregistrés au niveau des périmètres de grande hydraulique de plus de 510 Mm³/an et d'épargner près de 500 Mm³/an dans les zones d'irrigation privée ;
- Une augmentation des rendements des cultures dans des proportions pouvant atteindre 100% ;
- Une augmentation des revenus des agriculteurs, ce qui entraînera une amélioration des conditions de vie, ainsi que l'amélioration des recouvrements des redevances d'eau et la possibilité d'augmenter les tarifs de l'eau en grande hydraulique, se traduisant par une baisse des transferts budgétaires de l'Etat vers la grande hydraulique ;
- Une augmentation de la production agricole nationale et un rééquilibrage de la balance commerciale alimentaire ;
- La création de l'emploi durant les travaux et après l'achèvement du programme ;
- La protection des ressources en eau et de l'environnement (par la maîtrise du lessivage des engrais et la réduction de la surexploitation des nappes) ;
- La réduction de la demande énergétique du secteur de l'irrigation.

CONCLUSION

La limitation des ressources en eau au Maroc est une donnée structurelle, qu'il convient de traiter avec le maximum d'attention et de vigilance. Si l'agriculture irriguée est le principal utilisateur de l'eau, elle est en même temps le premier secteur à subir les conséquences néfastes de sa rareté. L'économie et la valorisation de l'eau sont désormais une priorité absolue et un défi stratégique pour le pays.

Les efforts consentis de part le passé dans le domaine de l'irrigation pour l'amélioration de ses performances n'ayant pas permis d'atteindre pleinement les objectifs d'économie et de valorisation de l'eau, le Maroc a pris conscience de la nécessité d'agir rapidement et différemment en mettant en œuvre une politique volontariste, percutante et cohérente dans toutes ses dimensions techniques et technologiques, économiques et sociales, à travers la mise en œuvre du PNEEL qui permettra de conduire une véritable révolution de l'agriculture irriguée marocaine, non seulement sur le plan des systèmes d'irrigation et de l'efficacité d'utilisation de l'eau, mais aussi sur le plan de la productivité et de la compétitivité.

REFERENCES

Bulletin Officiel (2002) B.O. n° 4970 du 17 janvier 2002 : Arrêté n° 1994-01 du 09 novembre 2001 relatif aux subventions accordées aux projets d'irrigation localisée.

Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Eaux et Forêts (2002) Plan d'action pour l'amélioration de l'efficacité de l'eau dans les systèmes d'irrigation. Administration du Génie Rural, Rabat, Maroc, 34 p.

Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes (2006) 50 ans de développement de l'irrigation au Maroc. Administration du Génie Rural, Rabat, Maroc, 48 p.

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2007) Programme national d'économie d'eau en irrigation. Administration du Génie Rural, Rabat, Maroc. Rapport principal, 58 p.

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2008a) Les ressources en eau dans la région de Marrakech : problématique et perspectives. Administration du Génie Rural, Rabat, Maroc, 10 p.

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2008b) L'économie et la valorisation de l'eau en irrigation : Un défi pour la durabilité de l'agriculture irriguée. Administration du Génie Rural, Rabat, Maroc, 9 p.

Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement (2006) L'avenir de l'eau, l'affaire de tous. Débat national sur l'eau, 29 novembre 2006, Rabat, Maroc. Plate forme, 66 p.

Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) (2004) Etude préliminaire sur les impacts de l'agriculture irriguée au Maroc. FAO, Rome, Italie, 52 p.

CHAPITRE 11

EAU ET AGRICULTURE EN MAURITANIE : L'AGRICULTURE IRRIGUEE, PRODUCTION PLUS FIABLE OU OPTION INCONTOURNABLE

B.M. SEMEGA*

Université de Nouakchott – Faculté des Sciences et Techniques – Département de
Chimie
Nouakchott, Mauritanie

RESUME

En conjoncture pressante d'explosion démographique, de sécheresse quasi-chronique, d'insuffisance quantitative et qualitative des denrées alimentaires et des ressources en eau, satisfaire la demande en nourriture requiert une production vivrière accrue, alliant la limitation des volumes d'eau utilisés pour ainsi pallier la pénurie des ressources. Eu égard aux nombreux problèmes récurrents de sécurité alimentaire dans les pays en voie de développement et de surcroît arides, en contexte sahélien et en particulier en Mauritanie, l'agriculture irriguée, bien que très consommatrice d'eau dans la plupart des situations et des techniques communément utilisées, apparaît incontournable pour annihiler les effets des sécheresses périodiques, sécuriser la production alimentaire, diminuer les importations de céréales et participer à la relance économique des zones rurales. Cependant, elle se doit également d'assurer une utilisation optimale et efficiente de l'eau et des intrants. Ainsi, depuis pratiquement plus d'une trentaine d'années, l'agriculture irriguée a vu le jour en Mauritanie avec les cultures traditionnelles du mil et du sorgho, qui ne trouvaient plus suffisamment d'eau à cause de la faiblesse des crues. L'irrigation, avec l'avènement de la riziculture, s'y est, par la suite, ancrée et amplifiée de plus en plus, car

* Auteur correspondant : Pr. SEMEGA Bakari Mohamed – Université de Nouakchott, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie, B.P. 5026, Nouakchott, Mauritanie
Email : semega@univ-nkc.mr / b.semega@accres.mr – Tél. : (+222) 630 80 33 / (+222) 641 80 19 – Fax : (+222) 525 39 97

elle a trouvé, le long de la vallée du fleuve Sénégal, un contexte favorable à son adoption par les populations qui, sans trop appréhender les contours des systèmes d'irrigation dans leurs ampleurs et limites, s'y sont adonnées pleinement. Les premiers résultats ont montré des productions spectaculaires par rapport aux récoltes habituelles, malgré une méconnaissance notoire des nouvelles pratiques d'irrigation. Mais d'année en année, la production a diminué, émoissant alors l'ardeur des agriculteurs. Ainsi, depuis plusieurs années, se pose de plus en plus avec acuité la nécessité d'une révision générale et une réorientation du choix et des pratiques rizicoles, surtout au niveau des grands périmètres. La riziculture sur la plaine alluviale du fleuve Sénégal, au Gorgol à Kaédi, est examinée dans cet article, en ses tenants et aboutissants, pour illustrer la situation de l'agriculture irriguée en Mauritanie.

Mots clés : Agriculture irriguée ; riziculture ; productivité ; économie d'eau ; reconversion ; sécurité alimentaire ; vallée du fleuve Sénégal ; Mauritanie.

INTRODUCTION

Partout dans les pays arides et en voie de développement, les pressions exercées par la nécessité de nourrir des populations affamées et sous-alimentées de plus en plus nombreuses et les situations pesantes de pénuries d'eau exigent que la productivité agricole se développe en optimisant les maigres ressources en eau disponibles par une utilisation judicieuse. La satisfaction des besoins alimentaires ne peut donc être assurée que par une productivité importante des cultures vivrières qui doivent s'accommoder de volumes d'eau limités pour atténuer les insuffisances des ressources (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995 ; Benmouffok, 2003). En Mauritanie, plus que partout ailleurs, cet objectif doit être constamment visé, poursuivi et atteint par l'agriculture irriguée, dont la première vocation est de garantir la sécurité alimentaire tout en remédiant aux effets des aléas climatiques (Séméga, 2007a).

Dans un contexte d'accroissement de ces aléas et de la pression démographique, l'équilibre entre l'offre et la demande de produits agricoles est plus difficile à maintenir. Un déficit s'en ressent ou en résulte pratiquement toujours. Ainsi, les systèmes d'irrigation, s'ils sont bien pensés et bien gérés, sont à la fois un enjeu socio-économique véritablement capable d'améliorer fondamentalement le quotidien des populations, un élément pertinent de réponse subtil au besoin de régulation et un atout de valorisation des ressources, tout en respectant au mieux la nature. Pour relever ce défi, l'irrigation doit s'avérer efficiente et performante.

L'étude présentée ici est une analyse de l'agriculture irriguée, notamment la riziculture en Mauritanie en général et dans la vallée du fleuve Sénégal, à Kaédi, en particulier.

L'IRRIGATION, ENTRE PRODUCTIVITE ET ECONOMIE D'EAU

L'irrigation, cet apanage de la rentabilité

Partout où l'irrigation est mise en œuvre, c'est qu'une meilleure productivité agricole est recherchée. L'irrigation permet, entre autres, d'améliorer considérablement la rentabilité des terres cultivées en garantissant une production régulière et soutenue, d'augmenter les surfaces cultivées en permettant même dans certains contextes la mise en culture de terres arides à désertiques et de diversifier, dans une zone climatique donnée, les pratiques culturales. Depuis toujours, elle est pratiquée dans les zones de cultures, où la pluviosité est tellement aléatoire et éphémère qu'elle ne peut assurer un apport d'eau suffisant aux plantes, leur permettre un développement harmonieux et garantir une production agricole satisfaisante. Comme les cultures, telles que la banane, la canne à sucre, les agrumes, certaines céréales (comme le riz), et le maraîchage, demandent un apport important en eau, la mise en place de système d'irrigation permanent ou d'appoint est fréquemment pratiquée.

Dans les pays chauds et de surcroît arides, en raison de la rigueur des facteurs climatiques et l'austérité des conditions hydrologiques et hydrogéologiques, l'agriculture vivrière intensive ne peut se concevoir et se mettre en place sans l'irrigation (Legoupil, et al. 1998). En outre, ce système de production, à grande échelle (Figure 1), ne dépend que très peu de la pluviosité, mais plutôt du renouvellement des stocks des fleuves, des rivières et des lacs dans lesquels l'irrigation puise ses besoins. Ainsi, l'agriculture irriguée, du fait de cette indépendance des facteurs fluctuants, notamment des conditions climatiques, constitue un système de production fiable, viable et de grande pérennité.

De ce fait, la Mauritanie, pays désertique sur 80% de son territoire et soumis à des sécheresses sévères et fréquentes, fonde beaucoup d'espoir sur l'irrigation, dont le développement constitue un enjeu primordial et une alternative intéressante pour pouvoir sortir de l'impasse alimentaire. De plus, comme pour la plupart des pays en voie de développement, surtout dans les pays arides, la réalisation de la sécurité alimentaire se trouve toujours reconforter par la mise en place d'une agriculture maîtrisable dans la majeure partie de ses activités, en l'occurrence d'une agriculture irriguée avec des exigences en eau raisonnables et s'accommodant des potentialités existantes.

Une économie d'eau et une efficience plus qu'impérieuse

Irriguer, c'est apporter à la plante, au moment opportun de son cycle végétatif, et en complément aux apports naturels s'ils existent, la quantité d'eau nécessaire à son développement. Ce n'est pas pour autant qu'il faut lui en apporter à profusion jusqu'au gâchis. En fait, l'irrigation permet d'augmenter la durée de végétation effective des plantes et les rendements de la production, et permet également la diversification des cultures, la réalisation de plusieurs campagnes de cultures par an et l'amélioration de la qualité des récoltes (Agence nationale de réalisation et de Gestion des infrastructures



Figure 1. La plaine du Walo traversée par un canal d'irrigation du périmètre pilote du Gorgol 1 à Kaédi, domaine de l'agriculture irriguée, la riziculture

hydrauliques pour l'Irrigation et le Drainage, 2003). Elle est pratiquée à des endroits ou à des moments où les eaux de pluie ne suffisent plus ou pas pour assurer les besoins, mêmes minimaux, en eau des cultures. De tout temps, l'agriculture irriguée s'est développée pour répondre à la nécessité de réduire le risque de récoltes déficitaires et l'insécurité alimentaire en terres sujettes à des sécheresses périodiques. De nombreuses

pratiques culturales et agronomiques à l'échelle de la parcelle peuvent militer à cet effet. L'agriculture irriguée a un rôle important à jouer comme promoteur de développement régional, comme agent d'amélioration des conditions nutritionnelles des populations et pour combattre la pauvreté et surtout en zones rurales (Faures et Sonou 2000). De plus, l'irrigation, une technique culturelle aujourd'hui indispensable à la sécurité alimentaire de nombreux pays, a un potentiel de production et de diversification très élevé et constitue un facteur de stabilisation de la production agricole. Pourtant, elle utilise beaucoup trop d'eau (70% des prélèvements mondiaux) par rapport aux autres secteurs d'activités. En effet, la production vivrière pour une personne nécessite chaque jour, suivant le régime alimentaire, le climat et l'efficacité des systèmes de production, entre 2000 et 5000 l d'eau. Ainsi, l'irrigation pourrait être remise en cause, car il existe actuellement un contexte de concurrence vive entre les différents usages de l'eau.

En outre, l'irrigation présente, pour certains milieux aquatiques, l'inconvénient de dégrader la qualité de l'eau (Ongley, 1996), d'épuiser les stocks d'eau et d'accélérer la désertification. À l'échelle locale, la consommation excessive de l'eau pour l'irrigation peut même conduire à une réduction considérable des volumes disponibles. Le cas du lac Tchad est un exemple édifiant. Autrefois, ce lac était la plus grande réserve d'eau douce du continent africain ; aujourd'hui il est 20 fois moins important qu'il ne l'était il y a 40 ans. Pourtant, les agriculteurs des pays limitrophes (le Tchad, le Cameroun, le Niger et le Nigeria) continuent de puiser toujours plus d'eau pour irriguer leurs champs et lutter contre la sécheresse qui sévit dans la région. Alors que seule une infime partie de l'eau d'irrigation parvient aux plantes, les pertes dues aux fuites de canalisations et à l'évaporation de l'eau stagnante sur les sols sont énormes, surtout lorsqu'il s'agit de techniques d'irrigation rudimentaires (Brouwer, 2000). Or, il est estimé qu'en Afrique, environ 40 à 60% de l'eau d'irrigation est ainsi perdue. Bien que l'efficacité en soit donc très médiocre, ces techniques restent encore bien implantées et utilisées. Dans le contexte actuel de rareté des ressources en eau douce, les pratiques de l'irrigation doivent s'évertuer de réaliser des économies substantielles d'eau afin de contribuer à pallier la conjoncture de pénurie (Séméga, 2007a). Ainsi, la « bataille de l'eau » ne se gagnera que lorsque l'agriculture irriguée saura minimiser ses quantités d'eau utilisées.

L'AGRICULTURE IRRIGUEE DANS LE CONTEXTE MAURITANIEN

Potentiels irrigables et aménagements hydro-agricoles

En Mauritanie, du fait d'une répartition naturelle irrégulière des pluies dans le temps et dans l'espace, l'agriculture classique est incapable, dans les conditions actuelles, d'assurer une production satisfaisante. L'agriculture irriguée, bien qu'implantée seulement ces dernières décennies, est incontournable et doit permettre la sécurisation des productions. Sur le territoire, les terres cultivables, tous types confondus, couvrent environ une superficie de 500 000 ha (moins de 1% de la superficie du pays), dont la moitié, qui est potentiellement irrigable, est répartie en 136 500 ha dans la vallée du fleuve Sénégal, 58 285 ha de cultures

de bas-fonds et derrière barrages, 49 215 ha de cultures de décrues contrôlées, et 6000 ha de cultures oasiennes (Ministère du Développement Rural et de l'Environnement, 1994).

Les surfaces irrigables sont divisées en petits, moyens et grands périmètres, selon la taille, ou en périmètres collectifs (grands périmètres et périmètres villageois) et en périmètres privés, selon le mode de gestion. Les grands périmètres collectifs de 500 à 2000 ha de superficie (Serghini, 2002) et pourvus de station de pompage ou de barrage permettant l'irrigation gravitaire, ont été, pour la plupart, aménagés par la Société Nationale de Développement Rural (SONADER) (avec 33 600 ha consacrés à la production intensive du riz). La SONADER a assuré leur encadrement ainsi que la gestion et la maintenance des ouvrages collectifs moyennant le paiement de redevance annuelle jusqu'en 1990/1991. A partir de cette date, les fonctions relatives à la production et à la transformation ont été transférées aux exploitants qui les assument à travers un comité de gestion. Les petits et moyens périmètres collectifs, généralement réalisés par les pouvoirs publics sans aucune participation financière des bénéficiaires, sont équipés de motopompes et leur gestion est assurée par un groupement ou une coopérative. Les périmètres privés, aménagés depuis 1985, se trouvant pour la plupart au Trarza où leur développement a connu un essor remarquable, ont été réalisés à l'initiative et à la charge des exploitants privés. En 1994, les aménagements hydro-agricoles en maîtrise totale, du Trarza, du Brakna et du Gorgol (Figure 2), ont été évalués à 40 261 ha, dont moins de la moitié est cultivée chaque année. Pour la campagne 2003-2004, la superficie totale irriguée s'élevait à 18 089 ha pour le sorgho, le maïs et le riz qui occupait à lui seul plus de 93% de cette superficie (Doucoure, 2004).

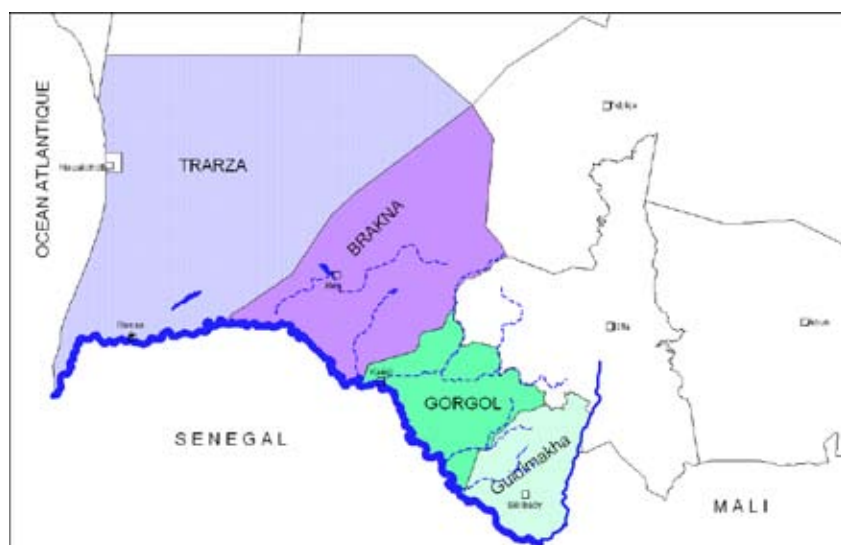


Figure 2. Les régions rizicoles de la Mauritanie (Trarza, Brakna, Gorgol et Guidimakha), le long de la rive droite du fleuve Sénégal

L'agriculture irriguée ou l'ambition de la sécurité alimentaire

En Mauritanie, l'irrigation revêt une importance capitale pour la production agricole et la sécurité alimentaire. Elle est pratiquée essentiellement dans la vallée, le long du fleuve Sénégal et de ses affluents (Food and Agriculture Organization of the United Nations et Direction du Développement et de la Coopération, 1990 ; Maïga, 1992), et dans une moindre mesure près des réservoirs établis à proximité de barrages.

Plusieurs modes d'irrigation sont pratiqués, tels que la submersion, la planche et à la raie, à des degrés et des ampleurs divers. La submersion, une irrigation traditionnelle, apporte gravitairement une énorme quantité d'eau jusqu'à atteindre une lame de 25 à 30 cm. La planche met la parcelle en eau sur toute la surface par une mince couche s'écoulant sur une pente de 0,2 à 3% et canalisée par des bullions dans le sens de la longueur. Son débit est fonction de la pente et des dimensions de la planche. Comme pour cette dernière, l'irrigation à la raie (les raies pouvant être parallèles ou perpendiculaires à la rigole d'amenée d'eau) est bien adaptée aux sols de pentes faibles. Selon le type de sol et de culture, elle est mise en œuvre par des sillons distants de 0,6 à 1,25 m, dont plusieurs peuvent être irrigués en même temps suivant le débit disponible. En pratique, l'irrigation est réalisée suivant un débit unique ou suivant une succession d'un premier débit fort, appelé débit d'attaque, et d'un deuxième plus faible, un débit d'entretien. L'irrigation à la raie, une technique d'irrigation très répandue dans le monde et surtout en Afrique (90% des terres irriguées) (Faures et Sonou 2000), est effectuée par gravité. Elle permet d'éviter de mouiller les feuillages en mettant en contact direct les plantes avec l'eau. La simplicité de sa mise en œuvre et son faible coût d'investissement en font une technique très accommodante. Ainsi, elle est le mode d'irrigation le plus pratiqué en Mauritanie.

Dans la région du fleuve, l'irrigation permet de cultiver plusieurs spéculations, avec une souplesse de calendrier des pratiques culturales plus importante que dans le reste du pays. Le riz en constitue la principale culture de la campagne agricole normale de l'hivernage alors que les légumes, le maïs et le sorgho sont plus réservés à la contre-saison. Mais néanmoins, l'irrigation consomme des quantités d'eau relativement élevées, surtout pour la culture du riz. De plus, en climat sahélien, les besoins en eau de la riziculture irriguée sont variables d'une saison à une autre. Ils sont de 8000 à 10 000 m³/ha pendant l'hivernage, de 11 000 à 14 000 m³/ha en saison sèche froide et 15 000 à 18 000 m³/ha en saison sèche chaude (Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest, 1992). Malgré cette contrainte de taille, la riziculture s'est implantée fortement et constitue aujourd'hui une des activités agricoles les plus importantes sur la plaine alluviale du fleuve. Elle se développe principalement dans les régions du Trarza, du Brakna, du Gorgol et du Guidimakha, et occupe une superficie de 18 200 ha, régulièrement cultivée et produisant jusqu'à 70 000 tonnes de riz paddy par an (Poisson et al, 1994). Mais cette production, bien que représentant 60% de la production céréalière nationale, est encore relativement faible et ne couvre que près de 30% de la consommation nationale de riz, car dans la sous-région comme dans le pays, le riz constitue la céréale de base de

l'alimentation quotidienne. Le sommet de l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO), qui s'est tenu à Bouaké en Côte d'Ivoire en 1992, a estimé la consommation de riz par personne entre 40 et 50 kg/an, dénotant des besoins importants et amplifiés par l'accroissement démographique.

L'autosuffisance alimentaire, une image floue

La production des périmètres rizicoles est toujours insuffisante et les rendements baissent continuellement à cause d'incidences de divers facteurs, face à une démographie galopante et des besoins qui ne cessent de s'amplifier.

En effet, les rendements moyens du riz paddy sont passés de 4,6 t/ha sur les périmètres collectifs et 4 t/ha sur les périmètres privés en 1987 à respectivement 3,5 et 3 t/ha en 1990, soit une déperdition de l'ordre de 24%. Cette baisse est imputable, pour les périmètres publics à la mauvaise gestion occasionnée par le désengagement des pouvoirs publics, pour les périmètres privés à la détérioration des aménagements, et pour tous types de périmètres confondus, à des problèmes récurrents de manque et de mauvaise gestion de l'eau et des intrants (Serghini, 2002).

Malgré des mesures d'accompagnement à travers de grands projets, dont le Projet de Développement Intégré de l'Agriculture Irriguée en Mauritanie (PDIAM), la situation ne s'améliore guère. Au titre de la campagne 1996-1997, les rendements moyens de 4,1 t/ha pour les grands périmètres collectifs, 3,4 t/ha pour les moyens périmètres collectifs et 4,2 t/ha pour les périmètres privés restent encore en deçà de leurs productions primaires. De plus, les cultures de contre-saison en irrigué, bien qu'assurant un appoint important, ne sont que très faiblement pratiquées. Les rendements varient entre 600 et 800 kg/ha pour le sorgho et sont de 600 kg/ha pour le maïs (Serghini, 2002).

Aujourd'hui, la riziculture est l'avant-garde de l'autosuffisance alimentaire en Mauritanie. Jointe à la diversification des spéculations et des systèmes de production, elle doit permettre d'assurer un développement économique durable de l'agriculture irriguée (Poisson et al, 1994). Ainsi, la conduite de diagnostics pertinents des systèmes irrigués et la mise en place de solutions concrètes et adaptées aux contraintes des agriculteurs et des périmètres peuvent contribuer à améliorer les conditions et les résultats de l'irrigation. Le riz, culture très exigeante, nécessite des travaux d'aménagement de terrain (tels que des planages permanents, des tracées et des curages fréquents de canaux d'irrigation et de drainage) et une quantité d'eau importante. Afin de garantir une meilleure rentabilité des surfaces cultivées et des moyens mis en œuvre, la riziculture doit s'accompagner nécessairement d'une diversification de cultures, telles que le maïs, le sorgho, le niébé et l'arachide, qui présentent un certain regain d'intérêt pour les populations, de cultures maraîchères (telles que les oignons, les choux, les patates douces, les pommes de terre, les carottes, les gombos, les tomates et les haricots verts) et de l'arboriculture fruitière (telle que les bananes et les agrumes).

De l'euphorie à la désillusion

Une reconversion qui était autant inéluctable qu'impérative

Le passage de l'agriculture traditionnelle extensive, pluviale ou de décrue à l'agriculture intensive irriguée, se traduisant toujours par une augmentation significative de la production, était souhaité et incontournable, particulièrement après les périodes de sécheresse, au cours desquelles les systèmes traditionnels de pratiques culturales, devenus encore plus improductifs et obsolètes pour la plupart, n'ont fait preuve que d'incapacité et d'insuffisance à pallier les situations de disette. Les productions des systèmes irrigués apparaissent alors comme une véritable solution. Quelle que soit la faible ampleur de ces productions, elles sont de loin meilleures et comparativement sont des raisons de satisfaction et de plénitude. Ainsi, à ces moments de disette, l'introduction de l'agriculture irriguée autre qu'oasienne arrive à point nommé et bénéficie d'un terrain favorable, d'une conjoncture propice au changement. Donc, elle a vite trouvé adoption et engouement auprès de la population qui voyait en elle une bouée de sauvetage face aux difficultés des années de sécheresse. L'agriculture irriguée, principalement rizicole, est venue guérir les maux alimentaires, dont souffraient les populations. Bien que naissante, les populations ne demandaient pas mieux que de l'adopter, sans même comprendre et mesurer ses contours réels et ses exigences, et sans même apprécier son besoin minimum d'accommodation au contexte local et aux possibilités et dispositions des hommes, des eaux et des sols.

Les cultures irriguées, qui se présentaient comme un système de production plus au point, fiable et durable, apportaient plus de 90% de la production rizicole du pays. Ces dernières années, elles ont produit plus de 50% des céréales du pays. Cette part est encore plus élevée pendant les années de faibles pluviométries (Food and Agriculture Organization of the United Nations et Programme Alimentaire. Mondial, 2004).

Tant pour l'élevage et les autres activités communes que pour l'agriculture, l'eau est un facteur de production primordial. Mais dans de nombreux pays comme en Mauritanie, elle est peu abondante et met vite en concurrence les différents utilisateurs. Ainsi, l'aménagement en culture irriguée pose souvent des problèmes d'arbitrage entre plusieurs utilisateurs de l'eau. Les conflits fréquents entre paysans et éleveurs autour de l'eau et des points d'eau sont une illustration des difficultés qui peuvent être exacerbées dans certains cas de demandes extrêmes. Cette situation implique la recherche de l'optimisation des consommations et la réduction des gaspillages à travers une gestion rationnelle des ressources en eau permettant la satisfaction plus pérenne des besoins.

La face cachée de l'irrigation

Aujourd'hui, l'agriculture irriguée mauritanienne souffre de la trop grande domination de la culture du riz (céréale qui, ces trois à quatre dernières décennies, s'est imposée, de plus en plus et de façon incontournable, dans l'alimentation locale quotidienne). Le développement de la monoculture du riz a entraîné le délaissement des productions vivrières traditionnelles, dont les demandes se retrouvent fortement accrues. Elle a également entraîné la détérioration de la faune et de la flore de la vallée. Les insectes

phytophages, les oiseaux granivores et les rongeurs ont connu un essor important et pullulent grâce à la prolifération de la végétation adventice.

Les espaces aménagés sont l'objet de dégradation notoire des conditions d'exploitation et d'entretien, conséquence de plusieurs facteurs, dont notamment :

- La médiocrité des aménagements hydro-agricoles, des systèmes de drainage, du nivellement et des relevés topographiques ;
- L'insuffisance à l'inexistence de maintenance et d'entretien des équipements, des canaux d'irrigation et de drainage, et du planage des parcelles, et le manque de maîtrise des techniques d'irrigation et de production ;
- Le manque d'amendement des sols et la salinisation des terres due à l'absence ou l'insuffisance de drainage et l'improductivité entraînant l'abandon des parcelles ;
- Le choix inadéquat des cultures selon la nature des sols (la riziculture sur les alluvions perméables conduisant à une surconsommation d'eau et à des coûts d'exploitation élevés), la faiblesse et la baisse des rendements du riz, et la réorientation difficile des agriculteurs vers d'autres spéculations ;
- La mauvaise gestion des périmètres, le démarrage souvent très tardif des campagnes agricoles dû à des reports incessants des préparatifs des terres, livrant les parcelles aux effets des pluies et à l'invasion des mauvaises herbes.

Les raisons sont multiples et d'ordres technique, financier, institutionnel et organisationnel, et aussi dues à l'insuffisance de moyens, d'information et de formation des agriculteurs sur les pratiques culturales d'irrigation et de leurs portées. Elles sont la cause de l'écart important entre superficies aménagées et superficies effectivement cultivées (Faures et Sonou, 2000). Elles sont également à l'origine de la dégradation croissante des sols par la salinisation et la baisse de fertilité due à l'absence de techniques adaptées d'aménagement, à la faible efficacité de l'irrigation et au manque de drainage approprié (Kenneth et Neeltje, 2002).

Dans la plupart des périmètres irrigués, l'eau est mal gérée et insuffisamment valorisée à travers une utilisation peu rationnelle, conduisant au gaspillage à outrance. Ainsi, les réseaux d'amenée d'eau parviennent difficilement à satisfaire la demande en eau, souvent excessive, qui entraîne la perturbation des tours d'eau avec des conséquences négatives sur la qualité du service à destination des usagers et sur le développement de la parcelle (Séméga, 2007c). D'autre part, le manque d'eau quasi-permanent joint à l'invasion des mauvaises herbes de certains secteurs peut entraîner la perte des récoltes qui conduit, à la longue, à l'abandon des parcelles, compromettant ainsi la durabilité de l'exploitation des périmètres. En plus, l'élévation du niveau des nappes phréatiques, la salinisation et la réduction de la fertilité des sols (Poisson et al., 1994 ; Dougherty et Hall, 1995) de certaines zones suite à une gestion défectueuse et des pertes de l'eau d'irrigation à la parcelle, accentuent les incidences négatives.

Tous ces facteurs concourent pour amplifier les fluctuations et les baisses de la production qui sont en plus accentuées par le manque de maîtrise des techniques d'irrigation et la mauvaise gestion des campagnes agricoles.

TENANTS ET ABOUTISSANTS DE L'AGRICULTURE IRRIGUÉE A KAEDI

Un contexte largement militant pour l'agriculture, notamment le système irrigué

La ville de Kaédi, capitale de la région du Gorgol dans le Sud de la Mauritanie, est localisée au 13° 30' longitude Ouest et au 16° 09' latitude Nord. Cette région fait partie de la haute vallée du fleuve Sénégal (Figure 3).

Son climat, de type sahélien, est caractérisé par une saison chaude et humide de juillet à octobre, une saison sèche et froide de novembre à mars et une saison sèche et chaude de mars à juin. Les précipitations annuelles moyennes sont de 370 mm à Kaédi, ville à vocation agropastorale, de tout temps, un des greniers les plus importants du pays. Les sols y sont principalement formés d'alluvions du fleuve et de ses affluents. La texture et la position topographique de ces sols, par rapport au niveau des crues du fleuve, déterminent leurs qualités agrologiques et leurs utilisations. Sur ces terres, sont pratiquées principalement les cultures du sorgho (cultures de décrues), du mil (cultures pluviales) et à partir des années 1970-80, du riz (cultures irriguées).



Figure 3. La région du Gorgol dans le contexte de la plaine alluviale du fleuve Sénégal

Dans le cadre des aménagements hydro-agricoles dans la sous-région, pour disponibiliser et gérer la ressource nécessaire à l'irrigation de périmètres rizicoles sur la vallée du fleuve Sénégal, un barrage régulateur et hydro-électrique est construit par l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), au Mali, à Manantali situé à 1100 km de l'embouchure du fleuve, sur son principal affluent, le Bafing (long de 760 km et d'un débit moyen annuel de 430 m³/s) (Albergel et al, 1993 ; Kane, 2005) (Figure 4). L'objectif principal

de ce barrage, mis en service en 1988, est, entre autres, d'assurer la régularisation du débit du fleuve à 300 m³/s à Bakel, situé à plus de 800 km de la mer, où il présentait alors des variations annuelles comprises entre 270 et 1245 m³/s. Ce barrage d'une capacité de retenue d'eau de 12 milliards de m³, doit permettre d'assurer l'irrigation dans la vallée de 255 000 ha de terres, dont 33 000 ha sont réservés à la crue artificielle (Bader, 1997 ; Kane, 2005) pour la pratique des cultures de décrue. La construction du barrage de Manantali sur le fleuve (Figure 4) a alors considérablement augmenté les superficies potentiellement irrigables le long de la vallée du fleuve, mais a également réduit les espaces inondés exploitables pour l'agriculture traditionnelle de décrue.



Figure 4. Le barrage régulateur et hydro-électrique de Manantali, situé à 1100 km de l'embouchure du fleuve Sénégal (Source : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal et Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture)

De plus, au Gorgol, comme partout ailleurs en Mauritanie, après la longue sécheresse des années 1970 et l'explosion démographique que connaît la région pendant la même période, tous les systèmes de production vivrière classiques se retrouvent complètement essoufflés et incapables de se remettre sur pied et en œuvre pour partir à la reconquête d'une production convenable. En récurrence, dans cette zone, l'agriculture irriguée venait à point timidement au milieu des années 1970 avec le sorgho et le maïs. Par la suite, elle a pris son essor avec l'avènement de la riziculture qui se présente être une réponse subtile aux rigueurs climatiques, à l'insécurité alimentaire et au redéveloppement de l'agriculture locale moribonde (Séméga, 2007c).

Une riziculture qui a bien pris son envol

Les contours de la riziculture à Kaédi

A Kaédi, la pratique de la riziculture dans les grands périmètres a vu le jour en 1977, non sans heurts avec les populations qui voyaient en elle et en la réforme agraire mise en œuvre à cet effet, un moyen de spoliations de leurs terres destinées aux cultures de décrues du mil, alors céréale de base de leur alimentation. Il fallait donc que les productions rizicoles soient convaincantes et à la hauteur des espérances pour apaiser les scepticismes des populations qui se remettaient difficilement des séquelles de la sécheresse. La riziculture s'est alors implantée progressivement, accompagnée par une réforme foncière, instrument de la relance de l'agriculture irriguée en Mauritanie.

La culture du riz, pratiquée sur les terres argileuses du Walo, est de type exploitation familiale (Poisson et al., 1994 ; Faures et Sonou, 2000) d'une superficie d'un demi hectare. En début de campagne, avant la mise en eau, la parcelle est labourée principalement par des machines agricoles, faisant appel aux services de prestataires privés. La semence du riz est effectuée selon deux procédés de semis : le repiquage et le semi direct. Dans le premier cas, après le planage de la parcelle en eau (Figure 5), de jeunes pousses de 18 à 25 j, ou tout au plus 30 j selon la variété de riz, sont repiquées dans la boue ou dans une mince lame d'eau de 5 à 10 cm (Figure 6). La pépinière de bourgeons, utilisée à cet effet, nécessite l'ensemencement de 60 kg/ha de semences de riz sélectionnées. Dans le second cas, le semi direct consiste à lancer à la volée, dans la parcelle en eau, des graines de riz prégermées dans l'eau pendant 24 h et incubées sous la chaleur pendant la même durée. La quantité de 120 kg/ha de semences est utilisée pour cette opération.

Les récoltes des premières années d'exploitation, de 1977 à 1980, produisant en moyenne entre 3,7 à 4,6 t/ha, ont été très encourageantes. Elles ont de ce fait démontré la nette démarcation entre la productivité de l'agriculture traditionnelle du mil (quelques quintaux à une tonne de production par hectare) et celle de l'agriculture moderne irriguée du riz. Elles ont été une raison de satisfaction, surtout en cette conjoncture de famine persistante, et donnaient un véritable élan à la riziculture. Le domaine cultivé se répandait rapidement d'année en année. Les graphes de l'extension des surfaces irriguées au Gorgol (Figure 7) montrent que l'irrigation ne s'est effectivement implantée qu'au



Figure 5. Travaux de planage manuel dans le périmètre pilote du Gorgol 1 (PPG1) de Kaédi, campagne rizicole de l'hivernage 2007-2008



Figure 6. Travaux de repiquage dans le périmètre pilote du Gorgol 1 (PPG1) de Kaédi, campagne rizicole de l'hivernage 2007-2008

milieu de la décennie 1980-1990, et surtout avec la riziculture. Cette dernière a connu une croissance rapide due à l'engouement populaire, à la mise en place de mesures d'accompagnement dans le domaine du foncier, du crédit et de la commercialisation,

et à l'intervention de la SONADER. La Figure 7 indique une augmentation continue des surfaces irriguées afin de satisfaire les besoins alimentaires de plus en plus importants. Les superficies irriguées atteignent leurs maximums aux campagnes agricoles de 1990-91 et 1991-92, puis subissent une chute importante à cause du désengagement de l'Etat, dès lors, elles restent peu fluctuantes.

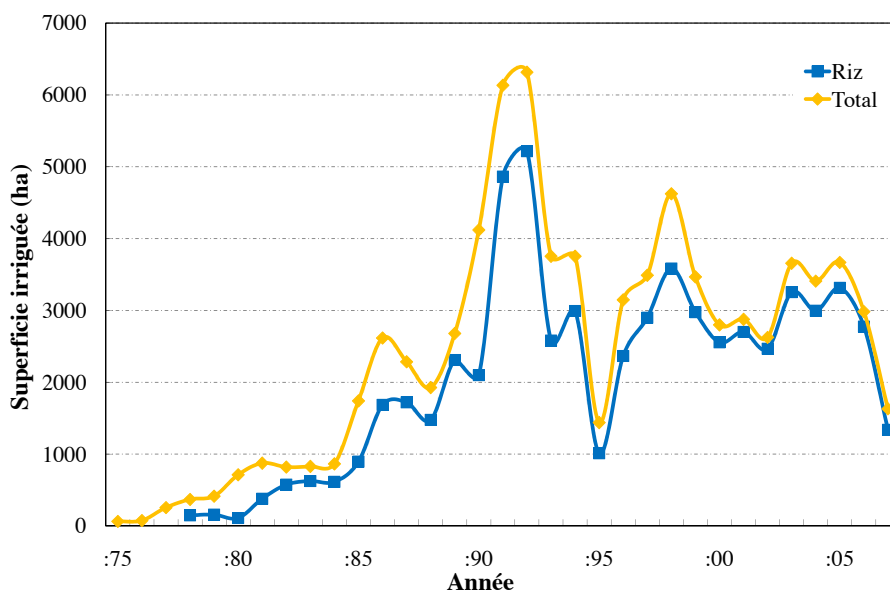


Figure 7. Evolution des superficies irriguées au Gorgol de 1975 à 2007 (D'après Société Nationale de Développement Rural, 2008)

Les superficies emblavées pour le riz en constituent l'essentiel, à hauteur de 50 à 94% selon les années. Pendant les campagnes 1994-95 et 2006-07, la faiblesse notoire des superficies irriguées reflète les situations d'inondation, donc des pertes des cultures, qu'ont connues à Kaédi les périmètres pilotes du Gorgol 1 (PPG1) pendant l'hivernage 1994-95 et PPG2 pendant l'hivernage 2006-07. La Figure 8 donne le profil de l'évolution du rendement moyen à l'hectare de 1977 à 2006 pour le périmètre pilote PPG1 de Kaédi. Cette figure montre que ce rendement, en général supérieur à 4 t/ha, évolue en dents de scies, témoignant d'une variabilité importante. La période de 1982 à 1989 présente les plus forts rendements réalisés. Après cette période, la tendance globale est à la décroissance.

La problématique de la production

Actuellement, et ce depuis déjà plusieurs années, la riziculture à Kaédi est confrontée à des problèmes de rentabilité dus à la dégradation des sols et des aménagements, à la mauvaise préparation des terres, labour insuffisant et souvent tardif, au manque fréquent de pépinière à cause de son développement malaisé et des méfaits des oiseaux et des autres prédateurs, et à l'insuffisance et l'inadéquation de l'utilisation de fertilisants (engrais et fumiers).

Les volumes d'eau utilisés sont élevés et de 20 à 50%, supérieurs à ceux prévus par l'ADRAO pour une campagne rizicole d'hivernage. Ils dénotent du gaspillage et des pertes énormes d'eau, et une inefficience de l'irrigation.

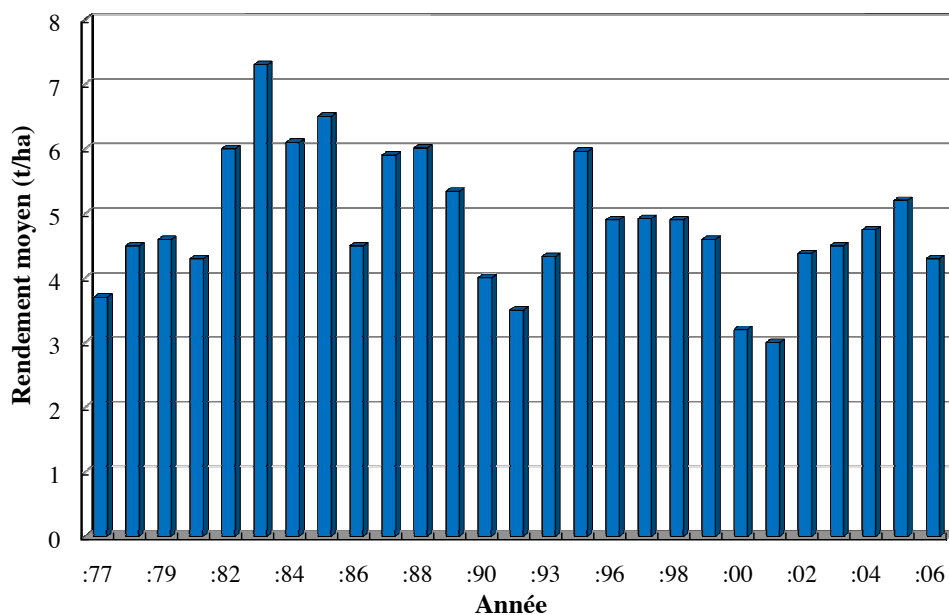


Figure 8. Evolution du rendement moyen du riz paddy dans le périmètre pilote du Gorgol 1 (PPG1) de Kaédi de 1977 à 2006 (D'après Société Nationale de Développement Rural, 2008)

D'autre part, les doses et les calendriers d'amendements en engrais des parcelles ne sont que très rarement respectés et les sols et les cultures en pâtiennent sérieusement, car les engrais, principalement constitués d'azote, de potassium et de phosphore, jouent un rôle fondamental dans la préservation de l'aptitude des terres et dans l'accroissement de leurs potentiels de production en aidant les cultures à se développer et à se fructifier (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1989; Séméga, 2007b), surtout sur des terres de la vallée, caractérisées pauvres en phosphore et potassium. Ces pratiques inadaptées d'utilisation de fertilisants se soldent aussi par la détérioration du pouvoir nutritif des terres et l'abaissement du rendement des cultures et de la qualité des récoltes.

Dans une telle situation, les productions, déjà très en deça des rendements possibles des terres de la vallée, sont très variables d'une année à l'autre. Le rendement moyen décennal entre 1977 et 2006 (Figure 9) indique la tendance vers un abaissement de plus en plus important. La Figure 9 montre aussi un taux d'abaissement notable d'une décennie à une autre, passant de 5,49% entre la période 1977-1986 et la période 1987-1996 à 13,63% entre cette dernière et 1997-2006, ce qui établit que le PPG1 de Kaédi est sujet d'une baisse de productivité (Tableau 1) due à l'incidence de la conjugaison de plusieurs facteurs.

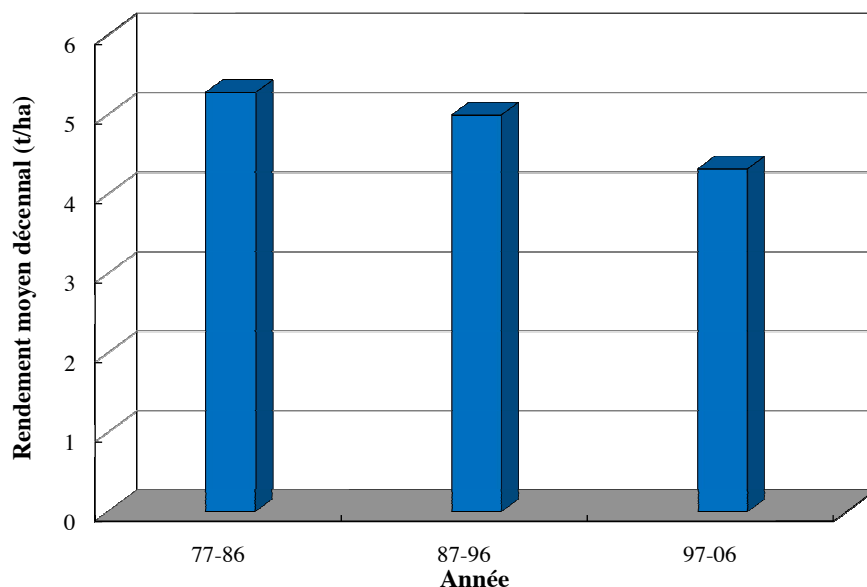


Figure 9. Evolution du rendement moyen décennal du riz paddy du périmètre pilote du Gorgol 1 (PPG1) de Kaédi de 1977 à 2006

Tableau 1. Evolution du rendement moyen décennal du périmètre pilote du Gorgol 1 (PPG1) de Kaédi de 1977 à 2006

Période	Rendement moyen décennal (t/ha)	Taux d'abaissement (%)
1977-86	5,28	0,00
1987-96	4,99	5,49
1997-2006	4,31	13,63

Aujourd'hui, les conditions d'exploitation sont telles que le système de production du PPG1 semble déjà essoufflé. Son rendement baisse continuellement (Figures 9 et 10) et ne peut que continuer à s'abaisser au fil des années, tant que les conditions d'exploitation se caractérisent par une insuffisance notoire de la maintenance des équipements et de l'eau à la parcelle, une absence d'entretien des canaux d'irrigation, un manque d'amendements adéquats des cultures et des sols, une dégradation récurrente des terres. Ces conditions sont aggravées par une mauvaise gestion des campagnes rizicoles induisant leur démarrage tardif et une invasion des cultures par des insectes phytophages, oiseaux granivores, rongeurs et une végétation adventice importante (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1989 ; Poisson et al., 1994). Ainsi, si aucune mesure efficace et rigoureuse n'est prise pour pallier cette tendance, à l'horizon 2016, le taux d'abaissement du rendement pourrait atteindre les 20% et le rendement moyen décennal tomber jusqu'à hauteur de 3,45 t/ha.

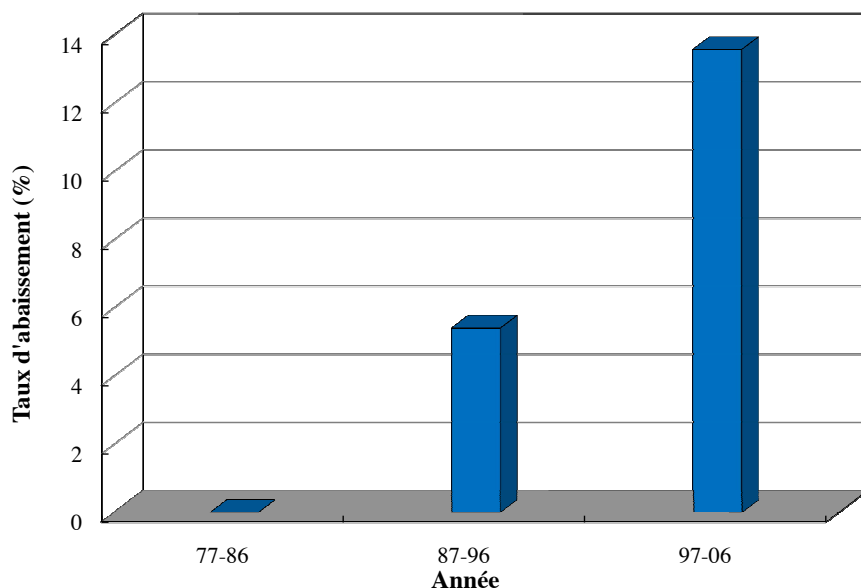


Figure 10. Taux d'abaissement du rendement moyen décennal du périmètre pilote du Gorgol 1 (PPG1) de Kaédi de 1977 à 2006

CONCLUSION

Après plus de 30 ans d'exploitation, la culture du riz au Gorgol, notamment à Kaédi, a fait sans doute ses preuves et montré ses insuffisances. A bien des niveaux, elle souffre encore, et de manière aiguë, d'une méconnaissance notoire du système irrigué par les principaux exploitants qui se trouvent souvent confrontés et impuissants face à des problèmes quotidiens couramment rencontrés. Une telle situation qui a des répercussions négatives rend le système de production peu performant. En outre, les conditions d'exploitation laissent à désirer et les terres sont l'objet de dégradation marquée et d'entretien défectueux, dont le corollaire est une improductivité caractéristique. La riziculture dans les grands périmètres irrigués est confrontée à des problèmes de rentabilité et de sous-exploitation des surfaces aménagées, dont certaines sont laissées en abandon.

Pour réussir à relever le défi de parvenir et d'assurer l'autosuffisance et la sécurité alimentaires, l'agriculture irriguée se doit d'être toujours bien portante. Ceci suppose son efficience à tous les niveaux et pour tous les aspects qui concourent à la meilleure production en quantité et en qualité. Les agriculteurs doivent être aussi maîtres de la situation et détenir une connaissance minimale, mais suffisante, pour la maîtrise des systèmes rizicoles irrigués, savoir identifier les contraintes, tant mineures que majeures, et être aptes aux interventions. Ils doivent donc être formés aux pratiques culturales et aux systèmes d'irrigation et d'utilisation adéquate des fertilisants. Une technicité prouvée

et une utilisation plus rationnelle et efficiente de l'eau et des intrants, à la fois naturels et chimiques, sont nécessaires à la bonne conduite d'une campagne rizicole.

Avant et même après le lancement de la riziculture dans la vallée du fleuve, des recherches agronomiques, menées pendant plusieurs années et pratiquées à grande échelle dans des périmètres pilotes, ont cerné et établi les conditions optimales de la culture du riz dans la zone. La conformité de manière rigoureuse des pratiques agricoles à ces conditions est une option probante de rentabilité qui peut être davantage confortée par une plus grande intensification des cultures en association de la culture du riz avec d'autres cultures qui appauvriraient moins les sols et assureraient la fertilisation des terres. A cet effet, les riziculteurs doivent prêter une attention toute particulière aux choix des spéculations à cultiver ensemble. De même, ils doivent s'assurer des apports permanents de la fumure phosphatée, car la carence en phosphore assimilable peut devenir rapidement un facteur limitant des rendements, notamment pour les sols à fertilité initiale médiocre, nécessitant souvent des amendements fréquents pour s'accommoder des exigences des cultures. En outre, toutes les mesures doivent être prises pour que les préparatifs soient au point et à temps, et que la campagne agricole soit calée effectivement à la période optimale de développement végétatif des cultures et leur permettre un épanouissement harmonieux et une production quantitative et qualitative évidente. Autrement dit, la campagne rizicole doit démarrer nécessairement à temps pour mettre de son côté tous les atouts de succès et ainsi s'assurer, au-delà des incidences des facteurs imprévisibles et non maîtrisables, le meilleur rendement.

REFERENCES

Agence nationale de réalisation et de Gestion des infrastructures hydrauliques pour l'Irrigation et le Drainage (AGID) (2003) Efficience de l'irrigation dans les grands périmètres en Algérie. Séminaire Franco-algérien sur la gestion de l'irrigation dans les conditions de ressource en eau limitée, Ghardaïa, Algérie, 1-3 avril 2003.

Albergel J., Bader J.-C., Lamagat J.P. et Seguis L. (1993) Crues et sécheresses sur un grand fleuve tropical de l'Ouest Africain : application à la gestion de la crue du fleuve Sénégal. *Sécheresses*, n°3 vol. 4, 143-152.

Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO) (1992) Formation en production rizicole. Manuel du formateur, Bouaké, Côte d'Ivoire, 29 p.

Bader J.-C. (1997) Le soutien de crue mobile dans le fleuve Sénégal à partir du barrage de Manantali. *Hydrol. Sci. J.*, 42, 815-831.

Benmouffok B. (2003) La sécurité alimentaire, à travers un développement durable et coordonné de l'irrigation dans les grands périmètres irrigués. Journée mondiale de l'alimentation, Alger, Algérie, 16 octobre 2003.

Brouwer C. (2000) Gestion des eaux en irrigation : pilotage des irrigations. Dans : Manuel de

formation n°4, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), p. 31-32.

Doucoure D. (2004) Projet de développement intégré de l'agriculture irriguée en Mauritanie (PDIAIM). Rapport Interne.

Dougherty T.C. et Hall A.W. (1995) Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Bull. d'Irrigation et de Drainage N° 53, 85 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1989) Evaluation des Terres pour l'Agriculture Irriguée: Directives, Bull. pédologique de la FAO N° 55.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) et Direction du Développement et de la Coopération (DDC) (1990) Projet de développement intégré de la vallée du fleuve Sénégal (PDIAIM), volet irrigation. Rapport interne du Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) et de la Direction du Développement et de la Coopération (DDC) du Département Fédéral des Affaires Etrangères, Suisse.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1995) La mise en valeur des eaux au profit de la sécurité alimentaire. Rapport WFS/96/TECH/2, Rome, Italie, 43 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) et Programme Alimentaire Mondial (PAM) (2004) Mission d'évaluation des récoltes et des disponibilités alimentaires en Mauritanie, axée plus particulièrement sur les pertes dues aux criquets pèlerins. Rapport spécial du 21 décembre 2004.

Kenneth K.T. et Neeltje C.K. (2002) Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Bull. d'Irrigation et de Drainage N° 61, 205 p.

Faures JM et Sonou M. (2000) Les aménagements hydro-agricoles en Afrique : situation actuelle et perspectives. Dans : Rapport du Colloque International « Eau-Santé » – Impact sanitaire et nutritionnel des hydro-aménagements en Afrique, Ouagadougou, Burkina Faso, 21-24 novembre 2000, 12 p.

Kane A. (2005) Régulation du fleuve Sénégal et flux de matières particulières vers l'estuaire depuis la construction du barrage de Diama. International symposium on sediment budgets, Foz do Iguaçu, Brésil, 3-9 avril 2005, Ed. International Association of Hydrological Sciences (IAHS Press), Wallingford, Royaume-Uni, 292, p. 279-291.

Legoupil J.C., Lidon B., Mossi M.I. et Ndiaye S. (1998) Gestion technique, organisation sociale et foncière de l'irrigation : atelier Pôle Système Irrigué (PSI)- Conseil Ouest et Centre africain pour la recherche et le développement (CORAF), Niamey (Niger), octobre 1996. Ed. CORAF, Abidjan, Côte d'Ivoire, 408 p.

Maïga M. (1992) Pour une intégration des structures de production des pays riverains du Fleuve Sénégal (Guinée, Mali, Mauritanie, Sénégal), Université de Paris I.

Ongley E.D. (1996) Control of water pollution from agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Bull. d'Irrigation et de Drainage N° 55, 111 p.

Poisson C., Marnotte P. et Ould Didi H. (1994) Le riz mauritanien en forte progression. *Agric. Dev.*, 2, 44-52.

Ministère du Développement Rural et de l'Environnement (MDRE) (1994) Le développement rural en chiffres. Ministère du Développement Rural et de l'Environnement (MDRE) de la République Islamique de Mauritanie (RIM).

Société Nationale de Développement Rural (SONADER) (2008) Données brutes sur les campagnes rizicoles regroupées au service de suivi et des statistiques agricoles. République Islamique de Mauritanie (RIM).

Séméga B.M. (2007a) Eau et agriculture : les contours d'une meilleure production, *Horizon* n°4441 du lundi 02 avril et n°4468 du mercredi 26 avril 2007.

Séméga B.M. (2007b) L'agriculture sous quelles formes et suivant quelle envergure ? *Horizon* n°4472 du mercredi 02 mai 2007.

Séméga B.M. (2007c) L'autosuffisance et la sécurité alimentaires, à quel prix ? *Horizon* n°4570 du mardi 18 et n°4571 du mercredi 19 septembre 2007.

Serghini H. (2002) Chapitre 6 : Développement des exportations agricoles mauritaniennes. Dans : Mauritania integrated framework – Volume II, Rapport Interne, 31 p.

CHAPITRE 12

PROBLEMATIQUE ET PERSPECTIVES DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU AGRICOLE AU MAGHREB

A. ZEGGAF TAHIRI*

Expert international, Manzanar Mangrove Foundation
Nouakchott, Mauritanie

Y. FILALI-MEKNASSI

Bureau Multipays de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et
la culture (UNESCO) à Rabat
Maroc

RESUME

Les pays du Maghreb connaissent une situation de pénurie en eau qui va certainement s'aggraver pendant les prochaines décennies, croissance démographique oblige. Le secteur agricole, jusque-là le plus gros consommateur d'eau dans cette région, sera en forte compétition avec les besoins domestiques d'une population toujours croissante et le secteur industriel vecteur de développement. La mobilisation de nouvelles ressources en eau ne pouvant pas être entreprise indéfiniment, il devient impératif de s'orienter vers l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau par le secteur agricole. Ce choix stratégique englobe plusieurs disciplines, telles que l'éducation, la recherche scientifique, le développement, et les décideurs politiques. Cependant, les pays du Maghreb sont encore en retard dans ces domaines et plus d'effort doit être consenti pour sensibiliser les populations locales, chercher, à travers la recherche scientifique, des solutions techniques qu'il faudra, par la suite, vulgariser au niveau des agriculteurs. Pour ce faire, une volonté politique allant dans le sens de l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau est indispensable. Des techniques existent déjà et peuvent être vulgarisées au niveau des

* Auteur correspondant : Dr. ZEGGAF TAHIRI Adel – Expert international – Manzanar Mangrove Foundation, Nouakchott, Mauritanie
Email : zeggaf.adel@yahoo.co.uk – Tél. : (+222) 529 79 29

agriculteurs et des utilisateurs de l'eau en général, d'autres sont en cours de recherche et doivent être appuyées pour aboutir à des techniques plus efficaces dans l'utilisation de l'eau.

Mots clés : Efficacité d'utilisation de l'eau ; agriculture ; Maghreb.

INTRODUCTION

La quantité d'eau disponible pour l'agriculture dans les pays Méditerranéens diminue à cause de la pression de la population croissante et d'une plus grande fréquence de la sécheresse (Hamdy et Lacirignola, 1999). Par conséquent, l'efficacité d'usage de l'eau pour la production agricole doit être maximisée.

Le secteur de l'eau au Maghreb reçoit depuis des décades beaucoup d'attention, que ce soit au niveau des décideurs politiques que de la communauté scientifique régionale et internationale. Trois caractères essentiels expliquent cet intérêt :

- La majeure partie des pays du Maghreb se situe dans un étage bioclimatique aride et semi-aride et même saharien. Vu que la production agricole est fortement tributaire du climat dans ces régions (Zeggaf et al., 2002), les sécheresses récurrentes mettent en péril la subsistance de la population rurale et la production agricole au niveau de ces pays ;
- La forte demande en eau dans ces pays est induite par des taux de croissance de la population des plus importants (Hamdy et Lacirignola, 1999) ;
- La pénurie chronique des ressources en eau au niveau de la plupart de ces pays et l'apparition en force des problèmes de pollution (Katerji et al., 2008).

Dans le présent article, les traits majeurs de la problématique qui entoure l'eau au Maghreb sont expliqués en détails.

PROBLEMATIQUE DE L'EAU AU MAGHREB

Pénurie de l'eau au Maghreb

D'une façon générale, la région du Maghreb compte parmi les pays les plus pauvres, du point de vue de la disponibilité en eau par habitant (Tableau 1). Tous les pays du Maghreb sont en deçà du seuil de pénurie en eau, qui se situe entre 1500 et 1700 m³/habitant/an (Falkenmark et Widstrand, 1992). En effet, l'Algérie et la Lybie sont en dessous des 500 m³/habitant/an, seuil considéré comme un indicateur de pénurie en eau sévère (Falkenmark et Widstrand, 1992). Cette situation risque de s'aggraver dans le futur surtout si la tendance de la croissance démographique dans les pays du Maghreb persiste.

Le pourcentage de ressources en eau utilisée reflète l'état ou l'intensité d'utilisation de l'eau dans un pays. Le seuil de 40% est considéré comme un optimum d'utilisation de l'eau dans un pays (Alcamo et Henrichs, 2002). Tous les pays du Maghreb ont déjà franchi ce

seuil, montrant une utilisation intensive des ressources en eau dans ces pays (Tableau 1).

Cependant, le cas de la Lybie, avec un pourcentage excédant 800%, illustre une utilisation plus que flagrante des ressources en eau non renouvelables (nappes phréatiques).

Ainsi, les pays du Maghreb se sont tournés vers la désalinisation de l'eau de mer pour subvenir essentiellement aux besoins domestiques et industriels de leurs populations, le coût de désalinisation étant encore prohibitif pour l'usage agricole.

Tableau 1. Ressources en eau et utilisation de l'eau dans les pays du Maghreb
(Source : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004)

	Pays			
	Algérie	Lybie	Maroc	Tunisie
Total des ressources en eau renouvelables (km ³ /an)	14,32	0,60	29,00	5,00
Pourcentage des ressources en eau utilisée (%)	44,4	805,6	40,3	60,4
Ressources en eau disponible par habitant (m ³ /habitant/an)	452	108	991	517
Eau utilisée par habitant en 2000 (m ³ /habitant/an)	201	870	399	312
Pourcentage des superficies irriguées/cultivées (%)	15,8	64,6	18,1	13,4

Cette situation de pénurie en ressources en eau dans les pays du Maghreb aura des conséquences dramatiques sur la production agricole dans ces pays (Yang et al., 2007). Améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE), diversifier l'économie, augmenter les réserves en devises sont autant de défis que ces pays pauvres en eau doivent relever pour s'assurer une relative sécurité alimentaire (Bouwer, 2000 ; Qadir et al., 2003).

Utilisation sectorielle de l'eau

L'analyse sectorielle de l'utilisation de l'eau dans le bassin Méditerranéen montre que, d'une façon générale, le secteur agricole est le plus gros consommateur d'eau (70% de l'eau disponible). Les secteurs urbain et industriel consomment respectivement 13 et 17% des ressources en eau disponibles (Hamdy et al., 2002).

Cependant, cette tendance générale cache les grandes disparités entre les pays du Nord et ceux du Sud du bassin Méditerranéen (Figure 1). Dans les pays développés de la rive Nord du bassin Méditerranéen, le secteur agricole consomme à hauteur de la moitié

des ressources en eau, suivi par le secteur industriel qui consomme environ 38% de ces ressources (Figure 1A). De l'autre côté du bassin Méditerranéen, les allocations sectorielles de l'eau montrent des tendances plutôt différentes. Dans ces pays, la plus grosse part des ressources en eau est allouée au secteur agricole (environ 79%), alors que le secteur industriel, encore florissant dans ces pays, consomme une part relativement mineure, avoisinant 8% (Figure 1B).

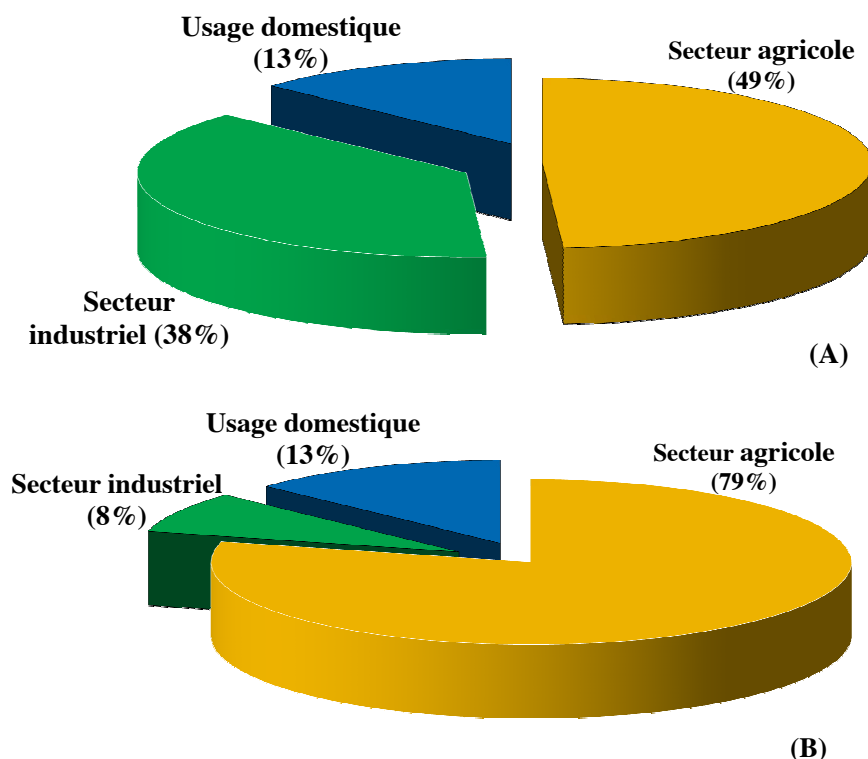


Figure 1. Allocation sectorielle de l'eau : (A) Dans les pays du Nord de la Méditerranée, et (B) Dans les pays du Sud de la Méditerranée (D'après Hamdy et Lacirignola, 1999)

Cette tendance est encore exacerbée au niveau des pays du Maghreb où la part de l'eau allouée au secteur agricole avoisine les 80% de l'eau disponible (Figure 2). Elle est maximale au niveau du Maroc, où elle avoisine 91%. Enfin, même si l'agriculture restera l'utilisateur dominant de l'eau dans ces pays pauvres en ressources hydriques, il est prévu qu'une compétition intense s'installe entre les différents secteurs (agriculture, industriel, et urbain). Cependant, pour assurer une gestion durable des ressources en eau, il est impératif de concevoir une utilisation plus efficace de l'eau par le secteur agricole (Qadir et al., 2007).

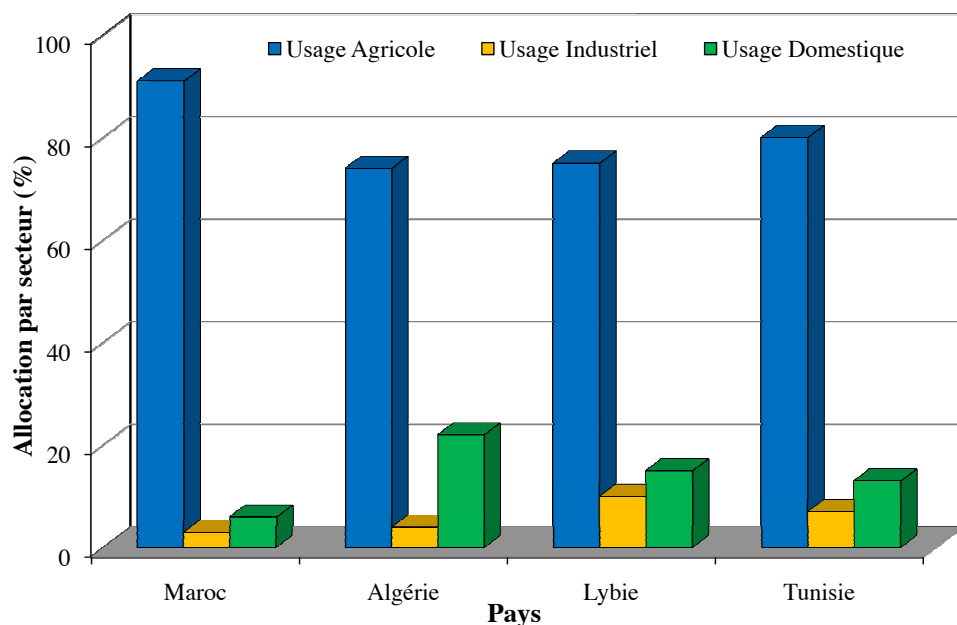


Figure 2. Allocation sectorielle de l'eau entre usage agricole, industriel, et domestique dans les pays du Maghreb (D'après Hamdy et Lacirignola, 1999)

Pertes de l'eau agricole

Les références sur les pertes globales de l'eau dans le secteur agricole dans les pays du Maghreb ne sont pas nombreuses. Quand elles existent, elles sont plutôt des estimations générales que des références précises basées sur des mesures au niveau de tout le périmètre irrigué ou le bassin versant (depuis le barrage ou le réservoir jusqu'à l'exploitation ou la parcelle).

Malgré tout, des références globales existent sur ces pertes en eau en agriculture. La Figure 3 montre que les pertes en eau à partir du système d'irrigation jusqu'à l'utilisation par la culture sont importantes, environ 55%, qui est répartie entre les pertes dues au transport de l'eau, au réseau d'irrigation, au système d'irrigation à la parcelle et à la distribution de l'eau à la parcelle. Cependant, ces pertes, même importantes, ne font référence qu'aux périmètres irrigués, alors qu'elles peuvent être aussi importantes en systèmes pluviaux.

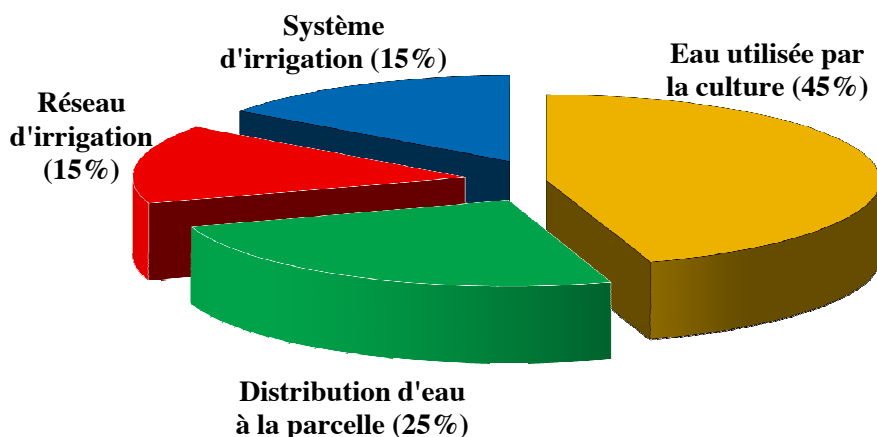


Figure 3. Sources et proportions des pertes de l'eau en agriculture (D'après Hamdy et Lacirignola, 1999 ; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004)

D'autres études montrent que les pertes en eau dues à l'évaporation de l'eau ou aux fuites d'eau au niveau du réservoir d'eau ou à partir du réseau d'irrigation peuvent atteindre environ 30% (Bos, 1985). De plus, les pertes par ruissellement et drainage peuvent constituer 63% de l'eau utilisée au niveau de la parcelle (Postel, 1993). Finalement, il s'avère à travers cette analyse que seulement 13 à 18% des ressources en eau allouée à l'agriculture irriguée est effectivement utilisée par la culture en forme de transpiration (Wallace, 2000). Il est important de noter que seule la transpiration, qui représente l'eau qui passe par le tissu végétal et s'évapore à travers les stomates des feuilles, est intimement liée à la croissance végétale et au rendement.

Au niveau de l'agriculture pluviale, les figures ne sont pas différentes puisque les pertes en eau sont aussi importantes. Environ 40 à 50% de l'eau des pluies est perdue en ruissellement et drainage, et 30 à 35% est perdue par l'évaporation du sol ou à partir des surfaces d'eau (Wallace, 2000).

Toutes ces études montrent l'importance d'une utilisation plus efficiente de l'eau, qui passe par la réduction des pertes au niveau des réservoirs d'eau, des systèmes d'irrigation et à la parcelle, plutôt qu'une augmentation, problématique parfois même impossible, des ressources en eau. Ce constat qui pourrait être considéré comme une nécessité dans la majeure partie des régions à vocation agricole devient une urgence pour les pays souffrant de pénurie en ressources en eau, tels que les pays du Maghreb.

EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU AU MAGHREB

Les ressources en eau deviennent rares, particulièrement dans les pays du Sud de la Méditerranée (Margat et Vallée, 1997). C'est pourquoi les pertes en eau dans le secteur de l'agriculture sont intolérables dans les pays du Maghreb.

Définition

En agriculture, plusieurs termes ou définitions existent pour quantifier l'EUE à partir du barrage jusqu'à la parcelle agricole, en passant par le réseau d'irrigation. Il est ainsi défini :

- L'efficacité de stockage au niveau d'une retenue de barrage ;
- L'efficacité du transport des canaux à partir du lieu de mobilisation de l'eau jusqu'à la prise de l'exploitation ;
- L'efficacité de la distribution d'eau au niveau de l'exploitation depuis la prise de l'exploitation jusqu'à la parcelle ;
- L'efficacité d'application de l'eau à la parcelle ou efficacité de l'irrigation ;
- Et l'efficacité globale qui combine ces différentes efficacités du système d'irrigation.

Dans ce qui suit, on va s'intéresser à l'EUE par la culture. Du point de vue agronomique, ce terme se réfère au rapport entre le rendement d'une culture et l'eau utilisée pour aboutir à cette production par unité de surface (Feddes, 1984 ; Pereira et al., 2002) :

$$\text{EUE (kg/m}^3\text{)} = \text{rendement} / \text{eau utilisée} \quad (1)$$

Le rendement peut être exprimé soit par la matière sèche totale, soit par le rendement récoltable (kg/m²).

La définition de l'EUE peut prêter à confusion, puisque, selon l'espèce en question, le rendement peut se référer au rendement grain, la biomasse totale, le pivot dans le cas de la betterave, ou même la quantité de sucre ou d'huile. Ainsi, certains auteurs (Katerji et al., 2008) préfèrent utiliser le rendement récoltable ou commercial au lieu de la matière sèche totale.

Par ailleurs, suivant l'approche préconisée, l'eau utilisée peut se référer à l'eau transpirée dans le cas d'une approche éco-physiologique (Percy, 1983), ou à l'eau évapotranspirée à la parcelle dans le cas de l'approche agronomique.

De plus, en pratique, certains auteurs divisent, pour simplifier, le rendement récoltable par les pluies reçues au cours du cycle de la culture ou par la somme des pluies et de la dose totale d'irrigation (Bouaziz et Belabbès, 2002).

En fait, ces simplifications émanent essentiellement de la cherté des équipements et de la difficulté de mesure de l'évapotranspiration d'une part et de la séparation de ses composantes, en l'occurrence la transpiration et l'évaporation du sol d'autre part (Zeggaf et al., 2008).

Ainsi, il en résulte une variabilité importante des EUE pour différentes espèces et dans différentes régions du monde.

Faible efficacité d'utilisation de l'eau à la parcelle

Les valeurs d'EUE pour certaines espèces et dans les deux rives de la Méditerranée sont présentées dans le Tableau 2. Il faut noter que si pour certaines espèces, comme

les cultures annuelles, essentiellement les céréales, les données sont plus ou moins disponibles, pour d'autres espèces, comme les légumineuses ou les arbres fruitiers, les données font défaut (Katerji et al., 2008), ce qui traduit, à notre sens, le peu d'intérêt porté à la problématique de l'EUE en agriculture, surtout dans les pays du Maghreb. Un effort doit être consenti pour contribuer à trouver des solutions efficaces à la pénurie des ressources en eau dans ces pays.

Tableau 2. Efficience d'utilisation de l'eau (EUE) pour quelques espèces cultivées en Méditerranée

Espèce	Pays	EUE (kg/m ³)	Référence
Blé	Maroc	0,11-1,15	Corbeels et al., 1998
	Maroc	0,32-1,06	Mrabet, 2002
	Italie	1,02-1,20	Van Hoorn et al., 1993
	Italie	1,08-1,59	Katerji et al., 2005
	Turquie	1,33-1,45	Sezen et Yazar, 1996
Tournesol	Maroc	0,82	Bouaziz et Belabbes, 2002
	Italie	1,35-1,80	Ben Nouna et al., 2000
	Turquie	1,65-2,15	Dagdelen et al., 2006
	France	1,6	Marty et al., 1975
Betterave à sucre	Maroc	1,79-2,68	Oussaid, 1996
	Italie	6,6-7,0	Katerji et al., 2003

Une analyse succincte du Tableau 2 montre que de larges différences existent dans les valeurs d'EUE pour une même espèce. Ces différences existent non seulement entre des études réalisées dans différents pays, mais parfois aussi entre des études menées sur le même site (Katerji et al., 2008). À part les erreurs expérimentales liées à la détermination du rendement et de l'évapotranspiration, cette variabilité dans la détermination de l'EUE peut être causée par les facteurs suivants (Katerji et al., 2008) :

- La conduite technique de la culture : différences dans l'application de l'eau et des fertilisants ;
- Les facteurs culturaux : différences entre espèces, effet variétal, réponse des stades phénologiques au stress hydrique ;
- Les facteurs environnementaux : climat et sol.

D'après le Tableau 2, les valeurs de l'EUE dans les pays du Maghreb sont très faibles relativement à celles des pays du Nord de la Méditerranée, ce qui peut être expliqué

par la non maîtrise de la conduite technique de la culture, notamment l'irrigation, le désherbage chimique, la fertilisation azotée et le contrôle des maladies cryptogamiques (Bouaziz et Belabbes, 2002).

Il s'en suit le paradoxe que les pays relativement riches en ressources hydriques, tels que les pays du Nord de la Méditerranée, utilisent plus efficacement leurs ressources en eau agricole que les pays souffrant de pénurie en eau, comme c'est le cas pour les pays du Maghreb.

PERSPECTIVES D'AMELIORATION DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU

Un certain nombre de pratiques culturelles, d'innovations techniques et de procédures de gestion de l'irrigation à la parcelle existent déjà dans le monde. Certaines ont déjà prouvé leur efficacité dans le domaine de gestion efficiente de l'eau à la parcelle et certaines sont en cours de développement. Dans cette section, un certain nombre de pratiques culturelles et de techniques visant l'amélioration de l'EUE à la parcelle sont présentés. Cette liste ne saurait être exhaustive mais illustre les avantages cumulés qui pourraient être tirés en combinant ces pratiques efficientes en eau.

Gestion de l'irrigation

Les ressources en eau sont dilapidées au niveau du secteur agricole et les cultures sont irriguées en excès de 30 à 49% (Hamdy et Katerji, 2006).

Ce constat met l'accent sur la nécessité de techniques d'irrigation plus efficientes, telles que l'irrigation de complément, qui consiste à appliquer une, deux, à trois irrigations durant le cycle de la culture, essentiellement pendant les stades de croissance les plus sensibles au stress hydrique, tels que la floraison et le remplissage du grain pour les céréales et les légumineuses (Oweis et Hachum, 2006). Cette technique peut donc constituer une alternative prometteuse pour augmenter les rendements dans les régions arides et semi-arides du Maghreb. Certaines recherches montrent que si la productivité de l'eau chez le blé est de l'ordre de $0,35 \text{ kg/m}^3$ dans les régions arides et semi-arides du Maghreb, elle peut atteindre $1,0 \text{ kg/m}^3$ avec une bonne gestion de la culture et une bonne distribution des pluies (Oweis et Hachum, 2006).

D'autres études (Ham et al., 1996 ; Zeggaf et al., 2008) montrent qu'une irrigation espacée dans le temps de la culture vaut mieux qu'une irrigation continue. En effet, il a été observé que pendant des périodes de stress hydrique moyen, une partie de l'énergie utilisée pour l'évaporation du sol est utilisée pour la transpiration de la culture. En d'autres termes, la culture transpire plus et donc produit plus en situation de stress hydrique moyen qu'en situation d'irrigation continue. Un système automatique de mesure des composantes de l'évapotranspiration et de gestion de l'irrigation a déjà été proposé (Zeggaf et al., 2008). Ce système de gestion de l'irrigation permettrait une économie de l'eau de près de 30 à 35% de l'eau utilisée à la parcelle (Zeggaf et al., 2007).

Fertilisation minérale

A travers la fertilisation, l'agriculteur fournit les éléments nutritifs assimilables par la culture. Une bonne irrigation à elle seule ne saurait conduire à des rendements élevés sans une fertilisation optimale. En effet, la fertilisation azotée est à même d'augmenter les rendements et d'améliorer l'EUE à la parcelle (Pala et al., 2007).

Ainsi, les interactions entre la fertilisation et le régime hydrique ont largement été étudiées pour certaines espèces prépondérantes en Méditerranée, telles que le blé (Oweis et al., 2000 ; Sadras, 2004). Cependant, la recherche sur l'EUE en relation avec la fertilisation pour de nombreuses autres espèces végétales est limitée dans la région Méditerranéenne. Cette recherche est nécessaire pour montrer aux agriculteurs les avantages d'une bonne fertilisation sur l'EUE à la parcelle (Katerji et al., 2008).

Encore une fois, une comparaison entre les quantités de fertilisants utilisées dans les pays du Maghreb et ceux du Nord de la Méditerranée montre que les fertilisants sont beaucoup moins utilisés dans les pays du Maghreb que dans les pays du Nord de la Méditerranée (Tableau 3). Ces quantités de fertilisants relativement faibles expliquent, en partie, les faibles rendements agricoles des pays du Maghreb, même si les valeurs présentées représentent une moyenne d'utilisation des fertilisants dans les zones irriguées et pluviales.

Enfin, il s'avère que la fertilisation minérale, encore faible dans les pays du Maghreb, peut constituer un levier pour l'amélioration des productions agricoles et l'EUE dans ces pays.

Tableau 3. Utilisation annuelle moyenne des fertilisants (1992-1998) dans certains pays de la région Méditerranéenne (D'après MedAgri, 2001 ; Katerji et al., 2008)

Pays	Fertilisants (kg/ha)
France	248
Italie	166
Turquie	65
Maroc	30
Algérie	11
Tunisie	19

Date et dose de semis

Pour réduire les pertes par évaporation du sol et permettre à la culture d'utiliser pleinement les réserves en eau du sol pendant le cycle cultural, l'établissement d'un couvert végétal

précoce et relativement dense est une autre alternative pour l'augmentation de l'EUE à la parcelle (Ritchie, 1972 ; Zeggaf et al., 2006).

D'autres études existent aussi concernant la modélisation du couvert végétal sous différentes densités de peuplement et leurs effets sur la réduction de l'évaporation du sol (Zeggaf et al., 2006). En effet, des doses de semis précises doivent être recommandées pour différentes cultures dans différentes régions, de telle façon à augmenter la part de la transpiration de la culture dans l'évapotranspiration au niveau de la parcelle, et réduire la part de l'évaporation du sol.

Dans le cas des zones pluviales, un recadrage du cycle de la culture dans l'année est important pour que la culture profite des eaux de pluies durant la majeure partie de la saison pluviale. Un semis précoce permet aussi d'éviter les effets néfastes de la baisse des températures à partir de novembre sur la germination et l'installation de la culture (Oweis et Hachum, 2006).

Dans les périmètres irrigués, la demande en eau d'irrigation est maximale à partir du printemps. Dans ces périmètres des semis graduels dans le temps permettent d'abaisser la forte demande en eau de près de 20%, et par conséquent la taille des systèmes d'irrigation et les coûts afférents (Oweis et Hachum, 2001).

Labour

Le labour influe aussi sur l'évaporation du sol et par conséquent l'EUE. Les résultats des différents labours varient en fonction du type de sol, de la teneur en eau du sol, et du climat pendant la période considérée (Wallace, 2000). En général, les taux d'évaporation du sol les plus élevés se produisent par des labours intensifs exposant une bonne partie de l'humidité du sol à l'évaporation (Wallace, 2000). Ainsi, Hammel et al. (1981) a montré qu'un labour à disque peut réduire l'évaporation du sol pendant la phase d'installation du blé.

Le semis direct, aussi appelé zéro labour, est une autre technique de conservation de l'eau du sol. Des recherches sur ce sujet ont été réalisées dans la région du Maghreb et des efforts de développement de cette technique auprès des agriculteurs sont en cours. Ces recherches montrent les avantages d'utilisation du zéro labour sur la teneur en eau du sol et sur les rendements réalisés (Mrabet, 2002). Le zéro labour combiné à l'utilisation du mulch (résidus de paille) augmente encore l'EUE (Mrabet, 2002). Le mulch réduit l'exposition du sol au rayonnement solaire, diminue l'évaporation du sol, et constitue une source alternative de fertilisation.

CONCLUSION

Les EUE à la parcelle dans le secteur agricole au Maghreb sont relativement faibles comparativement à celles obtenues dans les pays du Nord de la Méditerranée. La gestion de l'irrigation est telle que beaucoup d'eau est gaspillée par évaporation du sol, par ruissellement ou par percolation. Ce constat est d'autant plus alarmant que le secteur agricole est le plus gros consommateur d'eau dans les pays du Maghreb.

Des améliorations peu significatives dans l'EUE en agriculture sont à même d'économiser des quantités substantielles d'eau à utiliser dans les autres secteurs urbain et industriel. La mobilisation de nouvelles ressources en eau ne pouvant pas être entreprise indéfiniment, il devient impératif de s'orienter vers l'amélioration de l'EUE.

Ce choix stratégique englobe plusieurs disciplines telles que l'éducation, la recherche scientifique, le développement, et les décideurs politiques. Des techniques existent déjà et peuvent être vulgarisées au niveau des agriculteurs et des utilisateurs de l'eau en général, d'autres sont en cours de recherche et doivent être appuyées pour aboutir à des pratiques plus efficaces dans l'utilisation de l'eau.

REFERENCES

- Alcamo J. et Henrichs T. (2002) Critical regions: a model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. *Aquat. Sci.*, 64, 352-362.
- Ben Nouna B., Katerji N. et Mastrorilli M. (2000) Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *Eur. J. Agron.*, 13, 309-322.
- Bos M.G. (1985) Summary of ICID definitions on irrigation efficiency. *ICID Bull.*, 34, 1.
- Bouaziz A. et Belabbes K. (2002) Efficience productive de l'eau en irrigué au Maroc. *Rev. H.T.E.*, 124, 57-74.
- Bouwer H. (2000) Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agric. Water Manage.*, 45, 217-228.
- Corbeels M., Hofman G. et van Cleemput O. (1998) Analysis of water use by wheat grown on a cracking clay soil in a semiarid Mediterranean environment: weather and nitrogen effects. *Agric. Water Manage.*, 38, 147-167.
- Dagdelen N., Yilmaz E., Sezgin F. et Gürbüz T. (2006) Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. *Agric. Water Manage.*, 82, 63-85.
- Falkenmark M. et Widstrand C. (1992) Population and water resources: a delicate balance. Population Bull. 47, Population Reference Bureau, United Nations, Washington, DC, USA.
- Feddes R.A. (1984) Cropwater use and dry matter production: state of the art. Dans : Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 septembre 1984, p. 221-234.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2004) AQUASTAT Database – FAO's Information System on Water and Agriculture. Available on <<http://www.fao.org/ag/aquastat/>>.
- Ham J.M., Heilman J.L. et Lascano R.J. (1990) Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 52, 287-301.

Hamdy A. et Lacirignola C. (1999) Mediterranean Water Resources: Major Challenges Towards the 21st Century. IAM Editions, Bari, Italy, 570 p.

Hamdy A., Lacirignola C. et Trisorio-Liuzzi G. (2002) The integration of soil and water resources management towards a sustainable agricultural development in the Mediterranean. *Options Méditerranéennes, Série A.*, 50, 11-27.

Hamdy A. et Katerji N. (2006) Water Crisis in the Arab World. Analysis and Solutions. IAM Editions, Bari, Italy, 60 p.

Hammel J.E., Papendick R.I. et Campbell G.S. (1981) Fallow tillage effects on evaporation and seed zone water content in a dry summer climate. *Soil Sci. Am. J.*, 45, 1016-1022.

Katerji N., van Hoorn J.W., Hamdy A. et Mastrorilli M. (2003) Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agric. Water Manage.*, 62, 37-66.

Katerji N., van Hoorn J.W., Hamdy A., Mastrorilli M., Nachit M.M. et Oweis T. (2005) Salt tolerance analysis of chickpea, faba bean and durum wheat varieties. II. Durum wheat. *Agric. Water Manage.*, 72, 195-207.

Katerji N., Mastrorilli M. et Rana G. (2008) Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *Europ. J. Agronomy*, 28, 493-507.

Margat J. et Vallée D. (1997) Démographie en Méditerranée. *Options Méditerranéennes, Série A*, 31, 3-16.

Marty J.R., Puech J., Maertens C. et Blanchet R. (1975) Etude expérimentale de la réponse de quelques grandes cultures à l'irrigation. *C.R. Acad. Agric.*, 61, 560-567.

MedAgri (2001) Yearbook of Agricultural and Food Economies in the Mediterranean and Arab Countries. Eds CIHEAM/IAM, Montpellier, France, 426 p.

Mrabet R. (2002) Wheat yield and water use efficiency under contrasting residue and tillage management systems in a semi-arid area of Morocco. *Exp. Agric.*, 38, 237-248.

Oussaid M. (1996) Besoins en eau et conduite de l'irrigation de la betterave à sucre dans le périmètre des Doukkala. Mémoire de troisième cycle, option Génie Rural, IAV Hassan II, Maroc.

Oweis T., Zhang H. et Pala M. (2000) Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron. J.*, 92, 231-238.

Oweis T. et Hachum A. (2001) Reducing peak supplemental irrigation demand by extending sowing dates. *Agric. Water Manage.*, 50, 109-123.

Oweis T. et Hachum A. (2006) Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agric. Water Manage.*, 80, 57-73.

Pala M., Ryan J., Zhang H., Singh M. et Harris H.C. (2007) Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manage.*, 93, 136-144.

Pearcy R.W. (1983) Physiological consequences of cellular water deficits: efficient water use in crop production. Dans : Limitations of efficient water use in crop production. Eds. Taylor H.M., Jordan W.M. et Sinclair T.R., Amer. Soc. Agron., Inc., Crop Sci. Soc. Amer., Inc., Soil Sci. Soc. Amer., Inc., Madison. p. 277-287.

Pereira L.S., Oweis T. et Zairi A. (2002) Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manage.*, 57, 175-206.

Postel S.L. (1993) Water and agriculture. Dans : Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources. Ed. Gleick P.H., Oxford University Press, Oxford, p. 56-66.

Qadir M., Boers T.M., Schubert S., Ghafoor A. et Murtaza G. (2003) Agricultural water management in waterstarved countries: challenges and opportunities. *Agric. Water Manage.*, 62, 165-185.

Qadir M., Sharma B.R., Bruggeman A., Choukr-Allah R. et Karajeh F. (2007) Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agric. Water Manage.*, 87, 2-22.

Ritchie J.T. (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8, 1204-1213.

Sadras V.O. (2004) Yield and water-use efficiency of water- and nitrogen stressed wheat crops increase with degree of colimitation. *Eur. J. Agron.*, 21, 455-464.

Sezen S.M. et Yazar A. (1996) Determination of water-yield relationship of wheat under Cukurova conditions. *Trans. J. Agric. For.*, 20, 41-48.

van Hoorn J.W., Katerji N., Hamdy A. et Mastroilli M. (1993) Effect of saline water on soil salinity and on water stress, growth, and yield of wheat and potatoes. *Agric. Water Manage.*, 23, 247-265.

Wallace J.S. (2000) Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 82, 105-119.

Yang H., Wang L. et Zehnder A.J.B. (2007) Water scarcity and food trade in the Southern and Eastern Mediterranean Countries. *Food Policy*, 32, 585-605.

Zeggaf T.A., Nasrellah N., Hadrabach D. et Baidani A. (2002) Caractérisation de la variabilité spatiale du climat Marocain en relation avec la productivité des céréales à petites graines. *Hommes, Terre & Eaux*, 124, 84-90.

Zeggaf T.A., Anyoji H. et Yasuda H. (2006) Fixed and variable light extinction coefficients for estimating plant transpiration and soil evaporation under irrigated maize. *Agric. Water Manage.*, 84, 186-192.

Zeggaf T.A., Anyoji H., Takeuchi S. et Yano T. (2007) Partitioning energy fluxes between canopy and soil surface under sparse maize during wet and dry periods. Dans : Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs, 14-17 Février 2007, Valenzano, Italie, *Options Méditerranéennes, Série B*, 56 Vol I, 201-211.

Zeggaf T.A., Takeuchi S., Dehghanisanij H., Anyoji H. et Yano T. (2008) A Bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation. *Agron. J.*, 100, 988-996.

PARTIE IV

LE TRAITEMENT ET LA QUALITE DES EAUX POTABLES

CHAPITRE 13

MUNICIPAL WATER MANAGEMENT PRACTICES IN LIBYA

A.A. ABUFAYED*

AlFateh University – Dept. of Environment Engineering
Tripoli, Libya

A.A. ELKEBIR

AlFateh University – Dept. of Environment Engineering
Tripoli, Libya

ABSTRACT

Libya is a sparsely populated arid North African country. It relies almost totally on groundwater. Significant improvements in the standard of living of Libyans in the last four decades have resulted in a rapid growth in municipal water demands. This growth has been satisfied through intensive development of water resources culminating in the construction of the Great Man-made River Project (GMRP) which, upon completion, will transfer over 6 million cubic meters per year (Mm^3/yr). The total municipal water demand in 2005 was estimated to be 593 million cubic meters (Mm^3). Demands for the period 2008-2025 are expected to rise from 1.7 to 2.5 million cubic meters per day (Mm^3/d), respectively. Presently, about 47% of the population are supplied from the GMR Project. The Project's contributions are expected to increase to over 75% of the population in 2025. The rest of the population will be supplied from conventional sources and desalination plants. Water quality of major groundwater reservoirs is good with a total dissolved solids (TDS) concentration of 200-1500 mg/l. Groundwater salinity in "unconfined" coastal aquifers has deteriorated markedly in the last decades due to excessive groundwater discharge and subsequent seawater intrusion. The TDS concentrations have increased 2 to 10 folds between 1979 and 2002. Because of the large size of the country and the large number of communities, distributed water reached only 63% of the population in 2006. Major challenges facing the water sector are due to environmental, technical, socio-economic

* Auteur correspondant : Pr. ABUFAYED Abdulgader Ali – AlFateh University, Dept. of Civil Engineering, POB 13626, Tripoli, LIBYA

Email : aabufayed@hotmail.com – Tél. : (+218) 92 502 4906 – Fax : (+218) 21 333 9777

and institutional factors. Although numerous, overlapping and at times complex, they can be overcome easily through incorporation into the design, construction, operation and maintenance of water supply systems, human resources development, and sustainable funding. As water will become more vital to the sustainability of Libya's socio-economic development, so will the need for effective water management practices.

Key words: Libya; municipal; water; supply; quality; standards; management; strategy.

RESUME

La Libye est un pays aride de l'Afrique du Nord, peu abondamment peuplé. Elle se fonde presque totalement sur des eaux souterraines. Les améliorations significatives du niveau de vie des Libyens pendant les quatre dernières décennies ont eu comme conséquence une croissance rapide des besoins d'approvisionnement en eau municipale. Cette croissance a été satisfaite par le développement intensif des ressources en eau aboutissant à la construction de la grande rivière artificielle (« Great Man-made River Project » – GMRP) qui vise à transférer 6 millions de m³ d'eau par an (Mm³/an). La demande totale en eau municipale en 2005 a été estimée à 593 Mm³. Il est attendu que les demandes entre 2008-2025 augmentent de 1,7 à 2,5 Mm³/j. Actuellement, environ 47% de la population sont fournis à partir du GMRP. En 2025, les contributions du GMRP devraient grimper à plus de 75% de la population. Le reste de la population sera fourni à partir des sources conventionnelles et des stations de dessalement d'eau de mer. La qualité des eaux provenant des principaux réservoirs d'eaux souterraines est bonne avec une concentration en matières totales dissoutes (TDS) de 200-1500 mg/l. La salinité des eaux souterraines au niveau des aquifères littoraux à nappe libre a nettement été détériorée pendant les dernières décennies dues à la décharge excessive d'eaux souterraines et à l'intrusion consécutive d'eau de mer. Les concentrations en TDS ont augmenté 2 à 10 fois entre 1979 et 2002. En raison de la grande taille du pays et du grand nombre de communautés, l'eau distribuée a seulement atteint 63% de la population en 2006. Les principaux défis du secteur de l'eau correspondent à des facteurs environnementaux, techniques, socio-économiques et institutionnels. Bien que nombreux, transversaux et parfois complexes, ils peuvent être facilement surmontés par l'incorporation d'un développement des ressources humaines et d'une pérennité du financement dans la conception, la construction, l'exploitation et l'entretien des systèmes d'approvisionnement en eau. Ainsi, puisque l'eau devient plus essentielle à la durabilité du développement socio-économique de la Libye, le pays a besoin de pratiques de gestion de l'eau efficaces.

Mots clés: Libye ; municipal ; eau ; approvisionnement ; qualité ; standards ; gestion ; stratégie.

INTRODUCTION

Libya is a sparsely populated North African country. It is strategically located on the Central Southern Mediterranean Sea coast and extends over 1000 km South into the Sahara desert. It has an area of about 1 660 000 km² and a coastal line of 1950 km. Climate is harsh; as a result, Libya is mostly arid to semi-arid with no surface water resources. Desert occupies over 92% of the total area with agricultural lands and forests occupying only 3.94 and 0.29% of the total area, respectively. Urban centers and oasis occupy the remaining 2% of the total area.

Libya's present population of almost 6 million inhabitants is projected to increase to about 10 million inhabitants in 2025. Over 85% of this population are urban with this fraction increasing to over 90% in 2025. Significant improvements in the standard of living of Libyans in the last four decades have resulted in a rapid growth in both population and water demand rates for domestic, industrial and agricultural purposes. This growth has been accompanied by intensive development of water resources to meet the increasing demands with significant impacts on water resources. These developments included drilling of many wells, construction of dams, scores of desalination and water treatment plants, hundreds of distribution networks. These efforts culminated in the construction of the Great Man-made River Project (GMRP), the world's largest pre-stressed concrete pipe water conveyance system.

To meet the ever increasing demands for water, the National Program for Water and Sewerage was launched in 2006. It involves the design and execution of water supply and sewerage schemes for all of Libya's cities, towns and villages. Upon completion of this ambitious program, all Libyans will enjoy high quality water and sewerage services.

The objective of the paper is to describe the status of municipal water supply in Libya and its future prospects. To achieve this objective, the state of water supply and demand situation is presented along with water quality, drinking water standards and treatment technologies. Major challenges are identified based on the results of this presentation along with conclusions and recommendations specifying mitigation policies and measures needed to ensure the sustainable management of the country's drinking water resources.

MUNICIPAL WATER SUPPLY – DEMAND SITUATION

The municipal water supply and demand situation in Libya is shaped by two factors: demography and hydrology. The country's population and developmental investments have been concentrated along the coastal areas and in oases where good quality groundwater was available in large quantities. Because of its arid climate, Libya's water resources are mostly non-renewable; the major sources are situated in the Southern part of the country.

Water Supply Sources

Climate in Libya is primarily semi-arid and arid except for the narrow coastal strip – forming only about 10% of the total area – and the mountain chain West and East of the country where moderate Mediterranean climate predominates. Consequently, temperatures vary significantly spatially and seasonally with extremes ranging from -6 to over 50 °C while precipitation ranges from around 500 mm/yr in the Eastern coastal mountain chain to less than 10 mm/yr in most of the country. Almost 92% of the country receives less than 100 mm/yr of rain (Committee on Water Supply Strategy for the GSPLAJ, 1999).

Consequently, Libya is a water scarce country. With practically no surface water resources, Libya relies almost totally on groundwater. Unconventional sources used include desalinated water, water transported via the GMR Project, and treated wastewater effluents.

Conventional water resources

Groundwater is found in reservoirs located in five “hydraulic” regions (Figure 1). Characteristics of these major reservoirs are summarized in Table 1. The total sustainable withdrawal rate from these reservoirs is about 4500 million cubic meters per year (Mm^3/yr). This water is found in different formations with depths varying from several meters to several hundred meters (General Water Authority, 2006).

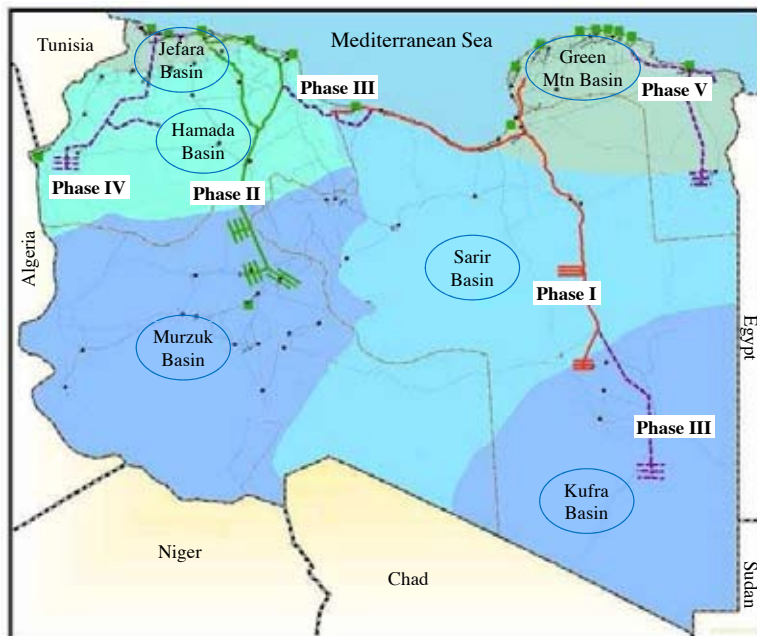


Figure 1. Major water regions and the different phases and routes of GMRP (Adopted from Committee on Water Supply Strategy for the GSPLAJ, 1999; Authority for the Execution and Management of the GMR, 2007)

Table 1. Characteristics of major groundwater reservoirs in Libya (Adopted from Committee on Water Supply Strategy for the GSPLAJ, 1999)

Reservoir	Area (km ²)	Utilizable Water (Mm ³ /yr)
Jabal Akhdar	145 000	250
Kufra/Sarir	700 000	800
Gefarah	18 000	250
Hamada Hamraa	215 000	400
Murzuq	350 000	1800

The Northern reservoirs of Jabal AlAkhdar and Hamadah Hamraa receive a total of about 650 Mm³/yr of surface recharge. About 60 Mm³/yr of this runoff is intercepted in 16 dams. The Gefara reservoir is witnessing excessive mining as it is located in the most densely populated and intensively irrigated region of Libya.

Unconventional Resources

Significance of unconventional water sources is increasing in direct response to the mounting stresses on the Northern reservoirs which have traditionally been the major source of water for Libya's major users. These sources include the GMRP, desalination and effluent reuse.

The GMR Project

This project was executed to counter the geographic imbalance between water demand and supply. The project consisted of five phases forming a grand conveyance network extending over 4000 km (Figure 1). Work on the GMRP started in 1984; operation of phase I started on August 28, 1991 and that of the phase II in September 1, 1996. Phases III and IV works are in progress while Phase V is in the planning and design stages. Upon completion, the GMRP will transfer over 6 Mm³/yr (Table 2). Although it is designed for 50 years, the water resources supplying the project will run for over 200 years according to the latest studies (www.need.com).

The GMR water was intended mostly for agricultural purposes (85%) while satisfying most of the municipal (12%). Water tariffs were set to reflect these priorities. However, with the water supply situation becoming critical in many urban areas and considering that the GMR unit water cost is notably lower than other alternatives, the fraction allocated for municipal purposes has been increased.

Table 2. Capacity of GMR Phases (Adopted from Committee on Water Supply Strategy for the GSPLAJ, 1999)

Phase	Capacity (m ³ /d)
Phase I: Sarir/Sirte/Tazerbo/Benghazi	2 000 000
Phase II: Hasawna / Gefara	2 500 000
Phase III: Kufra / Tazerbo / Sdaada	1 680 000
Phase IV: Ghadames/ Zwara / Zawia	246 000
Phase V: Jaghboob / Tubruq	130 000
Total	6 556 000

Desalination

Desalination technologies have been in use in Libya since the early sixties, mainly by companies exploring for oil in water short locations. Their utilization and fields of application have grown markedly ever since to match the increasing sectoral water and energy needs making Libya the largest user of these technologies in the Mediterranean region (Abufayed and ElGhuel, 2001).

The installed capacities of all desalination technologies increased slowly in the early seventies but notably at an almost constant rate of 30 000 m³/d annually since 1974. Presently, the total number of desalination plants exceeds 400 with a total installed capacity (TIC) of almost 1 million cubic meters per day (Mm³/d). Thermal, reverse osmosis (RO), and electrodialysis reversal (EDR) plants supply about 65%, 22% and 13% of the total desalinated water quantities, respectively.

Desalinated water is used mainly for municipal and industrial purposes. These uses account for 58 and 29% of the TIC. Multistage filtration (MSF) and RO plants provide 70 and 18%, respectively, of the desalinated water used for municipal purposes. Likewise, MSF provides 59% of the industrial waters and 66% of water provided for other uses. RO supplies 25 and 23% of the industrial and other uses waters, respectively.

Effluent Reuse

A large number of wastewater treatment plants has been installed in major urban centers in Libya with a TIC of over 600 000 m³/d. These plants are designed to produce effluents suitable for indirect agricultural irrigation purposes. Most of these plants are not operational, however, due to several socio-economic, technical and environmental challenges, thus severely limiting the potential for reuse.

Municipal Water Demand

The demand for water for municipal purposes has increased markedly in the last four decades in response to high population growth rates and increased per capita requirements reflecting large improvements in the standard of living. It constituted about 12% of the total amount of water used nationally in 2005 which was estimated to be 593 Mm³.

Per capita water requirements vary from 150 to 850 l/d. These requirements appear to reflect availability, leakage and low level of awareness among other factors: the more water available, the more used. Leakage rates are expected to exceed 40% in some communities where distribution networks are old and/or poorly maintained. Accordingly, demands for the period 2008-2025 are expected to rise from 1.7 to 2.5 Mm³/d (Mamoua, 2007).

Municipal Water Supply

As stated above, both conventional and non-conventional water sources have been utilized to satisfy municipal water requirements. Historically, groundwater from the five reservoirs has supplied all the water for all purposes. However, where water supply or quality problems arose, desalinated water was utilized. With the demand projected to increase gradually and deterioration problems expected to worsen, more reliance on non-conventional sources will be inevitable.

The GMRP

Presently, a total of 2 773 749 persons (47% of the total population) are supplied from the GMRP. The larger fraction (1 013 214 persons) is supplied from Phase I of the Project. Most of the communities served are coastal including the major population centers of Tripoli, Benghazi, and Misurata. The daily withdrawals from Phase I and Phase II are 383 497 and 577 221 m³/d; hence, the total daily withdrawal is 960 718 m³.

The GMRP's contributions are expected to rise to 1 856 447 m³/d to satisfy rising demands (Table 3). This supply can potentially serve a population of about 5.5 million persons, i.e., 75% of the total population.

Table 3. Existing and planned municipal water supplies from GMRP (Adopted from Authority for the Execution and Management of the GMR, 2007)

System	Supply	Existing	Planned 2010	Planned 2025
Phase I	%	19	17.50	22.50
Sirte/ Sarir/Tazerbo/Benghazi	m ³ /d	383 497	346 925	450 000
Phase II	%	23	36	48
Hasawna – Gefara	m ³ /d	577 221	900 343	1 186 447
Phase III	%	0	65	90
Ghadames – Zwara – Zawia	m ³ /d	0	160 845	220 000

Desalination plants

Although the GMRP is expected to satisfy most of the municipal water requirements, desalination technologies (mainly thermal and RO) will be utilized to supply a larger fraction of municipal demands. Both dedicated plants and dual purpose thermal plants are in operation, under construction, or in the process of being contracted. Plants in operation presently produce 237 000 m³/d, i.e., about 83% of their installed capacities. The total capacities of desalination plants under construction and those planned to be constructed by 2012 are 20 000 m³/d and 200 000 m³/d, respectively (Secretariat of Electricity, Water and Gas, 2008). Therefore, a total desalination capacity of 686 000 m³/d will be available in 2012 satisfying the needs of about 2 286 667 persons, i.e. 28% of the total population.

Conventional groundwater supplies

It is to be noted that several non-coastal small communities not lying on the route of the GMRP will continue to rely on groundwater from one of the five major reservoirs. Over extraction of groundwater aquifers has led to serious declines of water levels with rates exceeding 5 m/yr in some locations in the Gefara plain (General Water Authority, 2006). In fact, parts of the shallow aquifer in this plain have dried up completely. This phenomenon presents real challenges for the future development of many locations where over extraction occurs.

Water Quality Aspects

Water quality of major groundwater reservoirs (expressed as total dissolved solids – TDS) varies significantly from 200 to over 5000 mg/l depending on reservoir geology and utilization practices (Table 4). Fortunately, the largest aquifers have the best quality (200-1500 mg/l). Reservoirs near coastal urban centers are experiencing different levels of saline water intrusion, which has been reduced significantly with the transfer of the GMR waters to these centers. Agricultural and industrial pollution may be present in very isolated areas but little documented data are available to support or negate this presumption.

Table 4. Characteristics of major groundwater reservoirs in Libya (Adopted from Committee on Water Supply Strategy for the GSPLAJ, 1999)

Reservoir	Total Dissolved solids (TDS) (mg/l)
Jabal Akhdar	1000 to > 5000
Kufra/Sarir	200 to 1500
Gefarah	1000 to > 5000
Hamada Hamraa	1000 to 5000
Murzuq	200 to 1500

Typical water quality characteristics

Representative water quality characteristics are shown in Table 5. Libya's better quality waters are found in the Sarir/Kufra reservoirs with TDS concentrations of less than 500 mg/l. Water quality of aquifers used in North Eastern regions (Tubroq and Eljgiaghboob regions) is high (more than 1500 mg/l). South Western regions of Wadi Eshati and Ghat are characterized by high concentrations of iron ion (more than 2 mg/l) and low water salinity (less than 800 mg/l).

Table 5. Municipal water quality characteristics in some cities in Libya (Adopted from Mamoua, 2007)

City/Region	Water source/characteristics	Parameters exceeding National Drinking Water Standards (NDWS)
Tripoli	GMR phase II TDS = 900-1200 mg/l	Total hardness, TDS
Ghadames	TDS = 800-2600 mg/l Chlorides = 160-425 mg/l Total hardness = 1300 mg/l Iron = 0.6 mg/l	Taste, odour, total hardness, chloride, iron
Al-Azizia, Az-zawia, Western region cities	TDS= 2500-3500 mg/l	Total hardness, TDS, chloride, sulfates
Sirte	GMR phase I TDS = 300-500 mg/l	Very good quality
Ejdabia	GMR phase I TDS = 300-500 mg/l	Very good quality
Benghazi	GMR phase I TDS = 300-500 mg/l	Very good quality
Elmarage, Elbyda, Derna	TDS = 500-1500 mg/l	TDS, Taste
Alkofra	TDS = 80-500 mg/l	Very good quality
Sabhah	TDS = 800-2800 mg/l	TDS, iron, taste
Wadi Eshati	TDS = 300-600 mg/l Iron >2.5 mg/l	Iron, taste
Wadi Elhaya	TDS = 300-800 mg/l	Very good quality
Morzuq	TDS= 300-3000 mg/l	Depends on aquifer depth
Ghat	TDS = 100-400 mg/l Iron > 6 mg/l	Iron, taste

It can be seen from Table 5 that many Libyan cities face quality problems; these problems include excessive salinity, hardness, chlorides, taste, odor, and sulfates. Accordingly, these waters do not meet the Libyan drinking water standards.

Seawater intrusion

Groundwater salinity in “unconfined” coastal aquifers has increased markedly in the last decades due to excessive groundwater discharge and subsequent seawater intrusion. The situation is most evident in the coastal parts of the Gefara plain where TDS concentrations have increased 2 to 10 folds between 1979 and 2002 (Figure 2). In some locations, TDS concentrations exceeded 4000 mg/l making the water unfit for any uses. The salinity levels are likely to increase with the advancing salt front has intruded between 2 and 10 km in the Tripoli region between 1972 and 1995 (General Water Authority, 2006).

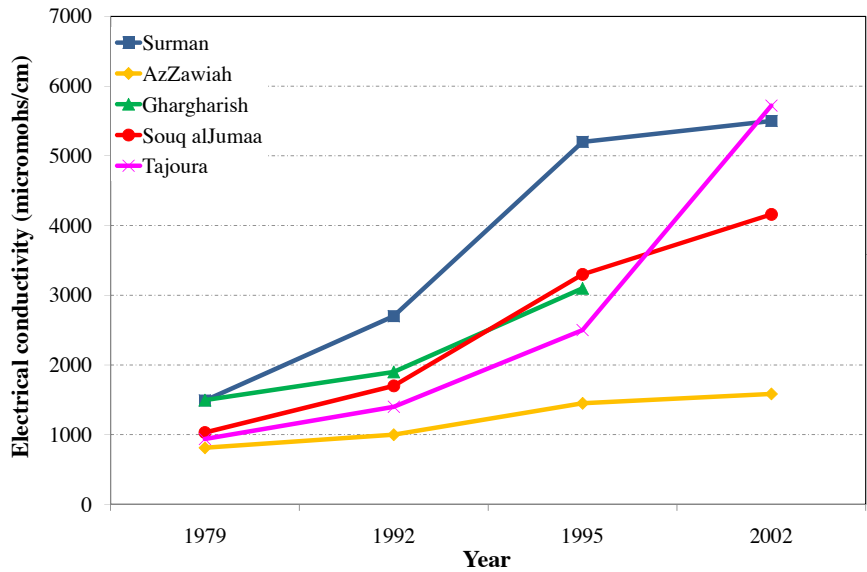


Figure 2. Representative seawater intrusion developments (Adopted from General Water Authority, 2006)

Water quality prospects

In 2006, Libya launched the National Program for Water and Sewage. This ambitious program entails the introduction of proper water supply and wastewater collection, treatment and disposal systems for all of Libya’s urban communities totaling around 400. The works included evaluation and updating of the existing systems and initiation of new ones. Design works have been completed giving way to contracting for construction. Expected to be completed within five years, this comprehensive multi-billion dollar program should ensure proper water supply to all.

Moreover, as practically the whole population will be served by the GMRP water, treated water or desalinated water, water quality problems will virtually be non-existent soon.

Water Distribution

Large investments have been made in water supply infrastructures including water sources, treatment, conveyance, storage and distribution systems. However, because of the large size of the country and the large number of communities, distributed water reached only 63% of the population in 2006. However, this value is well below the national aspirations. Quantitatively, a total volume of 593 Mm³ was supplied in 2006 (Authority for the Execution and Management of the GMR, 2007). Almost equal fractions were supplied from the GMRP (284 Mm³) and local groundwater supplies (282 Mm³) with desalination plants supplying the remainder (27 Mm³).

DRINKING WATER QUALITY STANDARDS

Drinking water standards (Libyan standard number 82/1992) have been set by the National Center for Standards. The main components of this standard are listed in Table 6. The standard is slightly more conservative than the World Health Organization (WHO) drinking water standards. It is to be noted that many of the water sources employed for municipal purposes do not meet this standard.

DESIGN DEMAND RATES AND TREATMENT TECHNOLOGIES SELECTION

Design criteria for water supply systems have been specified by the Secretariat of Planning. They include per capita water demand rates and variation factors and water treatment plant technology selection criteria. They have been used as a basis for the design of water supply schemes of the National Water and Sewerage Program (National Consulting Bureau, 2008).

Per capita water demand rates

Per capita daily water demands and variation factors have been set based on local experience, water supply limitations and community size (Table 7). They range from 150 liter per capita per day (l/c/d) for small cities (< 3000 persons) to 350 l/c/d for large cities (≥ 500 000 persons). An average rate of 250 l/c/d is widely used in design. Maximum daily and peak hourly demands are calculated based on factors corresponding to the population size.

Design criteria for the selection of water treatment technologies was based on simplicity, reliability, cost effectiveness as well as the capability to producing waters that met these standards (Table 8). As can be seen from Table 8, these criteria reflected the feed water quality, plant capacities and local conditions.

Treatment technologies in use ranged from simple iron removal systems (aeration/filtration/chlorination) to brackish water desalination systems (EDR and RO). Seawater desalination systems employing RO and thermal systems are also used. It is expected that all of these technologies will continue to expand almost equally as the National Water and Wastewater Program is executed.

Table 6. Libyan drinking water standards

Chemical constituent	Maximum Concentration Limit (mg/l)*
Calcium	200
Magnesium	150
Total Dissolved solids (TDS)	1000
Chloride	250
Sulphate	400
Iron	0.3
Zinc	150
Fluoride	1.5
Lead	0.001
Nitrate	45
Copper	1.0
Cadmium	0.005
Arsenic	15
pH	6.5-8.5
Sodium	200
Potassium	40
Hardness as CaCO ₃	500

*Except for pH

Table 7. Water demand projections (Adopted from National Consulting Bureau, 2008)

Component	Design Criteria	
Per capita water demand	Population [inhabitants]	Demand [Q] (l/c/d)
	< 3000	150
	3000-20 000	180
	20 000-50 000	200
	50 000-100 000	250
	100 000-500 000	300
	> 500 000	350
Maximum daily demand (m ³ /d)	Population [inhabitants]	Factor k _{maxd}
[Q _{maxd} =k _{maxd} *Q _{ave}]	< 10 000	1.8
	10 000-30 000	1.5
	30 000-100 000	1.4
	> 100 000	1.3
Peak hour demand (m ³ /h)	Population [inhabitants]	Factor k _{maxh}
[Q _{hmax} =k _{hmax} * Q _{ave}]	< 10 000	3.0
	10 000-30 000	2.7
	30 000-100 000	2.5
	> 100 000	2.0

Note: 1 l/c/d to be added for each future year

Table 8. Water Treatment Design Criteria (Adopted from National Consulting Bureau, 2008)

Component	Design Criteria
Potable water demand	Water treatment plant designed to provide the maximum daily demand
Feed water quality	Complete water analysis – include all parameters in the Libyan Standard Specifications N° 82 for Potable Water. Basic water analysis to include minimum – TDS, alkalinity, total hardness, Mn, K, Cl, CO ₃ , HCO ₃ , SO ₄ , NH ₃ , F, NO ₃ , NO ₂ , SS, Fe, H ₂ S, carbon dioxide, total coliform bacteria, pH and temperature data.
Effluent standard	As defined in the Libyan Standard Specifications N° 82 for Potable Water
Process selection for desalination	TDS of 1000-3000 mg/l – Electrodialysis Reversal (EDR) TDS of 3000-40 000 mg/l – Reverse Osmosis (RO) TDS of 25 000-40 000 mg/l – Thermal desalination or RO
Process selection for groundwater	Turbidity > 0.2 NTU – Filtration (multi media type)
Process selection for H ₂ S removal	H ₂ S > 0.1 mg/l – Packed Tower Aeration
Process selection for iron removal	Iron > 0.3 mg/l – Packed Tower Aeration / Oxidizing agent (i.e. NaOCl, KMnO ₄) for application containing organic bonded iron
Process selection for nitrate removal	NO ₃ > 45 mg/l – EDR (for TDS between 1000 to 5000 mg/l) / RO (for TDS > 5000 mg/l) / Ion exchange (for TDS < 1000 mg/l)
Process selection for hardness reduction	Total hardness > 500 mg/l – Softener (for TDS < 1000 mg/l) / Lime dosing (for very large application with TDS < 1000 mg/l) / EDR (for TDS 1000-3000 mg/l) / RO (for TDS > 3000 mg/l)
Process selection for disinfection	NaOCl Dosing – designed to give free Cl concentration of 0.5 mg/l Ultra Violet – applicable at point of use (due to low impact time)
Process selection for temperature reduction	Dependent on pipe material used in the network system. If necessary to reduce water temperature Cooling Tower (Induced Draft Type) to be used

WATER TARIFFS AND COST RECOVERY

Costs of municipal water supplied by the GMRP were set at 48 dirhams¹ per m³ to recover production and conveyance costs. End user water tariffs of 250 dirham (0.2 US dollars-USD) per m³ were set to recover basic costs of mining, transporting, treating and distribution of water.

Fee collection capabilities are solidifying and public response is improving especially in large urban areas. However, the response is still low making plants heavily dependent on public funds.

POLICIES AND LEGISLATIVE ASPECTS

Water supply and treatment have been addressed specifically in Laws 3/1982: Regulation of water resources utilization and 7/1982: Environmental protection. Law 3/1982 defines ownership, controls and principles that govern water sources development, utilization, preservation, and protection. According to this law, water sources are public property to be preserved by each and every person (Articles 1 and 2). Moreover, water use priorities are defined as follows: drinking, agriculture, industry and mining (Article 8). Discharge of solid and liquid wastes into water sources is prohibited (Article 6).

Other legislative actions include the following:

- Decision – Model regulation to regulate the Water and Drainage Utility at the Municipalities (N° 81 of 28 April 1976);
- General Peoples Council Decision – Provisions of Water Use (N° 791), and Definition of Water Zones (N° 790 of 1982);
- General Peoples Council Decision – Creation of the General Water Authority (GWA) (N° 249 of 1989);
- Law on the establishment of the general water and sewage water company (N°8 of 1996);
- Law N° 15, 1371 (2003) on protection and enhancement of the environmental with a special section on protection of water resources (Articles 39-47).

INSTITUTIONAL ASPECTS

Several institutions are in charge of drinking water supply and quality control/assurance in different capacities. The GWA assumes full responsibility for licensing all wells to be drilled for any purpose, including municipal ones and the overall management of national water resources. The Secretariat of Electricity, Water and Gas is the entity in charge of providing municipal water while the Authority for the Execution and Management of the GMRP is responsible for providing and managing the Project's water supplies for all

¹ Dirham is a division of the Libyan dinar; 1 Libyan dinar is equal to 1000 dirhams.

purposes including municipal ones. The Housing and Infrastructure Body is also charged with execution of water supply networks and treatment plants for the huge housing projects it undertakes. The General Peoples Committee for Health and Environment is charged with enforcing environmental protection and drinking water standards through the Environment General Authority. On the Shaa'bia² level, the secretariats for utilities undertake the activities of follow-up of planning and execution of water supply schemes. Finally, the General Association for Housing and Utilities plans, executes, and administers water supply, sewerage and solid waste schemes on the national level.

The National Center for Standards and Specifications is responsible for developing and updating drinking water standards and implementing them while the Environmental "Protection" General Authority is charged with environmental protection, including water resources use, conservation and protection from pollution. Health authorities are also involved through safeguarding of public health through ensuring safe drinking water.

Water supply and sewerage facilities are managed by the General Company for Water and Wastewater, a public company established in 1997 in accordance with Law 7/1426. Employing over 12 000 persons, this company operates and maintains all water supply and wastewater facilities, including pipelines, pump stations, water and wastewater treatment plants.

Aware of the critical role water in the sustainability of the nation's development has prompted the Libyan authorities to launch the National Water and Sewerage Program (NWSP) to provide water supply and sewerage services to all communities. Implementation of this program will require 4.5 to 6 billion USD.

Although the involvement of many entities in water works management is expected and at times necessary, the overlapping of responsibilities is unavoidable. The need to streamline the water sector and upgrade its institutional capacities are, therefore, in order.

WATER TREATMENT: A DIAGNOSTIC ASSESSMENT

Libya is a water constrained country with an arid climate and no renewable water resources. Consequently, Libya has relied solely on groundwater to drive its socio-economic development. Excessive groundwater mining has led to the depletion of some aquifers and serious seawater intrusion problems. Water quality problems associated with conventional sources have made it necessary to search for supplemental sources (such as the GMRP) and to treat (or desalinate) these waters to produce waters meeting the national drinking water quality standards. The water treatment technologies employed range from simple conventional iron removal systems to over 400 complex membrane systems (EDR and RO) and thermal desalination systems.

Clearly, large efforts have been made along with large financial investments leading to a significant improvement in the standard of living of a major fraction of Libya's population.

² Shaa'bia is the Arabic term referring to governorate.

However, this improvement has been accompanied with many challenges that limited the overall efficiency of the sector. These challenges have been most severe in the operation and maintenance aspects; the impacts of these challenges are more severe in small and remotely located areas. They may be attributed to environmental, technical, socio-economic and institutional factors as shown below.

Environmental Factors

1. Harsh environmental conditions, exemplified by severe temperatures ranging from below freezing to over 40 °C with large daily and annual amplitudes, frequent and strong sand storms, and dryness, result in intensified stresses and adverse impacts on plant structures, instrumentation and control and mechanical equipment. Stoppages, erosion, wear and tear are induced or exacerbated;
2. High water hardness and salinity are conducive to corrosion and scaling problems plaguing mechanical equipment and piping. These characteristics limit also the water uses and impact.

Design Aspects

1. Water treatment and desalination plants have been designed mostly by non-Libya consultants, not familiar local socio-economic and environmental conditions and constraints. Subsequently, the designs were unsuitable for the locales for which they were intended with very low efficiency and extremely short plant life. This problem was aggravated by the severe lack of data locally with large safety factors employed to compensate for this deficiency;
2. Notably, the designs focused on successful models employed in developed countries which employed highly mechanical systems, thus denying many small and remote sites the many operational and economic advantages of more appropriate simple technologies.

Operation and Maintenance Aspects

Operation and maintenance (O & M) have been a major chronic problem due to several factors including:

1. Lack of skilled personnel and high turnovers. This problem is accentuated by the lack of training institutions and the high demand for skilled manpower and competitiveness of other sectors;
2. Unavailability of consumables and spare parts locally causing long stoppages of some plant components thus impacting the plant performance;
3. Understaffing and equipping of laboratory facilities;
4. Lack of enforcement and awareness of quality implications has made monitoring and quality control practices markedly ineffective.

Socio-economic and Institutional Aspects

As stated above, there is a high skilled worker shortage and turnover because of the sector's low competitiveness. Moreover, the institutions in charge of water supply schemes, especially operation and maintenance, have changed frequently resulting in a reduced plant performance levels. These challenges are being overcome by institutional capacity building, however, with gradual but significant enforcement resulting from social attitudes and traditions becoming more acceptable of manual professions. Another factor that can contribute favorably towards upgrading the performance of municipal water management is enforcement of legislation related to tariff collection with a concomitant improvement of the water supply/quality services ensuring customer participation and satisfaction.

The problems listed above are numerous, overlapping and at times complex. However, they are typical of water supply systems with some site specific "local" factors. They can be overcome readily through an assessment of the existing situation and definition of specific causes and effects. The factors impacting system performance and reliability can be incorporated systematically through well structured institutions and translated into codes and standards applied to the design, construction, operation and maintenance of water supply systems. Training institutions will produce the skilled labor needed while incentives can attract and keep this labor force in the sector. Similarly, shortages in spares and materials can be made available through proper management and provision of funds.

Finally, water supply is a vital national undertaking with serious impacts and responsibilities shared by many stakeholders. Strategic planning, execution, operation and maintenance of water supply works should, therefore, be given utmost attention with specific roles assigned to each stakeholder and with all resources needed made available. Accountability and monitoring should be given the same attention. Management of water supply works should ensure the sustainable provision of water of high quality and sufficient quantity to everyone.

FUTURE PROSPECTS, CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Libya is a water short country. The large efforts and investments made in the last few decades have put to an end the acute shortages faced by the different users especially municipal ones. As the demand continues to increase geometrically with no parallel increase in the water resources, the water budget imbalance will become more evident. Water will continue to be a vital and scarce resource having serious effects on the sustainability of the country's development. More effective water management practices will be needed.

The GMRP should be utilized effectively. All communities lying on or reasonably near its transport lines should be supplied from these lines. Excess water should be used for industrial and agricultural purposes.

As over 80% of Libya's population lives within a 10-km corridor along its 1 900-km long and unpolluted coast, desalination should be utilized whenever it proves to be competitive to the GMR water, e.g. in dual purpose power plants. Desalination plants should be implemented only where no other recourses are available. Saved GMR water can be diverted to other users.

As most urban centers are located inside the agricultural planes, treated effluents should be utilized for irrigation, thus freeing more water for municipal uses and conserving groundwater, especially in over mined aquifers. Other valuable benefits of effluent reuse include protecting coastal and land resources from pollution, supplying nutrients and conditioners (fertilizers), recharging coastal aquifers thus reducing seawater intrusion and sustaining agriculture and providing employment.

Immediate stress should be placed on improving data base, monitoring and management of water resources through building community and formal institutional capacities.

Special efforts should be made towards developing water use and conservation awareness with focus on water demand management. This should include measures to improve water use efficiency, upgrading of water supply works and effluent reuse.

Water pricing must be introduced to encourage more efficient use by households but users should simultaneously be assured a safe quality and reliable water supply.

REFERENCES

Abufayed A.A. and ElGhuel M.K.A. (2001) Desalination Process Applications in Libya. *Desalin.*, 138, 47-53.

Authority for the Execution and Management of the GMR (2007) Water Allocations Report, p. 31-40.

Committee on Water Supply Strategy for the GSPLAJ (1999) Study of the Water Supply Situation and National Water Strategy for the Great Socialist People's Libyan Arab Jamahiriya (GSPLAJ). Report submitted to the General Peoples Committee, Libya, December 1999.

General Water Authority (2006) State of Water in the Great Jamahyriah.

Mamoua K.I. (2007) Water Supply and Demand in Urban Communities in Libya: An Assessment and Projects for the Period 2007-2025. Master's Thesis submitted for the Civil Engineering Department, AlFateh University, Tripoli, Libya, March 2007.

National Consulting Bureau (2008) Project for the Design of Water Supply, Sewerage and Storm Water Collection Systems. Technical Report, January 2008.

Secretariat for Electricity, Water and Gas (SEWG) (2008) Water Supply Plan: 2008-2012.

CHAPITRE 14

POLLUTION ORGANIQUE DES EAUX DE BARRAGE DE L'EST ALGERIEN ET EFFET DE LA CHLORATION

S. ACHOUR*

Université de Biskra – Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur –
Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS)
Algérie

S. GUERGAZI

Université de Biskra – Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur –
Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS)
Algérie

N. HARRAT

Université de Biskra – Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur
–Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS)
Algérie

RESUME

La qualité physico-chimique, notamment organique, a été étudiée pour 11 eaux de barrage du Nord-Est et du Sud-Est algérien. La réactivité de ces eaux vis-à-vis du chlore utilisé en désinfection a également été évaluée tout en observant les éventuelles corrélations entre cette réactivité et les caractéristiques minérales, et surtout organiques, de ces eaux. Leur réactivité vis-à-vis du chlore est appréhendée par la détermination des consommations en chlore et la formation de composés organohalogénés (tels que les trihalométhanes – THM et les organohalogénés totaux – TOX). Les résultats obtenus ont permis de montrer que les eaux prélevées et testées présentaient globalement une qualité moyenne, parfois médiocre et que la pollution y était très diversifiée. Certaines eaux ont présenté une minéralisation importante et une dureté élevée (les eaux du Sud-Est). Les eaux du Nord algérien ont surtout été caractérisées par des charges organiques

* Auteur correspondant : Pr. ACHOUR Samia – Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS), Université de Biskra – BP 145, RP, 07000, Biskra, Algérie
Email : samia.achour@larhyss.net – Tél. : (+213) 33 74 50 90 – Fax : (+213) 33 73 45 28

importantes, dont une fraction variable sous forme de substances humiques. La pollution organique, quantifiée par des paramètres globaux (tels que le carbone organique total – COT, la teneur en substances humiques et l'absorbance spécifique en ultraviolet – UV), aurait une origine à la fois naturelle et anthropique. Les concentrations en sels minéraux étaient non négligeables et révélaient la présence de quelques éléments dus à des rejets urbains et industriels, mais aussi à l'activité agricole. La chloration des eaux testées a induit des demandes en chlore importantes, du fait de la présence de composés fortement réactifs vis-à-vis du chlore (tels que l'azote ammoniacal, les substances humiques et les métaux). Toutes ces eaux semblent être le siège de nombreuses réactions compétitives qui peuvent mener à la formation de différents sous-produits suspectés d'être mutagènes, voire cancérigènes. Cet aspect a pu être mis en évidence par la détermination des potentiels de formation des trihalométhanés (PFTHM) et des organohalogénés (PFTOX) volatils et non volatils.

Mots clés : Eaux de barrage ; Est algérien ; matières organiques ; substances humiques ; chloration ; trihalométhanés ; organohalogénés totaux.

INTRODUCTION

En Algérie, l'eau constitue une denrée de plus en plus rare, vulnérable et difficilement renouvelable. Cette problématique met aussi l'accent sur les effets de la qualité des eaux sur les écosystèmes naturels mais surtout sur la santé publique. Il importe donc que les ressources en eau, déjà réduites, soient efficacement protégées contre toute nuisance (bactériologique ou chimique) et qu'elles soient traitées afin de produire une eau dont la qualité satisfait à des normes biologiques et physico-chimiques de potabilité.

Il n'est pas possible d'affirmer que les eaux naturelles algériennes (superficielles ou souterraines) aient pu faire, jusqu'à présent, l'objet d'analyses systématiques et régulières de contrôle de leur qualité ou de surveillance de pollution par certains effluents. Toutefois, les résultats de diverses études antérieures réalisées au laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS) de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Biskra (Algérie) ont pu donner un aperçu sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux algériennes (Achour et Moussaoui, 1993 ; Achour et Guergazi, 2002 ; Achour et al., 2008). Elles ont également mis en exergue une spécificité des problèmes de qualité en fonction de l'origine de la ressource hydrique (souterraine ou de surface) et de la localisation géographique de cette ressource. Ainsi, les eaux souterraines du pays resteraient encore relativement bien protégées, mais sont désormais insuffisantes face aux besoins grandissants. Ainsi, pour pourvoir à l'alimentation en eau potable (AEP) et à l'irrigation des grands périmètres, il a fallu avoir recours à la mobilisation des eaux de surface qui sont cependant de qualité médiocre et peuvent contenir des quantités non négligeables en matières organiques. Dans le cas de la plupart des eaux de barrage, les composés organiques de type humique semblent encore prépondérants et peuvent

représenter entre 60 et 90% du carbone organique total (COT) (Achour et Moussaoui, 1993 ; Achour et Guergazi, 2002). Mais, dans le cas de certains oueds¹, où se font des rejets tant urbains qu'industriels, ces substances naturelles ne représentent qu'au maximum 20 à 30% du COT, indiquant une pollution exogène plus complexe. Ces charges organiques croissantes conduiront à augmenter de plus en plus les doses de chlore nécessaires à la désinfection, ce qui mènera, à plus ou moins long terme, à de grands problèmes de toxicité chronique (tels qu'à des effets mutagènes et/ou cancérigènes), dus à la présence de composés organohalogénés (TOX) générés lors du traitement par chloration (Le Curieux et al., 1998 ; Rook, 1974 ; Santé Canada, 2006).

Au cours de la potabilisation des eaux de surface algériennes, l'usage du chlore peut se voir en préchloration et/ou en post-chloration. La chloration (par ajout d'eau de Javel ou par du chlore gazeux) étant l'unique procédé de désinfection utilisé en Algérie, l'impact de ce procédé de traitement a été observé sur quelques eaux de surface provenant de barrages de l'Est algérien.

Après la détermination des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux considérées, cette recherche s'est intéressée en particulier à la corrélation qui pourrait exister entre la charge organique, notamment de type humique, la composante minérale et les consommations en chlore par ces eaux. Le risque de formation de composés toxiques a pu par ailleurs être illustré par les valeurs des potentiels de formation des composés organohalogénés (PFTOX) lors de la chloration de ce type d'eaux.

MATERIELS ET METHODES

Echantillonnage

Les prélèvements d'eaux brutes de 11 barrages ont été effectués entre décembre 2005 et février 2006, à une profondeur de 15 à 30 cm de la surface de l'eau. La Figure 1 présente les différents sites de prélèvements au niveau des barrages étudiés. Le Tableau 1 présente les différents sites de l'étude ainsi que les dates de prélèvements.

Méthodes d'analyses physico-chimiques

Caractéristiques des eaux brutes

Les méthodes analytiques utilisées sont décrites par Rodier (2005) et APHA et al. (2005), ou dans les catalogues de l'appareillage utilisé. Elles sont aussi bien volumétriques, colorimétriques, spectrophotométriques que potentiométriques. Différents paramètres globaux ont ainsi été mesurés, tels que la température, le pH, la conductivité, la dureté ou titre hydrotimétrique (TH) , l'alcalinité ou titre alcalimétrique complet (TAC), les éléments minéraux majeurs (comme le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium

¹ Oued signifie, en langue arabe, rivière.

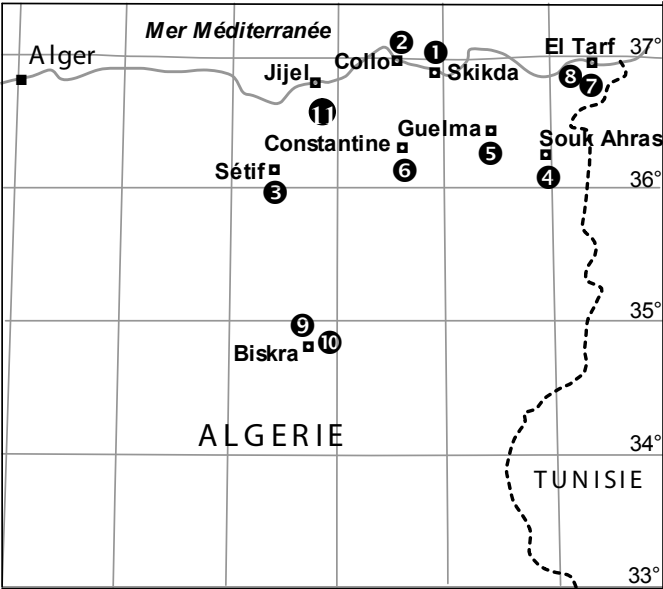


Figure 1. Situation géographique des barrages étudiés : 1. Zardezas, 2. Beni Zid, 3. Aïn Zada, 4. Aïn Dalia, 5. Hammam Debagh, 6. Hammam Ghrouz, 7. Chefia, 8. Mexa, 9. Fontaine des gazelles, 10. Foug El Gherza, 11. Beni Haroun

Tableau 1. Sites et dates de prélèvements des eaux de barrages de l'Est algérien

Eau de surface (Barrage)	Lieu	Date et heure de prélèvement
Barrage Zardezas	Harrouche (Wilaya de Skikda)	08/01/06 à 10h20
Barrage Beni Zid	Collo (Wilaya de Skikda)	08/12/05 à 11h20
Barrage Ain Zada	Aïn Zada (Wilaya de Setif)	09/12/05 à 10h15
Barrage Hammam Debagh	Hammam Debagh (Wilaya de Guelma)	04/01/06 à 10h20
Barrage Ain Dalia	Aïn Dalia (Wilaya de Souk Ahras)	07/01/06 à 10h25
Barrage Hammam Ghrouz	Athmania (Wilaya Constantine)	08/01/06 à 10h02
Barrage Chefia	Chefia (Wilaya d'El Tarf)	21/01/06 à 10h42
Barrage Mexa	Aïn Assel (Wilaya d'El Tarf)	21/01/06 à 12h35
Barrage Fontaine des Gazelles	Outaya (Wilaya de Biskra)	24/01/06 à 9h 45
Barrage Foug El Gherza	Biskra (Wilaya de Biskra)	26/01/06 à 10h40
Barrage Beni Haroun	Beni Harroun (Wilaya de Mila)	01/02/06 à 11h05

(Na⁺), les chlorures (Cl⁻) et les sulfates (SO₄²⁻) ou quelques polluants (incluant les nitrates, l'azote ammoniacal et le cadmium (Cd²⁺)). La turbidité a été mesurée par néphélométrie (Turbidimètre HACH). Les ions Na⁺ et potassium (K⁺) ont été dosés par photométrie d'émission de flamme (JENWAY CLINICAL PF P7). Les Cl⁻ et le Cd²⁺ ont été dosés par méthode potentiométrique grâce à une électrode spécifique aux ions chlorures (ELIT 8261 Cl 56075) et une électrode spécifique aux ions cadmium (ELIT 8241 Cd²⁺ 55670). Le dosage des ions SO₄²⁻, des ions manganèse (Mn²⁺), fer (Fe²⁺), nitrates (NO₃⁻), ammoniacale (NH₄⁺), nitrites (NO₂⁻), bromures (Br), phosphates (PO₄³⁻), cuivre (Cu²⁺) a été effectué par colorimétrie (photomètre HANNA C100 Multiparameter ion specific meter).

La charge organique globale a été caractérisée sur les eaux, préalablement filtrées sur membrane de porosité de 0,45 µm, par la mesure du COT avec l'appareil DOHRMANN DC 80. L'absorbance en UV à 254 nm a été déterminée sur un spectrophotomètre (JENWAY 6405 UV/Vis) avec un trajet optique de 1 cm. Le dosage des substances humiques a été effectué par la méthode des ajouts dosés à une longueur d'onde de 254 nm. Les teneurs initiales en substances humiques ont été évaluées grâce à des courbes d'étalonnage de l'absorbance en fonction des concentrations en mg/l de substances humiques ajoutées pour chaque eau.

Paramètres des eaux de barrages chlorées

Les essais réalisés en laboratoire ont eu pour but d'appréhender la réactivité des eaux testées par la détermination du potentiel de consommation en chlore (PCCl₂) et du potentiel de formation de trihalométhanes (PFTHM) et du PFTOX. Les chlorations ont été réalisées sur les différentes eaux préalablement filtrées à un taux de chlore de 20 mg/l et un temps de contact de 24 h pour la détermination des potentiels de réactivité.

Le chlore consommé a été déduit de la mesure du chlore résiduel par iodométrie. L'analyse des trihalométhanes (THM) a été effectuée par la méthode du Head Space, en chromatographique en phase gazeuse (Hewlett Packard 5840) équipée d'un injecteur automatique et d'un détecteur à capture d'électrons (Source ⁶³Ni). Les TOX sont analysés à l'aide de l'appareil DOHRMANN-XERIE DX20 par microcoulométrie. Les concentrations en TOX d'un échantillon sont donc données en masse équivalente de chlorures.

RESULTATS ET DISCUSSION

Qualité physico-chimique et charges organiques des eaux de barrages

Paramètres minéraux de qualité

Le Tableau 2 récapitule les gammes de valeurs des paramètres relatifs à la qualité minérale des eaux de barrages testées. Comparées aux normes recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organization, 2004), les valeurs de ces paramètres semblent indiquer une qualité moyenne des eaux, voire parfois médiocre.

Tableau 2. Paramètres minéraux de qualité des eaux de barrages de l'Est algérien

Paramètres	Valeurs	Moyenne
Température (°C)	12,50-15	14
pH	6,18-8,23	7,82
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	210-1440	684
Turbidité (UNT)	4,20-23	9,10
Dureté -TH (°F)	15-150	59,50
Alcalinité -TAC (°F)	4,10-18,5	12,50
Chlorures - Cl^- (mg/l)	42-274	111
Sulfates - SO_4^{2-} (mg/l)	39-185	117
Sodium - Na^+ (mg/l)	33-172	87
Potassium - K^+ (mg/l)	1,60-12	4,10
Fer - Fe^{2+} (mg/l)	0,02-0,29	0,16
Manganèse - Mn^{2+} (mg/l)	<0,10-0,30	0,04
Nitrates - NO_3^- (mg/l)	1,30-29	6,70
Nitrites - NO_2^- (mg/l)	0,10-2	0,42
Ammoniaque - NH_4^+ (mg/l)	0,04-1,31	0,24
Phosphates - PO_4^{3-} (mg/l)	0,07-2,75	0,71
Bromures - Br (mg/l)	0,01-0,48	0,14
Cuivre - Cu^{2+} ($\mu\text{g}/\text{l}$)	4-300	40
Cadmium - Cd^{2+} ($\mu\text{g}/\text{l}$)	9-110	31

Pour toutes les eaux, le pH est voisin de la neutralité indiquant la présence d'une alcalinité bicarbonatée. Des variations appréciables de la qualité sont toutefois notées entre les différentes eaux testées. Ainsi, les résultats ont pu montrer que les conductivités enregistrées correspondent à une minéralisation importante pour les eaux du Sud du pays (barrages de Foug El Gherza et de Fontaine des gazelles) puisque celles-ci dépassent 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pour ces mêmes barrages, les duretés (130 à 150 °F) excèdent très largement la norme de l'OMS 50 °F (World Health Organization, 2004) et résultent probablement de la nature géologique des terrains.

Concernant les barrages du Nord, les eaux sont apparues comme mi-dures et les conductivités relevées fluctuent entre 210 et 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sauf pour le barrage de Beni Haroun qui a présenté une conductivité de 1018 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce barrage s'est avéré être le plus pollué du fait de la mauvaise qualité minérale de ses eaux. Il a présenté la plus forte teneur en nitrates et en azote ammoniacal ainsi qu'en ions phosphates, provenant essentiellement d'une pollution de l'eau par des rejets d'eaux usées. Les eaux du barrage de Beni Zid sont celles qui ont indiqué la meilleure qualité minérale parmi les eaux testées.

Quant aux éléments métalliques, les teneurs en cuivre sont faibles mais décelables dans la plupart des échantillons, alors que le cadmium est présent à des teneurs dépassant largement la norme de potabilité de 3 $\mu\text{g}/\text{l}$ (WHO, 2004), ce qui ne pourrait résulter que d'une pollution industrielle au niveau de la côte Est du Nord de l'Algérie. D'assez faibles teneurs en fer et en manganèse sont relevées avec néanmoins des plus fortes valeurs dans les eaux du Sud (Biskra) et pourraient s'expliquer surtout par la nature des terrains dans cette région. Pour ces mêmes eaux, les teneurs en bromures dépassant 0,1 mg/l s'expliqueraient également par une origine géochimique. Mais pour les eaux de la région côtière de Skikda, les fortes concentrations en bromures (0,19 à 0,48 mg/l) pourraient être dues à des intrusions marines.

Par ailleurs, les valeurs des turbidités sont apparues comme variables selon le point de prélèvement. Les barrages de Beni Haroun, Mexa et Chefia ont présenté les plus fortes turbidités (9,6 à 23 UNT) du fait que ces barrages soient situés dans des régions très boisées. Ainsi, cette turbidité pourrait être essentiellement de nature organique, ce qui peut induire une augmentation des doses de réactifs nécessaires au traitement de ce type d'eau en station de potabilisation.

Charges organiques des eaux de barrage

Les Figures 2, 3 et 4 récapitulent les résultats obtenus concernant la charge organique des eaux testées, exprimée en COT (Figure 2) et en concentration de substances humiques (SH) (Figure 3) qui représentent généralement l'essentiel de la matière organique naturelle (MON).

Les plus fortes valeurs en matières organiques, exprimées en COT, sont enregistrées au niveau des barrages de Mexa, Beni Haroun, Chefia et Hammam Debagh et se situent entre 9,4 et 15,88 $\text{mg C}/\text{l}$. Pour le reste des barrages, les valeurs sont nettement plus faibles et varient entre 3,35 et 6,4 $\text{mg C}/\text{l}$. Les plus faibles valeurs correspondent aux eaux du Sud algérien (barrages de Foug el Gherza et Fontaine des Gazelles).

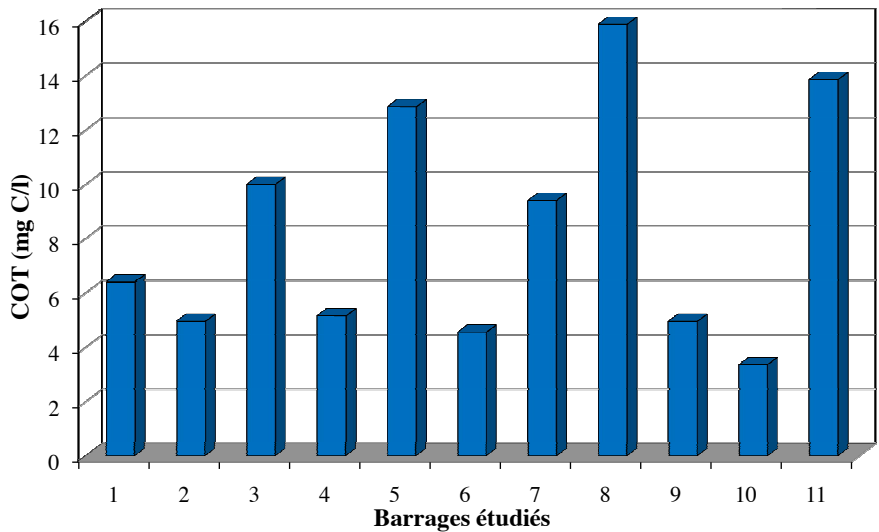


Figure 2. Charge organique des eaux de barrage de l'Est algérien, exprimée en COT :
1. Zardezas, 2. Beni Zid, 3. Aïn Zada, 4. Aïn Dalia, 5. Hammam Debagh, 6. Hammam Ghrouz, 7. Chefia, 8. Mexa, 9. Fontaine des gazelles, 10. Foug El Gherza, 11. Beni Haroun

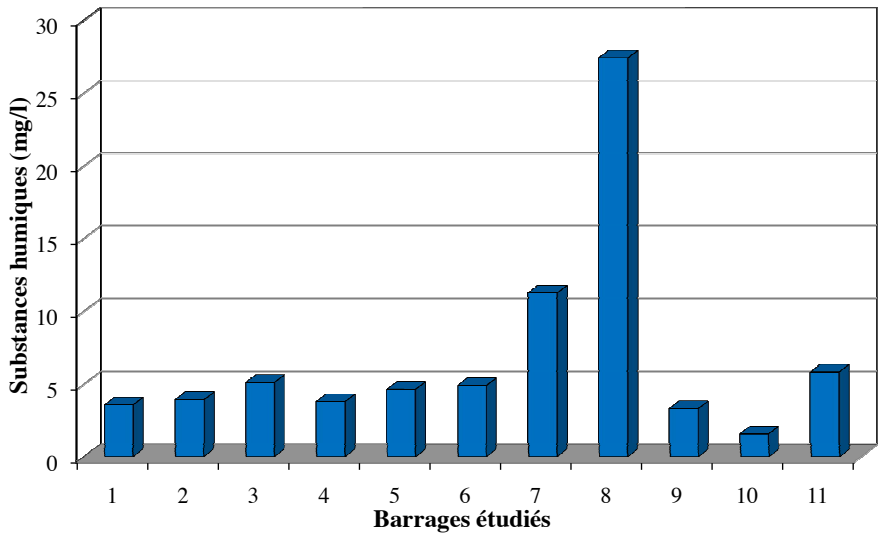


Figure 3. Concentration en substances humiques (SH) des eaux de barrage de l'Est algérien : 1. Zardezas, 2. Beni Zid, 3. Aïn Zada, 4. Aïn Dalia, 5. Hammam Debagh, 6. Hammam Ghrouz, 7. Chefia, 8. Mexa, 9. Fontaine des gazelles, 10. Foug El Gherza, 11. Beni Haroun

Les teneurs en SH sont importantes (Figure 3), supérieures à 11 mg SH/l, dans les eaux des barrages de Chefia et Mexa, alors que pour les eaux du Sud algérien, les teneurs en SH ne dépassent pas 3,5 mg SH/l. Mais d'une façon générale, la matière organique exprimée aussi bien en COT ou en SH apparaît comme non négligeable, notamment pour les eaux du Nord du pays, du fait d'une pollution naturelle (due à la végétation en décomposition), mais aussi de pollutions d'origine exogène (telles que les rejets urbains et industriels et les pratiques agricoles). Une étude antérieure (Achour et Moussaoui, 1993), réalisée sur plusieurs eaux de surface du Nord du pays (Keddara, Souk El Djemâa et oued Sebaou), avait montré que la matière organique était en grande partie non biodégradable, avec une proportion supérieure à 60% en matériel humique pour les eaux de barrage. Dans le cadre de cette étude et si l'on admet que le pourcentage en carbone dans la composition des SH avoisine 50% (Thurman, 1985), le matériel humique représenterait entre 40 et 86% du COT pour les eaux de Beni Zid, Aïn Zada, Chefia et Mexa. Cependant, la matrice organique des eaux des barrages de Beni Haroun et Hammam Debagh pourrait s'avérer plus complexe et comporter de nombreuses autres substances organiques non humiques naturelles ou d'origine anthropique. La détermination du paramètre SUVA (*Specific Ultraviolet Absorption*) pourrait étayer ces hypothèses. Ce paramètre, exprimé en l/mg.m, se calcule par la combinaison des valeurs de la Carbone Organique Dissous (COD, correspondant à la valeur du COT sur les eaux brutes filtrées) et de l'absorbance en ultraviolet (UV) à 254 nm par la relation suivante (U.S. Environmental Protection Agency, 1999 ; Potter et Wimsatt, 2005) :

$$\text{SUVA} = (\text{UV}_{254} / \text{COD}) \times 100 \quad (1)$$

Les valeurs de ce paramètre (Figure 4) varient entre 1,33 et 3,16 l/mg.m et seraient d'une part un bon indicateur du degré d'aromaticité de la matière organique et d'autre part du contenu humique de la charge organique des différentes eaux. Les valeurs obtenues du SUVA semblent indiquer que la proportion de composés organiques à structure aromatique par rapport à la charge organique globale serait non négligeable pour toutes les eaux étudiées. Les valeurs les plus faibles du SUVA (pour les barrages de Beni Haroun, Hammam Debagh, Zardezas et Aïn Dalia) indiqueraient que la majeure partie de la matière organique de ces eaux serait non humique et pourrait provenir de pollutions variées. Les valeurs les plus élevées du SUVA (2,52 à 3,16 l/mg.m) ont été observées dans le cas des eaux chargées en matériel humique, l'absorbance en UV étant principalement due à la présence des SH, notamment à leur structure polyphénolique. Ce type de composés organiques, fortement réactifs vis-à-vis du chlore (Dore, 1989), conduit à la formation de sous-produits potentiellement toxiques pour l'homme (Meier, 1988).

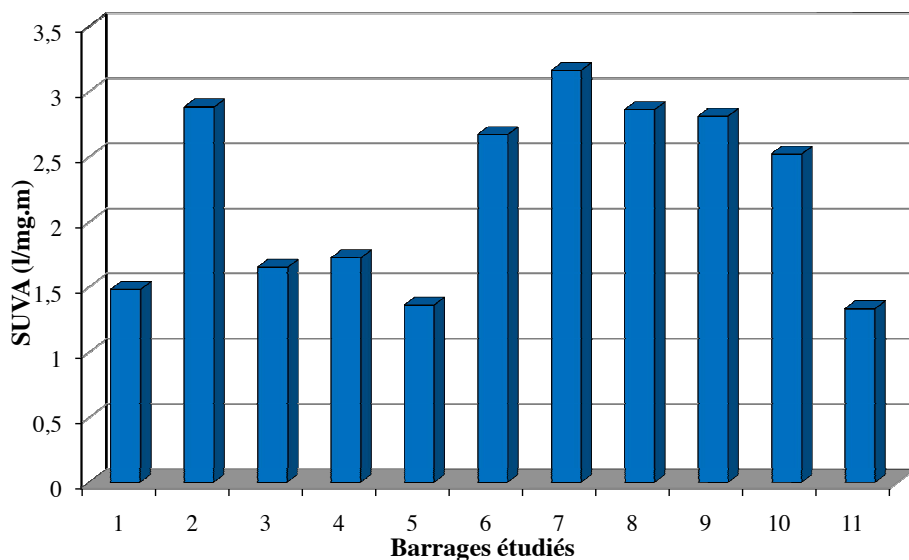


Figure 4. Détermination du paramètre SUVA (Specific Ultraviolet Absorption) des eaux de barrage de l'Est algérien : 1. Zardezas, 2. Beni Zid, 3. Aïn Zada, 4. Aïn Dalia, 5. Hammam Debagh, 6. Hammam Ghrouz, 7. Chefia, 8. Mexa, 9. Fontaine des gazelles, 10. Foug El Gherza, 11. Beni Haroun

Potentiels de réactivité des eaux vis-à-vis de la chloration

La chloration de l'eau est utilisée pour désinfecter l'eau depuis le début du XX^{ème} siècle, avec des résultats bénéfiques sur la santé publique. Mais depuis plusieurs décennies, la connaissance de la réactivité du chlore avec les constituants de l'eau a progressé et elle a permis d'évaluer non seulement les avantages de la chloration mais aussi ses effets négatifs (World Health Organization, 1998 ; White, 1992 ; U.S. Environmental Protection Agency, 2005). En effet, ce procédé peut générer, dans l'eau traitée, de nombreux sous-produits toxiques pour l'homme. Parmi ces derniers, les THM sont des composés TOX volatils, dont les plus connus sont le chloroforme majoritaire (CHCl_3), le bromodichlorométhane (CHCl_2Br), le dibromochlorométhane (CHClBr_2) et le bromoforme (CHBr_3). Ces THM constituent un diagnostic de la présence potentielle des autres composés de la famille des sous-produits de la chloration et leurs concentrations sont utilisées comme indicateur toxique d'une eau chlorée (Gruau, 2004). Quant à la mesure du TOX, elle permet d'estimer la quantité totale de TOX aussi bien volatils que non volatils.

Dans les stations de traitement algériennes, la chloration s'applique aussi bien en préoxydation qu'en désinfection (phase finale du traitement). Dans les eaux chlorées des barrages de Keddara et Souk El Djemâa dans la région d'Alger, des teneurs variant de 62 à 93 $\mu\text{g/l}$ en chloroforme ont été décelées ainsi que des potentiels de formation de TOX très importants, de l'ordre de 1000 $\mu\text{g Cl/l}$ (Achour et Moussaoui, 1993).

Dans le cas des eaux de la présente étude, le Tableau 3 récapitule les résultats visant la détermination du PCCl_2 , du PFTHM et du PFTOX. Ils correspondent à la capacité maximale de réactivité des eaux vis-à-vis du chlore pour des conditions extrêmes (temps de contact de 24 h et dose de chlore de 20 mg/l).

Tableau 3. Potentiels de réactivité vis-à-vis du chlore des eaux de barrage de l'Est algérien

Barrages	PCCl_2 (mg Cl_2 /l)	PFTHM ($\mu\text{g/l}$)	PFTOX ($\mu\text{g Cl}^-/\text{l}$)
Zardezas	12,30	65	726
Beni Zid	7,58	67	493
Ain Zada	9,55	72	721
Ain Dalia	9,35	46	489
Hammam Debagh	10,46	62	860
Hammam Ghrouz	9,90	81	608
Chefia	10,32	93	792
Mexa	12,48	112	822
Fontaine des gazelles	6,00	45	450
Foum El Gherza	5,80	39	471
Beni Haroun	16,22	78	985

Demandes en chlore

Les consommations en chlore ou demandes en chlore des eaux de barrage étudiées sont considérables et varient de 5,80 à 16,22 mg Cl_2 /l. Les différences observées entre les diverses eaux pourraient être corrélables avec leurs caractéristiques physico-chimiques, et plus particulièrement avec les teneurs et la nature des constituants tant organiques que minéraux.

La demande en chlore la plus élevée est enregistrée au niveau de l'eau du barrage de Beni Haroun qui présente des concentrations élevées en composés consommateurs de chlore (tels que les matières organiques, l'ammoniaque et les bromures).

Par ailleurs, les eaux comportant des charges organiques de type humique importantes (comme pour les barrages de Chefia et Mexa) présentent des demandes en chlore plus élevées que les eaux à faible teneur en SH (comme pour les barrages de Foum El Gherza, Fontaine des gazelles et Beni Zid). Les eaux de Hammam Debagh, Zardezas, Ain Zada et Ain Dalia sont caractérisées par d'assez faibles proportions en matières organiques

d'origine humique (18 à 28%) et de faibles valeurs de SUVA, les consommations en chlore importantes peuvent alors être expliquées par la présence de constituants organiques non humiques mais suffisamment réactifs avec le chlore.

Pour la plupart des eaux, il est également noté une bonne corrélation entre le COT des eaux brutes et leurs potentiels de consommation en chlore (Figure 5), ce qui confirme l'incidence importante de la présence de la matière organique sur la réactivité des eaux de surface au cours de la chloration.

Les différences de réactivité observées entre les eaux testées peuvent aussi être attribuées à la présence de certains éléments minéraux pouvant conditionner les consommations en chlore. Ainsi, des éléments minéraux réducteurs, tels que l'ammoniaque, les bromures, le fer ou le manganèse, peuvent conduire à de nombreuses réactions entrant en compétition avec les réactions chlore/matières organiques (Dore, 1989 ; Achour et Guergazi, 2002 ; Guergazi, 2006). Par ailleurs, à teneurs voisines en matières organiques et en azote ammoniacal, les fortes teneurs en chlorures et sulfates pourraient induire une diminution de la consommation par une baisse de l'activité des entités chlorantes (Achour et Guergazi, 2002). De plus, les eaux à forte turbidité organique peuvent créer une demande importante en chlore (Otson et al., 1981). Concernant les eaux qui ont été considérées dans cette étude, cette corrélation a pu être mise en évidence pour les eaux présentant à la fois de fortes valeurs en turbidité et en matières organiques de type humique (Figure 6).

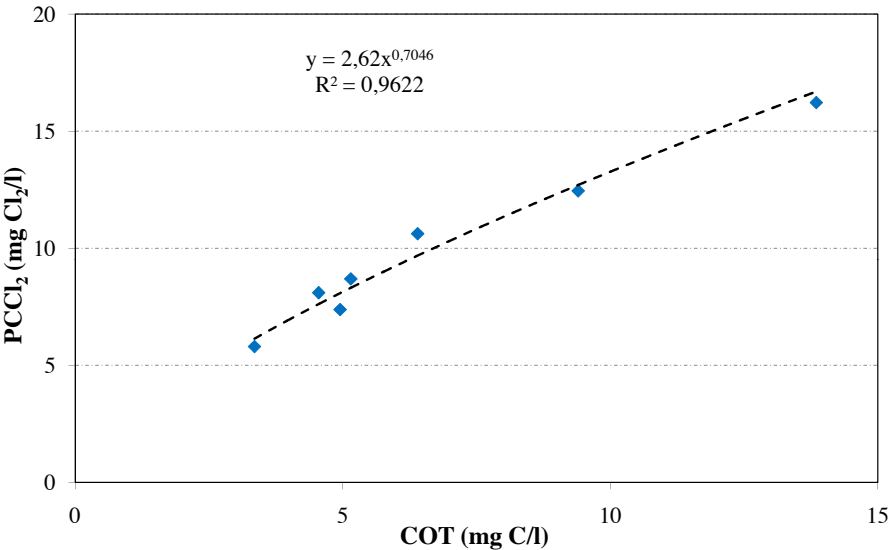


Figure 5. Corrélation entre les consommations en chlore et le COT de quelques eaux de barrage de l'Est algérien

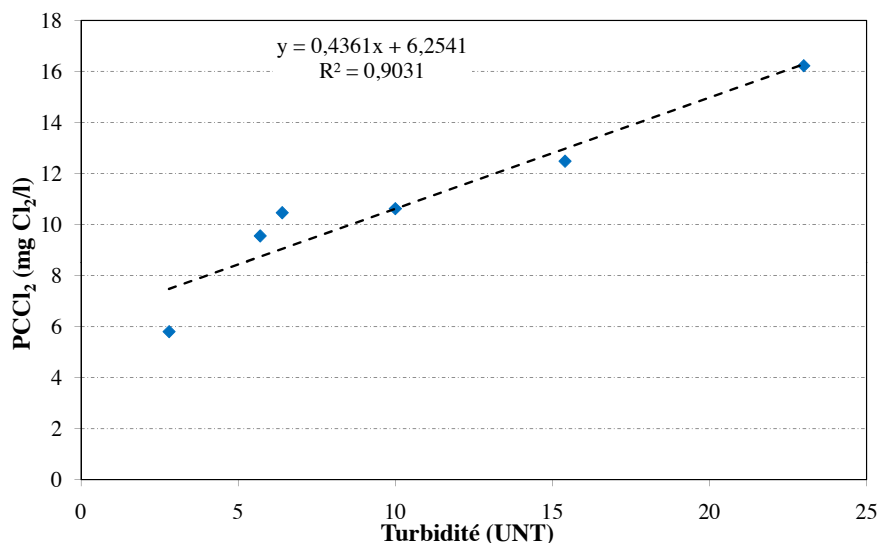


Figure 6. Corrélation entre les potentiels de consommation en chlore et la turbidité de quelques eaux de barrage de l'Est algérien

Potentiels de formation de sous-produits halogénés

Les potentiels de formation en THM les plus élevés sont observés pour les eaux les plus riches en composés organiques, notamment pour celles dont la charge organique est essentiellement naturelle (barrages de Beni Zid, Chefia, Mexa, Aïn Zada et Hammam Ghrouz). L'évolution de l'absorbance en UV après 24 h, caractéristique de l'aromaticité, indique qu'une fraction de la matière organique présente a pu être dégradée en structures aliphatiques, parmi lesquelles les THM. En effet, la diminution des absorbances UV après chloration a varié de 21 à 70%, selon le type d'eau et la nature de la matrice organique.

Pour toutes les eaux testées, le chloroforme a été le THM majoritairement formé. Cependant, la proportion en THM bromés, notamment en bromoforme, a sensiblement augmenté avec celle de la teneur initiale en bromures dans les eaux, comme cela a été le cas pour les eaux du Sud (barrages de Foug El Gherza et Fontaine des Gazelles) ou celles du littoral (barrages de Zardezas et Beni Zid). Les valeurs déterminées constituent bien sûr les concentrations maximales en THM pouvant se former lors de la chloration des eaux de surface. Elles restent inférieures aux valeurs guides recommandées (200 µg/l pour le chloroforme, 60 µg/l et 100 µg/l pour les dérivés bromés) (World Health Organization, 1998). Toutefois, les THM ont été classés comme pouvant être cancérogènes, suite à des études sur des animaux et à des données épidémiologiques sur les êtres humains (World Health Organization, 1998 ; Santé Canada, 2006). Les différentes réglementations recommandent alors que les concentrations en THM soient réduites à un niveau aussi bas que possible, mais sans compromettre l'efficacité de la désinfection de l'eau. Ces THM

ne représentent cependant que 5 à 20% de l'ensemble des dérivés TOX formés lors de la chloration (Legube et al., 1990). Des haloacides, de même que différents haloacétonitriles, halocétones, chlorophénols et furanones, dont la mutagénicité pourrait représenter plus de 50% de l'activité mutagène totale quantifiée sur des eaux chlorées, peuvent être présents (Lecurieux et al., 1998 ; Meier, 1988). La mesure des TOX des différentes eaux de cette étude indique des valeurs élevées correspondant à la formation de produits de substitution chlorés ou bromés et qui évoluent globalement dans le même sens que les potentiels de consommation en chlore. Parmi les précurseurs potentiels de TOX, les SH jouent évidemment un rôle fondamental. Cependant, d'autres composés organiques communément présents dans les eaux naturelles (tels que les algues et les acides aminés) pourraient générer un grand nombre de sous-produits dus à la chloration.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de déterminer la qualité physico-chimique de plusieurs eaux de barrage du Nord-Est et du Sud-Est algérien, ainsi que d'examiner son impact sur un traitement de potabilisation, la chloration. Nous avons pu quantifier la pollution minérale et surtout organique de ces eaux par différents paramètres de qualité, que nous avons confrontés aux normes de potabilité.

Mise à part l'eau du barrage de Beni Zid, toutes les eaux ont présentés des minéralisations et des duretés assez élevées, notamment pour les eaux du Sud-Est (barrages de Fom El Gherza et Fontaine des gazelles). L'eau du barrage de Beni Haroun est apparue comme la plus polluée parmi celles qui ont été testées. Il a été décelé des teneurs importantes en éléments minéraux, tels que l'ammoniaque, les nitrates, les phosphates et des métaux lourds (cadmium et cuivre), caractéristiques d'une pollution d'origine anthropique (eaux usées urbaines et industrielles, pratiques agricoles) et d'une dégradation évidente de la qualité de cette eau qui est, néanmoins, utilisée après traitement comme eau de boisson.

L'analyse de la matière organique présente dans toutes les eaux prélevées a mis en évidence que les charges organiques pouvaient être considérables et différer d'une eau à une autre. Les résultats obtenus ont montré que la proportion de composés organiques d'origine humique par rapport au COT variait dans une gamme très large, de 18 à 86%. Les valeurs de l'absorbance spécifique en UV ont évolué dans le même sens, indiquant que la matrice organique des eaux pouvait être complexe et renfermer de nombreux composés de structures variées et d'origines aussi bien naturelles qu'exogène.

La chloration en laboratoire des eaux de barrage a permis de tester leur réactivité vis-à-vis du chlore qui est utilisé dans toutes les stations de traitement algériennes. La chloration des eaux les plus chargées en matières organiques a abouti à des potentiels de réactivité importants vis-à-vis du chlore. Tous ces potentiels (PCCl_2 , PFTHM ou PFTOX) semblent corrélables à la qualité physico-chimique des eaux testées. Les demandes en

chlore pourraient être conditionnées par la nature et la quantité de matières organiques, mais aussi par la composition minérale de ces eaux (due à l'azote ammoniacal, aux bromures, aux métaux, aux chlorures et aux sulfates) ainsi que par la turbidité d'origine organique dans les régions à végétation plus dense. A travers les résultats concernant la détermination des THM et de l'ensemble des TOX volatils et non volatils, il apparaît que les eaux sont le siège d'un grand nombre de réactions qui peuvent mener à la formation de sous-produits de la chloration suspectés d'être mutagènes et cancérigènes. Les schémas de réaction du chlore avec les diverses substances contenues dans ces eaux de surface semblent complexes et peuvent difficilement être prévisibles au vue de la progression de la dégradation de leur qualité et de l'insuffisance de leur protection vis-à-vis des pollutions dues aux activités humaines.

Le chlore est efficace en tant que désinfectant et peut garantir la qualité microbiologique des eaux distribuées, cependant les gestionnaires doivent aussi prendre en considération les risques à long terme liés à la formation des TOX.

REFERENCES

Achour S. et Moussaoui K. (1993) La chloration des eaux de surface algériennes et son incidence sur la formation de composés organohalogénés. *Environ. Technol.*, 14, 885-890.

Achour S. et Guergazi S. (2002) Incidence de la minéralisation des eaux algériennes sur la réactivité de composés organiques vis-à-vis du chlore. *Rev. Sci. Eau*, 15,3, 641-660.

Achour S., Youcef L. et Guergazi S. (2008) Qualité physico-chimique des eaux souterraines et superficielles du Sahara septentrional oriental algérien. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, 311, 79-84.

APHA, AWWA et WEF (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21^e ed. American Public Health Association, American Water Works Association et Water Environment Federation, Washington, DC.

Dore M. (1989) Chimie des oxydants et Traitement des eaux, Ed. Lavoisier, Paris, 528 p.

Gruau G. (2004) Les sous-produits chlorés dans les eaux destinées à l'alimentation humaine. Facteurs de formation. Impacts sur la santé. Evaluation des risques dans le cas de la Bretagne, Rapport DRASS et Région Bretagne, France, 47 p.

Guergazi S. (2006) Influence de la minéralisation sur l'action d'oxydants vis-à-vis de la matière organique des eaux naturelles, Thèse de Doctorat en Sciences Hydrauliques, Université de Biskra, Algérie, 184 p.

Le Curieux F., Erb F. et Marzin D. (1998) Identification de composés génotoxiques dans les eaux de boisson. *Rev. Sci. Eau*, 11, 103-118.

Legube B., Xiong F., Croue J.P. et Dore M. (1990) Etude sur les acides fulviques extraits d'eaux superficielles françaises : Extraction, caractérisation et réactivité avec le chlore. *Rev. Sci. Eau*, 3, 399-424.

Meier J.R. (1988) Genotoxic activity of organic chemicals in drinking water. *Mutat. Res.*, 196, 211-245.

Otson R., Williams D.T. et Bothwell P.D. (1981) Comparison of trihalomethane levels and other water quality parameters for three treatment plants on the Ottawa River. *Environ. Sci. Technol.*, 15, 1075-1087.

Potter B.B. et Wimsatt J.C. (2005) Method 415.3-Measurement of Total Organic Carbon and Specific UV absorbance at 254 nm in source water and drinking water. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Washington, DC, USA, 56 p.

Rodier J. (2005) L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, Ed. Dunod, 8^e Edition, Paris, 1384 p.

Rook J.J. (1974) Formation of haloforms during chlorination of natural waters. *J. Water Treat. Exam.*, 23, 234-243.

Santé Canada (2006) Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, Document technique – Les Trihalométhanes. Santé Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 75 p.

Thurman E.M. (1985) Developments in biogeochemistry: Organic Geochemistry of natural waters. Dordrecht: Nijhoff M. Ed., Junk Publishers, Germany, 497 p.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1999) Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, EPA 815-R-99-014, EPA Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), USA.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2005) Technologies and Costs. Document for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule and Final Stage 2. Disinfectants and Disinfection By-products Rule, Office of Water (4606-M) EPA 815-R- 05-013, Environmental Protection Agency (USEPA), USA.

White G.C. (1992) Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants, 3rd ed. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA, 1200 p.

World Health Organization (1998) Guidelines for drinking water quality, 2nd ed., Vol. 2, Health criteria and other supporting information-trihalomethanes, World Health Organization (WHO) ed., Geneva.

World Health Organization (2004) Guidelines for drinking water quality, volume 1, recommendations, 3rd Edition, Ed. World Health Organization (WHO), Genève, Suisse.

CHAPITRE 15

FLUOR ET POSSIBILITES DE TRAITEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DU SAHARA SEPTENTRIONAL ALGERIEN

S. ACHOUR*

Université de Biskra – Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur –
Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS)
Biskra, Algérie

L. YUCEF

Université de Biskra – Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur –
Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS)
Biskra, Algérie

RESUME

Le problème de la fluorose a été signalé à l'état d'endémie dans le Sud algérien, mais plus spécialement dans le Sahara septentrional oriental. La cause de cette toxicité chronique est essentiellement due à la teneur élevée en fluor des eaux de consommation dans ces régions. En effet, les concentrations peuvent atteindre 3 à 4 mg/l et dépasser ainsi les normes de potabilité. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'étude de la qualité des eaux souterraines de cette zone (Biskra, Ouargla, Souf et Tougourt) et de la présence du fluor. Il s'agit également d'étudier les possibilités de défluoruration des eaux souterraines naturellement fluorées provenant de cette région. Pour cela, plusieurs procédés de traitement ont été considérés : précipitation chimique à la chaux, coagulation-floculation au sulfate d'aluminium, et adsorption sur la bentonite brute et activée de Maghnia. Au cours des essais de défluoruration par la chaux et le sulfate d'aluminium, nous nous sommes intéressés à la détermination de la dose optimale du réactif défluorant et au suivi de la qualité physico-chimique de chaque eau en fin de traitement. La comparaison des deux procédés a montré que les doses de réactifs à utiliser sont élevées, mais qu'il est

* Auteur correspondant : Pr. ACHOUR Samia – Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS), Université de Biskra – BP 145, RP, 07000, Biskra, Algérie
Email : samia.achour@larhyss.net – Tél. : (+213) 33 74 50 90 – Fax : (+213) 33 73 45 28

possible de ramener les teneurs en fluor à des valeurs conformes aux normes. Les résultats des essais concernant l'utilisation de la bentonite brute puis activée chimiquement sont également discutés. La bentonite de Maghnia activée pendant 3 h et à un taux massique (acide/bentonite) de 0,2 permet d'aboutir à des teneurs résiduelles en fluor conformes aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) relatives à la région d'étude.

Mots clés : Fluor ; chaux ; sulfate d'aluminium ; bentonite ; eaux souterraines ; Sud algérien.

INTRODUCTION

Le fluor (F) est un halogène comme le chlore, le brome et l'iode. Sa masse atomique est de 19 et son nombre atomique est égal à 9. C'est un élément universellement répandu dans la croûte terrestre, mais il ne se rencontre jamais à l'état libre dans la nature. En raison de sa forte électronégativité et sa grande réactivité chimique, il se présente sous forme de fluorures. La forte affinité des ions fluorures avec les tissus calcifiés, en particulier les dents et les tissus osseux, est à la base de leur intérêt en santé publique (Dean, 1934 ; Fawell et al., 2006).

Dans la nature, les fluorures sont présents dans de nombreuses roches, telles que la fluorine, la cryolite, la fluoroapatite, les micas, la topaze et la tourmaline, et sont retrouvés par conséquent dans l'eau de boisson à des concentrations variables suivant les roches traversées. Certains aliments particulièrement riches en fluorures (tels que le thé, les dattes, le manioc et les poissons) peuvent également contribuer à la quantité totale de fluor ingérée par jour par les êtres humains. Cette quantité serait néanmoins extrêmement variable selon les individus, la composition du régime alimentaire et la teneur en fluorures de l'eau utilisée pour la cuisson des aliments (Organisation Mondiale de la Santé, 1985). L'apport anthropique en fluorures au cycle de l'eau est généralement représenté par les poussières et les fumées des industries de phosphates, du verre ou de l'aluminium, ainsi que par l'utilisation de pesticides et d'engrais phosphatés en agriculture.

L'absorption d'une faible quantité de fluorures (0,6 à 1,2 mg/l selon les conditions climatiques) dans l'eau de boisson diminue la sensibilité de la dentition à la carie. Le fluor est utilisé aussi en thérapeutique contre l'ostéoporose qui consiste en une déminéralisation squelettique. Cependant, lorsque le fluor est apporté en quantité dépassant les normes, il est susceptible de provoquer chez l'homme des intoxications connues sous le nom de fluoroses. Une toxicité aiguë est généralement la conséquence d'une ingestion délibérée ou accidentelle de dérivés ou de composés fluorés, en particulier en milieu industriel (Organisation Mondiale de la Santé, 1986). Dans les régions où l'eau et les sols sont riches en fluor, la toxicité est chronique et se manifeste à long terme. Les effets toxiques sont des fluoroses dentaires et/ou squelettiques présentes à l'état endémique le plus souvent dans les régions tropicales et subtropicales. Elles sont fréquemment compliquées par un déficit en calcium et par la malnutrition (carence en protéines) (Azout et Abraham, 1978 ; Organisation Mondiale de la Santé, 1986).

Ces fluoroses sont largement répandues dans diverses régions du monde (telles que les Etats-Unis d'Amérique, l'Inde, la Chine, le Sénégal, l'Afrique du Sud et le Maghreb), pour lesquelles les eaux de boisson ont des teneurs en fluorures dépassant les normes. Ces normes, établies pour limiter la concentration en fluor dans les eaux de consommation, prennent en compte l'aggravation des effets toxiques par le climat de la zone considérée, et en particulier les températures maximales diurnes (Fawell et al., 2006). Dans les régions à climat semi-aride à aride, où les eaux souterraines représentent les principales ressources hydriques, une teneur en fluorures comprise entre 0,6 et 0,8 mg/l est recommandée pour les eaux d'alimentation. Les eaux du Sud algérien, et notamment la région orientale du Sahara septentrional, présentent le plus souvent des teneurs supérieures à 1 mg/l pour les nappes les plus superficielles. Les nappes albiennes, beaucoup plus profondes et donc difficilement accessibles pour les besoins de l'alimentation en eau potable (AEP), peuvent cependant présenter des teneurs en fluor conformes aux normes (Achour, 1990 ; Achour et al., 2008 ; Bouchahm et Achour, 2008).

La prévention contre les fluoroses consistera donc soit en l'utilisation d'autres sources d'eaux ayant des teneurs faibles en fluorures, soit à traiter les eaux fluorées afin d'atteindre les normes de potabilité. La réduction des teneurs en fluorures dans les eaux de consommation est peu pratiquée à travers le monde, mais de nombreuses expérimentations en laboratoire permettent une mise au point des avantages et des inconvénients des différentes méthodes de défluoruration. Les procédés peuvent être classés en deux catégories : (i) ceux basés sur l'addition de réactifs chimiques provoquant la précipitation ou la co-précipitation des fluorures et (ii) ceux basés sur les échanges d'ions ou l'adsorption sur des matériaux adaptés (Agence française de Sécurité Sanitaire des Aliments, 2005 ; Mazounie et Mouchet, 1984).

L'objectif de ce travail est de contribuer à l'étude de la qualité des eaux souterraines de la région Est du Sahara septentrional et de la présence du fluor dans ces eaux, afin de mettre en évidence le problème auquel est exposé la population de cette région. Il s'agit également d'étudier les possibilités de défluoruration des eaux souterraines, naturellement fluorées provenant de cette région, ceci par précipitation chimique à la chaux et par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium, ainsi que par adsorption sur la bentonite brute et activée de Maghnia. Le choix des procédés étudiés s'est porté sur la mise en œuvre simple du traitement et les procédés économiques et efficaces pour l'élimination de teneurs relativement faibles car ne dépassant pas 3 à 4 mg/l en fluor dans les eaux de boisson du Sud algérien (Bouchahm et Achour, 2008).

PRESENCE DU FLUOR DANS LES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION ORIENTALE DU SAHARA SEPTENTRIONAL ALGERIEN

Aperçu sur les aquifères de la région d'étude

Le système aquifère saharien désigne la superposition de deux principales couches aquifères, dont la plus profonde est celle du Continental Intercalaire (CI), sous jacente à

celle du Complexe Terminal (CT). Ce système recouvre une étendue de plus d'1 million de km², dont 700 000 se trouvent en Algérie. Le sous-bassin oriental est le plus étendu et est caractérisé par l'absence de relation entre l'aquifère du CT et celui du CI. A l'heure actuelle, l'hydrogéologie de tout le système aquifère saharien est assez bien connue grâce à plusieurs études de synthèse, dont la plus importante est celle de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) (1972), actualisée en 1982. Le projet du système aquifère du Sahara septentrional (SASS) (Observatoire du Sahara et du Sahel, 2003) a également permis d'améliorer les connaissances géologiques et hydrogéologiques du bassin dans son ensemble, grâce à des sondages récents et par l'étude historique sur 50 ans de la piézométrie ainsi que celle de la salinité. Durant la dernière décennie, les techniques isotopiques appliquées en Algérie ont également contribué à différencier plusieurs types d'eaux dans les ensembles aquifères sahariens ainsi que leur évolution hydrogéochimique (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz et al., 2003). Le système aquifère saharien est ainsi reconnu et exploité par près de 8800 points d'eau, dont 6500 en Algérie. Certaines contraintes d'exploitation (telles que la grande profondeur et les températures élevées) font que seuls quelques forages exploitent la nappe du CI (soit les nappes des grés et albiennes) dans la région orientale. Les nappes les plus exploitées, par des forages moyennement profonds, sont celles du CT et représentées par trois unités aquifères :

- La nappe phréatique du Quaternaire ;
- La nappe des sables du Miopliocène et du Pontien ;
- La nappe des calcaires de l'Eocène et du Sénonien.

Fluor et fluoroses dans la région du Sahara septentrional algérien

Données sanitaires

En Algérie, le problème du fluor a été signalé pour la première fois par le docteur vétérinaire Henri Velu de l'Institut Pasteur en 1932. Par la suite, diverses enquêtes épidémiologiques (Pinet et al., 1961 ; Poey, 1976) ont permis de conclure que la zone orientale du Sahara septentrional constituait la région la plus exposée au risque fluoritique et ont donné une idée éloquent de l'endémie siégeant dans cette région. Dans la région du Souf, ces travaux ont montré que pratiquement toute la population était atteinte de fluorose dentaire (maladie nommée Darmous) et squelettique à divers degrés. En 1980, une étude de l'Institut National de Santé Publique (INSP), dont les chiffres publiés ont concerné le pourcentage de population atteinte de fluoroses (Aroua, 1981), a précisé un peu mieux l'importance de ces fluoroses dans le Sahara septentrional. En distinguant entre les localités de la zone Est et celles de la zone Ouest, les pourcentages sont, par exemple, de 44% pour Ouargla, 45% pour Meghāir, 36% pour Djemāa tandis que les villes situées à l'Ouest accusent des taux inférieurs à 4% (par exemple : 1,3% pour Ghardaïa et 2,5% pour El Goléa). Aucun chiffre n'est donné pour la région de Biskra bien que les manifestations de cette fluorose apparaissent chez beaucoup de personnes vivant dans cette région.

Tous ces travaux s'accordent par ailleurs à attribuer l'apparition de cette toxicité chronique aux fluorures contenus surtout dans les eaux de consommation et partiellement aux aliments riches en fluor (tels que le thé, les dattes et certains légumes arrosés par des

eaux hyperfluorées). Ainsi, ces études épidémiologiques, et malgré leurs statistiques réduites et incomplètes, peuvent donner une idée éloquente de l'endémie dans la partie orientale du Sahara septentrional.

Répartition des teneurs en fluorures dans la région orientale du Sahara septentrional

Les études, qui ont présenté les concentrations en fluorures des eaux de la région du Sahara septentrional algérien, ont le plus souvent été effectuées dans le cadre d'études épidémiologiques (Aroua, 1981 ; Poey, 1976) ou de travaux concernant des problèmes ponctuels de qualité d'eaux (Azout et Abraham 1978 ; Achour, 1990 ; Edmunds et al., 2003). Ces études sont donc, à ce jour, assez rares et disparates, et une seule étude de synthèse (Bouchahm et Achour, 2008) a été abordée dans le but de préciser la répartition des teneurs en fluorures. Des cartes d'isoteneurs en fluor ont pu être établies pour les nappes ne présentant pas de discontinuité sur la zone d'étude, notamment les nappes des sables et des calcaires du CT. Pour ces nappes, les concentrations en fluor dans les eaux de la région étudiée dépassent toutes les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Il a été également observé que la région Centre de l'oued¹ Rhir (Touggourt et El Hadjira) était la plus exposée au risque fluoritique du point de vue de la santé des habitants de la région (Bouchahm et Achour, 2008).

Par ailleurs, les diverses études s'accordent à distinguer les eaux superficielles du CT des eaux souterraines profondes du CI. D'une façon générale, la nappe albienne du CI est apparue comme moins chargée en fluor, avec une répartition des teneurs assez homogène de l'ordre de 0,4 à 0,8 mg/l (Achour et al., 2008) conformes aux normes de l'OMS relatives à la région (0,6 à 0,8 mg/l en fluor). Edmunds et al. (2003) indiquent également des valeurs entre 0,3 et 1,2 mg/l pour les eaux du CI algérien et tunisien, précisant que ces eaux étaient sous saturées en fluorine.

Les causes de la présence de fluor en excès dans les eaux du Sahara septentrional demeurent encore au stade des hypothèses. Toutefois, une origine exogène étant peu probable, les teneurs relevées dans les nappes de la région orientale semblent dues à la nature géologique des réservoirs. Mais par analogie avec certains bassins sédimentaires, l'hypothèse que ces teneurs élevées peuvent être attribuées à la fluorapatite ou à un lessivage d'argiles très abondantes dans les formations étudiées peut être émise. L'enrichissement en fluor pourrait être réglé surtout par le produit de solubilité de la fluorine et donc la saturation vis-à-vis de la fluorine (Bouchahm et Achour, 2008 ; Travi, 1993).

MATERIELS ET METHODES

Echantillonnage et méthodes de dosage

L'échantillonnage des eaux de forages a été réalisé au cours de plusieurs campagnes dans le cadre d'études entreprises par le laboratoire en hydraulique souterraine et de surface

¹ Oued signifie, en langue arabe, rivière.

(LARHYSS) de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Biskra, entre 2005 et 2007. Les prélèvements ont essentiellement concerné les eaux destinées à l'AEP. Pour chaque région considérée (Biskra, Ouargla, El Oued-Souf, Touggourt), différents niveaux aquifères du CI ou CT ont été échantillonnés. La Figure 1 présente la situation géographique de la région d'étude.

Les paramètres physico-chimiques des eaux (tels que le pH, la conductivité, la dureté et l'alcalinité) ont été déterminés par les méthodes standard d'analyse (Rodier, 2005). Le fluor en solution a été dosé par la méthode potentiométrique en utilisant une électrode spécifique aux ions fluorures (Elit 8221F- 55907).

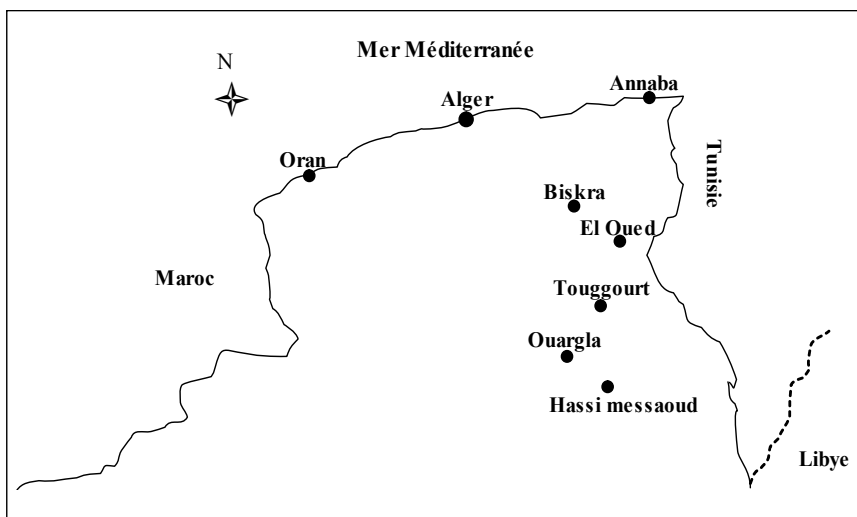


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Description des essais de défluoruration des eaux souterraines

Essais de défluoruration par la chaux et le sulfate d'aluminium

Solutions des réactifs défluorants

La solution mère de chaux, Ca(OH)_2 , a été préparée sous forme de lait de chaux en réalisant une suspension de 10 g/l. Le réactif coagulant utilisé est le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) pour lequel une solution mère de 10 g/l a été préparée périodiquement.

Essais de défluoruration par Jar Test

Les essais de défluoruration par la chaux et le sulfate d'aluminium sont effectués sur un banc de Jar-Test (Floculateur Fisher 1198) en utilisant des béciers en polyéthylène. Ils ont été réalisés sur quatre eaux souterraines de la zone orientale du Sahara septentrional : Doucen (Biskra), Chaïba (Biskra), Ede Meao (Ouargla) et Chott (El Oued-Souf). Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux ont été déterminées en laboratoire. Ces

eaux, destinées à l'AEP, proviennent toutes de forages captant les nappes du CT et sont suffisamment chargées en fluorures pour justifier des essais de défluoruration.

Les essais ont consisté à déterminer les doses optimales de chaux ou de sulfate d'aluminium, pour chaque concentration initiale en fluor (F_0), en introduisant des doses croissantes en ces réactifs défluorants. Le rendement de défluoruration (R , exprimé en pourcentage) a été évalué grâce à la détermination du fluor résiduel (F_r) par la relation :

$$R=100(1-F_r/F_0) \quad (1)$$

Une évaluation de l'incidence des traitements effectués sur la qualité finale de ces eaux a également été réalisée, afin de faciliter la comparaison entre les deux procédés de défluoruration utilisés. Les conditions d'agitation et de décantation étaient les suivantes (Youcef, 2006) :

- Agitation rapide à 200 tr/min durant 3 min ;
- Agitation lente à 40 tr/min durant 17 min ;
- Décantation de 30 min.

Essais de défluoruration par adsorption sur bentonite

Caractéristiques de la bentonite

La bentonite utilisée provient du gisement de Hammam Boughrara (Maghnia), fournie par la Société des bentonites d'Algérie, filiale de l'entreprise nationale des produits miniers non ferreux (ENOF) sous forme non traitée, à l'état finement broyé. Les caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques, déterminées au sein du laboratoire des analyses de l'ENOF (2005), font apparaître que cette bentonite était à plus de 65% composée de montmorillonite. La composition chimique (Tableau 1) révèle que les pourcentages d'oxydes majoritaires dans la structure de l'argile sont ceux de l'aluminium et de la silice. La bentonite de Maghnia présente un pH assez acide et le cation échangeable prédominant est le sodium.

Afin d'améliorer les performances de la bentonite, son activation chimique a été réalisée par attaque acide, en utilisant de l'acide sulfurique à 10%. Les conditions d'activation correspondent à un rapport massique (acide/bentonite) égal à 0,20 et un temps d'activation de l'argile de 15 min à 6 h (Youcef, 2006).

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite brute de Maghnia (Entreprise nationale des produits miniers non ferreux, 2005)

Bentonite	Surface spécifique (m ² /g)	pH	Cations échangeables (meq/100g)				Oxydes (%)	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Maghnia	86	6,2	30,6	12,8	36,2	9,5	60	22

meq/100g : milliéquivalents de cations échangés par 100 g de bentonite.

Description des essais d'adsorption

Les essais d'adsorption sur la bentonite brute ou activée ont été réalisés en batch en utilisant des béchers en polyéthylène et en agitant les solutions sur des agitateurs magnétiques. Des essais sur des solutions synthétiques de fluorure de sodium ont permis au préalable de déterminer les conditions optimales d'utilisation de la bentonite de Maghnia (Achour et Youcef, 2006). L'élimination du fluor par rétention sur la bentonite brute et activée a été testée sur des eaux de la région de Biskra à partir des forages de Bordj, de Karma, d'El Hai et de F₅-Biskra ville, tous destinés à l'AEP. Les caractéristiques physico-chimiques de ces différentes eaux sont présentées dans le Tableau 2. L'adsorption sur chacune des deux bentonites, brute et activée, a été testée. La masse de bentonite est fixée à 6 g/l et le temps de la réaction d'adsorption a été maintenu à 3 h, correspondant au temps d'équilibre. A la fin de chaque essai d'adsorption sur bentonite, un échantillon de la solution a été prélevé puis filtré sous vide à l'aide d'une membrane de porosité 0,45 µm. Le pH final et la teneur résiduelle en ions F⁻ en solution ont été notés.

RESULTATS ET DISCUSSION

Fluor et qualité physico-chimique des eaux du Sahara septentrional oriental

Avant d'entamer les essais de défluoruration des eaux échantillonnées, la détermination des principales caractéristiques des eaux de la région d'étude a été réalisée, à commencer par l'analyse du fluor (Figure 2 et Tableau 2). Les prélèvements ont concerné les eaux de forages destinées à l'AEP, et donc majoritairement celles des nappes des sables et des calcaires du CT. La Figure 2 présente quelques valeurs des teneurs en fluor relevées dans les eaux du CT et du CI pour les régions de Biskra, de l'Ouargla, de l'El-Oued et du Touggourt. Ces valeurs montrent que les teneurs en ions fluorures dans les eaux de boisson du CT sont, sans exception, supérieures à 1 mg/l et donc à la norme de l'OMS relative à ces régions, soit 0,8 mg/l.

Au cours des diverses études réalisées par le laboratoire LARHYSS (Achour et al., 2008 ; Bouchahm et Achour, 2008 ; Youcef, 2006), il a été possible de mesurer les différents paramètres de la qualité minérale de ces eaux, en plus de l'étude particulière de l'excès en fluor, grâce à un échantillonnage assez représentatif de la nature des eaux de la région. Le Tableau 2 présente quelques exemples de qualité physico-chimique des eaux prélevées du CT et du CI, notamment celle des eaux testées pour la défluoruration. Ainsi, les eaux de la nappe albienne (correspondant au CI) sont apparues dans tous les cas de meilleure qualité que les eaux du CT. Mais les températures élevées (supérieures à 50 °C) et les profondeurs des forages dépassant souvent 1 000 m dans la région orientale font que les eaux de la nappe albienne sont encore peu utilisées (Achour et al., 2008). Les pH de toutes les eaux prélevées présentent un léger caractère alcalin, bicarbonaté quelque soit le niveau aquifère. Les conductivités sont élevées (supérieures à

Tableau 2. Qualité physico-chimique d’eaux de boisson de la région orientale du Sahara septentrional algérien.

Forages	pH	Cond. (µS/cm)	TH (°F)	TAC (°F)	Na ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)
Biskra	7,39	2860	214	12,40	112	134	1050	1633	2,61
	8,22	1440	59	13,80	116	62	639	370	2,63
	7,24	1645	165	16,00	188	226	210	460	2,64
	7,67	1720	156	15,00	192	202	318	540	2,35
	7,25	2060	116	18,00	454	110	510	530	2,18
El Hai (CT5)	7,49	4010	162	21,00	971	101	1717	1200	1,41
O.Djellal (CI)	7,96	2650	114	12,50	460	186	592	1160	0,58
Ouargla	7,40	3750	200	14,00	488	138	1449	978	2,02
	7,97	2620	104	15,80	361	104	1150	683	1,99
	7,25	3350	156	15,00	697	131	1033	1122	1,07
	7,30	1530	81	12,00	170	86	420	540	0,58
	7,97	4370	142	8,50	600	184	700	970	2,81
Chott (CT)									
Kouinine (CT)	7,28	3440	188	12,40	665	115	1033	1330	1,18
Souf-El Oued	7,21	2390	83	11,20	228	123	374	790	0,38
S.Slimane (CT1)	8,10	3120	175	13,00	456	228	1000	990	3,12
DF36-Tougourt ville (CT2)	7,88	5320	469	10,50	910	320	1906	1740	1,86
Taibet (CI)	8,11	2810	158	11,40	215	172	924	800	0,70

CT : Nappe du Complexe Terminal; CI : Nappe du Continental Intercalaire; Cond. : Conductivité de l'eau.; TH : Titre Hydrotimétrique ou dureté de l'eau ; TAC : Titre Alcalimétrique Complet ou alcalinité de l'eau.

1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mais variables selon la région considérée. Les ions dominants sont le plus souvent les chlorures et les sulfates parmi les anions et le calcium et le magnésium parmi les cations. Les duretés totales dépassent assez largement 50 °F (Organisation Mondiale de la Santé, 2004). Toutefois, les teneurs importantes en magnésium peuvent favoriser une élimination efficace du fluor au cours de la précipitation chimique à la chaux.

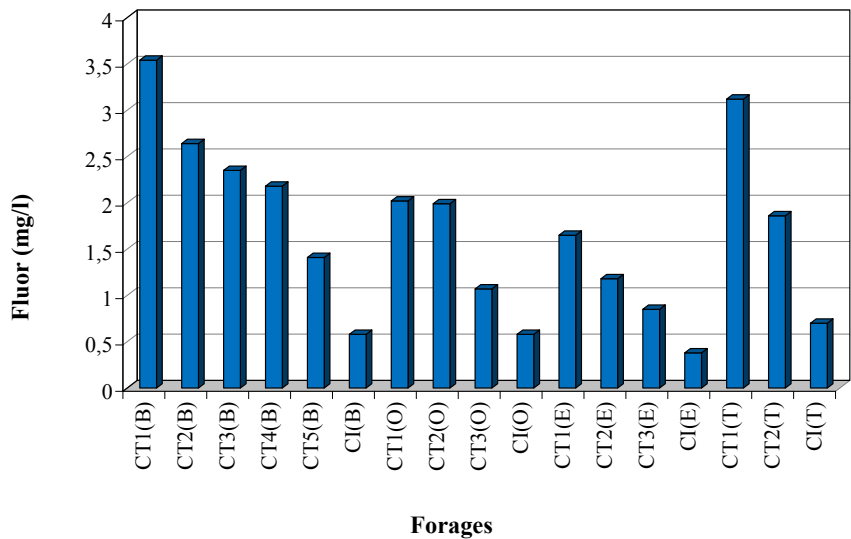


Figure 2. Teneurs en fluor dans les eaux souterraines des régions de Biskra (B), Ouargla (O), El-Oued (E) et Tougourt (T)

Au vu des données du Tableau 2, il paraît évident que les eaux souterraines du Sahara septentrional oriental présentent une qualité globalement médiocre et un risque fluoritique non négligeable. Il semble donc logique d'envisager un traitement des eaux destinées à la consommation. Ainsi, par des essais en laboratoire, la défluoruration des diverses eaux de forages de la région d'étude a été testée par des procédés physico-chimiques basés essentiellement sur des phénomènes de précipitation et d'adsorption sur les précipités formés (tels que la magnésie et l'hydroxyde d'aluminium) ou sur un matériau adsorbant spécifique (la bentonite brute et activée de Maghnia).

Défluoruration par la chaux et le sulfate d'aluminium

Dans un premier temps, le choix du procédé de traitement s'est porté sur la précipitation chimique à la chaux et la coagulation-floculation au sulfate d'aluminium, car ce sont des méthodes suffisamment sélectives vis-à-vis de l'ion fluorure et faciles d'emploi quant à leurs éventuelles applications à petite ou moyenne échelle (Boruff, 1934; Mazounie et Mouchet, 1984). Cette étape de l'étude a eu pour objectif l'application de chacun des procédés (chaux et sulfate d'aluminium) sur des eaux naturellement fluorées de la région concernée (Doucen, Chaïba, Ede Meao et Chott) (Tableau 2).

Défluoruration par précipitation chimique à la chaux

Dans les conditions opératoires en laboratoire, la précipitation chimique à la chaux s'est avérée très efficace pour trois eaux sur les quatre testées (Figure 3). Elle a permis d'atteindre d'une part des concentrations résiduelles en fluor variant entre 0,3 et 0,4 mg/l, très inférieures aux normes applicables dans la région, et d'autre part des rendements élevés, supérieurs à 84%. En pratique, il n'est pas nécessaire d'atteindre des teneurs aussi faibles, puisque la limite inférieure des normes est de 0,6 mg/l, selon l'OMS. Ainsi, ceci peut permettre d'économiser sur les quantités de chaux à ajouter et de préserver l'effet bénéfique d'un apport minimal en fluor.

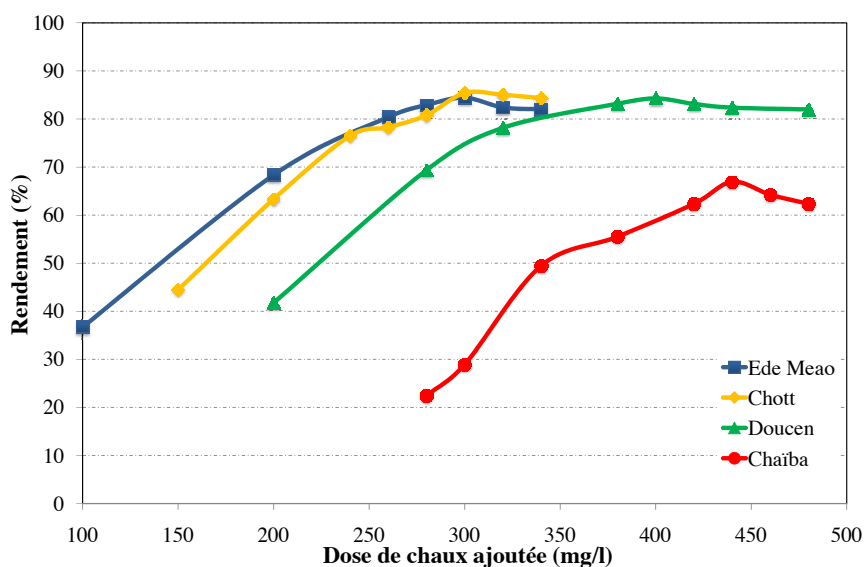


Figure 3. Rendements de défluoruration par la chaux d'eaux souterraines du Sahara septentrional algérien

Cependant, dans le cas de l'eau de Chaïba, le rendement du traitement est nettement moins élevé que pour les autres eaux et ne permet pas d'atteindre une valeur en fluor résiduel aussi basse que celles relatives aux autres eaux. Ceci peut être lié aux différences de teneurs en magnésium présent dans ces eaux. En effet, la teneur en magnésium conditionne le bon déroulement de la précipitation chimique à la chaux. Cet aspect avait déjà été mis en évidence sur des solutions synthétiques dopées en fluorure de sodium et dont les teneurs initiales en magnésium n'étaient pas suffisantes pour assurer une élimination maximale des fluorures (Youcef, 2006). Il faut également signaler que le fluor peut adopter des formes plus ou moins complexes dans les eaux naturelles pouvant réagir différemment des fluorures de sodium utilisés en solutions synthétiques. La présence de fortes teneurs en magnésium dans les eaux d'Ede Meao, de Chott et de Doucen a donc pu induire de meilleurs rendements du fait de l'adsorption des ions fluorures sur les

sites de la magnésie formée, $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Les rendements d'élimination du fluor par la chaux évolueraient dans le même sens que la quantité de magnésium précipité (Youcef, 2006). Toutefois, les doses optimales de chaux ajoutées restent élevées (300 à 440 mg/l) et rejoignent les résultats obtenus sur des solutions synthétiques à teneurs équivalentes en fluorures. Les différences observées entre les doses optimales pour toutes les eaux étudiées s'expliqueraient d'une part par les différences de teneurs initiales en fluor et d'autre part par l'importance d'autres éléments réagissant avec la chaux (tels que le calcium, le magnésium, les bicarbonates, le fer et la silice). Des phénomènes de co-précipitation peuvent éventuellement aider à l'élimination du fluor et expliqueraient les bons rendements de défluoruration obtenus. Cependant, ces phénomènes n'apparaissent qu'à des pH voisins de 10 à 11, ce qui nécessite une correction du pH de l'eau traitée par recarbonatation avant distribution.

Comparaison entre la défluoruration par le sulfate d'aluminium et la chaux

Lorsque la défluoruration a été réalisée avec le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), il a été constaté une baisse du pH jusqu'à des valeurs voisines de 6 à 7. Ce réactif présente donc l'avantage de ne pas nécessiter systématiquement un réajustement du pH des eaux qui ont au préalable un caractère légèrement alcalin. Par ailleurs, ces pH correspondent à la gamme de pH de formation et de prédominance de l'hydroxyde d'aluminium. L'abattement de la teneur initiale en fluor des eaux traitées, à doses croissantes de sulfate d'aluminium, peut être attribué à la formation du précipité peu soluble $\text{Al}(\text{OH})_3$ suite aux réactions d'hydrolyse du sel d'aluminium, qui sont accompagnées par une baisse du pH. Ce précipité contribue à la rétention des ions fluorures.

La comparaison des procédés de défluoruration par la chaux et le sulfate d'aluminium (Tableau 3) montre que les doses de réactifs à utiliser sont élevées et que les rendements d'élimination du fluor sont assez voisins pour les deux procédés. Toutefois, de plus faibles teneurs résiduelles sont obtenues lors de l'application du traitement à la chaux.

L'utilisation du sulfate d'aluminium présente l'inconvénient d'accroître la charge résiduelle des eaux en sulfates et en aluminium (Youcef, 2006). En effet, l'ajout de doses croissantes de sulfate d'aluminium a provoqué une augmentation de 10 à 42% des teneurs en sulfates en solution, suite à la dissolution du produit introduit à fortes doses (280 à 460 mg/l). Par contre, au cours de la défluoruration à la chaux, la légère diminution des ions SO_4^{2-} (8 à 30%) peut s'expliquer par la formation du précipité CaSO_4 .

À l'optimum de défluoruration par le sulfate d'aluminium, il a été également constaté, pour toutes les eaux testées, une augmentation de la teneur des ions Al^{3+} (0,11 à 0,42 mg Al^{3+}/l).

Tableau 3. Valeurs optimales de la défluoruration par la chaux et le sulfate d'aluminium d'eaux du Sahara septentrional algérien

Eaux	Dose de réactif (mg/l)		Fluor résiduel (mg/l)		Rendement (%)	
	Chaux	Al ₂ (SO ₄) ₃	Chaux	Al ₂ (SO ₄) ₃	Chaux	Al ₂ (SO ₄) ₃
Doucen (F ₀ = 2,61 mg/l)	400	300	0,41	0,83	84,3	68,2
Chaïba (F ₀ = 2,63 mg/l)	440	460	0,87	0,82	66,9	68,8
Ede Meao (F ₀ = 1,99 mg/l)	300	280	0,31	0,36	84,4	81,9
Chott (F ₀ = 2,81 mg/l)	300	350	0,40	0,72	85,4	74,4

F₀ : concentration initiale en fluor présente dans l'eau étudiée

Il apparaît donc une certaine similitude entre les deux procédés de défluoruration, tant dans leur mise en œuvre que dans les rendements de défluoruration obtenus. Leur efficacité est globalement liée à la formation de précipités, Mg(OH)₂ pour la chaux et Al(OH)₃ pour le sulfate d'aluminium, susceptibles de retenir le fluor par un mécanisme d'adsorption. Des réactions parallèles peuvent se produire et contribuer à l'élimination du fluor (telles que la formation de CaF₂ pour la chaux et la formation d'espèces hydrolysées cationiques de l'aluminium). Une gamme optimale de pH est également nécessaire à la précipitation des espèces chimiques précipitées.

Mais en tenant compte de la qualité des eaux de la région étudiée (teneurs en fluor ne dépassant pas 3 à 4 mg/l et teneurs importantes en magnésium et en sulfates), la précipitation chimique à la chaux apparaît comme un procédé plus approprié pour la réduction des teneurs en fluorures. Par l'emploi de la chaux, il semble également que la dureté totale puisse subir une diminution qui peut être non négligeable (30 à 40%), alors que le sulfate d'aluminium augmentera encore la teneur en sulfates des eaux déjà très chargées en cet élément. L'aluminium résiduel pourrait parfois dépasser la norme de 0,2 mg/l (Organisation Mondiale de la Santé, 2004). Bien que la précipitation chimique à la chaux conduise à la production de grands volumes de boues, l'emploi de la chaux apparaît économiquement plus intéressant que le sulfate d'aluminium du fait du prix élevé de ce dernier et de l'obligation de son importation vers l'Algérie.

Défluoruration par adsorption sur la bentonite de Maghnia

Au cours de cette étape de l'étude, la bentonite, dont le constituant majoritaire est la montmorillonite, a été testé comme matériau adsorbant. La bentonite est largement disponible dans les gisements de l'Ouest algérien.

Les travaux réalisés jusqu'à présent montrent que cette argile smectique possède, à l'état brut, des propriétés adsorbantes et une capacité d'échange d'ions vis-à-vis de divers polluants minéraux et organiques (Achour et Seghaïri, 2003 ; Gonzalez-Pradas et al., 1994 ; Veli et Alyüz, 2007). De plus, il a été montré qu'un prétraitement thermique ou chimique augmentait la capacité d'adsorption de différentes argiles (Gonzalez-Pradas et al., 1994 ; Seghaïri et al., 2004). L'utilisation d'argiles (tel que la bentonite et la kaolinite) ou de sols argileux en vue de la défluoruration des eaux a été également testée dans quelques pays, où les eaux de consommation présentent un excès en ions fluorures (Kau et al., 1998 ; Srimurali et al., 1998; Puka, 2004).

Cette recherche a pour but de tester d'une part le pouvoir adsorbant de la bentonite brute de Maghnia et d'autre part d'améliorer les performances de cette argile, après traitement à l'acide sulfurique.

Effet du temps d'activation de la bentonite sur l'efficacité de la défluoruration

L'élimination du fluor par rétention sur la bentonite de Maghnia a été testée sur des eaux de forages de la région de Biskra (Bordj, Karma, El Hai et F5), toutes destinées à l'AEP (Tableau 2).

Chaque eau a été traitée d'une part par la bentonite brute, d'autre part par la bentonite activée à des temps d'activation de 15 min à 6 h et avec un rapport acide/bentonite égal à 0,2. La masse de bentonite a été fixée à 6 g/l et la durée de l'essai à 3 h, temps d'équilibre déterminé au cours d'essais préliminaires sur des solutions synthétiques de fluorure de sodium (Youcef, 2006).

Pour toutes les eaux testées, les résultats présentés sur la Figure 4 montrent que les rendements de défluoruration évoluent en fonction du temps d'activation de la bentonite. Ces rendements augmentent progressivement jusqu'à un optimum puis diminuent au-delà d'un temps de 3 h. De plus, la bentonite de Maghnia, même à l'état brut, présente une capacité d'adsorption non négligeable, notamment pour les eaux les plus chargées en fluor (Karma et Bordj). Divers travaux (Kau et al., 1998 ; Srimurali et al., 1998) ont montré que la bentonite naturelle avait un pouvoir d'adsorption plus élevé que celui de différents matériaux, tels que la kaolinite ou la lignite. Un mécanisme d'échange d'ions, où les ions F^- sont échangés avec les groupements OH^- contenus dans la structure de l'argile est généralement considéré comme l'étape déterminante dans le processus d'adsorption. Les groupements hydroxyles de surface impliqués dans les oxydes des argiles (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) seraient responsables de l'adsorption du fluor sur ces argiles. Ces groupements ionisables en surface constitueraient les sites d'échange ou de fixation du fluor (Puka, 2004).

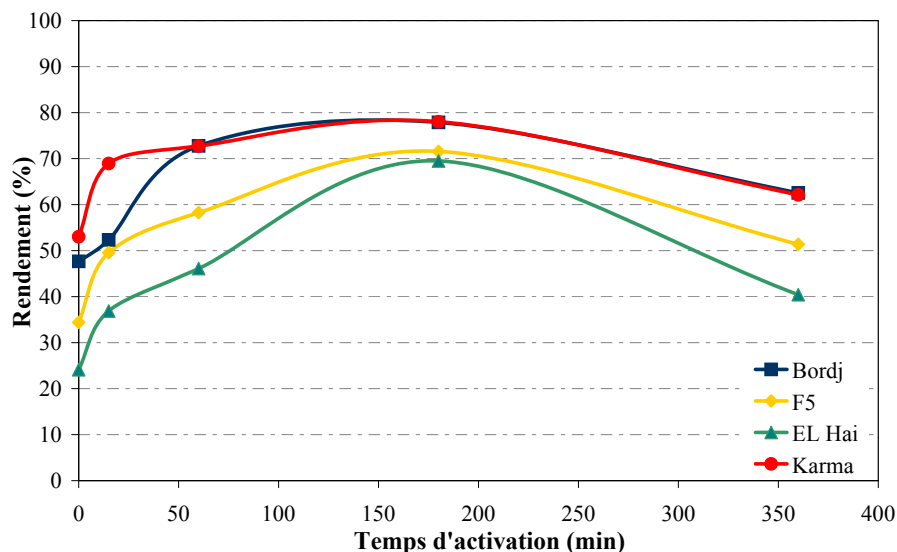


Figure 4. Effet du temps d'activation de la bentonite de Maghnia sur les rendements de défluoruration des eaux de la région de Biskra

Après activation chimique de l'argile, les rendements de défluoruration sont nettement améliorés et l'élimination maximale du fluor est obtenue pour 3 h d'activation pour les quatre eaux testées. L'activation acide de la bentonite neutralise une partie de la charge négative de la surface de cette argile permettant l'apparition de sites positifs à la surface de l'argile (Gonzalez-Pradas et al., 1994), ce qui facilite l'attraction des ions négatifs, tels que les ions fluorures. De plus, le traitement de l'argile par l'acide pourrait se traduire également par un développement de la porosité et une augmentation de la surface spécifique puisqu'elle passe, dans les conditions optimales testées, de 86 à 190 m²/g pour la bentonite de Maghnia. Toutefois, une trop longue durée d'activation chimique, de même qu'un excès d'acide, détruit généralement l'activité de la bentonite (Valenzuela-Diaz et Souza-Santos, 2001) et donc entraîne une diminution des rendements de défluoruration.

Résultats optima de défluoruration des eaux de la région de Biskra

Pour les conditions optimales d'activation de la bentonite, la Figure 5 récapitule les résultats de défluoruration des différentes eaux testées précédemment. Les résultats obtenus avec la bentonite non traitée sont également présentés à titre comparatif. Les rendements obtenus mettent en évidence que l'activation chimique de la bentonite de Maghnia améliore dans tous les cas l'élimination du fluor. Le traitement chimique de cette argile permet ainsi d'atteindre des teneurs résiduelles en fluor (0,43 à 0,62 mg/l), conformes aux normes recommandées (0,6 à 0,8 mg/l). Cependant, l'efficacité du traitement est variable selon la qualité physico-chimique de l'eau. En effet, la rétention du fluor pourrait dépendre non seulement de la teneur initiale du fluor mais également de

la composition minérale de l'eau considérée. Il a été ainsi constaté que les rendements augmentent lorsque la teneur initiale en fluor est plus importante. La présence de calcium, de magnésium, de chlorures et de sulfates en quantités importantes pourrait aussi influencer la fixation du fluor sur la bentonite (Youcef, 2006). Par contre, les anions, tels que les sulfates, les chlorures, les nitrates ou les bicarbonates, auraient des effets inhibiteurs sur l'adsorption du fluor (Mahramanlioglu et al., 2002 ; Puka, 2004). Compte tenu des teneurs élevées en chlorures et sulfates des eaux de toute la région d'étude, il peut se produire une compétition entre ces derniers et les ions fluorures vis-à-vis des sites d'adsorption sur la bentonite.

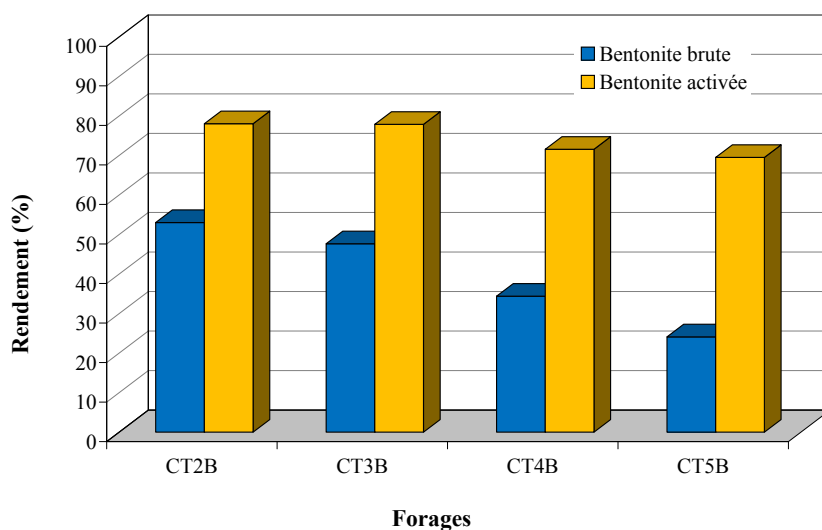


Figure 5. Rendements optima de défluoruration d'eaux de la région de Biskra par la bentonite de Maghnia

CONCLUSION

D'après quelques données d'enquêtes épidémiologiques, il a été possible de mettre en évidence, qu'en Algérie, la région orientale du Sahara septentrional est la zone la plus exposée au risque fluoritique (tel que les fluoroses dentaires et/ou squelettiques), provoqué en grande partie par l'excès de fluor dans les eaux. Par ailleurs, le contexte alimentaire pouvant influencer sur la toxicité du fluor, il est possible d'en déduire que la réduction de la prévalence des fluoroses pourrait passer par un meilleur régime alimentaire (tel que par l'apport en protéines et en calcium, voire même en magnésium). Ceci peut être d'un grand intérêt en ce qui concerne les enfants, plus vulnérables aux fluoroses, en particulier dans le Sud-Est algérien, où la couverture protéique est souvent le facteur limitant de l'état nutritionnel des populations locales.

A travers les analyses d'eaux destinées à l'AEP, les caractéristiques minérales sont apparues comme globalement médiocres avec des valeurs élevées et dépassant souvent les

normes de potabilité pour des paramètres, tels que la conductivité, la dureté, les chlorures et les sulfates. Concernant le problème du fluor et sa quantification dans les eaux, les analyses ont montré la répartition du fluor dans les eaux du CT et CI dans les différentes régions (Ouargla, El-Oued, Biskra et Touggourt). La présence d'un excès de fluor a pu être confirmée par les analyses effectuées sur des eaux des nappes des sables et des calcaires (CT). La concentration des ions fluorures est supérieure à 1 mg/l, sans toutefois dépasser 3 à 4 mg/l. Quant aux eaux des nappes albiennes profondes (CI), elles ont présenté une meilleure qualité que les eaux les plus superficielles et des teneurs en fluor conformes aux normes, souvent voisines de 0,4 à 0,7 mg/l.

De ce fait, pour toutes les régions à risque fluoritique élevé, la meilleure prophylaxie des fluoroses endémiques pourrait consister soit à développer la prospection d'eaux peu chargées en fluorures, soit à traiter les eaux fluorées pour en réduire de manière efficace les teneurs en fluorures.

Par des essais en laboratoire, les possibilités d'élimination du fluor ont été étudiées sur des eaux de forage du Sahara septentrional oriental. La coagulation-floculation au sulfate d'aluminium et la précipitation chimique à la chaux ont abouti à des rendements de défluoruration appréciables, mais au prix de doses élevées en réactifs, voisines de 300 à 500 mg/l selon le réactif utilisé et selon la teneur initiale en fluor. Certaines similitudes entre ces deux procédés ont pu être mises en exergue, notamment concernant les étapes de leur mise en œuvre (telle que les phases d'agitation et de décantation), ainsi que les mécanismes intervenant dans la réduction du fluor. Ces derniers seraient essentiellement liés à des phénomènes d'adsorption sur les précipités formés, $Mg(OH)_2$ par l'emploi de la chaux ou $Al(OH)_3$ par l'utilisation de sulfate d'aluminium. Cependant, la précipitation chimique à la chaux a permis une réduction des teneurs en fluor jusqu'à 0,3 à 0,4 mg/l, bien en deçà des normes de l'OMS. Bien que partielle, une réduction de la dureté et des ions sulfates a pu également être observée. De plus, cette méthode est particulièrement adaptée et économique pour des eaux naturellement chargées en magnésium.

Quant aux essais de rétention du fluor sur la bentonite de Maghnia, ils ont mené à des résultats prometteurs puisque les teneurs résiduelles en fluor sont tout à fait conformes aux normes de potabilité, notamment après activation de la bentonite à l'acide. Les mécanismes de fixation du fluor pourraient être des phénomènes d'adsorption et d'échange d'ions liés essentiellement aux oxydes présents dans la composition chimique des argiles. Cependant, les proportions relatives en certains éléments minéraux, notamment les chlorures et les sulfates, pourraient mener à des résultats sensiblement différents lors d'essais sur des eaux dont la composition diffère de celles considérées dans le cadre de cette étude.

Proposés à partir d'essais en laboratoire, ces procédés devront néanmoins être testés et optimisés à échelle réelle, soit à l'échelle d'une petite agglomération. Des essais préliminaires en laboratoire et comparatifs de l'incidence de chaque procédé sur l'élimination du fluor devraient permettre de procéder au choix du traitement le plus

adéquat. Ces essais permettraient de comparer les efficacités respectives des techniques testées et d'évaluer les risques de détérioration de la qualité finale des eaux, ainsi que les contraintes occasionnées par des traitements complémentaires souvent coûteux.

REFERENCES

Achour S. (1990) La qualité des eaux du Sahara septentrional en Algérie – Etude de l'excès en fluor. *Tribune de l'Eau, CEBEDEAU*, n°6, 42, 53-57.

Achour S. et Seghaïri N. (2003) Influence de la minéralisation d'eaux algériennes sur l'adsorption de matériel humique par la bentonite. *Tribune de l'Eau, CEBEDEAU*, 56, 15-21.

Achour S. et Youcef L. (2006) Effet de l'activation chimique de la bentonite sur l'élimination du fluor des eaux du Sud algérien. Proceedings de la 8^{ème} Conférence Internationale des Limnologues d'Expression Française (CILEF), 17-21 mars, Hammamet, Tunisie, p. 38.

Achour S., Youcef L. et Guergazi S. (2008) Qualité physico-chimique des eaux souterraines et superficielles du Sahara septentrional oriental algérien. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, 311, 79-84.

Agence française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AfSSA) (2005) Evaluation des traitements d'élimination de certains éléments minéraux dans les eaux minérales naturelles et les eaux de sources. Groupe de travail « Eaux minérales naturelles » – AfSSA, SA-0005, France, 20 p.

Aroua A. (1981) Problèmes de santé liés à l'hyperminéralisation de certaines eaux en Algérie. Séminaire de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sur la technologie appropriée à la déminéralisation de l'eau potable, 14-19 novembre, ALG/EHP 001/9, Alger, Algérie.

Azout B. et Abraham J. (1978) Existence et cause des fluoroses humaines dans la région d'El-Oued. *Annales de l'Institut National d'Agronomie, Alger*, 8, 5-12.

Boruff C.S. (1934) Removal of fluorides from drinking waters. *Ind. Engng.Chem.*, 26, 69-71.

Bouchahm N. et Achour S. (2008) Hydrochimie des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien – Identification d'un risque de fluorose endémique. *Rev. Int. La Houille Blanche*, 2, 76-82

Dean H.T. (1934) Classification of mottled enamel diagnosis. *J. Am. Dental Association*, 21, 1421-1426.

Edmunds W.M., Guendouz A., Mamou A., Moulla A., Shand P. et Zouani K. (2003) Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: Trace element and isotopic indicators. *Appl. Geochem.*, 18, 805-822.

Entreprise nationale des produits miniers non ferreux (ENOF) (2005) Rapport d'analyse des bentonites de Maghnia (Hammam Boughrara) et de Mostaghanem (M'Zila). Laboratoire de l'entreprise nationale des produits miniers non ferreux (ENOF), Maghnia, Algérie, 42 p.

Fawell J., Bailey K., Chilton J., Dahi E., Fewtrell L. et Magara Y. (2006) Fluoride in drinking water, Ed. WHO-IWA, London, ISBN 9241563192, 144 p.

Gonzalez-Pradas E., Villafranca-Sanchez M., Canton-Cruz F., Viciano M.S. et Perez M.F. (1994) Adsorption of cadmium and zinc from aqueous solution on natural and activated bentonite. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 59, 289-295.

Guendouz A., Moulla A., Edmunds W.M et Shand P. (2003) Hydrochemical and isotopic evolution in the Algerian Sahara. *Hydrogeology J.*, 11, 483-495.

Kau P.M.H., Smith D.W. et Binning P. (1998) Experimental sorption of fluoride by kaolinite and bentonite. *Geoderma*, 84, 89-108.

Mahramanlioglu M., Kizilcikli I. et Bicer O.I. (2002) Adsorption of fluoride from aqueous solution by acid treated spent bleaching earth. *J. Fluorine Chem.*, 115, 41-47.

Mazounie P. et Mouchet P. (1984) Procédés d'élimination du fluor dans les eaux alimentaires. *Rev. Sci. Eau*, 3, 29-51.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (1985) Fluor et Fluorures, Critères d'Hygiène de L'Environnement 36. Ed. Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 150 p.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (1986) Le bon usage des fluorures pour la santé de l'homme. Ed. FDI-Fondation W.K.Kellog-OMS, Genève, Suisse, 136 p.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (2004) Guidelines for drinking water quality, volume 1, recommendations. – First addendum to third edition. World Health Organization (WHO), Geneve, Suisse, ISBN 9241546964, 595 p.

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) (2003) Système aquifère du Sahara septentrional (SASS) – Gestion commune d'un bassin transfrontière. Observatoire du Sahara et du Sahel- Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), Tunis, 12 p.

Pinet F., Pinet A., Barriere J. et Bouche B. (1961) Endemic fluorosis of aqueous origin in Souf. Darmous and fluorosis osteoporoses. A report of 51 cases of condensing osteoses. *Algérie Med.*, 65.

Poey J. (1976) Evolution du bilan biologique en fonction du stade radiologique chez une population vivant dans une zone d'endémie fluorée du sud Algérien. *Eur. J. Toxicol.*, 9, 179-186.

Puka L.R. (2004) Fluoride adsorption modelling and the characterization of clays for defluoridation of natural waters. Magister Scientia in Chemistry, Faculty of Science, South Africa, 152 p.

Rodier J. (2005) L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Ed. Dunod, 8^{ème} Edition, Paris, 1384 p.

Seghaïri N., Koussa M. et Achour S. (2004) Effet de l'activation de la bentonite sur l'adsorption de substances humiques en eaux de minéralisation variable. *Larhyss J.*, 3, 87-98.

Srimurali M., Pragathi A. et Karthikeyan J. (1998) A study on removal of fluorides from drinking water by adsorption onto low-cost materials. *Environ. Pollut.*, 99, 285-289.

Travi Y. (1993) Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal. Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines. Eds. Université Louis Pasteur, Institut de géologie, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et Centre de géochimie de la surface, Collection Sciences géologiques Mémoire – 0302-2684, n°95, 155 p., Strasbourg, France.

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) (1972) Etude des ressources en eau du Sahara septentrional (ERESE), Algérie-Tunisie. Rapport final REG 100, Vol. 2 et 3, Paris, France.

Veli S. et Alyüz B. (2007) Adsorption of copper and zinc from aqueous solutions by using natural clay. *J. Hazard. Mater.*, 149, 226-233.

Valenzuela-Díaz F.R. et Souza-Santos P. (2001) Studies on the acid activation of Brazilian smectic clays. *Quim. Nova*, 24, 345-353.

Youcef L. (2006) Elimination de polluants minéraux des eaux par des procédés physico-chimiques de précipitation et d'adsorption. Thèse de Doctorat en Sciences Hydrauliques, Université de Biskra, Algérie, 162 p.

CHAPITRE 16

POTABILISATION DES EAUX DU LAC D'ALEG PAR DES MEMBRANES D'ULTRAFILTRATION CHARGEES A BASE « DE POLYSULFONE ET D'ACIDE POLYACRYLIQUE »

C. MBARECK*

Université de Nouakchott – PEQEAUX - FST
Nouakchott, Mauritanie

Q.T. NGUYEN

Université de Rouen
CNRS – Laboratoire PBS – Unité FRE 3101
Rouen, France

O. TAHIRI ALAOUI

Université de Rouen
CNRS – Laboratoire PBS – Unité FRE 3101
Rouen, France

J.-L. BOHM

Université de Caen – ERPCB – Génie Biologique
Caen, France

RESUME

Ce travail a pour objectif la potabilisation des eaux de surface en utilisant une nouvelle génération de membranes d'ultrafiltration (UF) chargées à base de polysulfone (PSf) et d'acide polyacrylique (PAA). En effet, les images microscopiques (Scanning-Electron Microscope – SEM) mettent en évidence la structure asymétrique des membranes PSf/PAA, qui est composée de deux couches : la première est pratiquement dense

* Auteur correspondant : Pr. MBARECK Chamekh – Université de Nouakchott – BP 5026, Nouakchott, Mauritanie
Email : chamec1@yahoo.fr – Tél. : (+222) 677 16 51 – Fax : (+222) 525 39 97

et dotée de pores de petite taille (≈ 25 nm), tandis que la deuxième est épaisse et totalement poreuse. La filtration de l'eau du lac d'Aleg (au Sud de la Mauritanie) sous une faible pression montre de très bonnes performances des membranes PSf/PAA. Ces performances dépendent des proportions de deux polymères. Ainsi, la membrane PSf/PAA 89/11 (pourcentage massique des deux polymères) donne les meilleurs résultats : une rétention quasi totale des microorganismes pathogènes (les coliformes) (+ 99%) et des matières en suspension (+ 99%) ; une très forte rétention des ions de fer (+ 93%) et des substances humiques (90%) ; et une faible rétention des ions calcium et magnésium (8%). En outre, la perte de flux (ou le taux de colmatage) ne dépasse pas 20% malgré l'augmentation significative de la concentration des substances humiques et des matières en suspension en fin de filtration.

Mots-clés : Potabilisation ; ultrafiltration ; eau de surface ; dépollution des eaux ; polysulfone ; acide polyacrylique.

INTRODUCTION

La croissance démographique et l'absence d'infrastructures de production et/ou de distribution d'eau sont à l'origine de graves problèmes liés à l'approvisionnement en eau potable (EP) dans les pays sous-développés. Dans la majorité des villages et des petites collectivités, les eaux de surface sont directement consommées sans traitement approprié. Cette pratique est à l'origine de la propagation des épidémies liées à la mauvaise qualité des eaux (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 2006). Si, dans de nombreux pays industrialisés, la qualité des eaux de consommation et la préservation de l'environnement font l'objet de soins particuliers, dans les pays pauvres, cette substance est exposée à de nombreuses sortes de pollution dues notamment aux rejets des déchets solides et liquides, l'anarchie dans l'utilisation des pesticides et des engrais et l'absence de stratégies de protection des sources hydriques et de l'environnement dans son ensemble.

Dans sa grande majorité, la Mauritanie est un pays désertique caractérisé par un climat aride. La pluviométrie est quasi insuffisante sur la totalité de son territoire. Actuellement, une grande partie des ruraux mauritaniens continue à pratiquer un mode de vie basé essentiellement sur l'agriculture et l'élevage autour des lacs, des barrages et des mares, qui constituent l'unique source d'approvisionnement en eau.

Les techniques classiques, telles que la coagulation et la floculation, sont utilisées à grande échelle pour la potabilisation des eaux de surface peu polluées. Ces techniques permettent, par ajout d'ions métalliques, principalement trivalents (tels que Al^{3+} et Fe^{3+}), d'améliorer significativement la qualité des eaux traitées (Cathalifaud et al, 1988, 1997 ; Lefebvre et Legube, 1990 ; Waïs Moassa et Mazet, 1991). Toutefois, ces techniques classiques ne permettent pas une élimination totale des microorganismes pathogènes ; d'où la nécessité de soumettre l'eau à une autre technique de désinfection. En outre, parmi

les inconvénients de ces techniques, il faut noter la production de boues, comme dans le cas de procédés de coagulation- floculation, ou de produits indésirables, comme dans le cas de certains procédés de désinfection, telle que la chloration (Godd et al., 1989).

Les techniques membranaires, telle que l'ultrafiltration (UF), sont de plus en plus utilisées comme moyen de potabilisation des eaux (Arnal Arnal et al., 2001 ; Ulbricht, 2006). Elles sont plus efficaces et plus sûres malgré le problème de colmatage qui limite leur expansion à grande échelle. Pour palier à cet obstacle, les recherches s'orientent, depuis quelques années, vers la fabrication de membranes hydrophobes dotées de groupes hydrophiles. L'incorporation de ces groupes limite significativement le colmatage des membranes (Marshall et al., 1993 ; Goosen et al., 2004 ; Jung, 2004 ; Hilal et al., 2005). Par ailleurs, Ulbricht (2006) a affirmé récemment que les membranes dotées de charges superficielles négatives ont un effet bénéfique sur la séparation des milieux biologiques, surtout au voisinage de pH neutre, où la plupart des protéines et des composants cellulaires porte des charges négatives. Sur la base des travaux d'Ulbricht (2006), il a été supposé que les membranes composés de polysulfone (PSf) et d'acide polyacrylique (PAA) peuvent apporter de bons résultats en matière de potabilisation des eaux de surface.

Ce travail fait partie des activités scientifiques développées par l'équipe de recherche « Potabilisation, Environnement et Qualité des Eaux » qui vise la mise au point d'une technique de potabilisation des eaux de surface adaptée au contexte Mauritanien. Plusieurs paramètres indicateurs de potabilité seront déterminés avant et après la filtration des eaux à travers les membranes PSf/PAA. Il s'agit de la turbidité, la teneur en substances humiques (SH), la contamination microbienne, la teneur en fer total, la teneur en ions calcium et magnésium, la demande chimique en oxygène (DCO) ou encore la conductivité électrique. En outre, une étude du phénomène de colmatage des membranes PSf/PAA sera également présentée.

MATERIEL ET METHODES

Propriétés des produits utilisés

Le PSf et le PAA ont été fournis par Sigma–Aldrich (Saint Quentin, Fallavier, France) et le diméthylformamide (DMF) par VWR International (Fontenay–Sous-bois, France). Les masses moléculaires du PAA et du PSf sont, respectivement, 450 000 et 26 000 g/mol.

Préparation des membranes

Le PSf et le PAA sont introduits dans un réacteur en verre contenant du DMF, thermostaté à 90 °C et équipé d'un système d'agitation. La solution des polymères est maintenue sous agitation pendant au moins 3 h. Ensuite, elle est refroidie, dégazée, coulée sur une plaque de verre, étalée avec un couteau de laboratoire (150 µm environ), laissée pendant 20 s et enfin plongée dans un bain contenant de l'eau distillée, dont la température est de 18 °C. Les membranes obtenues sont soigneusement lavées à l'eau et stockées dans une solution d'azidure de sodium jusqu'à ce qu'elles soient utilisées.

Mesure du flux hydraulique des membranes

La cellule-pilote utilisée (Figure 1) est de type Amicon 401S. Elle est équipée d'un système d'agitation thermostaté à 25 °C. La surface utile de la membrane est de 0,0038 m² et la pression de compression est de 0,5 MPa. Deux membranes PSf/PAA 89/11 et 92/08 (pourcentage massique des deux polymères) ont été expérimentées, leurs seuils de coupures en masse moléculaire (MWCO) sont respectivement 10 000 kD et 18 000 kD. Le flux hydraulique de chaque membrane a été déterminé sous une pression de 0,2 MPa après compression de la membrane pendant 2 h. Dans chaque expérience, environ 90% du volume initial (550 ml) a été filtré sous une pression de 0,2 MPa et une agitation de 400 tr/min. Les flux hydrauliques de l'eau pure et de l'eau du lac à travers la membrane sont calculés à partir de la formule suivante :

$$J_v = S \Delta V / \Delta t \quad (1)$$

où J_v (en l/h) est le flux volumique de l'eau du lac (J_0 dans le cas de l'eau distillée) ; S (en m²) est la surface active de la membrane ; ΔV (en l) est le volume filtré ; et Δt (en h) est le temps de filtration de ΔV .

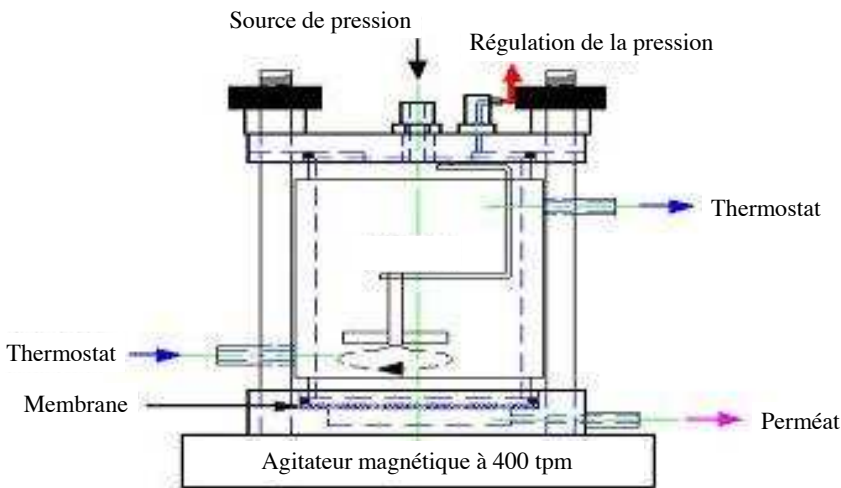


Figure 1. Cellule-pilote de filtration Amicon 401S

Plusieurs auteurs (Yuan et Zydney, 1999 ; Asatekin et al., 2007) utilisent le flux normalisé J_v/J_0 pour évaluer le taux de colmatage (Colm%), alors que dans la présente étude le taux de colmatage est exprimé avec les mêmes paramètres mais en proposant la formule suivante :

$$\text{Colm\%} = 100 (1 - J_v/J_0) \quad (2)$$

qui exprime la perte en pourcentage de flux de l'eau étudiée par rapport au flux de l'eau distillée dans les mêmes conditions. J_v est le flux de l'eau du lac alors que J_0 est le flux de l'eau distillée mesurée juste avant la filtration de l'eau du lac.

À la fin de chaque expérience, la membrane est nettoyée par un jet d'eau distillée puis plongée dans 50 ml d'eau de javel à 5% pendant 5 min. Ensuite, pour réactiver les sites ioniques, la membrane est plongée alternativement dans une solution d'acide chlorhydrique à 0,1 M et une solution de soude à 0,1 M pendant au moins 30 min pour chaque étape. La membrane est ensuite lavée abondamment avec de l'eau distillée avant d'être placée à nouveau dans la cellule-pilote. En conséquence, cette procédure de nettoyage et de régénération est suffisante pour permettre à la membrane de retrouver ses propriétés initiales.

Détermination de la concentration des ions métalliques et des substances humiques (SH)

La concentration en fer total est déterminée à 525 nm par un calorimètre DR 890 (HACH Company), selon la méthode phénantroline ; alors que la concentration en SH est mesurée à 254 nm par un spectrophotomètre UV/VIS lambda 3 (Perkin Elmer Varian). Le taux de rétention (R%) des ions ou groupes d'ions et des SH est calculé selon l'équation suivante :

$$R\% = 100 (A_0 - A_t)/A_0 \quad (3)$$

où A_0 est l'absorption de l'échantillon avant filtration et A_t est l'absorption après filtration.

La même équation a été utilisée pour calculer le taux de rétention des ions calcium et magnésium, dont la concentration a été déterminée par un dosage volumétrique en utilisant de l'acide éthylène-diamine-tétraacétique (EDTA à 0,01 M).

Par ailleurs, la cinétique d'UF est suivie dans notre étude en exprimant la teneur en matières solubles et en matières en suspension en fonction de V/V_0 , qui correspond au volume cumulé d'ultrafiltrat (V), à un instant donné, sur le volume total à filtrer (V_0). Ce paramètre, qui varie de manière monotone avec le temps de filtration, est plus pertinent pour caractériser la membrane car il tient compte de la charge réelle de l'eau en impuretés qui colmatent plus ou moins la membrane et font diminuer le débit d'ultrafiltrat dans le temps.

Détermination de la conductivité électrique, de la turbidité et du pH

La conductivité électrique est déterminée à 25 °C avec un conductimètre WTW type LF197 alors que la turbidité a été mesurée avec un turbidimètre LP 2000 (HANNA Instruments, Portugal). Le pH est mesuré avec un pH mètre WTW type pH 197. Dans les trois cas, des précautions d'étalonnage ont été respectées.

Détermination de la teneur des coliformes

Les échantillons ont été prélevés à environ 4 m de rivage et à 50 cm de profondeur. Ils sont conservés dans des bouteilles stériles à 4 °C, puis ramenés au laboratoire d'analyse 5 h après.

L'échantillon prélevé est dilué dans l'eau stérilisée dans de proportions variables allant jusqu'à un million de fois. Un volume de 100 μ l de diluat est déposé sur un milieu de culture (TTC Tergitol 7 gélose nutritive) dans trois boîtes de Pétri (expériences en triplicate) et le nombre de colonies développées est déterminé par comptage visuel après culture dans une étuve à 37 °C pour les coliformes totaux et à 44,5 °C pour les coliformes fécaux, pendant 24 h chacun. En multipliant le nombre de colonies par le taux de dilution, on obtient la teneur en bactéries de l'échantillon de départ.

RESULTATS ET DISCUSSION

Avant d'aborder les expériences de potabilisation des eaux, une étude de la morphologie des membranes PSf/PAA a été faite afin de connaître davantage la structure des membranes, qui conditionne les résultats de filtration. En outre, deux séries de membrane, PSf/PAA 89/11 et 92/08, ont été examinées afin de mettre en évidence les performances des membranes PSf/PAA en matière de potabilisation des eaux de surface.

Caractérisation morphologique des membranes utilisées

Les résultats de la microscopie électronique à balayage (MEB) ont révélé l'asymétrie des membranes PSf/PAA, dont la structure est constituée d'une couche poreuse et d'une couche presque dense. Les images des sections des membranes PSf/PAA 89/11 et 92/08 (Figure 2) montrent la présence des structures poreuses semblables aux structures spongieuses. L'observation de chaque image révèle que ces structures deviennent de plus en plus petites et compactes de la surface inférieure (côté verre) vers la surface extérieure (indiquée par le sens de la flèche sur la Figure 2). La comparaison des deux images montre également que ces structures sont légèrement plus petites dans la membrane PSf/PAA 89/11 que dans la membrane PSf/PAA 92/08. En outre, les valeurs de l'épaisseur de la couche dense, indiquées dans le Tableau 1, montre que celle-ci est plus épaisse dans la membrane PSf/PAA 89/11 que dans la membrane PSf/PAA 92/08.

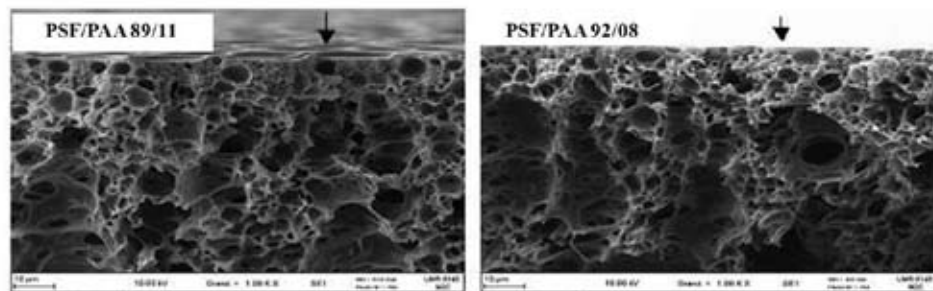


Figure 2. Images MEB des sections des membranes PSf/PAA 89/11 et 92/08 (Grossissement de 1000X, à 10 kV)

Tableau 1. Quelques caractéristiques des membranes PSf/PAA 89/11 et 92/08

Paramètres	PSf/PAA 92/08	PSf/PAA 89/11
Capacité d'échange (Cp) (méq/g)	1,1	1,3
Seuil de coupure en masse moléculaire (MWCO) (kD)	≈ 18	≈ 10
Epaisseur de la couche dense (nm)	110	730
J ₀ mesurée sous à 0,2 MPa (l/m ² /h)	225	33

Il est intéressant de signaler qu'il est difficile de donner une valeur unique à la taille des pores, dont la majorité se présente sous forme d'une structure poreuse à trois niveaux. Chaque pore superficiel (niveau 0) contient une série des pores plus petits (1^{er} niveau) et ces derniers contiennent d'autres plus petits (2^{ème} niveau) (Figure 3). A titre d'exemple, dans le cas de la membrane PSf/PAA 92/08, la taille moyenne des pores du niveau 0 (pores extérieurs) est de 680 nm alors que celle des pores du 1^{er} niveau (pores intérieurs ou sous-pores) est de 136 nm et celle des pores du 2^{ème} niveau (sous sous-pores) est de 25 nm. Ainsi, les pores se présentent comme une succession de pores de plus en plus petits au fur et à mesure qu'on pénètre dans la couche dense de la membrane. Il est évident que ce sont uniquement les pores du 2^{ème} niveau, qui sont les vrais régulateurs de la filtration des matières à travers la membrane, même si ceux du niveau 0 et du 1^{er} niveau auront un impact non négligeable sur la filtration des matières plus volumineuses. A notre connaissance, ces structures n'ont jamais fait l'objet d'une publication scientifique.

Par ailleurs, le seuil de coupure des membranes PSf/PAA 92/08 et 89/11 déterminé par la mesure de la teneur en carbone total (TOC) de plusieurs solutions de polyéthylène glycol ayant différents poids moléculaires, avant et après filtration sous une pression de 0,2 MPa, a permis de trouver les seuils de coupure suivants : ≈ 10 kD et ≈ 18 kD pour les membranes PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08, respectivement.

La formation de ces différentes structures morphologiques a été attribuée par de nombreux auteurs à la séparation de phase lors de la coagulation (Reuvers et al., 1987 ; Smolders et al., 1992). L'immersion du film liquide de solution de polymères dans le bain de coagulation provoque la formation de deux domaines : un riche en polymères et pauvre en solvant, et l'autre riche en solvant et pauvre en polymères. Ces deux domaines donnent après évacuation du solvant une structure poreuse. Selon notre approche, nous supposons que la formation de ces structures morphologiques est due aux forces antagonistes associées aux phénomènes d'inter-échange entre le solvant et le non solvant. En effet, après l'immersion du film-liquide PSf/PAA dans le bain de coagulation, les chaînes polymères, qui sont étendues en solution, sont soumises à des forces de contraction opposées aux forces de pénétration du non solvant (eau) dans le film. Ces forces antagonistes entraînent, d'une part, une rapide vitrification de la surface supérieure

qui est en contact avec le non solvant, et d'autre part, la formation des poches intérieures riches en solvant. C'est ainsi que se forme en fin de compte une couche supérieure, mince et presque dense, et, une couche inférieure, épaisse et poreuse.

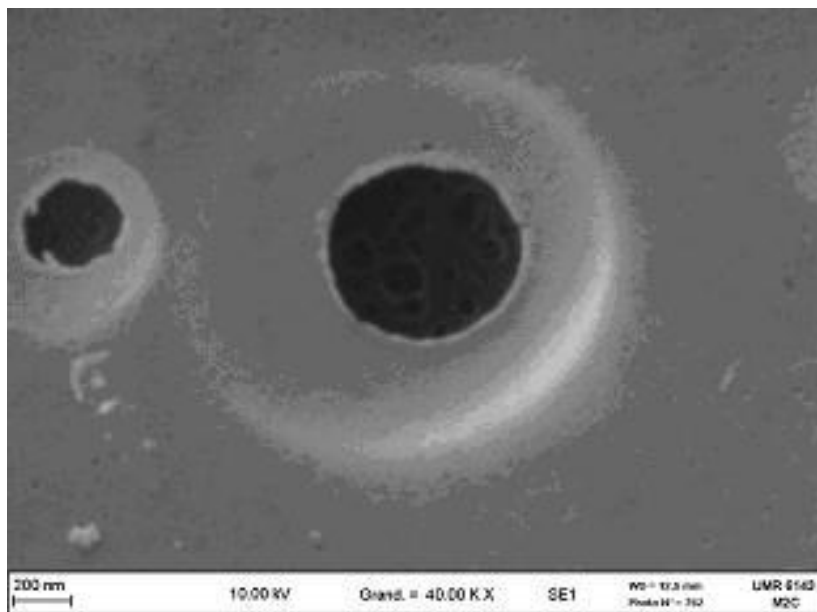


Figure 3. Image MEB de la surface semi dense de la membrane PSf/PAA 92/08 (Grossissement de 40 000X, à 10 kV)

Par ailleurs, l'aptitude de ces membranes à retenir des cations laisse à supposer qu'au cours de la coagulation, les molécules d'eau qui pénètrent dans la matrice de la membrane attirent les groupes carboxyliques, provoquant ainsi une orientation préférentielle de ces groupes vers le centre des structures poreuses. Par conséquent, les groupes carboxyliques sont préférentiellement distribués à l'interface des pores et sur les surfaces membranaires.

Potabilisation des eaux du lac d'Aleg

Il est important de rappeler que les eaux de surface (telles que les eaux des lacs, des fleuves, des rivières, des barrages, des étangs et des zones humides) contiennent habituellement des SH, des microorganismes pathogènes et des ions métalliques.

Le Tableau 2 résume les principales caractéristiques de l'eau du lac d'Aleg (au Sud de la Mauritanie), objet de notre étude. La coloration rouge-jaunâtre de ces eaux reflète certainement la présence des particules colloïdales (Black et Christman, 1963 ; Pennanen, 1975).

Tableau 2. Principales caractéristiques physicochimiques des eaux du lac d'Aleg

Paramètres	Eaux du lac d'Aleg
pH à 25 °C	7,90
Dureté totale (Ca ²⁺ + Mg ²⁺) (mg/l)	80
Concentration en fer total (mg/l)	1,30
Demande Chimique en Oxygène (DCO) (mg/l)	8
Teneur en matières solides dissoutes (TDS) (mg/l)	37
Conductivité électrique à 25 °C (µS/cm)	40,40
Absorbance à 254 nm	0,66
Turbidité (UNT)	62
Couleur	Jaune-rougeâtre

Élimination des micro-organismes pathogènes

Le Tableau 3 regroupe les résultats des analyses microbiologiques de l'eau du lac d'Aleg avant et après filtration à travers la membrane PSf/PAA 92/08. Les coliformes totaux et les coliformes fécaux ont été totalement éliminés. Ces résultats étaient prévisibles car la taille mesurable des plus petits pores ($\approx 0,025 \mu\text{m}$) est plus petite que celle de la majorité des microorganismes pathogènes indicateurs de pollution. Dans plusieurs travaux (Hou et al., 1980 ; Kostenbader et Cliver, 1983 ; Madaeni et al., 1995), il a été mentionné qu'un grand nombre des microorganismes pathogènes, tels que les bactéries et certains virus, peuvent être éliminés par filtration sur des membranes de $0,22 \mu\text{m}$. Xiandong et Xionrong (2003) ont également rapporté que l'utilisation de membranes en céramique (de taille de pores comprise entre $0,15\text{-}0,30 \mu\text{m}$) a permis l'élimination totale de l'E. Coli, la salmonelle, la microzyma, le staphylotoxin, le pseudomonas et l'aeruginosa. Ainsi, les membranes PSf/PAA, notamment celles qui contiennent plus de 8% de PAA, sont capables d'éliminer ce genre de microorganismes pathogènes habituellement présents dans les eaux de surface.

Tableau 3. Principaux paramètres microbiologiques de l'eau du lac d'Aleg avant et après filtration à travers la membrane PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Stérilisation totale de la cellule de filtration et de la membrane, agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa

Paramètres	Avant filtration	Après filtration
Coliformes totaux (milieu TTC Tergitol 7) (UFC/100 ml)	2200	0
Coliformes fécaux (UFC/100 ml)	160	0

Elimination des matières en suspension

La Figure 4 montre que la filtration des eaux du lac d'Aleg à travers la membrane PSf/PAA 89/11 entraîne, dès les premiers volumes de filtrats, une rétention quasi totale (0 UNT) des matières en suspension, tandis que pour la membrane PSf/PAA 92/08 une partie de ces matières en suspension traverse toujours la membrane (7 UNT). Pour ces dernières membranes, il est constaté que la turbidité diminue au fur et à mesure de la progression de la filtration. En effet, l'accumulation des matières en suspension sur la surface et dans les pores contribue à réduire le seuil de coupure de la membrane. C'est dans ce sens que plusieurs études (Mackenthun et Keup, 1970 ; Narkis et Rebhun, 1975 ; Safe Drinking Water Committee et National Research Council, 1977 ; Kay et al., 1980) ont indiqué que les matières en suspension se composent essentiellement de particules organiques résultant de la décomposition des matières végétales et animales, d'oxydes et d'hydroxydes métalliques (fer ou manganèse), d'organismes biologiques, comme les algues, le zooplancton et les bactéries filamenteuses ou en amas, et de particules fibreuses des minerais d'amiante et des argiles.

Les résultats obtenus montrent que la membrane PSf/PAA 89/11 permet d'éliminer totalement les matières organiques et inorganiques en suspension, alors que la membrane PSf/PAA 92/08 laisse passer une très petite quantité, surtout dans les premières étapes de la filtration. La différence de comportement est due essentiellement à la taille des pores et à la densité des charges membranaires. La membrane PSf/PAA 89/11 est à la fois la plus chargée et la moins poreuse (pores plus petits). Elle laisse passer difficilement les matières en suspension. Alors que la membrane PSf/PAA 92/08 est moins chargée et plus poreuse (pores plus grandes) et laisse passer une partie des matières en suspension, notamment lors des premières étapes de filtration où la couche de polarisation (dépôt) est assez mince.

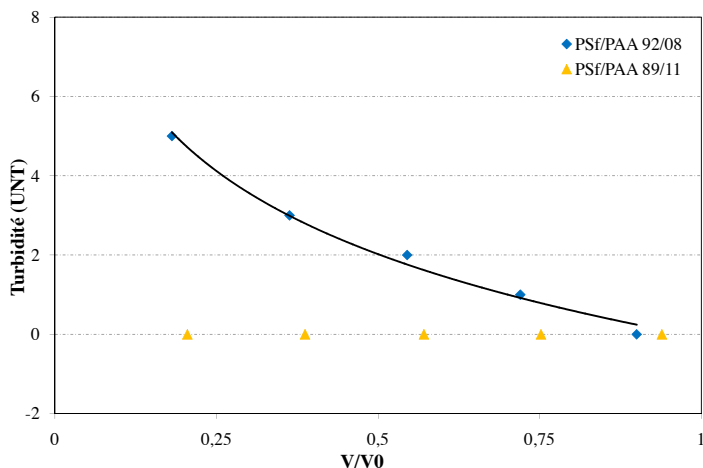


Figure 4. Variation de la turbidité de l'eau du lac d'Aleg après filtration à travers les membranes PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa

Selon l'Organisation Mondiale de Santé (OMS), la turbidité des eaux de consommation ne doit pas dépasser au maximum 1 UNT, or cette valeur n'est pas forcément une garantie de potabilité, selon certaines études (Clarke et al., 1964 ; Wershaw et al., 1969 ; Kahn, 1974 ; Shäffer et al., 1980 ; Pryor et al., 1998 ; Ebie et al., 2006 ; Peter-Varbanets et al., 2009). Suivant ces études, les matières en suspension peuvent protéger des bactéries et des virus contre les procédés de désinfection (chloration). En outre, certains polluants, tels que le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), l'acide 2,4 dichlorophénoxyacétique (2,4-D) et les composés apparentés, peuvent s'adsorber sur les matières solides en suspension (Wershaw et al., 1969 ; Kahn, 1974). Cependant, des poliovirus ont été détectés dans des eaux dont la turbidité était inférieure à 1 UNT alors que la concentration de chlore résiduel était supérieure à 1 mg/l (Shäffer et al., 1980). D'autres études ont également démontré la présence de coliformes dans des eaux dont la turbidité variait de 3,8 à 84 UNT, même après un traitement au chlore (Clarke et al., 1964). Précisons que les résultats de ces travaux indiquent la nécessité de filtrer les eaux de surface afin d'en réduire les risques liés à la turbidité. La filtration sur membrane offre plusieurs avantages : l'élimination des microorganismes pathogènes et l'élimination des matières en suspension sans modification de la nature de l'eau (e.i. sans ajout de substances, sans chauffage, etc.).

Enlèvement des substances humiques (SH)

La Figure 5 présente le taux d'enlèvement des SH en fonction du volume filtré. Le taux d'enlèvement des SH avoisine 93% pour la membrane PSf/PAA 89/11, alors que pour la membrane PSf/PAA 92/08, ce taux évolue de 40% (après filtration de 18% du volume initial) jusqu'à 86% (après filtration de 90% du même volume). Plusieurs études (Hong et Elimelech, 1997 ; Yuan et Zydney, 1999) ont indiqué que l'enlèvement des SH dépend, d'une part, de la nature des SH et, d'autre part, de la nature de l'eau filtrée : le pH, la force ionique et la concentration des ions divalents et trivalents. A titre d'exemple, les cations métalliques (divalents et trivalents) se précipitent ou forment des complexes à des pH définis. Les acides humiques précipitent à faible pH (milieu acide) tandis que les acides fulviques précipitent à pH élevé (milieu alcalin). De même, la solubilité des acides gras dépend fortement du pH et leur flux à travers une membrane tend à diminuer considérablement à faible pH (Brinck et al., 2000). En outre, des interactions peuvent se développer entre les SH et les cations métalliques. L'établissement de ces interactions a été mis en évidence grâce à la rétention de ces cations par des membranes d'UF, dont la taille des pores ne permet pas de retenir une importante quantité de ces cations seuls. En effet, cette rétention a été attribuée à la formation des complexes entre les substances humiques et les cations métalliques. Toutefois, Swift (1989) mentionne qu'une forte concentration des cations divalents et trivalents (force ionique élevée) peut entraîner la neutralisation des molécules des SH et leur repliement sur elles-mêmes. Par conséquent, les molécules des SH traversent facilement la membrane.

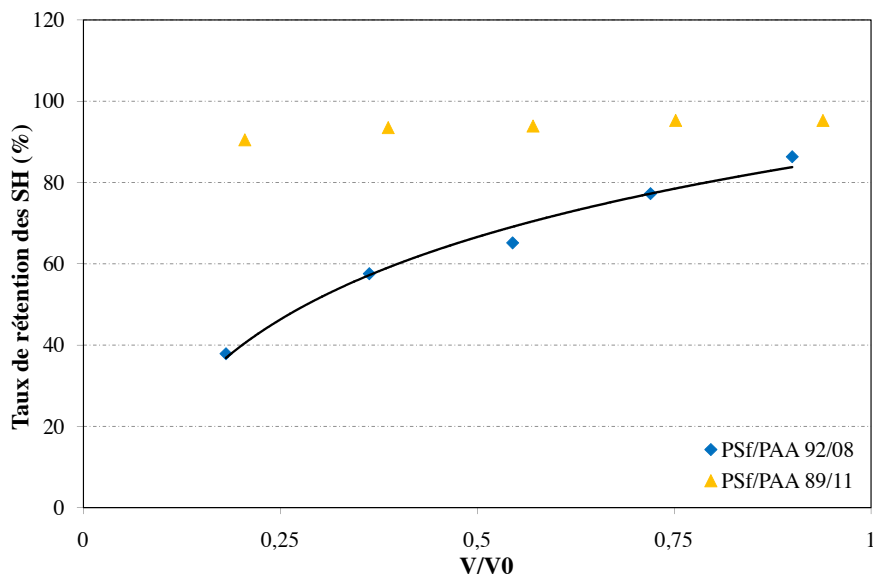


Figure 5. Taux de rétention des substances humiques (SH) après filtration de l'eau du lac à travers les membranes PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa

Détermination du taux d'enlèvement des ions de fer (fer total), de calcium et de magnésium

La Figure 6 présente les résultats de l'enlèvement du fer total après filtration sur les membranes PSf/PAA. La membrane PSf/PAA 92/08 présente un taux d'enlèvement proche de 83% après filtration de 18% du volume initial. Ce taux atteint 96% après filtration de 55% et 100% après filtration de 72% du volume initial. Quant à la membrane PSf/PAA 89/11, le taux d'enlèvement atteint 100% après filtration de 38% du volume initial. Ces résultats montrent une augmentation du taux d'enlèvement des ions de fer avec l'augmentation du pourcentage de l'acide polyacrylique dans la membrane PSf/PAA, et en fonction du temps de filtration. La très bonne rétention des ions métalliques trivalents et divalents par la membrane PSf/PAA 89/11 est due à la fois à la petite taille des pores et à la capacité d'échange la plus élevée (Schnitzer et Kahn, 1972).

Par ailleurs, la forte rétention des ions de fer laisse supposer que les ions de fer réagissent avec les charges carboxyliques membranaires et avec les molécules des SH. Ces interactions conduisent à la formation de complexes qui se déposent sur la surface et à l'intérieur des pores. La formation de ces complexes est accélérée par l'augmentation de la concentration des SH au fil du temps (Hong et Elimelech, 1997 ; Seidel et Elimelech, 2002). Ces complexes ralentissent le passage de l'eau et des ions métalliques à travers la

membrane. Ces interprétations sont en accord avec la formation des couches rougeâtres, riches en fer, sur la surface de filtration (Figure 7). Ces résultats montrent également que les membranes PSf/PAA peuvent être directement utilisées pour la déferrisation des eaux de surface.

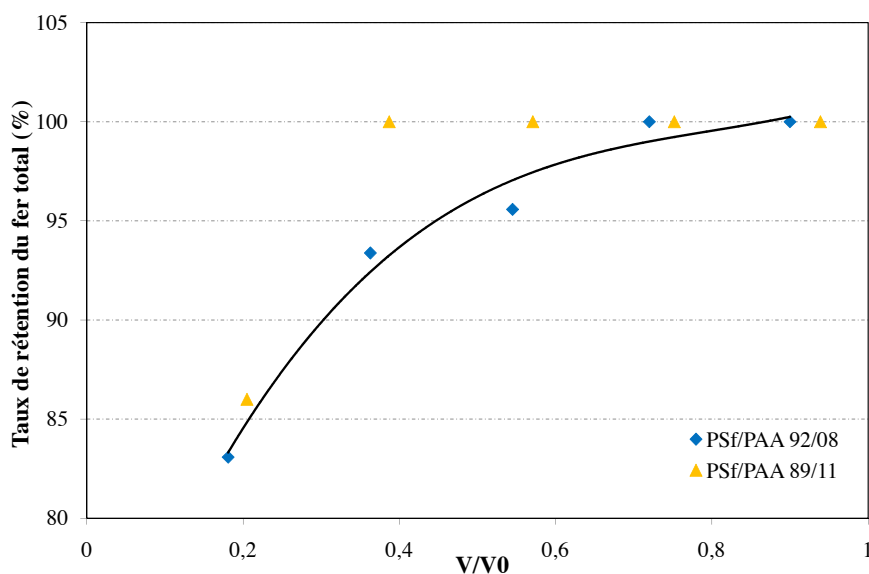


Figure 6. Taux de rétention de fer total après filtration de l'eau à travers les membranes PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa



Figure 7. Images de la surface de filtration de la membrane PSf/PAA 89/11 : (a) avant filtration ; (b) après filtration ; et (c) après filtration et lavage avec l'eau distillée et l'eau de javel à 5%

La Figure 8 présente le pourcentage des ions calcium et magnésium retenus par les membranes PSf/PAA. La diminution de la rétention des ions calcium et magnésium est due d'une part à la saturation progressive des membranes PSf/PAA et d'autre part à la compétition défavorable avec les ions trivalents. Pour $V/V_0 < 0,5$ la rétention est légèrement supérieure pour la membrane PSf/PAA 89/11 que pour la membrane PSf/PAA

92/08. Cette différence est due certainement à la capacité d'échange de la membrane PSf/PAA 89/11, qui est plus élevée, et à la taille des pores plus petits.

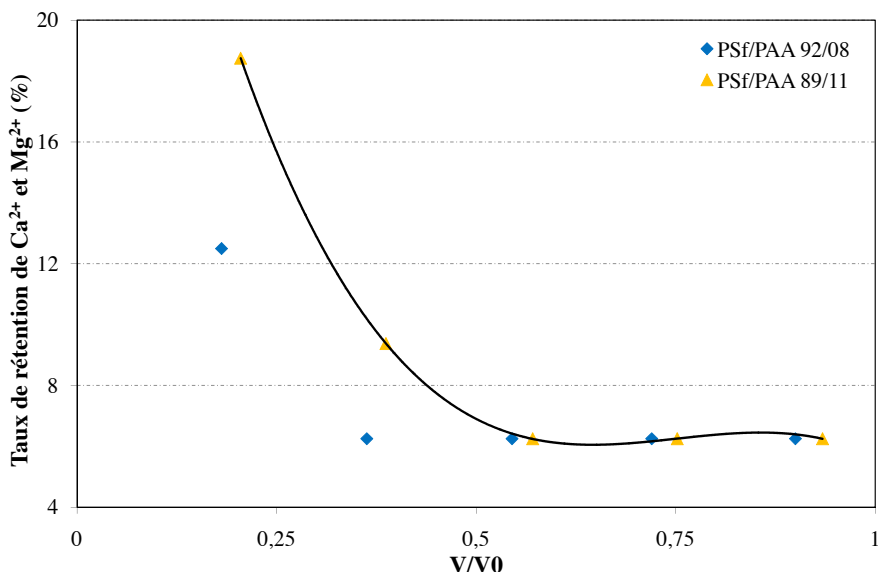


Figure 8. Taux de rétention des ions calcium et magnésium après filtration de l'eau du lac d'Aleg à travers les membranes PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa

La forte rétention des ions fer par rapport aux ions calcium et magnésium est une preuve des fortes interactions développées par les ions fer et les charges opposées portées par la membrane (groupes carboxyliques) ou présentes dans l'eau (SH). L'ensemble de ces charges opposées forme un réseau tridimensionnel qui se dépose sur la surface et à l'intérieur des pores de la membrane. Il est ainsi supposé que ce réseau tridimensionnel est composé de plusieurs couches de charges opposées, déposées alternativement sur la surface de la membrane. Le réseau est principalement initié par des ponts électrostatiques entre les cations divalents et trivalents présents dans l'eau, d'un côté, et les groupes carboxyliques portés par la membrane, de l'autre côté. La formation de cette première couche est suivie par une deuxième couche constituée essentiellement des SH, puis une autre contenant principalement les ions métalliques, suivie par une autre couche riche en SH et ainsi de suite.

Variation de la conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique constitue un moyen supplémentaire pour comprendre le comportement des membranes PSf/PAA vis-à-vis de la filtration des eaux

de surface. La Figure 9 montre une chute de conductivité électrique lors des premiers volumes de filtrat. Cette perte en charges ioniques est plus importante à travers la membrane PSf/PAA 89/11 que PSf/PAA 92/08.

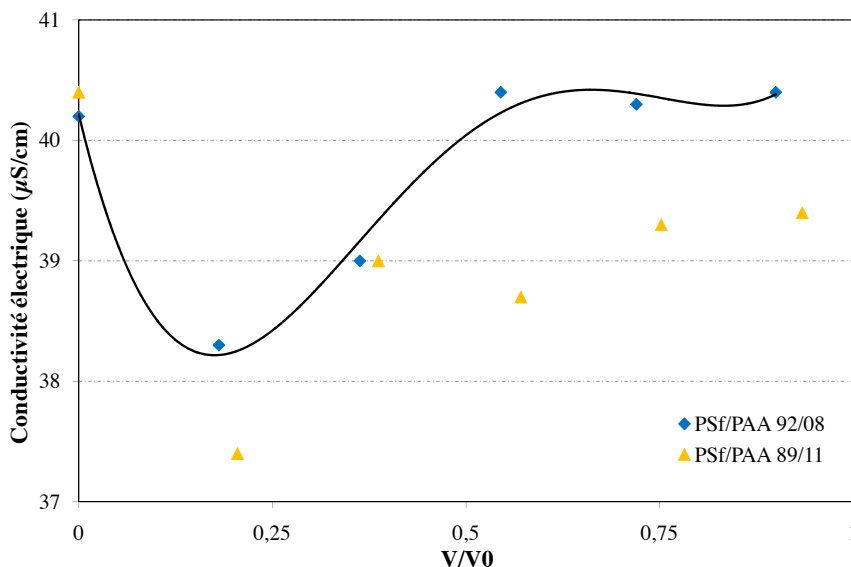


Figure 9. Variation de la conductivité électrique de l'eau du lac d'Aleg avant et après filtration à travers PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa

Ces résultats indiquent une réduction de la densité des charges après filtration de l'eau, à travers les membranes PSf/PAA. Ces charges peuvent être attribuées aux ions métalliques et aux SH. La rétention de ces charges est plus importante dans les premières étapes de la filtration, où les ions Na^+ ou/et H^+ sont échangés contre des ions trivalents et divalents (tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), dont la conductivité électrique est sensiblement plus faible. En tout état de cause, la variation de la conductivité électrique de l'eau après filtration à travers les membranes PSf/PAA renforce l'idée de rétention des charges ioniques au sein de la membrane. Ceci est en accord avec les résultats obtenus lors des mesures de la concentration des ions fer, calcium et magnésium.

Evaluation du phénomène de colmatage

Dans l'optique de caractériser le colmatage des membranes PSf/PAA, le pourcentage de la perte du flux de l'eau du lac d'Aleg (J_v) par rapport à celui de l'eau distillée (J_0) a été évalué. Contrairement à l'eau distillée, l'eau du lac d'Aleg est chargée en matières solubles et en matières en suspension, qui peuvent soit développer des interactions électrostatiques

avec la membrane, soit se déposer directement sur la surface et à l'intérieur des pores.

La Figure 10 montre que la filtration de l'eau du lac d'Aleg à travers les membranes PSf/PAA entraîne une perte de flux hydraulique plus importante pour la membrane PSf/PAA 92/08 que pour la membrane PSf/PAA 89/11.

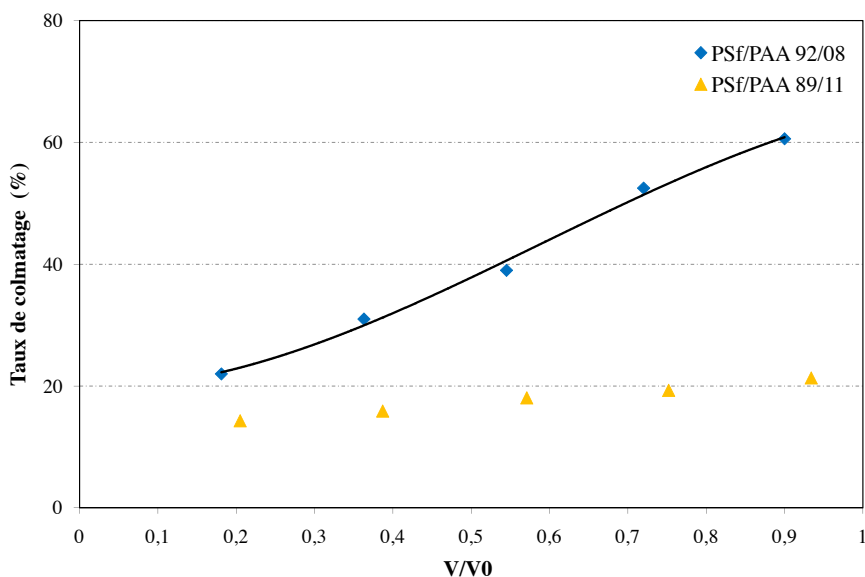


Figure 10. Taux de colmatage (ou perte de flux) des membranes PSf/PAA 89/11 et PSf/PAA 92/08. Conditions opératoires : Agitation de 400 tpm, température de 25 °C, volume à filtrer de 550 ml et pression de 0,2 MPa

Pour ce genre de membranes, deux phénomènes peuvent s'associer : (i) le simple dépôt des matières en suspension non chargées sur la surface des membranes et (ii) la formation de complexes due aux interactions entre les charges membranaires et les charges présentes dans l'eau. Ces complexes contribuent aux rétrécissements des pores et par conséquent ils limitent le passage des matières à travers les membranes (Yuan et al., 2002). La tendance de la membrane PSf/PAA 92/08 à se colmater plus rapidement peut s'expliquer par la taille des pores. En effet, les pores de la membrane PSf/PAA 92/08 sont plus grands, et par conséquent, les matières en suspension et les matières solubles s'insèrent plus facilement en profondeur, créant ainsi des amas qui limitent davantage le passage de l'eau à travers la membrane.

CONCLUSION

L'étude de la potabilisation des eaux de surface (lac d'Aleg au Sud de la Mauritanie) par les membranes d'UF chargées à base du mélange des polymères, polysulfone et acide

polyacrylique (PSf/PAA), montre que les résultats offerts par la membrane PSf/PAA 89/11 sont plus intéressants en termes de flux et de sélectivité que ceux de la membrane PSf/PAA 92/08. Ces performances sont dues, d'une part au seuil de coupure plus bas, et d'autre part à la capacité d'échange plus élevée pour la membrane PSf/PAA 89/11.

De façon générale, cette étude met en évidence les très bonnes performances des membranes PSf/PAA en matière de potabilisation des eaux de surface. Elles peuvent offrir une eau exempte de microorganismes pathogènes, de métaux lourds, de matières en suspension et très peu chargée en SH. Ces membranes PSf/PAA, qui sont faciles à fabriquer et économiquement rentables, associent des propriétés hydrophobes et hydrophiles. Ces deux propriétés sont d'une grande importance dans la mesure où ils permettent la rétention des matières organiques naturelles, la prévention de l'encrassement de la membrane, la réduction de la pénétration de composés ioniques solubles, la facilitation de la perméabilité de l'eau ou encore l'augmentation de la durée de vie des membranes.

L'UF, déjà largement utilisée en Europe pour produire de l'EP, n'est pas encore utilisée en Mauritanie pour plusieurs raisons. Bien qu'elle soit simple (utilisable par du personnel peu qualifié) et écologique (non nocif et non toxique pour l'environnement), son efficacité et son faible coût de traitement nécessite une validation dans le pays. Pour implanter ce système de traitement à grande échelle, il faudrait concevoir des modules et des appareils simples et adaptés aux conditions techniques propres du pays, de manière à rendre possible une maintenance locale. La faisabilité technico-économique de tels systèmes serait à évaluer dans les conditions locales : elle dépend principalement de la durée de vie de la membrane et leur capacité à résister au colmatage et à être régénérée. De ce point de vue, la membrane PSf/PAA semble bien adaptée, car elle a pu être régénérée simplement par contact avec de l'eau de Javel diluée.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche intitulé « valorisation des techniques traditionnelles de traitement des eaux en Mauritanie, à la recherche d'une technique simple et efficace » financé par le Gouvernement Mauritanien (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de Recherche Scientifique, projet FNARS). Nous avons également bénéficié d'un appui important du Gouvernement Français (SCAC, Projet Amprun, Ambassade de France, Nouakchott, Mauritanie).

REFERENCES

- Arnal Arnal J.M., Sancho Fernandez M., Martin Verdti G. et Lora Garcia J. (2001) Design of a membrane facility for water potabilization and its application to Third World countries. *Desalin.*, 137, 63-69.
- Asatekin A., Kang S., Elimelech M. et Mayes A.M. (2007) Anti-fouling ultrafiltration membranes containing polyacrylonitrile-graft-poly(ethylene oxide) comb copolymer additives. *J. Memb. Sci.*, 298, 136-146.

Black A.P. et Christman R.F. (1963) Characteristics of colored surface waters. *J. Am. Water Works Assoc.*, 55, 753-770.

Brinck J., Jönsson A.S., Jönsson B. et Lindau J. (2000) Influence of pH on the adsorptive fouling of ultrafiltration membranes by fatty acid. *J. Memb. Sci.*, 164, 187-194.

Cathalifaud G., Ayele J. et Mazet M. (1988) Aluminium effect upon adsorption of natural fulvic acids onto PAC. *Water Res.*, 32, 2325-2334.

Cathalifaud G., Ayele J. et Mazet M. (1997) Aluminium ions /organic molecules complexation: formation constants and stoichiometry. Application to drinking water production. *Water Res.*, 31, 689-698.

Clarke N.A., Berg G., Kabler P.W. et Chang S.L. (1964) Human enteric viruses in water: source, survival and removability. *Adv. Water Pollut. Res.*, 2, 523-535.

Ebie K., Yamaguchi D., Hoshikawa H. et Shirozu T., (2006) New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbidimeter with two optical systems in series. *Water Res.*, 40, 683-691.

Godd G.A., Bell S.G. et Brooks W.P. (1989) Cyanobacterial toxins in water. *Water Sci. Technol.*, 4, 499-511.

Goosen M.F.A., Sablani S.S., Ai-Hinai H., Ai-Obeidani S., Al-Belushi R. et Jackson D. (2004) Fouling of reverse osmosis and ultrafiltration membranes: a critical review. *Sep. Sci. Technol.*, 39, 2261-2297.

Hilal N., Ogunbiyi O.O., Miles N.J. et Nigmatullin R. (2005) Methods employed for control of fouling in MF and UF membranes: a comprehensive review. *Sep. Sci. Technol.*, 40, 1957-2005.

Hong S. et Elimelech M. (1997) Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes. *J. Memb. Sci.*, 132, 159-181.

Hou K., Gerba C.P., Goyal S.M. et Zerda K.S. (1980) Capture of latex beads, bacteria, endotoxin, and viruses by charged modified filters. *App. Environ. Microbiol.*, 40, 892-896.

Jung B. (2004) Preparation of hydrophilic polyacrylonitrile blend membranes for ultrafiltration. *J. Memb. Sci.*, 229, 129-136.

Kahn S.U. (1974) Adsorption of 2,4-D from aqueous solution by fulvic acid-clay complex. *Environ. Sci. Technol.*, 8, 236-238.

Kay G.P., Sykora J.L. et Burgess R.A. (1980) Algal concentration as a quality parameter of finished drinking waters in and around Pittsburgh, Pa. *J. Am. Water Works Assoc.*, 72, 162-168.

Kostenbader K.D. et Cliver D.O. (1983) Membrane filter evaluations using poliovirus. *J. Virological Methods*, 7, 253-257.

Lefebvre E. et Legube B. (1990) Coagulation par Fe(III) de substances humiques extraites d'eaux de surface: effet du pH et de la concentration en substances humiques. *Water Res.*, 24, 591-606.

Mackenthun K.M. et Keup L.E. (1970) Biological problems encountered in water supplies. *J. Am. Water Works Assoc.*, 62, 520-526.

Madaeni S.S., Fane A.G. et Grohmann G.S. (1995) Virus removal from water and wastewater using membranes. *J. Memb. Sci.*, 102, 65-75.

Marshall A.D., Munro P.A. et Tragardh G. (1993) The effect of protein fouling in microfiltration and ultrafiltration on permeate flux, protein retention and selectivity-a literature review. *Desalin.*, 91, 65-108.

Narki N. et Rebhun M. (1975) The mechanism of flocculation processes in the presence of humic substances. *J. Am. Water Works Assoc.*, 67, 101-108.

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) (2006) L'eau, une responsabilité partagée. 2^{ème} rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau. Disponible sur le site <www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr2/index_fr.shtml>.

Pennanen V. (1975) Humus fractions and their distribution in some lakes in Finland. Dans : Humic substances, their structure and function in the biosphere. Eds. Povoledo D. et Golterman H.L., Pudoc, Wageningen, Pays-Bas, p. 207.

Peter-Varbanets M., Zurbrügg C., Swartz C. et Pronk W. (2009) Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. *Water Res.*, 43, 245-265.

Pryor M.J., Jacobs E.P., Botes J.P. et Pillay V.L. (1998) A low pressure ultrafiltration membrane system for potable water supply to developing communities in South Africa. *Desalin.*, 119, 103-111.

Reuvers A.J., Van der Berg J.W.A. et Smolders C.A. (1987) Formation of membranes by means of immersion precipitation. I. A model to describe mass transfer during immersion precipitation. *J. Memb. Sci.*, 34, 45-67.

Safe Drinking Water Committee et National Research Council (1977) Drinking water and health. Volume 1, Chapter IV: Solid particles in suspension, U.S. National Academy of Sciences, Washington, DC, USA, ISBN 0-309-07831-8, p. 135-204.

Schnitzer M. et Kahn S.U. (1972) Humic substances in the environment. Ed. Dekker M., New York, NY, USA, 204 p.

Seidel A. et Elimelech M. (2002) Coupling between chemical and physical interactions in natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes: implications for fouling control. *J. Memb. Sci.*, 203, 245-255.

Shäffer P.T.B., Metcalf T.G. et Sproul O.J. (1980) Chlorine resistance of poliovirus isolants recovered from drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 40, 1115-1121.

Smolders C.A., Reuvers A.J. et Boom R.M. (1992) Microstructures in phase-inversion membranes Part 1. Formation of macrovoids. *J. Memb. Sci.*, 73, 259-275.

Swift R.S. (1989) Molecular Weight, Size, Shape, and Charge Characteristic of Humic Substances: Some basic considerations. Dans : Humic Substances II, In Search of Structure. Eds. Hayes M.H.B., MacCarthy P., Malcolm R.L. et Swift R.S., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, ISBN 0-471-92279X, p. 449-465.

Ulbricht M. (2006) Advanced functional polymer membranes. *Polym.*, 47, 2217-2262.

Waïs Moassa M.T. et Mazet M. (1991) Influence des sels minéraux sur l'adsorption des acides humiques sur floccs d'hydroxydes préformés. *Environ. Technol.*, 12, 725-730.

Wershaw R.L., Burcar P.J. et Goldberg M.C. (1969) Interaction of pesticides with natural organic material. *Environ. Sci. Technol.*, 3, 271-273.

Xiandong S. et Xiaorong H. (2003) The characterization and water purification behavior of gradient ceramic membranes. *Sep. Purif. Technol.*, 32, 73-79.

Yuan W. et Zydney A.L. (1999) Humic acid fouling during microfiltration. *J. Memb. Sci.*, 157, 1-12.

Yuan W., Kocic A. et Zydney A.L. (2002) Analysis of humic acid fouling during microfiltration using a pore blockage-cake filtration model. *J. Memb. Sci.*, 198, 51-62.

CHAPITRE 17

DESSERTE DOMESTIQUE D'EAU POTABLE EN MILIEU RURAL : POTABILISATION DES EAUX DE SURFACE PAR FILTRATION LENTE SUR SABLE

B.M. SEMEGA*

Université de Nouakchott – Faculté des Sciences et Techniques – Département de Chimie
Nouakchott, Mauritanie

RESUME

En milieu rural, l'utilisation courante essentiellement de l'eau de surface sans traitement préalable et accessoirement de l'eau souterraine accroît les risques de contraction de maladies liées à l'eau, qui exigent un traitement de potabilisation d'appoint. La filtration, une technique accessible, peut constituer un atout dans la conquête de la qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine. La filtration lente sur sable éliminant les particules en suspension et les microorganismes à un taux élevé accommode la plupart des eaux à divers usages (tels que pour une utilisation domestique, pour la production d'eau potable, pour le domaine de l'agriculture et de l'industrie). De ce fait, cette technique de traitement est intéressante pour les petites collectivités en raison de son accessibilité due à un faible coût, à une mise en œuvre simple et une exploitation facile, un dimensionnement aisé et une simplicité de la maintenance. L'objet de cet article est de présenter l'étude d'un filtre mis au point, conçu et fabriqué intégralement avec des matériaux locaux, dans un souci d'intégration effective. Les résultats obtenus ont été probants. En effet, les eaux filtrées étaient totalement exemptes de turbidité et de microorganismes pendant toute la période de fonctionnement efficace. Dans la phase de

* Auteur correspondant : Pr. SEMEGA Bakari Mohamed – Université de Nouakchott, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie – B.P. 5026, Nouakchott, Mauritanie
Email : semega@univ-nkc.mr / b.semega@accs.mr – Tél. : (+222) 630 80 33 / (+222) 641 80 19 – Fax : (+222) 525 39 97

disfonctionnement dû au colmatage du filtre, la dégradation des propriétés de l'eau a été observée avec la réapparition, et même plus intense, de la turbidité et de la population bactérienne. En outre, le filtre restait globalement indifférent à la rétention des éléments dissous, avec cependant certaines propriétés s'écartant de ce comportement général. D'autre part, des propriétés importantes pour le fonctionnement, telles que la capacité utile en fonction de la vitesse de rentrée de l'eau dans le filtre et les pertes de charge, restent à être établies pour optimiser l'utilisation de la filtration lente sur sable.

Mots clés : Eau de surface ; maladies hydriques ; zone rurale ; potabilisation ; filtre domestique ; filtration lente sur sable.

INTRODUCTION

Disposer d'une source d'eau naturelle superficielle suffisante et de qualité requise pour la consommation humaine est actuellement d'une telle rareté que cela relèverait même de l'impossible (Séméga, 2006a). En effet, les ressources en eaux naturellement potables (telles que les sources, les fleuves, les rivières et les nappes phréatiques) sont quasi-inexistantes, car surexploitées ou souillées par une activité humaine pressante. Dans le contexte mauritanien, elles se caractérisent en général par une rareté aiguë dans le temps et dans l'espace. Pendant la période des pluies, les mares temporaires, qui s'accumulent par-ci et par-là, sont très vite prises d'assaut et souvent utilisées à toutes fins. En d'autres situations, les populations, pour se garantir les disponibilités en eau et un accès à l'eau effectif, s'agglomèrent dans les zones humides, autour d'axes fluviaux, de lacs et de retenues de barrages. Mais, les eaux de ces réserves, après avoir lessivé de grandes étendues et recueilli divers déchets des êtres vivants et de leurs activités, se retrouvent presque toujours chargées en polluants et contaminées par de nombreux microorganismes pathogènes pour l'homme (Lanoix et Roy, 1976).

Ces eaux douces, quoique s'apprêtant à divers usages du fait de leur faible minéralisation qui constitue une disposition optimale tant pour la consommation humaine que pour l'irrigation, ne répondent que rarement aux exigences de la consommation humaine. En outre, la nature des sels, qui forment cette salinité, peut avoir une incidence notable et non souhaitée sur la santé, alors que la charge polluante limite ou en interdit même certaines utilisations sans traitement préalable. Or, dans la plupart des situations, par méconnaissance de faits, par indifférence ou par contrainte, les populations des zones de pénurie, ayant trouvé de l'eau douce, se soucient peu ou ne sont plus regardants, ni méfiants vis-à-vis de la qualité de l'eau (Séméga, 2006a).

Dans les localités urbaines autant que rurales, les besoins en eau nécessitent la mobilisation d'efforts et de capitaux importants pour installer des systèmes de desserte d'eau potable de qualité et en quantité requises pour satisfaire les demandes en eau. Pour les sites, surtout isolés, de quelques dizaines, centaines à millier d'habitants s'alimentant essentiellement avec de l'eau de surface et incidemment avec de l'eau souterraine, les

risques de maladies hydriques d'origine virale ou bactérienne sont patents (Séméga, 2006a). De même, pour les populations riveraines du fleuve Sénégal, comme pour celles des zones des lacs, l'accès à l'eau n'est essentiellement que quantitatif. Ainsi, les eaux dans ces zones, en général très exposées, doivent être saines avant consommation afin de ne pas constituer une source de maladies pour ces populations. En outre, depuis l'avènement des barrages sur le fleuve qui a permis, par endroits, une plus longue stagnation des eaux, les maladies hydriques ont connu une recrudescence (Séméga, 2006b). A cet effet, la mise en œuvre de stratégies d'une prise en main communautaire de l'approvisionnement en eau s'avérerait impérieuse pour faire reculer la prévalence de ces maladies. Il est donc opportun de s'atteler à trouver les moyens de disponibiliser l'eau avec le minimum de risques pour le consommateur.

La filtration, une technique très accessible, permet d'éliminer les particules en suspension et les microorganismes de l'eau à un taux s'accommodant avec l'usage courant (tel que pour la production d'eau potable, pour un usage domestique, pour un usage dans l'agriculture et l'industrie) (Huisman et Wood, 1974). De ce fait, la filtration lente sur sable est une solution intéressante pour les petites collectivités, car exigeant peu de capitaux et de frais d'exploitation tout en étant simple à réaliser. D'après Visscher et al. (1988) et Maazouzi et al. (2007), ce procédé de traitement s'adapte bien en milieu rural, du fait d'une bonne qualité de traitement, d'un fonctionnement simple et d'une maintenance abordable.

Le présent article s'inscrit dans la résolution de proximité de la problématique de la desserte du milieu rural en eau potable dans sa dimension de qualité. Il se rapporte à l'étude d'un prototype de filtration lente sur sable, d'une capacité pouvant subvenir aux besoins en eau d'une famille. L'essai en laboratoire a pour but de s'assurer des performances du système de filtration mis au point afin de vulgariser son utilisation.

LA FILTRATION LENTE SUR SABLE

Principe et fonctionnement

L'infiltration naturelle, par percolation dans les terrains perméables, conduit les eaux de pluies, en les épurant, à constituer des réserves aquifères. La filtration lente sur sable, une réplique de ce processus naturel, permet de réaliser, suivant la dimension et la diffusion particulière, la rétention des matières en suspension et des matières colloïdales contenues dans l'eau. Les microorganismes actifs, se fixant à la surface du sable, forment ainsi une membrane biologique (Visscher et al, 1991), siège des mécanismes d'épuration. L'activité de cette membrane, d'une épaisseur de 40 à 50 cm, mettant, selon la qualité de l'eau brute, trois à sept jours pour se former, diminue au fur et à mesure que l'eau s'épure en renfermant de moins en moins de matières organiques et d'éléments nutritifs (Hijnen et Van Der Kooij, 1992).

L'épuration débute dans la couche d'eau surnageant le filtre, où les particules les plus fines s'agrègent sous l'action d'interactions physiques et biochimiques, qui agit d'autant

plus efficacement que la vitesse d'écoulement est faible (0,1 à 0,2 m/h) et le temps de rétention suffisant. Le nombre de bactéries diminue, alors que se produit une réduction des matières organiques (Wang et Summers, 1996 ; Welte et Montiel, 1992). L'élimination des impuretés et l'amélioration de la qualité physique, chimique et bactériologique de l'eau ont lieu au niveau du lit filtrant, notamment dans la membrane biologique, dont dépend en grande partie l'efficacité du filtre (Van Os et al., 1997). La formation d'une biopopulation à l'intérieur du lit de sable conforte cette efficacité. La nature et la granulométrie du sable utilisé (comprise entre 0,3 à 2,5 mm suivant l'objectif recherché) (Permo, 1981) sont d'une importance capitale. Le sable, choisi en fonction des caractéristiques de l'eau brute et de la vitesse de filtration souhaitée, doit avoir un diamètre effectif (90% en masse du sable de taille supérieure à ce diamètre), un coefficient d'uniformité, une densité relative et une porosité adéquats (Cox, 1967). En outre, le sable doit être le plus propre possible, de pureté requise, donc exempt d'argiles, de poussières et de fragments divers.

La filtration consiste à faire passer, de manière lente, l'eau à traiter à travers un lit filtrant (Lanoix et Roy, 1976) d'épaisseur variant de 60 à 120 cm et à recueillir l'eau débarrassée des impuretés (Tableau 1). L'élimination des microorganismes, tels que les bactéries, les algues, les kystes, les protozoaires (comme le Giardia et Cryptosporidium) et les virus, peut être totale (Foliguet et Doncoeur, 1975 ; Runia et al., 1997), et celle de la couleur et de la turbidité, substantielle (Hoff, 1978 ; Lechevallier et al., 1981 ; Reilly et Kippin, 1983 ; Ben Thayer et al., 2007). Cette filtration élimine aussi, de manière efficace, les gaz sulfureux et les précipités oxydés dissous de fer et de manganèse dans les eaux (Montiel et Welte, 1990).

Tableau 1. Rendement de filtres lents sur sable (d'après Visscher et al., 1991)

Paramètre de la qualité de l'eau	Effet d'épuration de la filtration lente sur sable
Couleur	Réduction de 30 à 100%
Turbidité	Généralement réduite jusqu'à moins 1 UNT
Coliformes fécaux	Réduction de 95 à 100% et souvent 99 à 100%
Cercaires	Réduction quasi-complète des cercaires, schistosomes, kystes, œufs, etc.
Virus	Elimination complète
Matières organiques	Réduction de 60 à 75%
Fer et manganèse	Elimination en grande partie
Métaux lourds	Réduction de 30 à 95%

Selon les caractéristiques granulométriques du matériau filtrant, la grosseur et la cohésion des solides en suspension, la filtration a lieu en surface ou en profondeur. Les filtres lents sur sable ont l'avantage de se passer de la coagulation et de pouvoir être construits avec

des matériaux simples, disponibles partout comme l'ont souligné Cox (1967) et Huisman et Wood (1974). La simplicité de leur fonctionnement et de leur entretien constitue un autre avantage évident (Visscher et al., 1988). Leur effluent est peu corrosif et d'une qualité constante (Cox, 1967). Cependant, pour des eaux brutes de turbidités élevées, leur utilisation peut s'avérer coûteuse et leur efficacité faible.

Mécanismes de filtration

Au cours de la filtration, un ou plusieurs des mécanismes suivants peuvent intervenir dépendamment des caractéristiques des particules à retenir et du sable filtrant : capture, fixation et détachement (Huisman et Wood, 1974 ; Société Degrémont, 1989 ; Haarhoff et Cleasby, 1991 ; Cardot, 1999 ; Campos et al., 2006). La capture par tamisage mécanique s'opère par rétention de particules plus grosses que la maille du filtre ou déjà déposées formant elles-mêmes une barrière filtrante. Ce processus, d'autant plus actif que la maille du matériau filtrant est petite, retient une proportion importante des matières minérales en suspension. La capture par dépôt sur le matériau filtrant intervient lorsqu'une particule de plus petite taille que la maille des pores, entraînée avec l'eau dans son écoulement, est interceptée par frottement, change de trajectoire par diffusion aléatoire, inertie ou décantation, ou encore se retrouve retenue en profondeur dans le matériau. La fixation des particules à la surface du lit filtrant, due à des forces de coincement et de cohésion, et/ou à des forces d'adsorption, principalement d'attraction de Van der Waals, est favorisée par une faible vitesse d'écoulement de l'eau (Cardot, 1999). Le détachement a lieu lorsque les dépôts de particules par capture et fixation réduisent les espaces entre les grains et conduisent à une augmentation de la vitesse d'écoulement, qui détache partiellement (relargage) les particules déjà retenues et les entraîne plus en avant dans le matériau filtrant ou même dans le filtrat (Société Degrémont, 1989).

Lors de la filtration, les matières en suspension sont retenues dans les vides intergranulaires sur la plus grande partie de la hauteur du lit filtrant (Cleasby, 1983). La turbidité de l'effluent et la perte de charge du filtre permettent de contrôler son fonctionnement et d'optimiser son lavage (Cardot, 1999). L'atteinte de certaines valeurs de ces paramètres indique le dysfonctionnement du filtre, sa crevaision qui se manifeste à la fois par une augmentation notable de la turbidité et des pertes de charge. Ce dysfonctionnement est dû à l'accumulation de grandes quantités d'impuretés qui colmatent le lit filtrant. Le filtre est alors isolé et subit un lavage consistant à ôter soigneusement, par raclage, 2 à 5 cm de sable de la partie supérieure de la couche biologique, sujette à l'engorgement (Lanoix et Roy, 1976). La période d'utilisation du filtre correspond à la durée de fonctionnement séparant deux lavages. Cette utilisation est optimisée lorsque le fonctionnement du filtre est conduit de sorte que la turbidité de l'effluent et les pertes de charge atteignent en même temps leurs valeurs limites.

MATERIELS ET METHODES

Prototype de filtre mis au point

Le système de filtration conçu est formé de deux consoles de fût métallique usager (Figure 1), dont les caractéristiques sont regroupées dans le Tableau 2. Le filtre comprend un lit de sable classé reposant sur des couches de graviers. Le réservoir de stockage présente, du côté opposé du tuyau d'amenée du filtrat, une vanne de récupération de l'eau, reliée à un tube télescopique placé au centre du réservoir par l'entremise d'un coude à 90°. Ce tube est surmonté d'un flotteur qui permet de maintenir un volume d'eau constant dans le réservoir et de réguler ainsi l'évacuation de l'eau filtrée. Le réservoir de filtration, renfermant les matériaux filtrants, comporte, au milieu de sa base, un orifice qui le relie à celui de stockage par un tuyau de raccordement avec une vanne assurant le transfert de l'eau filtrée et l'évacuation des eaux de lavage.

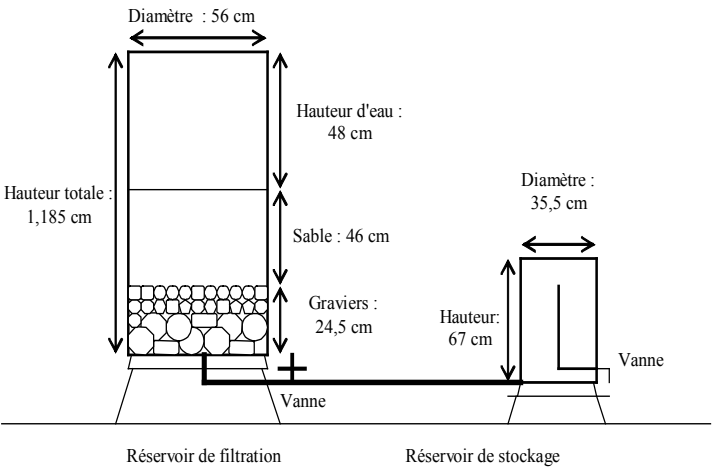


Figure 1. Le système de filtration mis au point et étudié

Tableau 2. Caractéristiques des modules du système de filtration étudié

Réservoir	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)	Volume (l)
Réservoir de filtration	118,5	56	292
Réservoir de stockage	67	35,5	66

Le lit filtrant

Les matériaux filtrants sont constitués de graviers de différents calibres ainsi que deux types de sables (Tableau 3). Les graviers, rouges ou blancs, de formes rondes à ovales et de taille variant entre 2 et 60 mm, sont triés afin de constituer des lots de tailles voisines pour les différentes couches. Les sables sont éoliens rouges (oxydés) renfermant des impuretés et des poussières (particules diverses) ou marins blancs (lessivés) contenant des éclats de coquilles (calcaires).

Tableau 3. Caractéristiques techniques du système de filtration mis au point

Matériaux	Taille (mm)	Hauteur du massif (cm)	Volume (l)	Epaisseur (cm)	Proportion du volume total (%)
Graviers	30 à 60	10	61	24,5	20,90
	10 à 20	9			
	2 à 10	5,5			
Sables	0,16 à 0,4	46	113	46	38,70
Charge en eau		48	118	48	40,40

Les matériaux utilisés sont lavés avant leur mise en place dans le filtre pour s'assurer de leur propreté adéquate. Le lavage des sables et des graviers élimine les impuretés et la teinte qui peut modifier la turbidité de l'effluent. Le lavage, en premier lieu à l'eau sous pression pour éliminer les poussières (Cox, 1967), est répété plusieurs fois jusqu'à ce que l'eau qui surnage soit la plus claire possible. Puis un lavage à l'acide chlorhydrique à 10%, à raison de 2 l d'acide pour 5 l de matériau à laver, est effectué pour décaper les impuretés réfractaires fortement adhérentes aux grains, les matières organiques ou le calcaire dans le cas du sable marin. Ensuite, le matériau lavé est séché au soleil pendant 10 à 12 h. Puis, le sable est tamisé pour trier les grains par tailles, comprises entre 0,16 à 0,40 mm (Cox, 1967), à l'aide d'une série de tamis normalisés de différentes ouvertures et d'un vibreur.

Le filtre est rempli de bas en haut en superposant les couches de graviers, des plus gros aux plus petits, puis la couche de sable. Les graviers constituant le support du filtre

se répartissent selon la taille sur une hauteur de 10 cm de graviers de 30 à 60 mm de diamètre, 9 cm de 10 à 30 mm de diamètre et 5,5 cm de 2 à 10 mm de diamètre. La couche filtrante de sable, d'une épaisseur de 46 cm, repose sur la dernière couche de graviers. La hauteur totale du filtre est répartie entre couches de graviers d'épaisseur 24,5 cm, de sable d'épaisseur 46 cm et de lame d'eau de 48 cm, qui représente la charge totale en eau (Tableau 3).

Le filtre, une fois mis en place, subit un lavage d'appoint avant le début de la filtration. Ce lavage a pour but d'éliminer les traces d'acides ainsi que les poussières restées collées aux matériaux et pouvant induire une turbidité dans le filtrat. Le lavage s'effectue d'abord en continu avec de l'eau du robinet débitée par un raccord dans le filtre où une hauteur d'eau constante est maintenue au-dessus de la couche de sable. Le réservoir de filtration évacue à son tour les eaux de lavage par la vanne qui déverse l'eau dans un évier. Pour maintenir une circulation uniforme de l'eau, le système a été réglé de telle manière que le débit entrant dans le filtre soit égal au débit sortant. Le contrôle, au cours du lavage, de la turbidité de l'eau à la sortie du filtre notifie un lavage adéquat lorsqu'elle est voisine de celle de l'eau à l'entrée. La vérification du pH de l'eau de lavage à la sortie, moyen de contrôle plus approprié, est aussi utilisée et la valeur du pH doit être voisine de celle de l'eau de lavage, attestant ainsi la propreté du filtre.

Prélèvements et méthodes de caractérisation

L'échantillonnage pour cette étude a concerné à la fois les opérations de prélèvements des eaux destinées à la filtration, mais aussi à leurs analyses physico-chimiques et bactériologiques. Les eaux étudiées proviennent de la réserve d'eau du barrage de Dima sur le fleuve Sénégal, où, stagnantes, les eaux abritent un développement important de *Typha Australus* et diverses plantes aquatiques, telles que la laitue d'eau douce, l'Azolla et des nénuphars. Les prélèvements de l'eau destinée à la filtration ont été effectués à 3 m de la berge, à fond boueux, à une profondeur supérieure 0,7 m, dans une zone fréquentée pour les bains, la lessive, l'abreuvement des animaux et pour le puisage de l'eau à usages domestiques. Au moment du prélèvement, l'eau a été homogénéisée par un brassage vigoureux, puis une dizaine de fûts en plastique (volume de 70 l), préalablement rincés avec l'eau à prélever, ont été remplis.

Les échantillons avant filtration ont été prélevés dans le filtre juste au moment de sa mise en marche. De même que le premier filtrat a été prélevé pour les analyses physico-chimiques et bactériologiques après filtration. Les prélèvements ont été effectués de façon synchrone. Les analyses physico-chimiques et bactériologiques ont été réalisées par les méthodes classiques d'analyses des eaux (Rodier, 1984 et 1996). La minéralisation (M_{20}) a été déterminée à partir de la mesure de la conductivité à 20 °C (C_{20}). La turbidité a été mesurée par nephelométrie. Le calcium, le magnésium et la dureté totale ou le titre hydrotimétrique (TH) ont été dosés par la méthode titrimétrique à l'acide éthylène-diamine-tétracétique (EDTA). La teneur en sodium et en potassium a été déterminée par

photométrie de flamme. Les chlorures et les carbonates et bicarbonates ont été dosés respectivement par argentimétrie (méthode de Mohr) et par acidimétrie. Les titres des sulfates par nephelométrie au chlorure de baryum, des nitrates au salicylate de sodium, des nitrites au réactif de Zambelli et de l'ammonium à l'hypochlorite de sodium ont été mesurés sur un spectrophotomètre UV-visible. Les précisions des dosages des différents éléments varient de 3 à 5%. Les coliformes totaux et fécaux ont été ensemencés sur un milieu de culture Mac Conkey Agar (MCA) et les streptocoques fécaux ensemencés sur de la Gélose à la Bile, à l'Esculine et à l'Azine de Sodium (GBEAS). Pour la gamme de colonies de microorganismes (coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux) dénombrés dans les échantillons d'eau caractérisés au cours de cette étude, l'intervalle de la limite de confiance au seuil de 95%, variait de 3,69 à 18,39%.

L'étude du système de filtration a consisté à suivre les caractéristiques du filtre en fonctionnement, amorcé dès qu'une hauteur d'eau constante (110 l d'eau) était maintenue sur le matériau filtrant. L'alimentation du filtre est assurée par une bassine qui déverse lentement l'eau à filtrer de manière à ne pas perturber l'état de la surface du lit filtrant. Ainsi, l'évolution de la turbidité, des propriétés physico-chimiques et de la population des bactéries a été suivie.

RESULTATS ET DISCUSSION

Le Tableau 4 présente les résultats du suivi de la variation de la turbidité en fonction du temps. Les Tableaux 5 et 6 regroupent les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'eau, avant et après filtration.

Ces résultats indiquent qu'avant filtration, l'eau à traiter présente sur le plan physico-chimique une potabilité requise pour l'ensemble des caractéristiques étudiées à l'exception de la turbidité et des nitrites qui ont une teneur plus élevée que la norme pour l'eau potable. Le dénombrement des colonies de coliformes fécaux et totaux et des streptocoques fécaux de cette eau (Tableau 6) indique que cette eau est insalubre sur le plan bactériologique.

La représentation graphique de la variation de la turbidité en fonction du temps (Figure 2) permet d'illustrer le fonctionnement du filtre, qui se subdivise en trois phases. Une première phase, très courte, caractérise une décroissance rapide due à l'amorce de la filtration et correspondant à la chute de la turbidité qui passe, en 5 min, de 5,9 à 2,5 UNT, soit un abattement de plus de 40%. Une deuxième phase, relativement plus longue, marque une diminution faible jusqu'au minimum de 0,3 UNT que la turbidité n'atteint qu'au bout de 3 h, soit un abattement de 95% par rapport à l'eau brute. Une troisième étape d'accroissement rapide de la turbidité indique le colmatage progressif du système de filtration. L'ensemble de cette évolution de la turbidité traduit le comportement du filtre vis-à-vis de l'eau à traiter.

Tableau 4. Variation de la turbidité en fonction du temps

t (min)	Tb (UNT)	t (min)	Tb (UNT)	t (min)	Tb (UNT)	t (min)	Tb (UNT)
0	5,9	50	2,2	115	1,1	215	2,1
5	2,5	55	2,1	125	0,9	225	5,2
10	2,3	60	2,1	135	0,8	235	7,9
15	2,2	65	2,0	145	0,6	245	8,6
20	2,4	70	1,9	155	0,6	255	9,7
25	2,3	75	1,8	165	0,3	265	10
30	1,9	80	1,8	175	0,7	275	11
35	2,1	85	1,4	185	1,4		
40	2,1	95	1,1	195	1,8		
45	1,9	105	1,0	205	2,1		

Tb : turbidité

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau avant et après filtration

	Echantillon		
	Avant	Après	Réduction (%)
pH	7,65	7,5	2
C ₂₀ (µS/cm)	550	492	11
M ₂₀ (mg/l)	394	352	11
TH (mg/l)	104	100	4
Ca (mg/l)	24	24	0
Mg (mg/l)	10,7	9,72	9
Na (mg/l)	99,8	64	36
K (mg/l)	0,5	1,2	-119
Cl (mg/l)	135	128	5
HCO ₃ (mg/l)	104	77	26
NO ₂ (mg/l)	0,129	0,226	-76
NO ₃ (mg/l)	0,455	0,057	87
SO ₄ (mg/l)	12,34	4,94	60
NH ₄ (mg/l)	0,19	0,19	0

Tableau 6. Suivi microbiologique des différentes étapes de la filtration

Etapes	Coliformes totaux	Coliformes fécaux	Streptocoques fécaux
Avant filtration	4	2	1
En cours de filtration	0	0	0
Au colmatage	10	4	0

Le profil de la turbidité en fonction du temps (Figure 2) permet d’observer que la période de fonctionnement efficace du filtre s’étale sur une durée de 3,5 h, au cours de laquelle la turbidité reste inférieure ou égale à 2,1 UNT. Ce profil montre également que dès que la membrane filtrante ne joue plus son rôle de barrière, le filtre est en disfonctionnement. Il est colmaté en raison de la réduction des espaces intergranulaires par obstruction des interstices du matériau filtrant (Cardot, 1999). Dans cette situation, la turbidité réaugmente pour se retrouver au bout d’une heure, à des valeurs plus élevées que celle de l’eau brute. Cette augmentation pourrait être due à un relargage des matières en suspension retenues par la membrane filtrante qui en libère beaucoup plus qu’elle n’en retient. Il y a alors un redéveloppement de la turbidité qui altère fortement la qualité de l’eau filtrée.

Lors de la filtration, la barrière filtrante a agi différemment sur les caractéristiques de l’eau. Les Figures 3, 4 et 5 montrent que pour le pH, la minéralisation, le calcium, le magnésium, les chlorures et l’ammonium, les teneurs sont restées quasi-inchangées après filtration, avec toutefois une faible réduction pouvant atteindre 10%. Ces profils sont en accord avec le comportement général en filtration des éléments dissous qui ne sont en principe pas ou peu retenus par la membrane filtrante.

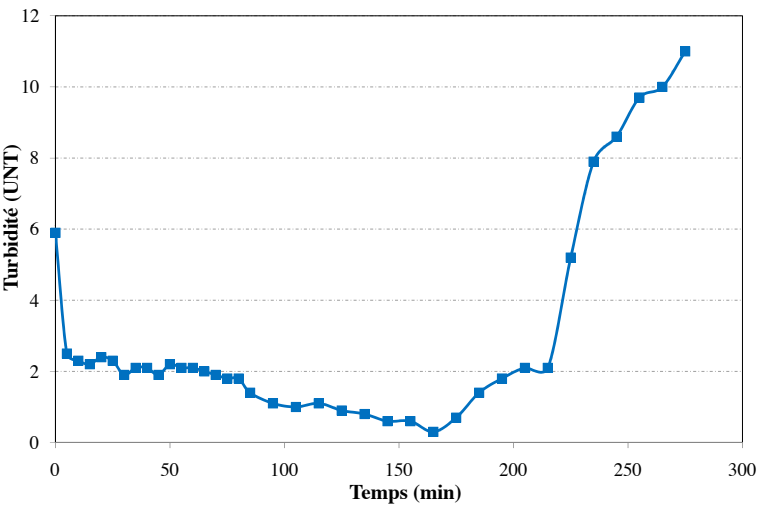


Figure 2. Variation de la turbidité en fonction du temps au cours de la filtration

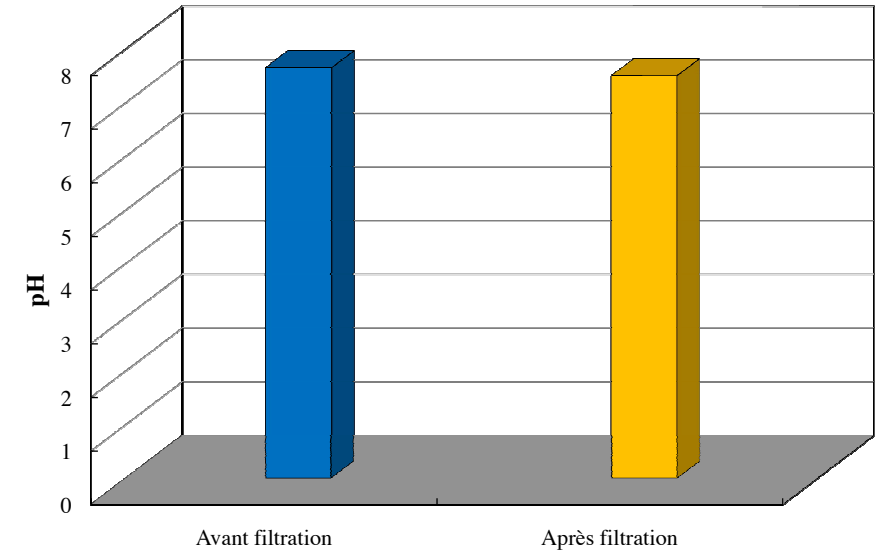


Figure 3. Profil du pH de l'eau avant et après filtration

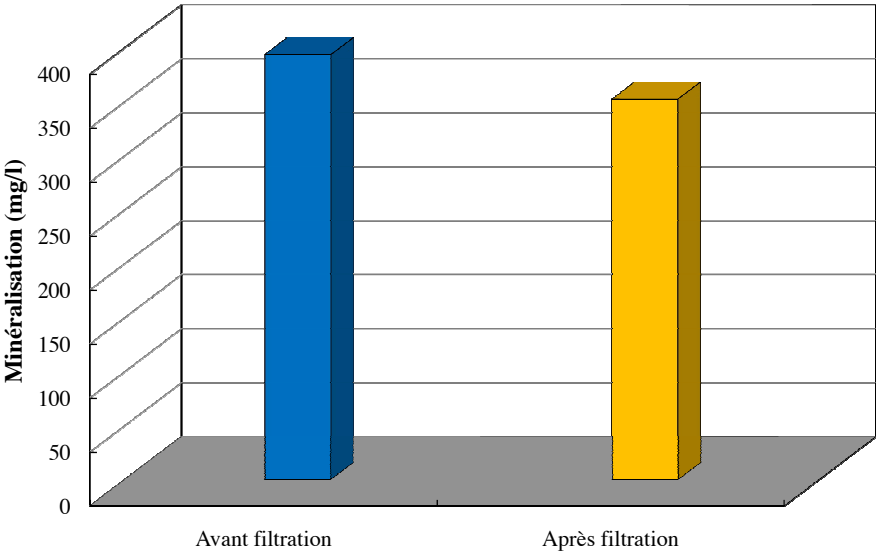


Figure 4. Profil de la minéralisation de l'eau avant et après filtration

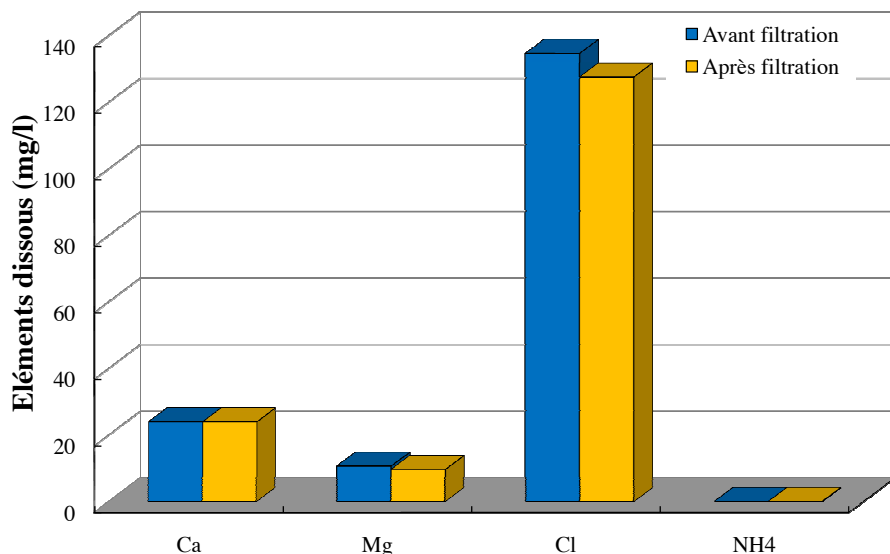


Figure 5. Profils du calcium, du magnésium, des chlorures et de l'ammonium de l'eau avant et après filtration

Pour le sodium, les bicarbonates, les sulfates et les nitrates, le filtre constitue une véritable barrière qui les retient substantiellement. Les Figures 6, 7 et 8 indiquent que ces éléments accusent des abattements respectifs de 36, 26, 60 et 87%. Ces abattements relativement importants ont entraîné une diminution notable de l'ordre de 10% de la minéralisation totale de l'eau qui améliore sa potabilité. Cependant, ces caractéristiques ne se conforment pas au comportement général des éléments dissous dans la filtration. Les anions renfermant de l'oxygène, les sulfates et surtout les nitrates ont leurs teneurs qui ont diminué de manière très marquée avec la filtration et semblent être engagés dans des processus utilisant leur oxygène. Ainsi, la diminution observée pourrait être due à leur décomposition par des bactéries anaérobies présentes dans le milieu et dont l'action serait une réduction, ce qui a pour effet d'entraîner la transformation des nitrates en nitrites, dont la teneur a considérablement augmenté au cours de la filtration. La non potabilité physico-chimique de l'eau brute, qui était déjà due à une teneur élevée en nitrites, supérieure à la limite admise de 0,1 mg/l, se retrouve encore plus accentuée après la filtration.

Pour les microorganismes, le filtre s'est avéré encore plus efficace. Ainsi, la population bactérienne a été complètement éliminée de l'eau (Figure 8) avec un abattement de 100%. Cette situation, bénéfique pour la potabilité de l'eau traitée, subsiste tant que le filtre fonctionne efficacement. Dès qu'apparaît le colmatage du filtre, alors que complètement annihilée, la population bactérienne, corrélativement à l'augmentation de la turbidité, réapparaît aussi à travers la colonie des coliformes fécaux et totaux qui ne semblent plus être retenus par la barrière filtrante. De plus, leur présence est plus importante même que pour l'eau brute non traitée.

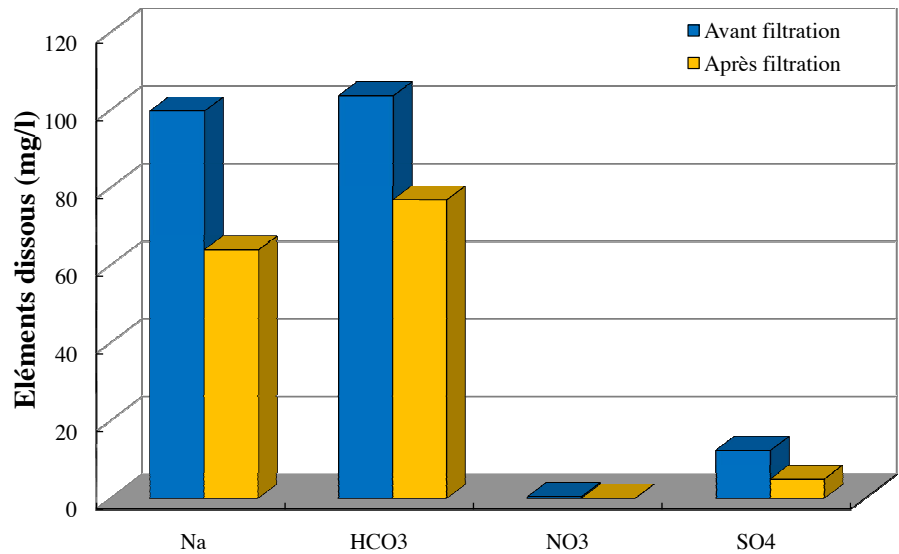


Figure 6. Profils du sodium, des bicarbonates, des nitrates et des sulfates de l'eau avant et après filtration

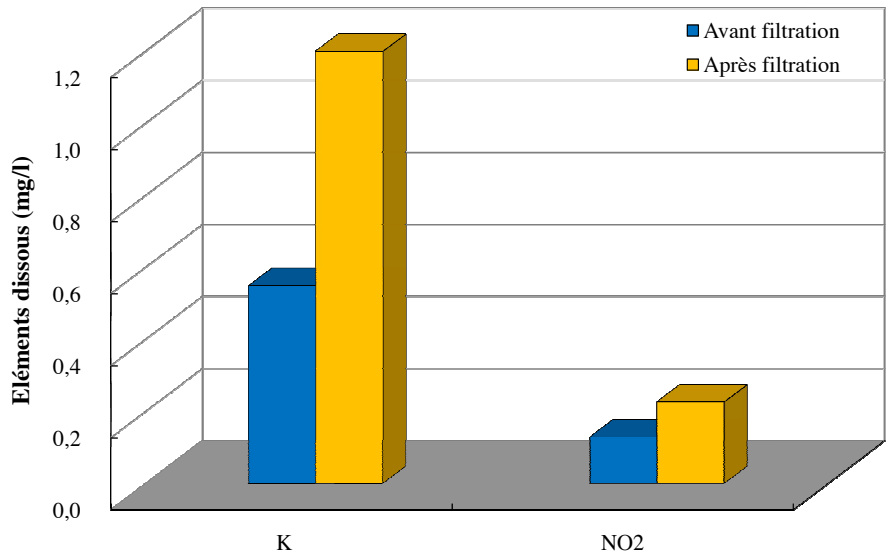


Figure 7. Profils du potassium et des nitrites de l'eau avant et après filtration

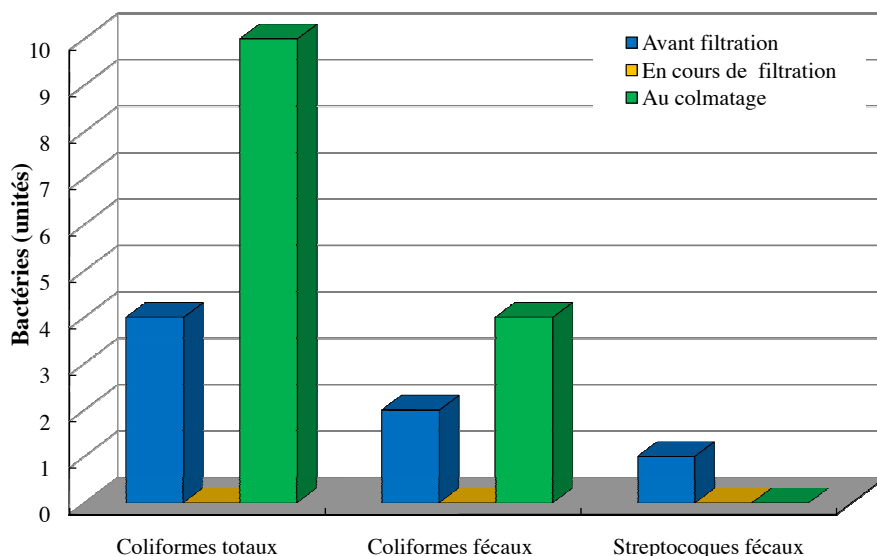


Figure 8. Profils de la population bactérienne de l'eau avant et après filtration

A l'inverse des autres éléments dissous, les nitrites et le potassium présentent un comportement assez particulier. La filtration, au lieu de constituer pour ces éléments une barrière, semble favorisée leur redéveloppement. Ainsi, ils se retrouvent dans l'effluent avec des teneurs qui ont fortement augmenté, respectivement de 76 et 119%. L'augmentation relativement importante de la teneur du potassium pourrait provenir des sels d'évaporites résiduels de potassium, que renfermerait vraisemblablement le sable marin utilisé dans le filtre. La situation de l'augmentation de ces éléments est préjudiciable au traitement de l'eau, surtout lorsqu'elle les conduit au dépassement des limites imposées par les normes. Ce comportement aurait pu être élucidé par un suivi systématique des caractéristiques physico-chimiques de l'effluent au cours de la filtration et au colmatage afin de préciser le sens d'évolution.

CONCLUSION

L'étude du système de filtration mis au point et caractérisé à travers son fonctionnement et les propriétés physico-chimiques et bactériologiques de l'eau brute et de son effluent amène à tirer les conclusions suivantes :

- La membrane filtrante joue effectivement son rôle de barrière de rétention des matières en suspension et des microorganismes. L'eau ainsi filtrée est devenue claire et potable sur le plan bactériologique ;
- La filtration, qui ne devrait pas en principe affecter de manière notable les propriétés des espèces chimiques dissoutes dans l'eau, autres que le fer, le manganèse et

les métaux lourds, a entraîné une diminution bénéfique et une augmentation préjudiciable de la teneur de certaines d'entre elles.

L'étude a également révélé quelques insuffisances de conception du système de filtration, qui exigent des adaptations fonctionnelles afin d'améliorer sa connaissance et optimiser ses performances. De ce fait, des piézomètres doivent y être intégrés pour permettre sa caractérisation hydraulique à travers le suivi des pertes de charge. De même, la chaîne de traitement doit comporter un réservoir d'alimentation qui permettra de réguler et de stabiliser le débit entrant dans le filtre et maintenir une charge constante d'eau afin d'éviter de perturber le lit filtrant en versant directement l'eau, surtout à débit élevé. De plus, le réservoir de filtration doit être muni d'une vanne autonome pour le lavage.

En outre, l'étude ayant été faite à faible débit pour mieux cerner les étapes du processus de filtration, la capacité effective en volume du filtre a été occultée. L'étude doit être poursuivie et conduite à différents débits dans la gamme des vitesses de la filtration lente sur sable, pour permettre de déterminer cette capacité du filtre en fonctionnement efficace et d'en préciser le débit optimum.

A l'issue de cette étude, en prenant en compte les remarques pertinentes relevées, un système de filtration à trois réservoirs, dont deux horizontaux, est proposé (Figure 9). Ce système serait plus adapté et plus avantageux d'entretien et de fonctionnement avec une surface de lit filtrant plus grande, en l'occurrence, une capacité plus importante.

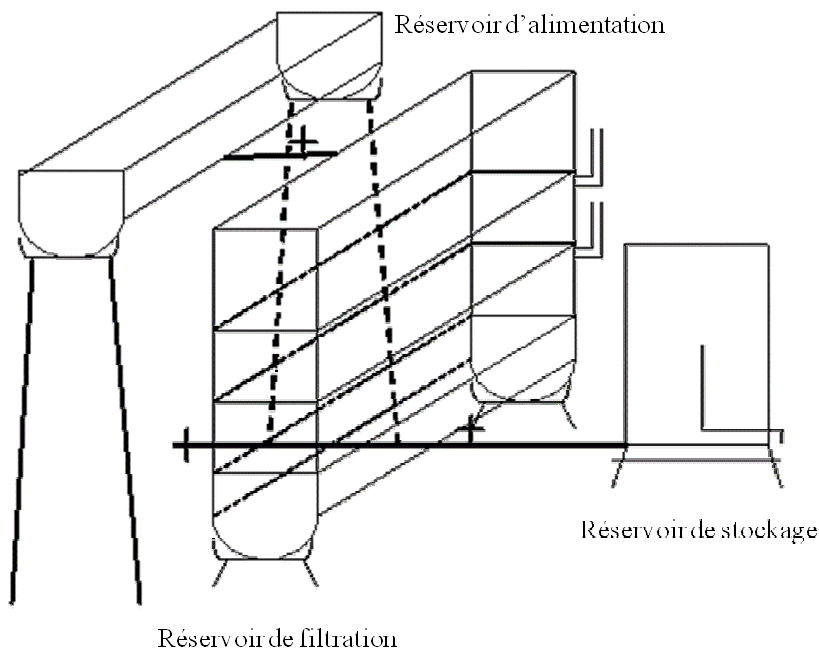


Figure 9. Schéma du module de filtration proposé

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'Organisation Non Gouvernementale (ONG) TENMYA et à la FEDERATION LUTHERIENNE MONDIALE en Mauritanie qui, dans le cadre de leurs activités de vulgarisation des systèmes intégrés de potabilisation des eaux de surface en milieu rural, nous ont proposé cette étude et fourni le matériel et la logistique nécessaires à sa réalisation technique. Nous remercions également les étudiants de la filière « Maîtrise et Gestion de l'Eau » de la Faculté des Sciences et Techniques, Ibrahima SY et Abou Salif BASS, pour leurs efforts et leurs contributions déterminantes dans les travaux de laboratoire de cette étude.

REFERENCES

Ben Thayer B., Riahi K. et Boudhraa H. (2007) Élimination de la turbidité par oxygénation et filtration successives des eaux de la station de Sfax (Sud de la Tunisie). *Rev. Sci. Eau*, 20(2), 355-365.

Campos L.C., Smith S.R. et Graham N.J.D. (2006) Deterministic-based model of slow sand filtration. II: Model application. *J. Environ. Eng.*, 132, 887-894.

Cardot C. (1999) Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques. Ed. Ellipses Marketing, Collection Technosup, Paris, France, ISBN : 2729859810, p. 256.

Cleasby J.L. (1983) Slow sand filtration and direct in-line filtration of a surface water. Proceedings of the American Water Works Association Seminar on Innovative Filtration Techniques, Las Vegas, Nevada, USA, p 1.

Cox C.R. (1967) Techniques et contrôle du traitement des eaux. Ed. Organisation Mondiale de la Santé (OMS), Série de monographies n°49, Genève, Suisse.

Société Degrémont (1989) Mémento Technique de l'eau, tome 1, 9^e édition, Ed. TEC & DOC-LAVOISIER, Rueil-Malmaison, France, p. 1459.

Foliguet, J.M. et Doncoeur F. (1975) Élimination des entérovirus au cours du traitement des eaux d'alimentation par coagulation/floculation/filtration. *Water Res.*, 9, 953-961.

Haarhoff J. et Cleasby J.L. (1991) Biological and physical mechanisms in slow sand filtration. "Slow Sand Filtration", American Society of Civil Engineers, New York, USA, p 19-68.

Hijnen W.A.M. et Van Der Kooij D. (1992). Elimination du COA et accumulation de matières bactériennes dans les filtres à sable expérimentaux. *Rev. Sci. Eau*, 5(S), 17-32.

Hoff J.C. (1978) The relationship of turbidity to disinfection of potable water. Evaluation of the microbiology standards for drinking water. EPA-570/9-78-OOC. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, p.103.

Huisman L. et Wood W.E. F.I.C.E. (1974) Slow sand filtration. Ed. Organisation Mondiale de la Santé (OMS), Genève, Suisse, ISBN: 9241540370, p. 122.

Lanoix J.N. et. Roy M.L. (1976) Manuel du technicien sanitaire, édition O.M.S, Genève, Suisse, p. 193.

Lechevallier M.W., Evans T.M. et Seidler R.J. (1981) Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 42(1), 159-161.

Maazouzi A., Ketteb A. et Badri A. (2007) Etude de procédés de filtration sur sable de la région de Béchar en prétraitement de l'eau potable. *Desalin.*, 206(1-3), 358-368.

Montiel A. et Welte B. (1990). Le manganèse dans l'eau – Elimination du manganèse dans l'eau par traitement biologique. *Rev. Sci. Eau*, 3, 469-481.

PERMO (1981) La pratique de l'eau. Ed. Le Moniteur, Collection Livres scientifiques et techniques et de sciences humaines, Paris, France, ISBN : 9782281111415.

Reilly J.K. et Kippin J.S. (1983). Relationship of bacterial counts with turbidity and free chlorine in two distribution systems. *J. Am. Water Works Assoc.*, 75(6), 309-312.

Rodier J. (1984) L'analyse de l'eau : eaux naturelles – eaux résiduaires – eau de mer ; chimie – physico-chimie – bactériologie – biologie, 7^e édition. Ed. Dunod, Paris, France, p. 1365.

Rodier J. (1996) L'analyse de l'eau : eaux naturelles – eaux résiduaires – eau de mer, 8^e édition. Ed. Dunod, Paris, France, p. 1394.

Runia W.Th., Michielsen J.M.G.P., Van Kuik A.J. et Van Os E.A., (1997) Elimination of root infecting pathogens in recirculation water by slow sand filtration. Proceedings of 9th international congress on Soilless culture, Jersey, New Jersey, USA, p 395-408.

Séméga B.M. (2006a). Eau, assainissement et hygiène : impacts socio-économiques. *Horizon* n°4194 du mardi 28 mars 2006.

Séméga B.M. (2006b). Le fleuve Sénégal et ses riverains : les remous de la conquête du meilleur destin. *Horizon* n°4276 du mardi 25 juillet 2006.

Van Os E.A., Bruins M.A., Van Buuren J., Van Der Veer D.J. et Willers H. (1997) Physical and chemical measurements in slow sand filters to disinfect recirculating nutrient solutions. Proceedings of 9th international congress on Soilless culture, Jersey, New Jersey, USA, p. 313-328.

Visscher J.T., Veenstra S. et Bastemeijer T. (1988) La filtration lente sur sable : manuel d'entretien. Guides de formation n°1, Ed IRC, La Hague, France, p.72.

Visscher J.T., Paramasivam R., Raman A., et Heijnen H.A. (1991). La filtration lente sur sable pour l'approvisionnement en eau collective : planification, conception, construction et entretien. Documents techniques n°24, édition IRC, La Hague, France, p. 51.

Wang J.Z. et Summers R.S. (1996) Étude de la biodégradation de la matière organique naturelle ozonée dans les filtres à sable. *Rev. Sci. Eau*, 9, 3-16.

Welte B. et Montiel A. (1992) Elimination du CODB par une combinaison de traitements biologiques dont la filtration lente dans une filière de production d'eau potable. *Rev. Sci. Eau*, 5(S), 165-176.

PARTIE V

LE TRAITEMENT ET LA QUALITE DES EAUX USEES

CHAPITRE 18

MUNICIPAL WASTEWATER MANAGEMENT PRACTICES IN LIBYA

A.A. ABUFAYED*

AlFateh University – Dept. of Environment Engineering
Tripoli, Libya

A.A. ELKEBIR

AlFateh University – Dept. of Environment Engineering
Tripoli, Libya

ABSTRACT

Significant improvements in the living standard of Libyans in the last four decades have resulted in a rapid growth in both population and water consumption rates for domestic, industrial and agricultural purposes. This growth has been accompanied by the construction of over 70 municipal wastewater treatment plants with effluent reused as early as 1971. Municipal wastewater characteristics, expressed in terms of Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), Chemical Oxygen Demand (COD), and suspended solids (SS), are typical of those of weak-to-medium wastewaters while ammonia nitrogen is within the range specified for strong wastewaters. Treatment technologies evolved from trickling filters (TF) in the early seventies to activated sludge (AS) in the eighties and thereafter. Secondary and tertiary standards were adopted universally with plants producing effluent suitable for limited irrigation applications. However, due to a host of environmental, technical and socio-economic factors, most wastewater treatment plants failed to meet effluent quality standards. The most critical challenges leading to these shortcomings were inappropriate institutional and human resources capabilities. These challenges must be given priority if expanded, upgraded or newly constructed wastewater treatment plants are to produce reusable effluents thus protecting the environment and providing a renewable source to supplement Libya's overstressed water resources.

Key words: Libya; municipal; wastewater; treatment; technology; management; reuse.

* Auteur correspondant : Pr. ABUFAYED Abdulgader Ali – AlFateh University, Dept. of Civil Engineering – POB 13626, Tripoli, LIBYA
Email : aabufayed@hotmail.com – Tél. : (+218) 92 502 4906 – Fax : (+218) 21 333 9777

RESUME

Les améliorations significatives du niveau de vie des Libyens pendant les quatre dernières décennies ont eu comme conséquence une croissance rapide des taux de population et de consommation d'eau à des fins domestiques, industrielles et agricoles. Cette croissance a été accompagnée de la construction de plus de 70 stations de traitement des eaux usées municipales, avec une réutilisation de l'effluent dès 1971. Les caractéristiques des eaux usées municipales, exprimées en termes de demande biochimique en oxygène (DBO₅), de demande chimique en oxygène (DCO), et de matières en suspension (MES), sont typiques de ceux des eaux usées ayant une pollution faible à moyenne, tandis que les concentrations en azote ammoniacal correspondent à des eaux usées caractérisées par une forte pollution. Les procédés de traitement ont évolué des lits bactériens (TF) au début des années 70 vers les boues activées (AS) à partir des années 80. Des normes au niveau des traitements secondaires et tertiaires ont été adoptées universellement avec des stations produisant des effluents appropriés pour des applications contrôlées d'irrigation. Cependant, en raison d'une foule de facteurs environnementaux, techniques et socio-économiques, la plupart des stations de traitement des eaux usées n'ont pas pu atteindre les standards de qualité fixés pour la réutilisation des effluents. Les principaux problèmes concernaient les capacités inadéquates des ressources humaines et institutionnelles. Résoudre ces problèmes doit être une priorité, si les nouvelles stations de traitement d'eaux usées et celles qui sont rénovées ou agrandies ont aussi pour but la réutilisation des effluents, et donc de protéger l'environnement et fournir une source renouvelable pour compléter les ressources en eau surchargées de la Libye.

Mots clés : Libye ; municipal ; eau usée ; traitement ; technologie ; gestion ; réutilisation.

INTRODUCTION

Significant improvements in the living standard of Libyans in the last four decades have resulted in a rapid growth in both population and water consumption rates for domestic, industrial and agricultural purposes. This growth has been accompanied by the construction of large-scale wastewater infrastructures including conveyance networks and wastewater treatment plants with effluent reuse schemes. Over 70 municipal wastewater treatment plants have been constructed in most cities and towns with effluent reused as early as 1971.

Expenditures for sewerage projects increased correspondingly from 58.4 million US dollars-USD in 1963-1969 to over 2.5 billion USD in 1970-1985 (while expenditures for

infrastructures projects including sewerage works in the next five years are estimated to be over 0.8 billion USD) (Environmental General Authority, 2008).

The objective of this paper is to assess the state of municipal wastewater management practices in Libya. This objective is achieved through: 1) providing an overview of the evolution of municipal wastewater management, 2) characterization of raw municipal wastewater quality, 3) outlining treatment technologies employed, 4) describing effluent reuse practices, and 5) summarizing national legislative and institutional aspects of wastewater management. Next, the challenges and lessons learned from over 40 years of wastewater management are identified along with an assessment of the experience gained. Based on this assessment, conclusions and recommendation are made defining ways of overcoming these challenges and, subsequently, turning treated effluent from a high risk pollutant to a valuable non-conventional water source highly needed supplement Libya's overstressed conventional water resources.

EVOLUTION OF WASTEWATER TREATMENT PRACTICES IN LIBYA

Wastewater management enjoyed special attention in the 1970's and 1980's decades as a major component of modernizing Libya's infrastructures and, subsequently, improving the population's living standards. Wastewater treatment was intended to: 1) protect public health and the environment and 2) provide a supplemental source of water, thus reducing the load on overstressed conventional sources.

First generation wastewater treatment plants were constructed in the major cities of Benghazi, Derna, Marj, Misurata, Sebbeh, Tripoli, and Tobruq during the period 1963-1967. Construction efforts increased considerably in quantity and capacity in the early seventies to eighties with the total number of wastewater treatment plants (including extensions) exceeding 70 spanning all major cities, towns and villages (Figure 1 and Table 1). However, this number does not include many package plants installed in oil or "temporary" contractors' companies camps dispersed throughout the country. The number of plants increased almost linearly over the period 1963 to 1995 at an average rate of one plant per year.

The large increase in wastewater quantities due to high growth rates of Libya's population from 2.25 million inhabitants in 1973 to almost 6 million inhabitants in 2006 necessitated upgrading and extension of existing wastewater treatment plants and construction of new ones thus initiating the third generation plants which are under tendering or construction presently. Expected to be operational as soon as 2010, these plants will produce effluents suitable for agricultural reuse.



Figure 1. Locations of major wastewater treatment plants in Libya (From Abufayed et al., 1998)

Table 1. Major wastewater treatment plant data (Adopted from Abufayed et al., 1998; Abufayed, 1999)

Location	Capacity (m ³ /d)	Treatment Technology	Location	Capacity (m ³ /d)	Treatment Technology
Tobruq A	1350	TF	Agouria	3600	AS
Tobruq B	33 000	AS	Benghazi A	27 300	TF
Derna A	4550	TF	Benghazi B	54 000	AS
Derna B	8300	AS	Ajdabia	15 600	AS
Shahhat	6743	AS	Jaghboub	Data unavailable	
Beida A	4500	TF	Bursess	300	AS
Beida B	2507	AS	Abiaar	7400	AS
Gharnada	2507	AS	AlBrega	3500	AS
Ghobbah	3000	AS	AbouHadi	1000	AS
AlGhegheb	1250	AS	Sirte	26 400	AS
AlAthroun	250	AS	Heishah	Data unavailable	
AlAbrag	1250	AS	Tawerghah	Data unavailable	
AdDabousia	1200	AS	Misratah A	1350	TF
Qasr Libya	300	AS	Misratah B	24 000	AS
Ain Mara 1	500	AS	Zliten 1	6000	AS
Ain Mara 2	300	AS	Khoms	8000	AS
AlMarj A	4550	AS	Tajoura	1500	AS
AlMarj B	8300	AS	Tripoli A	27 000	TF
Massah	2507	AS	Tripoli B	110 000	AS
Ras Hilaal	625	AS	Tripoli C	110 000	AS
Karsa	425	AS	Janzour	6000	AS
Zawia 1	6800	AS	Gharyat E	500	AS
Zawia 2	9000	AS	Gharyat W	150	AS
Sebrata	4000	AS	Tobghah	300	AS
Sormaan	20 800	AS	Shwairef	500	AS
Martouba	1500	AS	Sebhah A	1360	AS
UmmRzam	100	AS	Sebhah B	47 000	TF
AlMkheli	300	AS	Braak	3520	AS

Location	Capacity (m ³ /d)	Treatment Technology	Location	Capacity (m ³ /d)	Treatment Technology
AtTamimi	1000	AS	Oubari	2000	AS
AlAziat	500	AS	Samnou	8400	AS
Zwara	27 750	AS	Zeghen	8400	AS
Tarhouna	3200	AS	Tamanhnt	8400	AS
Gharian	3000	AS	Ghodowa	8400	AS
Yefrin	1725	AS	Kufra	15 000	AS
Mesallata	3400	AS	Kufra Hai	2000	AS

TF: Trickling Filter; AS: Activated Sludge

Plant installed capacities ranged from 100 to 110 000 m³/d with a total installed capacity of about 600 000 m³/d in 2000 corresponding to a served population of about 3.5 million (slightly over half of the population). These capacities included extension phases of many of the larger and medium sized plants (such as Tripoli, Benghazi, Misratah, Sebha, Derna, Tobruq). The total installed capacities increased from a rate of 6500 m³/d/yr during 1965-1975 to 16 000 m³/d/yr in 1975-1995 (Figure 2). About two thirds of the plants have capacities below 10 000 m³/d while only about 10% have capacities over 30 000 m³/d (Abufayed et al., 1998).

It is worth noting that the ambitious National Program for Water and Sewerage, started in 2006 and nearing completion presently, will provide integrated utilities designs including water supply, wastewater and storm water management systems for over 400 urban centers and neighborhoods. Execution of some of these works has been initiated with the rest of these works planned to be executed immediately upon completion of the design works.

WASTEWATER MANAGEMENT PRACTICES

Wastewater treatment has been applied in major Libyan cities and towns for over four decades. Master national, regional and local plans have included wastewater collection, treatment and disposal works as an integral of the infrastructure works. Experiences were thus accumulated in the fields of planning, design, operation and maintenance of wastewater works as well as reuse of treated effluents. In the meantime, institutions and legislature have been developed to put in place these plans and ensure their effectiveness.

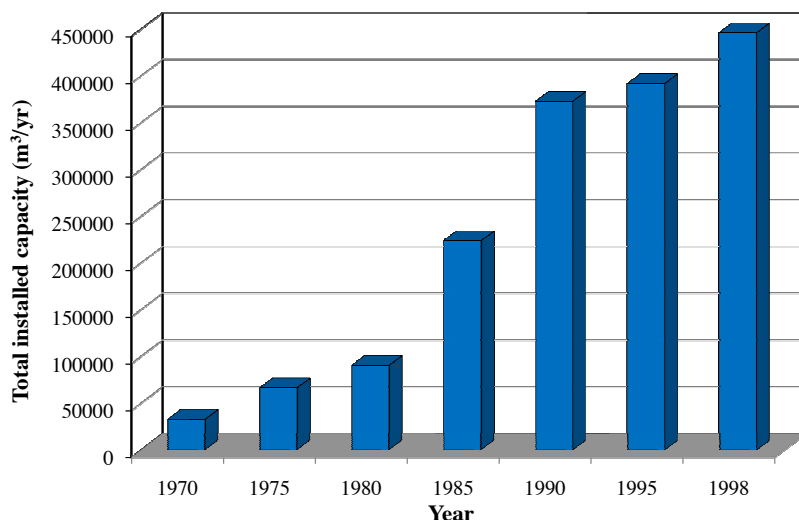


Figure 2. Growth in total installed wastewater treatment plant capacities (From Abufayed et al., 1998)

Wastewater characteristics and treatment plant performance

Typical raw wastewater characteristics for the city of Tripoli, Libya's largest city, are summarized in Table 2. Values of pH varied markedly from slightly acidic (6.7) to highly basic (10.2) reflecting the impacts of industrial discharges. These impacts can also be seen in the values of suspended solids (SS) (205-3773 mg/l). These spikes were infrequent and of very short durations, however, having no discernable impacts on overall plant performance (Abufayed et al., 1997; ElGhuel, 1991). Temperature variations reflected local climatic changes. It can be concluded that these characteristics are representative of weak-to-medium wastewater except for ammonia nitrogen which was typical of strong sewage (Metcalf and Eddy, 1991). The characteristics were stable as can be deduced from the low standard of deviation (SD). These conclusions are confirmed by data reported in other studies for raw wastewater and plant performance characteristics of several representative wastewater treatment plants during optimum operational conditions (Table 3).

Treatment efficiencies in terms of biochemical oxygen demand (BOD_5), SS, and ammonia (NH_3-N) exceeded 94%, 95% and 82%, respectively (Table 3). These exceptionally high efficiencies are associated with newly constructed and well operated larger plants located in major urban centers.

Presently, only about 15% of the existing plants are operational with effluents produced below recommended standards (Environmental General Authority, 2008). The rest of the plants are undergoing rehabilitation or idle due to a host of problems. For example, except for Tripoli plant which has been renovated completely recently, all first generation plants are out of service presently bringing to an end trickling filter (TF) technology uses.

Table 2. Typical raw wastewater characteristics of Tripoli treatment plant (Adopted from ElGhuel, 1991)

Parameter	Max.	Min.	Average	Standard Deviation (SD)
pH	10.2	6.7	7.36	0.33
Temperature (°C)	30	16	21	4
Biochemical Oxygen Demand (BOD ₅) (mg/l)	217	105	169	21
Chemical Oxygen Demand (COD) (mg/l)	426	175	305	43
Suspended solids (SS) (mg/l)	3773	205	442	296
Ammoniac (NH ₄ -N) (mg/l)	95	20	48	10

Table 3. Operational performance characteristics of representative wastewater treatment plants (Adopted from Abufayed et al., 1997, 1998; Abufayed, 1999)

Location	BOD ₅ (mg/l)		SS (mg/l)		NH ₃ -N (mg/l)	
	In	Out	In	Out	In	Out
Tripoli*	308	9.5	439	13.1	59	2.3
Tripoli**	292	10.5	349	18.1	47	0.9
Benghazi	319	18	371	14.8	-	-
Tarhouna	280	6.4	315	10	-	-
Misurata	325	7	342	8	38	7

**Data reported in 1991*

***Data reported in 1997*

Design criteria and effluent standards

Typical design criteria and expected performance levels for first generation wastewater plants are shown in Table 4. They are based on a daily per capita water consumption of 250-300 liter per capita per day (l/c/d) and typical BOD₅ and SS generation rates.

**Table 4. Typical wastewater treatment plant design criteria and performance levels
(Adopted from Abufayed et al., 1997, 1998; Abufayed, 1999)**

Parameter	Average value			
	Crude sewage	Primary effluent	Secondary effluent	Chlorinated effluent
Dry weather flow (l/c/d)				200
Peak flow rate (l/c/d)				600
BOD ₅ (mg/l)	270-300	210	15	≤ 10
SS (mg/l)	325-350	140	20	≤ 10
NH ₃ -N (mg/l)	30		5	
Residual chlorine				≥ 1

Sewage treatment, effluent disposal and reuse design criteria adopted by the National Water and Sewerage Program (NWSP) are summarized in Table 5. They include design flow rates, organic and nitrogen loads, effluent standards, treatment process to be employed, and sludge disposal methods. It is to be noted that secondary treatment standards are specified for all plants and that treatment processes are selected based on community size. Technically simple processes (stabilization ponds and aerated lagoons) are recommended for communities whose population is less than 30 000 persons while activated sludge (AS) process is assigned for larger communities.

Wastewater treatment technologies

To meet effluent criteria, set to produce effluents suitable for agricultural reuse, wastewater treatment plants had to include secondary (biological) treatment followed by tertiary advanced treatment (such as filtration (granular media or micro), disinfection (chlorination) and storage). Treatment methods were, thus, capable of producing effluents that were very low in biodegradable organics, SS and microorganisms (Figure 3). This flow sheet was applied universally regardless of size, location or availability of agricultural lands.

Table 5. Sewage treatment, effluent disposal and reuse design criteria

Component	Criterion
Design flow	Design flow (m^3/h) is defined as 80% of the average daily water use divided by a factor, which depends on the population size of the settlement. Preliminary treatment is proposed to be designed for four x design flow and biological treatment for two x design flow.
Design load	Design load is based on the specific loads in gram per person per day (g/p/d), which for total suspended solids (TSS) = 80 mg/l, BOD_5 = 60 mg/l, nitrogen = 11 mg/l and phosphorus = 4 mg/l. Industrial load should be considered from case to case.
Effluent standard	Effluent standard for irrigation and infiltration is proposed to be 30 mg/l for TSS and 20-30 mg/l for BOD_5 .
Process selection for wastewater treatment for settlements smaller than 30 000 persons	Two biological processes are proposed to be used: stabilization ponds, when there is good access to land, and aerated lagoons when there is low access to land.
Process selection for wastewater treatment for settlements larger than 30 000 persons	Activated sludge (AS) is proposed to be use.
Process selection for sewage sludge	Sludge is proposed to be treated in drying beds without thickening.



Figure 3. Properly operated activated sludge plant in Benghazi (Source: National Company for Water and Sewerage)

Biological treatment included both fixed growth (TF) and suspended growth systems (AS). First generation plants (1960's) employed TF exclusively while second generation and extension plants adopted the AS process. Different modifications of the AS are employed with conventional AS favored in larger cities and the extended aeration modification in smaller and isolated towns. It can be seen from Table 1 that AS is the process of choice for practically all cities and towns of Libya. This trend is enforced by the national guidelines for process selection (Table 5).

A sizable fraction of Libya's population lives in unsewered areas. This fraction is composed mostly of small remote communities' residents and those living in areas lying outside "approved master plans" or in agricultural areas. In these areas, septic tank systems are utilized which are not always properly designed and/or operated with potential water pollution problems when water tables are high.

Wastewater reuse

Effluent reuse applications started with the first generation plants operations in 1967. About 70% of plant effluents, including all large sized plants effluents, were intended for agricultural reuse while 20% were discharged into wadis¹ and only 10% are discharged into the sea. Other uses included "arbitrary" groundwater recharge, construction and pavement works.

Agricultural reuse applications, in turn, included irrigation of green areas, forests, wind breaks, pasture lands, and fodder crops. Digested sludge was also used as a soil conditioner, e.g.,

¹ Wadi: Arabic term traditionally referring to a river.

the total amount of sludge produced by Tripoli and Misurata wastewater treatment plants was utilized by agricultural projects and by local farmers as soil conditioner (Abufayed et al., 1997, 1998; Abufayed, 1999; ElKebir et al. 2008). The country's largest plants, Tripoli and Benghazi, were coupled to agricultural projects (Hadhbah Khadrah and Gouarsha projects, respectively) to ensure optimum use of effluent as an alternate to conventional water sources. Basic data concerning these two projects are summarized in Table 6.

Both phases I and II of AlHadbah AlKhadrah (Tripoli) plant were operational after intensive rehabilitation completed recently. Phase I was commissioned in 1971 signaling the start of large scale effluent reuse in Libya. The combined design flow for both phases is 137 000 m³/d.

Table 6. Effluent reuse applications in Tripoli and Benghazi (Adopted from Abufayed et al., 1997, 1998; Abufayed, 1999)

Location	Phase	Flow rate (m ³ /d)	Irrigated area (ha)	Application
Tripoli	I	27 000	2500	Fodder crops, vegetables and fruits
	II	110 000	1500	Fodder crops
Benghazi	I	27 000	360	Fodder crops
	II	27 000	658	
	III	27 000	1000	
Total		218 000	6018	

Effluents were chlorinated at a dose of 10-15 mg/l for 20 min prior to pumping to irrigated water storage tanks providing detention of 1-3 days. Phase I effluent having a chlorine residual of 1.1 mg/l was used to irrigate 110 farms (6 ha each) producing vegetables, fruits and fodder crops and windbreaks. Similarly, phase II effluent was used to irrigate 1500 ha producing fodder crops only and to irrigate windbreaks and plantations for sand dune stabilization. Sheep and cow production was also practiced as a complementary activity in the project. Average flow rates for phases I and II were 25 000 m³/d and 64 000 m³/d, respectively. Fixed sprinkler irrigation system is used in phase I farms and in half of phase II farms; the second half employs pivot irrigation. Over 8000 m³/d of sludge was produced; the bulk is used within the agricultural project associated with the plant while the excess was sold to farmers (National Body for Scientific Research, 1981; AlGhali and AlAdl, 1989; ElKebir et al., 2008).

Seasonal changes in heavy metal concentrations in plant effluent are shown in Table 7. It can be seen that these concentrations are well within the allowable limits proposed by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

A total of 81 000 m³/d projected from the three phases of Benghazi wastewater treatment plant was intended for irrigating an area of about 1000 ha dedicated solely for fodder crops production.

It is to be noted that effluent salinity increased notably in many coastal cities including Tripoli and Benghazi due to seawater intrusion limiting effluent acceptability. This trend has been mitigated, however, since the operation of the Great Manmade River Project (GMRP). Despite this improvement, effluent reuse is limited presently to only four plants with the total amount actually reused not exceeding 80 000 m³/d. This limitation is due to several persistent technical and socio-economic problems as will be elaborated below.

Table 7. Seasonal variations in heavy metal concentrations of Tripoli wastewater treatment plant (Adopted from Ali, 1993)

Metal		Concentration (mg/l)	FAO limit (mg/l)
Cobalt	Winter	0.011	0.05
	Summer	0.054	
Chrome	Winter	0.010	0.10
	Summer	0.067	
Cadmium	Winter	0.005	0.01
	Summer	0.009	
Copper	Winter	0.041	0.10
	Summer	0.013	
Manganese	Winter	0.011	0.20
	Summer	0.016	
Lead	Winter	0.261	2.00
	Summer	0.179	
Zinc	Winter	0.058	2.00
	Summer	0.040	
Nickel	Winter	0.059	5.00
	Summer	0.020	

Wastewater treatment costs

Unit treatment/production prices are available only for a few plants (National Body for Scientific Research, 1981; Abufayed et al., 1998). They ranged from 0.078 to 0.7 USD/m³. Higher operation and maintenance (O & M) costs are due to several factors including

climate (such as wind, dust and large temperature fluctuations), lack of skilled qualified human power and reliance on expatriates, import of technology and spares and materials, etc. Capital and operation costs of the first phase of the Tripoli wastewater treatment plant were 0.28 and 0.73 USD/m³, respectively (National Body for Scientific Research, 1981). Although these costs are outdated, they are indicative of the following:

1. Capital (depreciation) costs constitute the major fraction (82%) of treatment costs reflecting very high plant costs. These ratios are in contrast with common practices;
2. Operational costs are still high because of several factors including small plant sizes, remoteness, lack of skilled labor, spares, and materials, as well as the higher wear and tear on electromechanical equipment because of sand, salinity, etc.

Institutional aspects of wastewater management in Libya

Wastewater works are planned and managed at the national level by the General Board for Housing and Utilities. Construction of these works is entrusted to the Company for Water and Wastewater, a public company established in 1997 and reestablished in 2008 with branches covering the whole country. Employing over 12 000 persons, this company operates and maintains all water supply and wastewater facilities, including pipelines, pump stations, water and wastewater treatment plants. The Housing and Infrastructures Board, established in 2006, is charged with provision of infrastructures (including complete sewerage works) of all new housing projects.

Several entities are in charge of enforcement of effluent reuse criteria directly or indirectly. The National Center for Standards and Specifications is responsible for developing effluent reuse standards and implementing them while the Environmental "Protection" General Authority is charged with environmental monitoring and protection, including resource use and conservation, and pollution control. Health authorities are also involved through safeguarding of public health, as are bodies responsible for sewerage facilities operation and maintenance. Finally, agricultural authorities are concerned within the domain of food production and safety, and provision of land resources for effluent reuse.

Aware of the significance and uniqueness of utilities design, the state established the Engineering Consulting Office for Utilities (ECOU) to undertake the functions of design of utility works nationally with a complementary role played by other public and private consulting offices.

Education and training of manpower involved with wastewater engineering is entrusted to public education institutions with universities providing the educational aspects and technical (medium and high level) institutes providing the practical training. The major universities, namely AlFateh and Gar Younus Universities, provide education at undergraduate levels within the civil engineering curricula while several institutes train in the general fields of environment, mechanical and control engineering. A special training

institute was established in Zliten, but has ceased to function due to shortages in staff and continuity of enrollment. To date, no special institutions are charged with wastewater management capacity building. Graduate studies at the university levels have produced many master theses in the field of wastewater engineering and project management. Because they were very few, these studies have had limited applications and hence limited contributions to overcoming the wastewater management challenges.

Legislative aspects of wastewater management in Libya

Wastewater treatment and effluent reuse have been addressed specifically in Laws 3/1982: Regulation of water resources utilization, and 7/1982 with its update (Law no. 15/2003: Protection and enhancement of the environment). While Law 3/1982 defines ownership, controls and principles that govern water sources development, utilization, preservation, and protection, Law 15/2003 establishes the framework for environment protection with a special chapter on disposal of liquid and solid wastes. According to this law, discharge of solid and liquid wastes into water sources is prohibited (Article 6). Specifically, this law:

1. Prohibits discharge of polluted waters before being treated to approved standards (Article 51);
2. Considers effluents a water source that shall be utilized after its treatment, unless it shall be proved that its use is unpractical or unfeasible (Article 79);
3. Prohibits wastewater reuse except after proper treatment according to approved standards (Article 104).
4. Specifies entities in charge of defining and monitoring treatment methods, effluent standards, etc. (Article 48).

The Environment General Authority (EGA) has formed a national committee to propose guidelines for effluent reuse. Meanwhile, reference is made to numerous guidelines particularly those of the FAO and World Health Organization (WHO). Stringent monitoring and enforcement capabilities are also lacking.

Several decisions of relevance to wastewater management include those for land use management, agriculture, urban planning, infrastructures and utilities as well as bylaws elaborating the laws.

INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT AND EFFLUENT REUSE

Practically all medium to large-scale factories install independent industrial wastewater treatment plants that are designed to provide advanced treatment. Because of the availability of skilled labor and access to spares and materials, these plants are generally better-operated and maintained than municipal wastewater treatment plants. This is especially the case in large plants, such as the steel and petrochemical complexes where treatment efficiencies are high and effluents are reused successfully or discharged into the sea (Abufayed, 1992).

Both biological and chemical treatment methods are applied depending on the nature of the waste with chemical methods forming the majority of the plants. In many factories, effluent reuse for green area irrigation is practiced, especially in areas facing water shortages.

Small "household" industries discharge into the public sewerage system. These industries include plastics, soft drinks, and bleaches. Data on discharges from these industries are scarce. It is believed that a negligible fraction of these wastes undergo different levels of pretreatment. However, the impacts of these discharges on the collection and treatment works are insignificant, as described above. Nevertheless, a survey of industrial connections, wastewater characteristics, pretreatments, and impacts is necessary.

WASTEWATER MANAGEMENT: CHALLENGES AND LESSONS LEARNED

Despite a head start and large financial investments, the success of Libya's wastewater treatment and effluent reuse practices has been overshadowed by a multitude of problems limiting the number of plants operating satisfactorily to only a few. These problems have been encountered throughout all stages of the practice (such as planning, design, construction, O & M, and reuse application). Expectedly, they are more severe in small and remotely located plants. They may be attributed to environmental, technical, socio-economic and institutional factors, as discussed below.

Environmental aspects

1. The physical environment in Libya is very harsh as climate is arid to semi-arid throughout the country. Ambient temperatures range from below freezing to over 50 °C with large daily and annual amplitudes. Sand storms are frequent. As most plants are located in open areas with little protection, plant equipment and structures are subjected to severe thermal stresses and large amounts of sand and dust with impacts being most severe on instrumentation and control and mechanical equipment. Stoppages, erosion, wear and tear are induced or exacerbated by such severe climatic conditions;
2. High effluent water hardness and salinity and evaporation rates are conducive to corrosion and scaling problems plaguing mechanical equipment and piping;
3. Suitable agricultural land is not always available for effluent application thus posing a serious challenge to wastewater authorities, especially when proper discharge bodies are not readily accessible;
4. As degradation rates are increased due to high strength of the wastewater and high ambient temperatures, nuisance problems are magnified when plants are not performing satisfactorily.

Design and construction aspects

1. Most wastewater treatment plants have been designed by expatriates with modest participation at later stages from national consulting offices. Practically all designs aimed at achieving tertiary effluent standards. Large plants were designed with potential for extension into several phases to meet rapid population growth;
2. As no actual design data were available, plants were designed employing general criteria (Table 4). Treatment technologies were selected without proper consideration to the unique local and site constraints and conditions. Consequently, highly mechanized treatment plants that were “contemporary and demonstrated, more modern looking and thus more appealing to the client” were prescribed. To overcome data scarcity and ensure high performance levels, stress was made on large safety factors and redundancy; hence the high capital and running costs and O & M problems;
3. The designs overlooked the use of mechanically simple appropriate treatment technologies, such as stabilization ponds, denying many small and remote communities the many operational and economic advantages of these technologies. This overlook may be due to lack of experience by the designers or expectation that mechanical systems were;
4. Plant execution periods ranged from two to nine years with an average of six years. These periods are very long considering the nature of the facilities and plant life. This long period of execution and interruptions reflected serious contractual/execution problems that deserve special consideration and action.

O & M aspects

1. O & M have been conducted by both Libyans and expatriates. They proved to be a major problem because of lack of skilled personnel and high turnover rates. This problem was accentuated by social attitudes, lack of incentives, and unavailability of specialized training institutions;
2. Spare parts and consumables were unavailable locally and had to be procured from limited suppliers prompting plants to overstock to ensure continuous availability. Conversely, under stocking of spare parts had lead to serious interruptions;
3. Monitoring and quality control were practiced irregularly and in a few plants only. They were constrained by understaffing and equipping of laboratory facilities and lack of enforcement and awareness of quality implications;
4. Although most of the plants were less than 25 years old, the state of their structures and electromechanical equipment was poor due to the harsh environment and poor up keeping, operation and maintenance practices.

Socio-economic and institutional aspects

1. The high level of environment awareness led to a strong formal “state” commitment towards wastewater treatment. However, a residual social view demeaning the

- profession still exists discouraging the enrollment into educational and training institutions and thus limiting availability of skilled professionals in the fields of wastewater management nationwide;
2. Wastewater effluents are believed to be "impure, unclean or even filthy" so direct contact is forbidden and use of products is disfavored;
 3. In many rural areas, effluents are too small and out of phase with demand hydrograph to make reuse cost-effective;
 4. Although sewerage service fees are levied, fee collection capabilities are still limited and public response is low making plants heavily dependent on public funds. Sufficient funds are difficult to obtain given the large number and poor condition of plants and fierce;
 5. Persistent effluent quantity and quality problems, farmers unawareness of fertilizer value of effluents and availability of cost-effective "pure" water sources have contributed to limiting treated effluent reuse applications in most plants;
 6. Effluent reuse monitoring and enforcement of standards are generally lacking due to the numerous institutions in charge simultaneously, their weakness, and lack of coordination;
 7. Product unit cost, a major factor in reuse applications, was high as a result of adverse environmental conditions, improper design, construction, and operation and maintenance practices;
 8. The very large scale and value of investments made in the sewerage sector were incomparable reflecting a high level of awareness and strategic planning. However, the institutional capabilities needed to manage these huge investments were not available and the efforts to build and develop these capabilities could not keep pace with the skills required which increased quantitatively and qualitatively with time. In fact, these institutions have changed frequently as has the managerial approach. These changes, coupled with administrative instability within sewerage works themselves, have led not only to reduced plant performance levels, but, at times to the total disintegration of these plants. Hence, most existing plants are in need of major rehabilitation if not total reconstruction;
 9. Most of the personnel managing wastewater treatment works presently are not qualified properly; moreover, they are usually transient, and thus invest very little in upgrading their skills. This way, the O & M problems accumulate with expected adverse consequences.

The problems listed above have had severe cumulative impacts on plant life and performance (availability and efficiency) and product costs. As a result, the actual plant capacities are only a small fraction of the installed ones (24 million cubic meters per year (Mm³/yr) vs. 220 Mm³/yr) (Abufayed et al., 1998; Abufayed, 1999; Environmental General Authority, 2008) limiting significantly effluent reuse potential and creating potential environmental hazards.

Viewed from a different perspective, these challenges are very simple and, therefore, decidedly surmountable. It is very clear, based on the long experience gained locally, that the most critical challenges are institutional capabilities and human resources. These two elements should, therefore, be given special priority in any wastewater management strategy. Highly developed institutions and human resources will ensure that wastewater infrastructures installed around the country are operated and maintained sustainably.

Institutional capacity building must be associated with stability and be sustained by proper funding and strengthened through dynamic and pragmatic legislation. Public awareness and participation of all stakeholders are prerequisite for successful management. On the other hand, continued training and incentives must be given special consideration when evaluating the mitigation measures and upgrading management practices.

Plant design, execution, O & M should spring from a full understanding and incorporation of local environmental conditions and socio-economic factors.

Finally, as can be inferred from the above, wastewater management is characterized by a multiplicity of actors playing different but complimentary roles. Therefore, all wastewater management plans must be integrated with the national socio-economic development plans.

FUTURE PROSPECTS OF WASTEWATER MANAGEMENT PRACTICES

In spite of the numerous problems facing its applications, wastewater management continues to play a vital role in Libya's national public health, environment protection and water resources management. This role is defined by the continued growth in Libya's population and improvement in living standards requiring new or expanded/upgraded wastewater treatment plants, the rising environmental awareness as well as by many unique socio-economic and environmental features, namely:

1. Libya is a water short country and treated wastewater effluents constitute a sustainable economically viable and continuously increasing supplemental source;
2. Libya is an urban and coastal society: over 80% of the population lives within a 10-km corridor along its 1900-km long and unpolluted coast. Fortunately, these urban centers are located inside the agricultural planes;
3. Tertiary treated effluent costs are less than one fifth those of desalinated seawater (National Body for Scientific Research, 1981; Abufayed et al. 1998), the only alternative source available in Libya;
4. Other valuable benefits – offsetting effluent costs – protecting coastal and land resources from pollution, supplying nutrients and conditioners (fertilizers), reducing seawater intrusion into excessively mined coastal aquifers and freeing these aquifers for higher quality, sustaining agriculture and providing employment;

5. Reuse areas are numerous, including green areas, forests, fodder crops, widening the potential applications and benefits. These applications will be increased further with effluent desalination technologies (such as microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis) making effluent suitable for non-agricultural purposes.

Aware of these benefits and of the present state of water and sewerage works (many of which have exceeded their design lives) has prompted authorities to embark on an ambitious 7-10 year NWSP intended to achieve two objectives: 1) extend water supply and wastewater collection and treatment facilities to all towns and villages, so that all urban centers, no matter how small, will enjoy centralized water and sewerage services, and 2) rehabilitate all existing water supply and sewerage works so that they will function at design levels. Funds allocated for this program are between 4.5 and 6 billion USD. This comprehensive program entails training and institutional capacity building.

Proper implementation and operation of the NWSP will increase the wastewater effluent contribution from about 0.6% of the total national water supply presently to about 600 Mm³/yr in 2025, thus increasing this contribution to 13% of total water demand (Abufayed et al. 1997). Assuming an average irrigation requirement of 6000 m³/ha/yr, a total of 100 000 ha may be irrigated using treated effluent.

SUMMARY, CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Compared to many of its fellow Mediterranean states, Libya has had a head start in wastewater treatment and effluent reuse. Intensive efforts have been made since the early sixties to provide wastewater collection, treatment and effluent reuse. Analysis of the status of wastewater treatment and effluent reuse practices in Libya has been made summarizing the challenges and lessons learned and identifying major problems. Based on this analysis, the following conclusions and recommendations are made:

1. Wastewater collection, treatment and reuse facilities exist in practically all urban centers in Libya. Generally, effluent reuse applications were most successful in the early stages of plant operations;
2. Presently, wastewater treatment plants suffer a multitude of operation and maintenance challenges with serious degradations in effluent quality causing a "wastewater management crisis". Serious mitigation measures are being undertaken;
3. Lack of basic design data inferred from local conditions and O & M data in all aspects of wastewater management practices and lack of coordination between parties concerned contributed markedly to the extent and intensity of existing challenges and adverse impacts;
4. Although they are numerous, these challenges are readily surmountable through human institutional capacity building, human resources development

and incentives to ensure that new and upgraded plants are operated properly in a sustainable manner in order to avoid resurgence of “crisis situation”. These two elements are prerequisite to any remedial measures and enhancements of wastewater management practices; unless and until they are achieved, all efforts and investments in this area are doomed to fail;

5. Effluent reuse is a viable non-conventional water resource especially suited to supplement Libya's overstressed water sources due to water scarcity, rise in environmental awareness, tighter regulations, and demonstrated economic advantages over existing conventional and non-conventional sources. Its role is likely to be more significant making it a major element in the sustainable development of the country;
6. Capacities of existing and planned treatment plants will need to be upgraded continuously to meet increasing population sizes to be served and more stringent standards.
7. Awareness is rising regarding the pollution effects of wastewater on public health and the environment providing a strong drive towards upgrading and construction of wastewater treatment plants;
8. A national strategy for wastewater management should be prepared within the overall national strategy for health, environment and water resources management. This strategy should define the role of wastewater management in the development plan, set the broad objectives and identify the implementing and funding institutions. A policy and procedures, legislation and standards should also be defined and/or updated and an action plan prepared and put into effect.

REFERENCES

Abufayed A.A. (1992) A Diagnostic Study of Environmental Impacts of Industrial Discharges in the Janzoor Industrial Zone. A Report Prepared for the Secretariat of Light Industries, August, Tripoli, Libya.

Abufayed A.A., Sherif E. and Mshawet F. (1997) Performance Characteristics of Phase II of the Tripoli Wastewater Treatment Plants 1st Year of Operation. Conference of Arab Biologists Union, June, Misurata, Libya.

Abufayed A.A., Tabib M. and ElKraiw Z. (1998) Applications of Wastewater Treatment Technologies in Libya. National Engineers Congress, 11-13 October, Misuratah, Libya.

Abufayed A.A. (1999) Treated Wastewater Effluents Applications in Irrigated Agriculture in Libya. A Country report submitted to the Arab Organization for Agriculture Development, November, Khartoum, Sudan.

AlGhali M. and AlAdl A. (1989) Alhadbah Alkhadraa Wastewater Treatment Plant, Tripoli. *AlHandasi*, 3, 54-55.

Ali J.M. (1993). Search for Heavy Metals in Domestic Wastewater. *AlHandasi*, 25-26, 112-118.

ElGhuel M.K.A. (1991) Operational and Performance Characteristics of a Sequencing Batch Reactor Treating Municipal Wastewater from Tripoli, Libya. Master thesis, AlFateh University, Department of Civil Engineering, Tripoli, Libya.

ElKebir A.A., Issa G.M. and Khalifa A.M. (2008) Evaluation of Wastewater Treatment Plants in the Great Jamahyria. National Workshop on Treated Effluent Reuse, 30 November 2008, Tripoli, Libya.

Environmental General Authority (EGA) (2008) National Strategy for Sustainable Development, January, 2008, Libya.

General Company for Water and Sewerage (2000) Misurata wastewater treatment plant data. Personal communication.

Metcalf and Eddy Inc. (1991) Wastewater Treatment, Disposal and Reuse. 3rd Ed., Eds. McGraw Hill, New York, 109 p.

National Body for Scientific Research (1981) Wastewater Treatment and Reuse Studies: 1. Wastewater Treatment Methods and Data Analysis in the City of Tripoli, December, 1981.

CHAPITRE 19

LA GESTION LOCALE ET DURABLE DE L'EAU MUNICIPALE – UNE NOUVELLE APPROCHE : UTILISER L'EAU PLUSIEURS FOIS VERS LE ZERO REJET

A. GHRABI*

Centre de Recherches et des Technologies des Eaux – Laboratoire Traitement et
Recyclage des Eaux
Tunisie

A. KOUNDI

Expert indépendant en traitement des eaux
Tunisie

L. BOUSSELM

Centre de Recherches et des Technologies des Eaux – Laboratoire Traitement et
Recyclage des Eaux
Tunisie

RESUME

Le système d'épuration classique centralisé en Tunisie a montré ses limites. Le développement de la réutilisation des eaux usées traitées se trouve plafonné, malgré les incitations économiques et l'encouragement de l'Etat tunisien. Une nouvelle approche est actuellement à l'ordre du jour, elle est basée sur la ségrégation des eaux grises et des eaux noires, en vue d'améliorer le taux de réutilisation des eaux usées traitées. Dans le cadre d'un projet de recherche et de développement, une étude démonstrative sur la gestion locale de l'eau municipale a été réalisée dans un Centre de Démonstration Technique (TDC). Elle est basée sur la ségrégation des eaux grises et noires et intègre les eaux pluviales dans un foyer universitaire. L'objectif est de diffuser des concepts et

* Auteur correspondant : Pr. GHRABI Ahmed – Laboratoire Traitement et Recyclage des Eaux du Centre de Recherches et des Technologies des Eaux – Technopole de Borj Cedria – BP. 273, 8020 Soliman, Tunisie
Email : ahmed.ghrabi@certe.rnrt.tn / a.ghrabi@yahoo.fr – Tél. : (+216) 71 43 11 22 – Fax : (+216) 79 41 28 02

de développer des techniques permettant une utilisation optimisée et totale des eaux usées domestiques après un traitement adéquat. Le système mis en place comporte trois lignes de traitement relatives aux eaux grises, aux eaux noires et aux eaux pluviales. L'eau de pluie collectée est valorisée à trois reprises (par les douches, les chasses d'eau et l'irrigation), alors que l'eau potable utilisée au niveau des douches est recyclée deux fois (via les chasses d'eau et l'irrigation). Les résultats sont encourageants et la qualité des eaux à la sortie des trois filières répond à la qualité de l'eau exigée par l'usage et permet une réutilisation totale de l'effluent traité. Cette approche, appelée gestion locale et durable de l'eau, a permis de mettre en place le concept « zéro rejet », en tirant profit de la valeur économique des eaux usées.

Mots clés : Eaux usées ; eaux grises ; eaux noires ; réutilisation ; recyclage ; zéro rejet.

INTRODUCTION

En raison de sa position géographique, la Tunisie est soumise à l'influence du climat qu'il la caractérise : humide à l'extrême Nord, semi-aride au Centre et aride au Sud. C'est un pays à ressources en eau renouvelables relativement limitées et rares. Le développement urbain, l'extension des périmètres irrigués, ainsi que le développement des industries et du secteur du tourisme sont les facteurs essentiels de l'augmentation des besoins en eau. Par ailleurs, l'amélioration du niveau de vie des citoyens se traduit par une consommation spécifique en eau potable de plus en plus importante. Si la demande en eau est en progression rapide, l'offre tend au contraire vers une limite imposée par le volume de la ressource en eau disponible et par le coût de sa mobilisation.

La sécurité en eau du pays ne peut être assurée que par la mobilisation de toutes ses ressources en eau, basée sur une exploitation optimale, économique et durable. Consciente de l'importance de ce secteur stratégique de développement, la Tunisie a mis en place un programme national de mobilisation de toutes les ressources en eau depuis 1990. L'objectif principal est de satisfaire la demande en eau des différents secteurs au cours des prochaines décennies. La stratégie est axée sur l'amélioration de l'efficacité des réseaux, la rationalisation de la consommation d'eau, l'exploitation des volumes d'eau libérés par l'agriculture, et enfin le recours aux ressources non conventionnelles, comme le dessalement des eaux et la réutilisation des eaux usées.

Une tendance émergente en Tunisie est à l'ordre du jour actuellement : utiliser l'eau plusieurs fois et tirer profit de toutes les ressources en eau en adaptant l'usage à la qualité et inversement. Réutiliser l'eau (soit en remobilisant l'eau retournée après usage au milieu naturel, soit en branchant directement certaines utilisations sur des rejets d'eaux usées traitées de manière appropriée) est un moyen efficace pour réduire les pressions des utilisations sur les ressources (Margat et Vallée, 1999). Cette réutilisation se développe particulièrement dans les pays méditerranéens, où les ressources encore disponibles se raréfient, et elle permet d'augmenter les quantités d'eau utilisées, donc de satisfaire des demandes croissantes, sans accroître les prélèvements.

Après avoir présenté un aperçu général de l'assainissement en Tunisie, le présent article présentera une nouvelle approche basée sur la ségrégation des eaux grises et des eaux noires, qui a été développée dans le cadre d'un projet de recherche appliquée. Elle concerne une étude démonstrative sur la gestion locale de l'eau municipale et qui servira comme un centre de démonstration technique (TDC).

APERÇU SUR L'ASSAINISSEMENT EN TUNISIE

Le parc des stations d'épuration

La Tunisie s'est engagée depuis les années 1970 à doter le pays d'un système de collecte, de transport et de traitement des eaux usées. Le système d'assainissement est le plus développé au Maghreb. Un programme de priorité a été mis en place pour protéger les zones touristiques, les grandes et les petites villes et les zones rurales, sans oublier de valoriser et assurer la promotion de la réutilisation des eaux usées traitées.

Les réseaux d'assainissement et le parc de stations d'épuration n'ont pas cessé d'évoluer. Actuellement, 87% de la population urbaine est prise en charge et raccordée au réseau public d'assainissement, 81% de la population urbaine et 60% de la population totale du pays bénéficient des services de l'assainissement. Les grandes villes et les villes côtières touristiques sont totalement équipées d'installations de traitement, soit 47 stations d'épuration (STEP). La majorité des moyennes villes sont aussi équipées d'installation d'assainissement, avec 51 STEP. Le Tableau 1 donne une idée sur l'évolution du parc des STEP en Tunisie (Office National de l'Assainissement de Tunisie, 2007).

Tableau 1. Evolution du nombre de stations d'épuration (STEP) et du réseau d'assainissement en Tunisie (Office National de l'Assainissement de Tunisie, 2004 et 2007)

	Année						
	1975	1987	1997	2001	2003	2004	2006
Nombre de STEP	5	24	52	25	70	75	98
Réseau d'assainissement (km)	900	3700	7700	10 250	11 425	11 900	13 200

Les eaux usées traitées par ses stations sont à 76% d'origine domestique. Les eaux usées industrielles qui représentent environ 19% sont d'abord prétraitées par les industriels eux-mêmes, selon les exigences de la norme NT 106-02 de rejet tunisienne. Les 5% restants sont d'origine touristique. Plusieurs procédés technologiques sont utilisés dans les STEP (Office National de l'Assainissement de Tunisie, 2007): il s'agit de STEP à boue activée (83%) ; de

STEP comportant des lits bactériens (1%) ; des stations de traitement par lagunage naturel ou facultatif (8%) et des stations de traitement par lagunage aéré (8%).

Performances des procédés de traitement

Les STEP doivent répondre à la norme NT 106-02 qui réglemente le rejet en fixant la qualité de l’effluent traité (paramètres physicochimiques et bactériologiques) en fonction du milieu récepteur (maritime, hydraulique ou réseaux publics d’assainissement).

Les performances sont variables et dépendent des procédés technologiques appliqués. En effet, d’un point de vue de l’élimination de la pollution organique, les procédés intensifs à boue activée ou à lits bactériens sont en moyenne les plus performants, alors que la qualité microbiologique de ces eaux traitées descend difficilement en dessous de 10⁵ coliformes par 100 ml. Compte tenu des avantages dédiés à l’ensoleillement, les rendements obtenus par les procédés extensifs de type lagunage sont moins importants en termes de pollution organique, à cause de la prolifération des algues, alors que la réduction des coliformes est très appréciable, et elle atteint souvent les quatre unités logarithmiques. Le Tableau 2 donne les performances des STEP sur l’élimination de la pollution organique, exprimée en Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅) (Office National de l’Assainissement de Tunisie, 2007).

Quant à l’élimination des matières nutritives (l’azote, exprimé en N-NTK, et le phosphore, exprimé en P-PO₄), les STEP du type lagunage sont moins efficaces que les procédés à boue activée (Figure 1) (Koundi, 2003).

Tableau 2. Performance des procédés de traitement (Office National de l’Assainissement de Tunisie, 2007)

Procédé de traitement	Rendement épuratoire (DBO ₅ , exprimé en %)
Boue activée faible charge	91
Boue activée moyenne charge	90
Lits bactériens	88
Lagunage aéré	82
Lagunage naturel	78

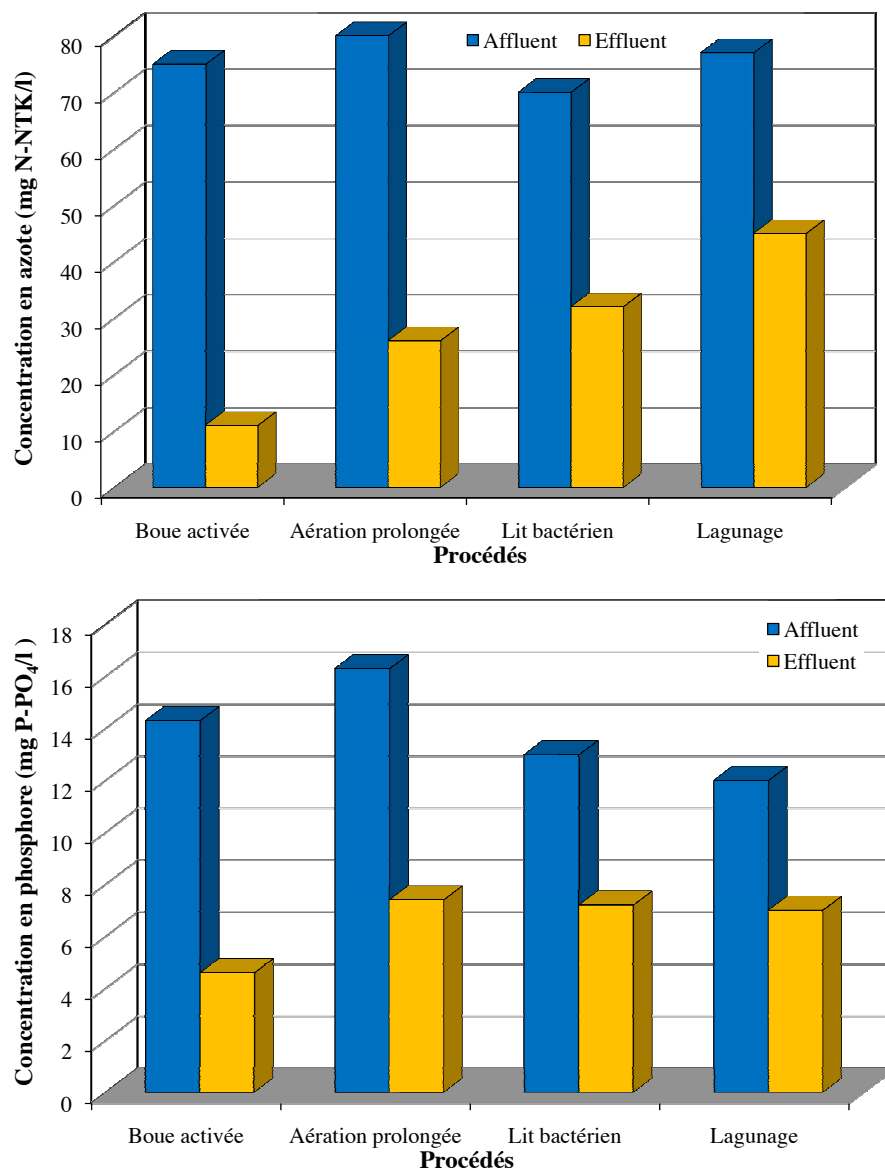


Figure 1. Elimination de l'azote et du phosphore à l'entrée (Affluent) et à la sortie (Effluent) des stations d'épuration

Le coût de l'épuration

Le Tableau 3 résume les coûts d'investissements et d'exploitation des différents procédés de traitement (Koundi, 2006). Le coût d'exploitation le moins cher est attribué aux

lagunes naturelles, alors que les lagunes aérées sont les plus chères à exploiter. Ces coûts englobent les frais en énergie, les salaires et les dépenses d'entretien.

Tableau 3. Frais d'investissement et d'exploitation en dinar tunisien (TND)¹ par équivalent habitant (Koundi, 2006)

Procédé	Investissement (TND/eq-hab)	Exploitation (TND/eq-hab/an)
Lagunage naturel	92	1,95
Chenal d'oxydation	107	7,50
Aération prolongée	110	5,85
Lagunage aéré	105	7,95
Boue activée + digesteur	162	3,00

La réutilisation des eaux usées

Aujourd'hui, la plupart des grandes villes collectent leurs eaux usées, les traitent et rejettent une grande partie de ces eaux dans le milieu récepteur. Cette solution appliquée dans des pays arides, tels que la Tunisie, paraît illogique et un grand effort est aujourd'hui déployé pour augmenter le taux de réutilisation de 20 à 60%. La qualité des eaux usées traitées sera améliorée par l'introduction d'une étape de désinfection et les surfaces irriguées augmentées par le développement de projets stratégiques. Toutefois, une solution appliquée à la source est plus durable. Elle considère les eaux usées comme une ressource et non comme un rejet qu'il faut se débarrasser le plus rapidement possible.

Les volumes des eaux usées traitées seraient de 270 millions m³ (Mm³) en 2011, dont 88% seraient traitées dans les STEP. En 2001, 35 Mm³ sur 169 Mm³ d'eaux usées traitées, soit environ 20%, ont été réutilisés pour irriguer 7400 ha, répartis sur 6600 ha de terres agricoles, 600 ha de terrains de golf, et 200 ha d'espaces verts et récréatifs (Office National de l'Assainissement de Tunisie, 2007). Le problème majeur qui entrave le développement des périmètres irrigués avec les eaux usées est que l'épuration conventionnelle des eaux usées, telle qu'elle est pratiquée dans les STEP, ne prend pas en considération la qualité des eaux exigée par les utilisateurs, mais généralement ces STEP produisent une eau secondaire qui répond aux normes de rejet dans le milieu récepteur (NT 106-02). Ce système d'épuration classique a montré ses limites et le développement de la réutilisation des eaux usées traitées se trouve plafonné, malgré les incitations économiques et les tarifs échelonnés en fonction de la qualité de l'eau. Il est donc difficile d'atteindre les objectifs de 50%, tels qu'ils ont été prévus par la stratégie du pays en matière de réutilisation des eaux usées traitées (Nebeurt et Benabdallah, 2003).

¹ 1 dinar tunisien (TND) correspond à 0,68752 dollar US (USD), taux de change du 18 février 2009.

Dans la réutilisation des eaux usées, l'élimination des pathogènes reste l'objectif principal du traitement. Pour que ce dernier soit efficace et performant, l'élimination exige la mise en œuvre d'une technique conçue à cette fin. Cependant, cet objectif n'est pas souvent fixé à l'origine et les filières basées sur les systèmes classiques de traitement des eaux usées (tels que les boues activées, les chenaux d'oxydation et la biomasse fixée) ont été conçues au départ et avant tout pour éliminer les matières organiques. Ces procédés conventionnels de traitement aboutissent donc à un effluent secondaire répondant aux normes de rejets dans le milieu hydrique (soit dans la mer et les rivières). Ainsi, ces systèmes classiques exigent d'autres mesures de protection, si la réutilisation des eaux usées au sens le plus large du terme est envisagée.

Devant la demande pressante des agriculteurs pour faire des eaux usées traitées un usage non restrictif, l'Office National de l'Assainissement de Tunisie (ONAS) a entamé un programme ambitieux pour équiper les nouvelles STEP d'un traitement complémentaire. Une étude stratégique est élaborée pour relever le taux de réutilisation de ces eaux dite « de seconde main ». Actuellement, trois projets pilotes sont déjà réalisés pour l'amélioration de la qualité des eaux traitées par les STEP existantes (par l'utilisation d'une filtration sur sable, d'une désinfection des eaux épurées par irradiations ultraviolet – UV et par bassin de maturation). Le programme d'équipement des STEP existantes concernera quatre stations en première tranche et une vingtaine en deuxième tranche.

D'après Shayeb et al. (2008), le développement de la réutilisation des eaux usées en Tunisie rencontre deux principaux obstacles : le premier est lié à la qualité insuffisante et variable des eaux et les contraintes réglementaires. Pour améliorer la situation et augmenter le taux de réutilisation, il faudra agir sur deux plans : (i) renforcer la réutilisation dans le domaine agricole, en organisant des transferts inter-saisonniers, et (ii) promouvoir les usages industriels, municipaux et de loisir. La diversification des usages et l'adaptation du traitement permettent également d'augmenter le taux de réutilisation et une meilleure adaptation de l'offre et de la demande en eau usée traitée.

LA GESTION DU CYCLE DE L'EAU URBAIN

Le système de gestion de l'eau municipale englobe généralement les composantes suivantes :

- L'approvisionnement en eau à partir d'une source d'eau protégée (telle qu'une nappe souterraine, un barrage ou une source) ;
- Le contrôle du traitement de l'eau et la distribution d'une eau potable de bonne qualité (répondant aux normes exigées) et en quantité suffisante sur toute la période de l'année ;
- La collecte des eaux usées et des eaux pluviales dans un réseau d'égouts séparatif et/ou unitaire ;
- Le transport et l'évacuation, en dehors des agglomérations, des eaux usées et des eaux pluviales collectées ;

- Le traitement des eaux usées et des eaux pluviales dans des STEP ;
- Le contrôle des eaux traitées par la STEP avant leur rejet dans le milieu naturel (obéissant aux normes de rejets) ;
- Le traitement et la réutilisation et/ou le rejet contrôlé des boues produites par les STEP.

Cette approche, dite classique, est également appelée gestion municipale centralisée des eaux (Figure 2), parce que toutes les eaux, avant leur distribution en zone urbaine, sont purifiées dans une station centrale, puis les eaux usées collectées sont aussi renvoyées vers une STEP centralisée pour être traitée et décharger dans le milieu récepteur.

D'une façon générale, les eaux usées sont le résultat de l'utilisation domestique à différentes fins de l'eau potable. Les différentes catégories des eaux usées peuvent être classées de la manière suivante :

- Les eaux usées contenant les matières fécales en provenance des chasses hydrauliques des toilettes (eaux vannes), appelées également les eaux noires ;
- Les eaux usées contenant les urines, connues sous l'appellation eaux jaunes ;
- Les eaux usées en provenance des cuisines ;
- Les eaux usées en provenance des machines à laver, buanderie, douches, salles de bain, lavabos, qui sont rangées dans la catégorie des eaux grises ;
- Les eaux usées de lavage des surfaces et locaux.

Dans le système classique d'assainissement, toutes ces eaux sont mélangées et rejetées sans séparation directement dans le réseau d'égouts. Toutes ces eaux ne présentent pas toutes les mêmes caractéristiques de pollution et leur ségrégation pourrait être intéressante du point de vue du traitement, du recyclage ou/et de la réutilisation.

LA SEPARATION DES EAUX USEES

Les eaux grises représentent environ le 2/3 du volume totale d'eau usée rejetée par un ménage, alors que les eaux noires sont beaucoup plus polluées et ne représentent qu'un peu moins du tiers. Les eaux usées en provenance des cuisines sont rangées souvent avec les eaux noires. L'urine représente une fraction des eaux usées, qui contient la majeure partie des nutriments (87% d'azote, 50% de phosphore et 60% de potassium des eaux usées proviennent des urines), alors qu'il ne représente que 1% du volume total (Otterpohl, 2004). La Figure 3 donne une idée de la répartition de l'utilisation domestique de l'eau dans une famille de la région du Moyen Orient (Organisation Mondiale de la Santé, 2004).

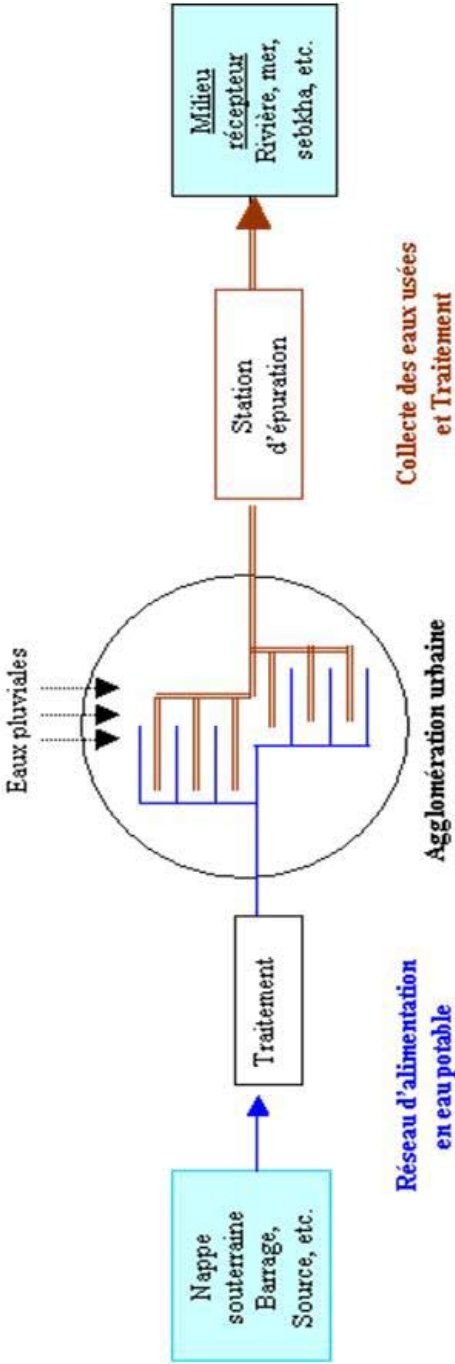


Figure 2. Le système classique d'alimentation en eau potable, de collecte et de traitement des eaux usées dans une agglomération

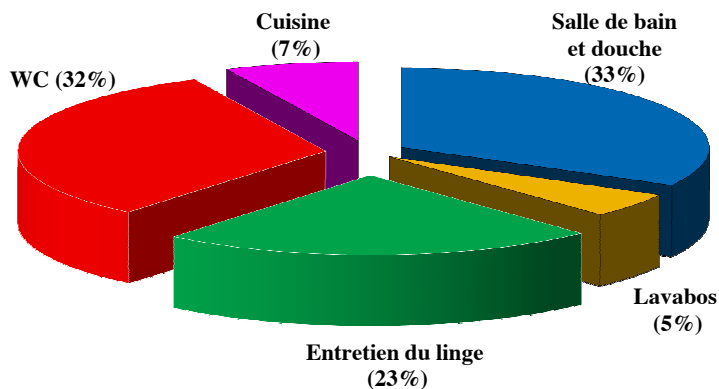


Figure 3. Répartition de l'utilisation de l'eau dans une famille dans la région du Moyen Orient (Organisation Mondiale de la Santé, 2004)

Les caractéristiques des eaux grises domestiques peuvent varier en fonction des unités habitées, du nombre des occupants et du style de vie. Elles sont influencées également par l'origine des eaux utilisées et des produits utilisés dans le lavage et le nettoyage, comme le savon, le shampooing et des produits d'entretien commercialisés (les détergents). Les eaux grises se distinguent clairement des caractéristiques des eaux usées non traitées (brutes), car ce sont des eaux bien moins polluantes. En Tunisie et en milieu urbain, les eaux grises sont estimées à environ 69 l/jeq.hab, alors que les eaux noires ne dépassent pas 30 l/jeq.hab. La réutilisation des eaux grises, après un traitement simple et adéquat, est possible. En effet, ces eaux peuvent être recyclées et alimenter les chasses d'eau des toilettes. Pour ce faire, il est nécessaire de collecter séparément les eaux grises et les eaux noires dans les maisons, ce qui impose des considérations pour les systèmes de collecte existants. Ainsi, pour les nouvelles constructions, il faudra tenir compte de la séparation des eaux grises et des eaux noires dans la conception initiale des travaux sanitaires prévus pour les habitations.

Dans ce contexte, la gestion locale de l'eau basée sur la ségrégation des différentes qualités de l'eau usée produite permet un traitement et une réutilisation adaptée à la qualité et à l'usage de l'eau. En plus, il peut être plus acceptable par l'individu de gérer ces propres rejets que de réutiliser des rejets traités générés par d'autres individus. En effet, à cause de l'évacuation des eaux usées loin des points de production vers des stations de traitements, les gens sont de moins en moins confrontés à la manipulation des eaux usées diminuant les possibilités de leur réutilisation et entraînant un sentiment de « rejet et de dégoût » qui tend à être généralisé en milieu urbain.

L'application du concept de gestion locale des eaux à large échelle nécessite l'adaptation et le développement de technologies de traitement performantes et à faible coût. Le coût final est fortement atténué par le bénéfice de la réutilisation, générant une économie d'eau fortement appréciée dans des pays où l'eau est rare.

Certaines applications urbaines sont facilement adaptables à une ségrégation des eaux et aboutissent à un bénéfice incontestable, tel que dans les hôtels, les clubs de sports, les hammams et les foyers universitaires. Ce type de bâtiments présente une facilité de ségrégation des eaux grises et noires, puisque les douches et les toilettes sont souvent séparées en des lieux d'utilisation commune. Par ailleurs, ces bâtiments disposent d'une surface importante de collecte d'eau de pluie. Étant donné qu'en Tunisie beaucoup de bâtiments et d'immeubles ont déjà un double système d'évacuation des eaux grises et noires, ces deux catégories d'eaux usées ne se mélangent souvent qu'en dehors du bâtiment. En évitant ce mélange, le développement du traitement et le recyclage des eaux grises seraient accélérés, soit environ le 2/3 des eaux usées produites.

LE ZERO REJET : ETUDE DE CAS

La Figure 4 illustre un exemple de la gestion locale de l'eau basée sur la séparation des eaux. Le choix de la technologie reste fonction de l'usage, donc de la qualité de l'eau et de l'objectif de réutilisation.

Il existe plusieurs cas réels d'utilisation des eaux grises dans le monde, comme en Allemagne, en Italie, au Japon, en Australie, en Chypre, aux Etats Unis d'Amérique, en Angleterre, en Suède et dans d'autres pays (Lens et al., 2001 ; Otterpohl, 2004 ; Organisation Mondiale de la Santé, 2004). Cette nouvelle approche offre plusieurs options et possibilités de réutilisation des eaux traitées. Elle présente une solution intéressante, basée sur la valeur économique et fertilisante des eaux usées pour les régions où l'eau est rare (telles qu'au Maghreb et au Moyen Orient).

Dans le cadre d'un projet de recherche et de développement « Concepts durables vers une municipalité sans effluents » (www.zer0-m.org), financé par l'Union Européenne dans son programme régional méditerranéen pour la gestion locale de l'eau, des Centres de Démonstration Technique (TDC) ont été réalisés dans les pays du Sud de la Méditerranée (au Maroc, en Tunisie et en Egypte) et en Turquie (Baban et al., 2008 ; Regelsberger et al., 2007). L'objectif était de diffuser des concepts et de développer des techniques permettant une utilisation optimisée des eaux domestiques d'agglomérations – la municipalité sans effluents – et leur contenu en boucles plus ou moins fermées. Des installations pilotes de démonstration ont pu être réalisées et ainsi il a été démontré la faisabilité de l'approche d'une gestion durable, centrée sur le ménage et utilisant les avantages de collecter et de traiter des fractions d'eaux usées séparément (Bousselmi et al., 2008 ; Regelsberger, 2008).

En Tunisie, un foyer universitaire de trois étages occupé par 212 étudiantes a été sélectionné pour l'installation du TDC. Le bâtiment du foyer dispose au rez-de-chaussée d'un espace de bains équipé de 18 douches et d'un espace sanitaire par étage contenant 10 lavabos et 5 toilettes. Le système mis en place comporte trois lignes de traitement relatives aux eaux grises, aux eaux noires et aux eaux pluviales. Les eaux traitées par les trois lignes sont réutilisées et recyclées respectivement dans les chasses d'eaux des toilettes, dans

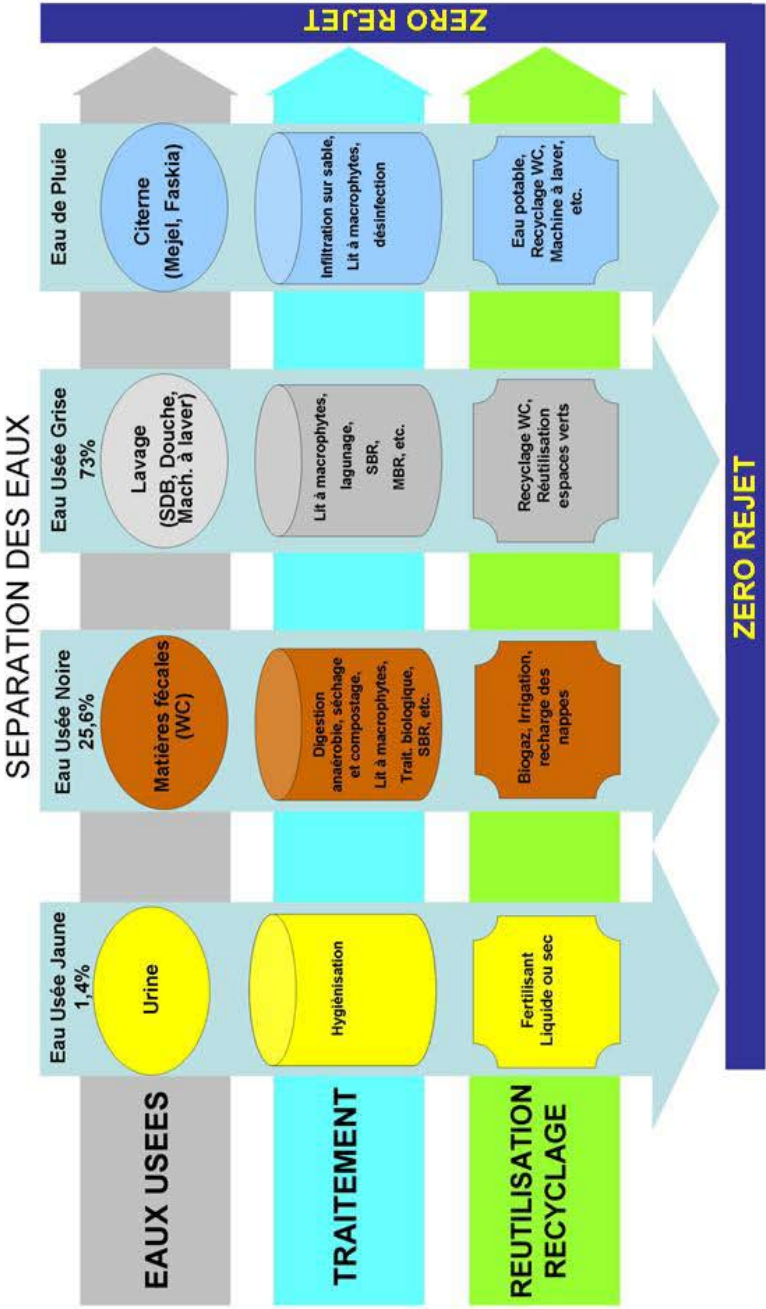


Figure 4. Séparation des eaux et différentes possibilités de traitement, de recyclage et de réutilisation (D'après Köttner et al., 2003) (WC : Toilettes ; SBR : Réacteur biologique séquentiel ; SDB : Salle de bain ; MBR : Réacteur biologique à membrane)

l'irrigation de l'espace vert aménagé à côté du foyer et au niveau de l'alimentation des douches. Les technologies implantées sont un réacteur biologique à membrane (MBR – BUSSE GmbH), un réacteur biologique séquentiel (SBR – AquaCycle de PONTOS GmbH) et une zone humide.

Concernant la filière des eaux grises, les eaux rejetées par les douches sont à faible valeur nutritive. Elles sont traitées en parallèle par les deux réacteurs MBR et SBR. Le MBR est une technologie à coût d'investissement plus élevé en comparaison au SBR, mais c'est un réacteur compact et assurant une qualité d'eau traitée désinfectée. L'eau traitée par le SBR est ensuite désinfectée par UV. Après traitement, l'eau est recyclée dans les chasses d'eau des toilettes.

Pour la filière des eaux noires qui proviennent des toilettes, ces eaux sont traitées dans une fosse septique (IMHOFF), puis dans une zone humide composée de deux bassins plantés (*Phragmites australis*) à écoulement vertical et horizontal, respectivement. L'eau traitée est réutilisée pour irriguer les espaces verts, ce qui permet de tirer profit de la valeur fertilisante des nutriments présents dans les eaux noires. Les boues produites par la fosse IMHOFF, essentiellement dans le premier compartiment, sont retirées annuellement et traitées dans un lit à compostage planté par des macrophytes (*Phragmites australis*).

Concernant la filière de l'eau pluviale, collectée à partir du toit du foyer (environ 600 m²), ces eaux sont stockées, filtrées sur un filtre à sable, chauffées à l'énergie solaire et utilisée pour l'alimentation des douches. Dans le cas de fortes pluies, le trop plein du réservoir de collecte alimente un lit d'infiltration dans l'objectif de favoriser l'alimentation de la nappe à une perte par ruissellement de surface.

La Figure 5 illustre schématiquement le fonctionnement des trois lignes de traitement et le recyclage.

Une goutte de pluie collectée est valorisée à trois reprises (dans les douches, les chasses d'eau et au niveau de l'irrigation), alors que l'eau potable utilisée au niveau des douches est recyclée deux fois (dans les chasses d'eau et au niveau de l'irrigation). La Figure 6 présente la spirale de réutilisation en fonction des traitements réalisés.

La qualité des eaux grises et noires, comparée aux eaux usées municipales, est illustrée par les Figures 7 et 8, qui mettent en évidence la différence entre les différentes catégories des eaux usées. Les eaux grises sont peu polluées et justifient bien leur séparation des eaux noires pour pouvoir les traiter et les recycler dans les chasses d'eau des toilettes. De même, une faible concentration en coliformes fécaux est observée (Figure 7). Les eaux noires contiennent de fortes teneurs en Demande Chimique en Oxygène (DCO), en DBO₅ et en azote (Figure 8) (Arnold et Bousselmi, 2007).

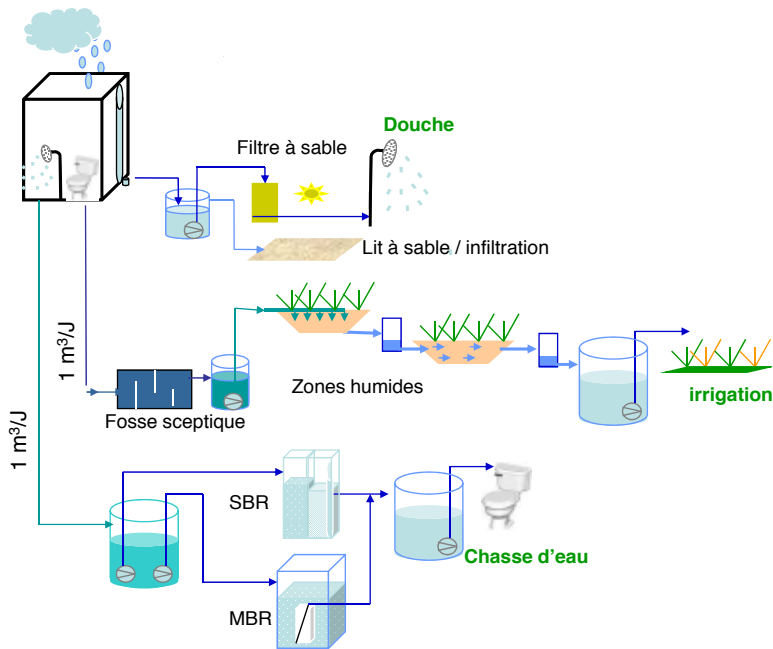


Figure 5. Exemple de gestion locale de l’eau, vers le zéro rejet des effluents municipaux

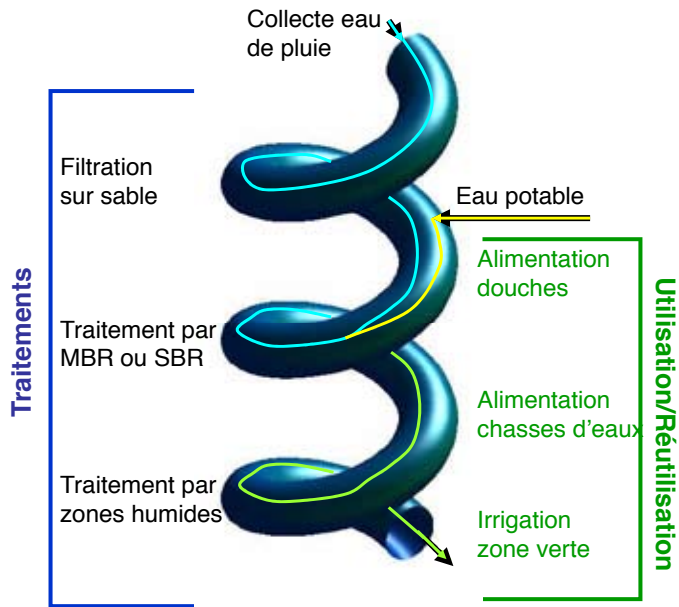


Figure 6. Spirale de réutilisation des eaux en fonction des traitements

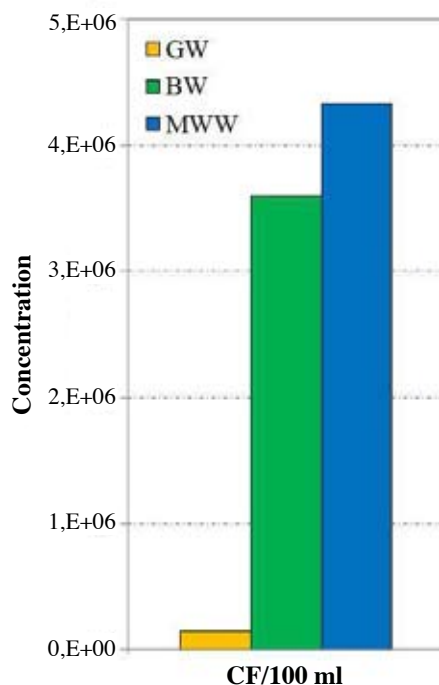


Figure 7. Concentration en coliformes fécaux (CF) des eaux grises (GW), des eaux noires (BW) et des eaux usées municipales (MWW)

D'après la Figure 9, le réacteur MBR est plus performant que le SBR qui nécessite une étape de désinfection pour pouvoir recycler les eaux traitées dans les chasses d'eau des toilettes. Toutefois, le SBR offre des avantages économiques dans l'investissement et mérite d'être optimisé et amélioré pour délivrer une qualité conforme au recyclage.

Une enquête sur l'acceptabilité de ce concept auprès des utilisatrices (Arnold et Bousselmi, 2007) a montré une attitude positive vis-à-vis des trois utilisations (soit la douche, la chasse d'eau et l'irrigation).

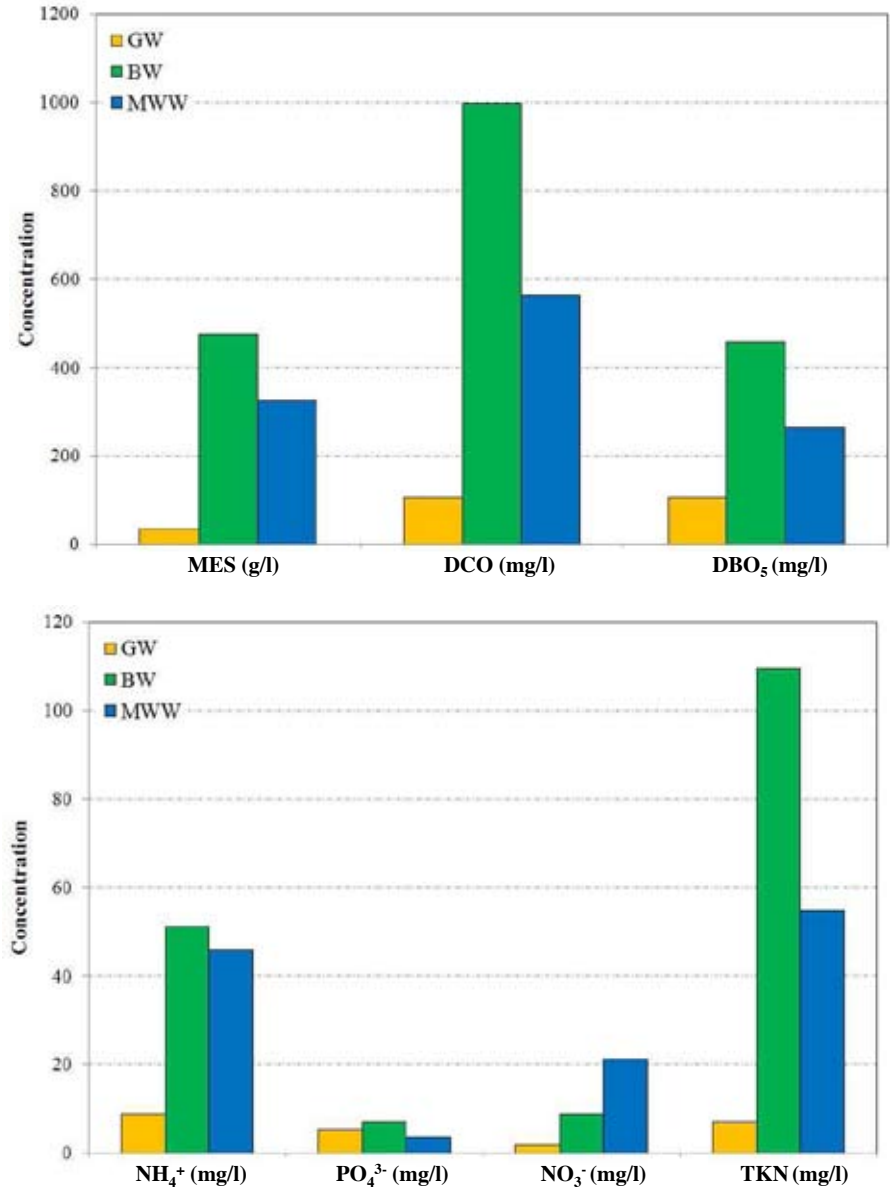


Figure 8. Qualité des eaux grises (GW), des eaux noires (BW) et des eaux usées municipales (MWW) (MES : Matières En Suspension ; DCO : Demande Chimique en Oxygène ; DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène ; NH₄⁺ : Azote ammoniacal ; PO₄³⁻ : Ion phosphate ; NO₃⁻ : Nitrate ; NTK : Azote Total de Kjeldhal)

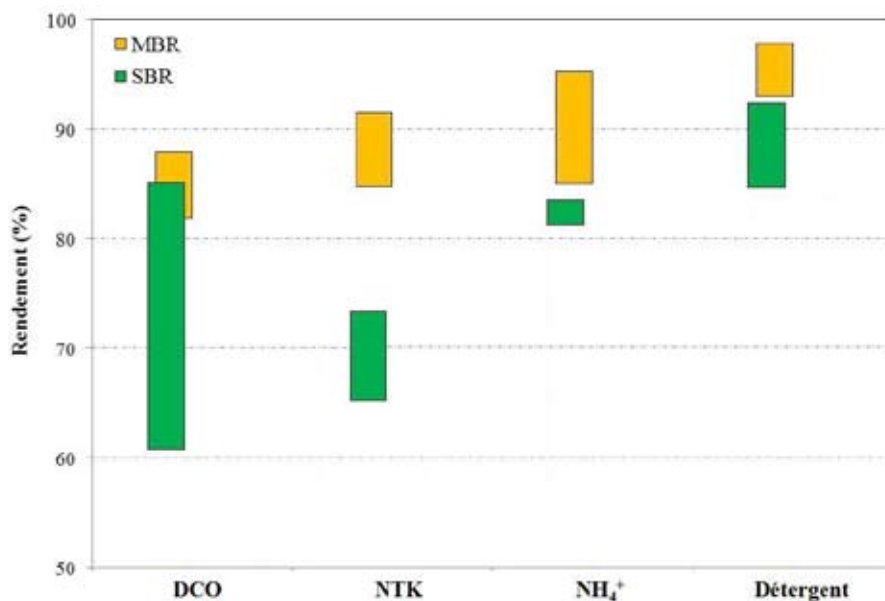


Figure 9. Performance des réacteurs MBR et SBR dans le traitement des eaux grises (DCO : Demande Chimique en Oxygène ; NTK : Azote Total de Kjeldhal ; NH₄⁺ : Azote ammoniacal ; MBR : Membrane Bioréacteur ; SBR : Réacteur Biologique séquentiel)

Un programme de recherche est en cours pour optimiser et évaluer les performances de ces technologies vis-à-vis des eaux grises et noires, sous les conditions réelles. Ce programme est également appuyé par des cycles de formation autour du TDC (sur le concept, les technologies, le recyclage et/ou la réutilisation). Le Tableau 4 donne les différentes options et les possibilités de traitement des différentes catégories des eaux usées pour un objectif de réutilisation totale des effluents traités (Baban et al., 2008).

CONCLUSION

En respectant les règles d'hygiène et de santé publique, la réutilisation des eaux grises conduit, sans aucun doute, à la préservation et la valorisation des ressources en eau. Ceci devient possible grâce à la présence de systèmes de collecte et de traitement des eaux grises dans les habitations et les infrastructures commerciales. Cette pratique demandera nécessairement l'encouragement du traitement des eaux usées et leur réutilisation, et en particulier dans les nouvelles constructions. La modification du code de construction et de l'urbanisme et les conditions de l'octroi des autorisations favoriseraient les possibilités d'utilisation des eaux grises. En effet, deux systèmes distincts de conduites pour la collecte des eaux grises et des eaux noires devraient être mis en place.

Tableau 4. Les différentes options techniques de séparation, de traitement et réutilisation des eaux usées (Baban et al., 2008)

Catégories des eaux usées	Traitement	Réutilisation / recyclage
<u>Eaux usées grises :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Teneur en nutriments faible • Teneur en matière organique généralement faible comparée à l'eau usée classique • Volume élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone humide : série de bassins plantés à écoulement vertical et horizontal (CW) • Sol filtrant planté • Réacteur Biologique Séquentiel (SBR) • Réacteur biomembrane (MBR) • Disques biologiques • Fosse septique • Désinfection par UV 	Chasses d'eau des toilettes (WC)
<u>Eaux usées noires</u> <ul style="list-style-type: none"> • Teneur en matière organique élevée • Possibilité de production d'énergie (biogaz) 	<ul style="list-style-type: none"> • MBR • Réacteur anaérobie ascendant (deux étages) • CW • Fosse septique • Lit de séchage des boues • Lit de compostage des boues 	Irrigation
<u>Eaux usées jaunes (urine)</u> <ul style="list-style-type: none"> • Teneur en nutriments élevée 	Collection séparée et stockage (dilution et/ou traitement physico-chimique)	Fertilisants (complément)
<u>Eaux pluviales</u> <ul style="list-style-type: none"> • Eau claire de bonne qualité • Ressource renouvelable 	<ul style="list-style-type: none"> • Système de collecte des eaux pluviales tombant sur les toits • Filtre de déchets • Réservoir de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Chasses des toilettes (WC) • Irrigation • Machines à laver • Douches • Boisson après désinfection

L'utilisation des eaux grises pourrait être encouragée dans les établissements publics et d'enseignement, comme les écoles et les universités, et en particulier dans les mosquées, où les eaux grises présentent une qualité meilleure du point de vue pollution et sont facilement collectées et réutilisées dans l'irrigation des espaces verts et des terrains de jeux se trouvant dans les environs du lieu de production des eaux grises. La consommation des eaux dans les locaux administratifs, qui représentent environ 20% de la consommation en eau totale dans les villes, incite et confirme l'intérêt de la réutilisation des eaux grises dans les établissements d'enseignement et des mosquées. Si la réutilisation des eaux grises reste tributaire des saisons non pluvieuses et des surfaces irrigables, le recyclage des eaux grises dans les chasses d'eau, les toilettes et le nettoyage des cours, ou encore son utilisation dans les circuits de refroidissement, représente une alternative intéressante dans la mesure où ces besoins en eau correspondent à environ 50% de la consommation domestique.

Cette approche devient plus intéressante si les eaux pluviales sont également intégrées, d'autant plus que cette application est très ancienne et la Tunisie l'a déjà bien adoptée depuis l'antiquité (avec l'utilisation des citernes privées et publiques implantées en particulier dans la région du centre et du Sud du pays). Cette approche intègre la gestion locale de l'eau d'une manière durable et tend vers la réalisation du concept zéro rejet en tirant profit au maximum des eaux usées et en les considérant comme une source qu'il faut valoriser et pas une eau souillée qu'il faut se débarrasser le plus rapidement possible.

Dans une prochaine étape, il faudra généraliser les résultats obtenus par d'avantage de réalisations et pousser plus loin la recherche de nouvelles et intéressantes solutions. Les techniques utilisées présentent une nouvelle chance pour le Maghreb et les pays de la Méditerranée, connaissant une pression particulièrement forte et croissante sur leurs ressources en eau et qui pourtant ont tablé jusqu'ici sur des technologies d'eau développées dans des régions beaucoup plus arrosées et sur des bases qui datent d'il y a plus d'un siècle.

REFERENCES

- Arnold F. et Bousselmi L. (2007). Local waters treatment and reuse in a students' residence hall – a study on acceptance. *Sustainable Water Manage. J.*, 2, 15-19.
- Baban A., Bousselmi L., El Hamouri B. et Abdel Shafy H. (2008). An overview for the technical and demonstration centres of the zero-M project. *Sustainable Water Manage. J.*, 2, 31-35.
- Bousselmi L., Lamine M. et Ghrabi A. (2008). Integrated approach to water saving – A practical example in a student residence in Tunisia. *Sustainable Water Manage. J.*, 2, 16-19.
- Köttner M., Kaiser A. et Anendano M.V. (2003). Dry fermentation biogas technology – a practical approach for closed loop sanitation, waste stabilisation and nutrient recovery. Proceedings of the 2nd International Symposium on ecological sanitation, incorporating

the 1st IWA specialist group conference on sustainable sanitation, 7-11 Avril 2003, Lübeck, Allemagne, p. 483-490.

Koundi A. (2006). Evaluation technico-économique des procédés de traitement des eaux usées en Tunisie. Rapport « InWent » sur le secteur de l'eau dans la région Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA) (2005-2008).

Koundi A. (2003). Performances des stations d'épurations des eaux usées en Tunisie. Communication orale au Séminaire « Réutilisation des eaux usées traitées et des boues résiduelles » organisé par l'Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts (INRGREF), 24-25 septembre 2003, Tunis, Tunisie.

Lens P., Grietje Z. et Lettinga G. (2001). Decentralised sanitation and reuse: Concepts, systems and implementation. IWA publishing, ISBN 9781900222471, 650 p.

Neubert S. et Benabdallah S. (2003). La réutilisation des eaux usées traitées en Tunisie. Etudes et rapports d'expertise 11/2003, Institut Allemand de développement, ISBN 3889852599, 96 p.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (2004). Réutilisation des Eaux Grises (eaux de lavage) dans la Région du Moyen Orient, Centre Régional de la Santé Environnementale d'Amman, Jordan, 12 p.

Office National de l'Assainissement de Tunisie (ONAS) (2004). Rapport annuel 2004. République Tunisienne, Ministère de l'Environnement et de Développement Durable, Office National de l'Assainissement (ONAS), 16 p.

Office National de l'Assainissement de Tunisie (ONAS) (2007). Rapport annuel 2007. République Tunisienne, Ministère de l'Environnement et de Développement Durable, Office National de l'Assainissement (ONAS), 16 p.

Otterpohl R. (2004). New technological development in ecological sanitation. Proceedings of the 2nd International Symposium on ecological sanitation, incorporating the 1st IWA specialist group conference on sustainable sanitation, 455-462, 7-11 Avril 2003, Lübeck, Allemagne.

Margat J. et Vallée D. (1999). Vision méditerranéenne sur l'eau, la population et l'environnement au XXI^{ème} siècle. Contribution à la vision mondiale sur l'eau promue par le Conseil Mondial de l'eau et le Global Water Partnership, élaborée par le Plan Bleu dans le cadre du MEDTAC/GWP, 83 p.

Regelsberger M. (2008). Zer0-M: shifting wastewater from a disposal problem to an asset. *Sustainable Water Manage. J.*, 2, 3-6.

Regelsberger M., Baban A., Bousselmi L., Abdel Shafy H. et El Hamouri B. (2007). Zer0-M, sustainable concepts towards a zero outflow municipality. *Desalin.*, 215, 64-72.

Shayeb H., Haouach L. et Echeikh R. (2008). Les défis de la réutilisation des eaux usées. *Sustainable Water Manage. J.*, 1, 9-15.

PARTIE VI

LA RECHERCHE ET LES DEVELOPPEMENTS FUTURS

CHAPITRE 20

APPLICATION DE LA MODÉLISATION DÉTERMINISTE ET STOCHASTIQUE À LA PRÉVISION DES ÉTIAGES

Cas du Bassin de Reraya, Affluent de Tensift

R. BOUAICHA*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE)
Rabat, Maroc

RESUME

L'évaluation des débits d'étiage porte toujours sur la distribution des valeurs minimales annuelles des débits observés. Pourtant, pour les besoins de planification, la prévision des bas-débits est impérative en tant qu'outil d'aide à la décision. Pour atteindre cet objectif, la modélisation constitue une aide précieuse pour émettre des prévisions de débits à moyenne échéance. Le présent article présente l'application des modèles conceptuels et stochastique (ARMA) pour appréhender le régime d'étiage, pendant la période de mai à septembre, au niveau de l'oued Reraya, affluent de Tensift, situé au Sud du Maroc. Par ailleurs, pour combiner la représentativité de ces modèles, la procédure multi-modèles a été testée en vue de corriger les erreurs de prévision, dont la performance dépend étroitement de la qualité des séries de mesures hydro-pluviométriques disponibles. A ce titre, il faut noter l'intérêt des modèles ARMA et de la procédure multi-modèles, qui offrent les meilleures prévisions.

Mots clés : Etiage ; prévision ; modèle ; déterministe ; conceptuel ; stochastique ; Reraya.

* Auteur correspondant : BOUAICHA Redouane – Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE) – rue Hassan Bencheikroune, Agdal, Rabat Maroc
Email : bouaicha@water.gov.ma – Tél. : (+212) 661 10 14 35 – Fax : (+212) 537 77 86 99

INTRODUCTION

A l'instar des risques d'inondation menaçant plusieurs régions du monde, du fait du changement climatique constaté au cours de ces dernières années, les risques de sécheresse présentent également un enjeu majeur pour la gestion de la rareté de l'eau. Pour faire face à cette problématique, le Maroc a entrepris un effort considérable en matière de mobilisation des ressources en eau, ayant permis de satisfaire les besoins des différents usagers d'une part, et de surmonter les années de sécheresse vécues d'autre part.

Pour préserver ces acquis structurels, il est primordial d'œuvrer pour une gestion optimale des retenues de barrages, afin d'assurer un développement durable du Maroc. Une telle gestion ne peut se faire de façon objective et intégrée qu'en procédant à une évaluation fiable du potentiel hydrique actuel et futur, notamment en période d'étiage où les défis sont majeurs.

Plusieurs investigations ont été faites en matière d'analyse et de prévision de la sévérité d'étiage pour appréhender les risques et les conséquences d'éventuelles sécheresses. Cependant, la prévision météorologique reste un préalable important pour anticiper la connaissance des débits futurs des cours d'eau, et par la suite la ressource escomptée en période estivale.

Par ailleurs, la précision des bas-débits dépend étroitement de la qualité des données disponibles, et plus particulièrement des pratiques de jaugeages et des méthodes de traitement des annuaires hydrologiques.

Pour approcher la précision des bas débits, plusieurs types de modèles peuvent être utilisés pour améliorer les techniques de modélisation. L'approche retenue dans cet article consiste à procéder à une analyse comparative des modèles conceptuels, de la régression linéaire, des modèles conceptuels et stochastique (ARMA) et de la procédure multi-modèles.

MODELISATION DU REGIME DES ETIAGES

La modélisation des étiages consiste à simuler les bas-débits en essayant de trouver la formulation mathématique la plus adaptée au bassin versant étudié, pour identifier la réponse d'un cours d'eau suite à des précipitations ou à la fonte des neiges. A cet effet, il y a lieu de procéder au calage du modèle, moyennant les données historiques, afin de dégager les paramètres donnant le meilleur ajustement. Différentes méthodes permettent la validation du calage d'un modèle, telles que la méthode graphique, permettant de comparer les débits observés et simulés, et la méthode statistique, basée sur les tests statistiques propres à chaque type de modèle.

Il est important de noter que tous les modèles de simulation d'étiages tiennent compte du fait qu'après la saison des hautes eaux, les débits d'une rivière abordent une phase de décrue. Si aucune pluie ne survient, l'hydrogramme résultant ne présente plus aucun

caractère aléatoire : le débit en un point de la courbe de tarissement est parfaitement défini, aux erreurs de mesures près, pour un seul débit observé à un instant antérieur. Si au contraire, surviennent des pluies tardives, il va se greffer sur la courbe de tarissement des pointes de crues.

Les modèles utilisés dans cette étude sont les suivants :

- Le modèle déterministe-statistique ;
- Les modèles conceptuels (GENDEB, GARDENIA) ;
- Le modèle autorégressif et de moyenne mobile (ARMA) ;
- La procédure multi-modèles.

Ces modèles ont été testés au niveau du bassin versant de l'oued¹ Reraya, affluent de la rive gauche de l'oued Tensift, situé au Sud du Maroc, pour prévoir les débits moyens des mois de mai, juin, juillet, août et septembre 1997.

MODELE DETERMINISTE-STATISTIQUE

Le modèle déterministe-statistique simule les deux principales composantes du débit moyen mensuel : (1) le débit de base (Q_b) qui est dû aux conditions initiales, et (2) le débit pluvial (Q_p) qui est dû aux pluies postérieures à la période de prévision.

Détermination du débit de base

Le **débit de base** est calculé à partir de la courbe de récession pendant le tarissement :

$$Q_b = \frac{1}{T} \times \int_0^T Q_0 \times \exp(-a \times t) dt = \frac{Q_0}{a \times T} \times [1 - \exp(-a \times T)] \quad (1)$$

Où : T = le nombre de jours du mois considéré ;
 Q_0 = le débit initial au début de chaque mois, mesuré sur le terrain ou déduit des calculs à partir de la courbe de tarage ;
 a = le coefficient de récession, fonction de Q_0 ;

$$a = \frac{\ln Q_0 - \ln Q(t)}{t} \quad (2)$$

La relation $a = f(Q_0)$ est calculée pour chaque mois en utilisant les techniques de régression.

¹ Oued signifie, en langue arabe, rivière.

Détermination du débit pluvial

Le débit pluvial peut être formulé par la relation suivante :

$Q_p = f(Q_0, P)$ (3)

où P constitue la quantité de pluie tombée pendant la période de prévision.

La détermination de cette relation dépend évidemment de la prévision météorologique à long terme. Cependant, de nos jours, la prévision saisonnière reste toujours d'ordre qualitatif. De ce fait, il est proposé de considérer des quantités de pluie moyennes, pour chaque cas de prévision météorologique, associées à un certain intervalle de probabilité (Tableau 1).

Tableau 1. Quintiles pluviométriques pour différentes probabilités de dépassement

Fréquence au dépassement (%)	1997				
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
10	108	42	19	18	39
20	83	25	12	10	23
50	42	8	2	2	6
80	15	2	0	0	1
90	5	0,5	0	0	0

Concernant l'identification de la meilleure corrélation reliant le débit pluvial d'un mois considéré au débit Q_0 et à la quantité de pluie, la méthode « Stepwise » a été utilisée pour définir les variables explicatives appropriées (Tableau 2).

Tableau 2. Equations de régression calées pour déduire le débit pluvial (Q_p)

Mois	Equation de régression
Mai	$Q_{mai} = 0,737 \times Q_0 + 0,0119 \times P_{mai}$
Juin	$Q_{juin} = 0,5724 \times Q_0 + 0,0026 \times P_{juin} + 0,0041 \times P_{mai}$
Juillet	$Q_{juillet} = 0,6388 \times Q_0 + 0,0019 \times P_{juillet}$
Août	$Q_{août} = 0,5167 \times Q_0 + 0,019 \times P_{août}$
Sept.	$Q_{sept.} = 0,4434 \times Q_0 + 0,055 \times \sqrt{P_{sept.}}$

En considérant la superposition du débit de base et du débit pluvial, le débit moyen mensuel s'écrit :

$$Q = Q_b + Q_p \quad (4)$$

L'application de cette méthode à l'année 1997 permet d'émettre les prévisions pour la période allant de mai à septembre 1997. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Débits (m³/s) prévus par le modèle déterministe-statistique

Année	Mois	P (m ³ /s)	a	Débit (m ³ /s)				
				Q ₀	Q _b	Q _p	Q _{cal}	Q _{obs} ²
1997	Mai	47,1	0,03	2,59	1,75	2,47	4,22	2,32
	Juin	14,6	0,02	1,57	1,25	0,32	1,57	1,64
	Juillet	4,2	0,04	0,74	0,45	0,48	0,93	0,47
	Août	2,9	0,04	0,26	0,16	0,19	0,35	0,22
	Sept.	119,1	0,02	0,16	0,12	0,67	0,79	1,24

Q_{cal} : Débit calculé ; Q_{obs} : Débit observé

MODELES CONCEPTUELS

Les modèles conceptuels sont des modèles déterministes, dont le concept est basé sur la transformation de la pluie brute en débit en incorporant dans leurs structures les mécanismes physiques engendrés par le cycle hydrologique. Les modèles à réservoirs représentent le type de modèles conceptuels utilisés, notamment à des fins d'évaluation des différentes composantes du cycle hydrologique.

Le modèle conceptuel GARDENIA présente 3 schémas de fonctionnement hydrologique et permet la modélisation de la neige, alors que le modèle conceptuel GENDEB présente un seul schéma.

Le Tableau 4 présente les résultats obtenus par l'application des modèles conceptuels GENDEB et GARDENIA pour la prévision des débits relatifs à la période de mai 1997 à septembre 1997.

² Le débit observé (Q_{obs}) est issu du traitement de l'annuaire hydrologique de la station de référence.

Tableau 4. Débits prévus par les modèles conceptuels

	1997				
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Débit (m³/s) prévu par GENDEB	3,02	1,84	0,47	0,10	2,82
Débit (m³/s) prévu par GARDENIA	1,76	1,34	0,97	0,68	1,40
Débit observé (Qobs) (m³/s)	2,32	1,64	0,47	0,22	1,24

MODELISATION STOCHASTIQUE

Les modèles ARMA (p,q), appliqués dans le cadre de cette étude, sont utilisés pour modéliser les séries chronologiques, telles que celles des pluies, des débits ou d’autres phénomènes de l’environnement et de l’économétrie (Box et Jenkins, 1970). Ces séries chronologiques sont caractérisées par une forte dépendance entre les observations successives. Il est aussi supposé qu’elles peuvent être représentées par des modèles linéaires, c’est à dire que la série étudiée (Z_t) peut être considérée comme étant la sortie d’un système linéaire, dont l’entrée est un bruit blanc discret (a_t). La formulation mathématique s’écrit, pour un modèle ARMA (p,q) :

$$[\sum_{j=0}^p \Phi_j \times B^j] \times z_t = [\sum_{j=0}^q \Theta_j \times B^j] \times a_t \tag{5}$$

où B est un opérateur de translation en arrière, tel que :

$$B \times Z_t = Z_{t-1} \text{ et } B^j \times Z_t = Z_{t-j} \tag{6}$$

La modélisation stochastique se fait par une approche itérative, et passe par les étapes suivantes :

- 1. Sélection du type de modèle ;
- 2. Identification de la forme de modèle en utilisant la fonction d’autocorrélation (ACF) et la fonction d’autocorrélation partielle (PACF) ;
- 3. Estimation des paramètres du modèle ;
- 4. Contrôle de la qualité du modèle moyennant le test de Box-Pierce, l’examen des fonctions ACF et PACF des résidus, le test de normalité et la statistique AIC (*Akaike Information Criterion*).

Les prévisions pour la période d’étiage, de mai à septembre 1997, présentées dans le Tableau 5 ont pu être réalisées grâce à l’application du modèle autorégressif (1,0). D’après les résultats, les débits calculés par le modèle ARMA sont plus proches des débits observés. Ainsi, le modèle ARMA permet d’obtenir des prévisions de débit plus fiables que les modèles déterministe-statistique et conceptuels.

Tableau 5. Débits prévus par le modèle ARMA (1,0)

	1997				
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Débit prévu (m ³ /s)	3,37	1,78	0,60	0,32	0,30
Débit observé (Qobs) (m ³ /s)	2,32	1,64	0,47	0,22	1,24

PROCEDURE MULTI-MODELES

La procédure de décision multi-modèles permet de combiner plusieurs méthodes pour calculer une moyenne pondérée des prévisions émises par les différents modèles (Ungureanu et Adler, 1998). En effet, un seul modèle ne permet pas de tenir compte, simultanément, des différents aspects liés à un processus aléatoire, et plus particulièrement les erreurs dues aux pratiques de mesures ou aux problèmes de représentativité des variables explicatives prises en compte.

L'hydrologue prévisionniste est donc amené à mettre en œuvre plusieurs modèles et de corriger les écarts par la procédure multi-modèles.

Cette méthode permet de calculer le débit prévu sous forme de moyenne pondérée des débits résultant de l'application des différents modèles testés en affectant un coefficient de pondération calculé comme suit :

Supposons que m modèles soient utilisés pour émettre des prévisions, l'erreur de prévision du modèle k est :

$$e_k = \frac{Q_k^{\text{prévu}} - Q_{\text{obs.}}}{Q_{\text{obs.}}} \quad (7)$$

Le poids à affecter à chaque modèle est donné par la formule suivante :

$$w_k = \frac{(e_k^2)^{-1}}{\sum_{j=1}^m (e_j^2)^{-1}} \quad (8)$$

$$\text{Avec } \sum_{j=1}^m w_k = 1$$

Le débit prévu moyennant la procédure de décision multi-modèles s'écrit :

$$Q = \sum_{k=1}^m w_k \times Q_k \quad (9)$$

où Q_k est le débit prévu par le modèle k .

Le Tableau 6 présente les prévisions de cette procédure, calculées à partir des moyennes pondérées des débits prévus par les techniques de régression, les modèles GENDEB, GARDENIA et ARMA. La Figure 1 permet de visualiser graphiquement les résultats présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Synthèse des prévisions réalisées pour le calcul du débit (m3/s) par les différents modèles étudiés

Débit (m³/s)		1997				
		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Modèle considéré	Observé (Qobs)	2,32	1,64	0,47	0,219	1,24
	Régression	4,22	1,57	0,93	0,35	0,79
	GENDEB	3,02	1,84	0,47	0,10	2,82
	GARDENIA	1,76	1,34	0,97	0,68	1,40
	ARMA	3,01	1,60	0,55	0,32	0,26
	Multi-modèles	2,59	1,55	0,55	0,10	1,37

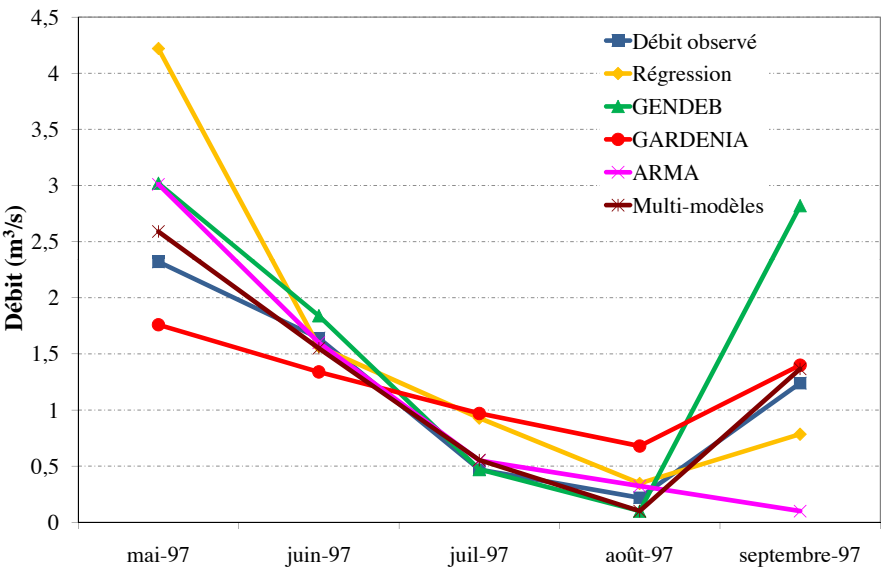


Figure 1. Comparaison des prévisions des débits d'étiage

CONCLUSION

L'application de la modélisation présente un outil précieux d'aide à la décision au gestionnaire des ressources en eau pour permettre une évaluation raisonnable et une gestion rationnelle, notamment pendant la période des basses eaux. L'analyse des résultats issus de l'application des différents modèles montre que les modèles ARMA et la procédure multi-modèles offrent les meilleures prévisions.

Par contre, les prévisions issues des techniques de régression sont relativement décalées par rapport aux observations. En effet, l'application de cette méthode nécessite d'intégrer plusieurs variables explicatives qui influencent le débit à l'exutoire.

Quant aux modèles conceptuels, malgré leur description détaillée du cycle hydrologique, ils nécessitent d'intégrer la composante « neige » pour tenir compte du régime nival de l'oued Reraya. A cet égard, le renforcement du réseau d'observation hydrologique et l'intégration de mesures de neige constituent un impératif pour pouvoir émettre des prévisions fiables.

REFERENCES

Box G.E.P. et Jenkins G.M. (1970) Time series analysis: Forecasting and control. Ed. Holden-Day, San Francisco, CA, USA, 553 p.

Ungureanu V. et Adler M.-J. (1998) Long range forecasting of hydrological aspects of droughts. Séminaire international annuel du groupe Alpine and Mediterranean Hydrology (AMHY) de FRIEND – Programme Hydrologique International (PHI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), Istanbul, Turquie, octobre 1998. Rapport annuel N° 6, p. 97-108.

CHAPITRE 21

UTILISATION DES TECHNIQUES ISOTOPIQUES POUR LA CONNAISSANCE ET L'EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU AU MAROC

N. ZINE*

Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement
Rabat, Maroc

H. BEN ABDELFADEL

Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement
Rabat, Maroc

B. DHIMMI

Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement
Rabat, Maroc

RESUME

Le présent article rappelle le contexte géographique du Maroc et son influence sur la répartition des ressources en eau. Cette répartition, plus au moins clémentine au Nord et sévère au Sud, se trouve également influencée par divers facteurs, tels que le changement climatique, la pollution et les besoins croissants en eau. Les méthodes conventionnelles, comme les études hydrogéologiques, les études géophysiques et les travaux de forages, ayant constitué un grand apport pour la recherche, la connaissance et l'évaluation des ressources en eau, ont connu leur limite. Les dernières décennies le Maroc a fait appel aux nouvelles technologies. Parmi les techniques qui répondent le mieux à nos besoins, les techniques isotopiques constituent un outil de mesure efficace, pratique et non onéreux. A travers les études isotopiques menées au niveau des différentes régions du Maroc et basées essentiellement sur les éléments stables (^2H , ^{18}O) et radioactifs (^3H , ^{14}C),

* Auteur correspondant : ZINE Nadia – Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement – 20 Rue Hassan Ben Chekroun, Agdal Rabat Maroc
Email : faqir@water.gov.ma – Tél. : (+212) 651 47 62 87

il s'est avéré qu'une grande partie des nappes du Royaume, principalement celles situées à l'Est et au Sud du pays, connaissent des taux de renouvellement faible, voire même nul. Devant cette situation, le Maroc doit prendre, à temps, les dispositions nécessaires pour la protection et la préservation de ces ressources en eau. Dans cet article deux cas d'études seront présentés : (i) le bassin du Loukkos (dorsale calcaire du Rif), pour lequel les analyses isotopiques ont révélé des âges récents pouvant être situés entre 5 et 10 ans et ont également permis de déterminer l'altitude de recharge des sources, en vue d'une meilleure protection de la qualité de ces dernières ; et (ii) le bassin du Sahara (bassin de Laayoune – Dakhla) qui présente généralement des eaux, dont le renouvellement est très faible voir même nul, avec des âges équivalents à plusieurs milliers d'années.

Mots clés : Ressources en eau ; techniques isotopiques ; protection ; préservation ; âge des eaux ; bassin du Loukkos ; bassin du Sahara.

INTRODUCTION

La situation géographique du Maroc confère au pays un climat essentiellement semi-aride à aride, excepté dans la zone limitée du Nord. Ces conditions climatiques difficiles affectent aussi bien les ressources en eau de surface que les eaux souterraines, faisant du Maroc un pays dont le potentiel en eau est limité. Cette situation ne pourrait que s'aggraver dans le futur, suite aux sécheresses consécutives, au changement climatique et à la demande de plus en plus croissante en eau.

La maîtrise de la connaissance et de l'évaluation de la ressource en eau est donc indispensable pour une prise de décision adéquate et une gestion durable de cette ressource. Pour les ressources en eaux souterraines, où les méthodes conventionnelles (telles que les études hydrogéologiques, les explorations par forage et les études géophysiques) connaissent parfois leurs limites, le recours à de nouvelles technologies, dont l'hydrologie isotopique ou la télédétection, s'avère incontournable.

Les techniques isotopiques qui s'appuient sur le traçage naturel de l'eau et de ses constituants dissous sont d'une utilité qui n'est plus à démontrer aujourd'hui. Plusieurs traceurs isotopiques stables (^{18}O , ^2H , ^{13}C , ^{15}N , ^{34}S) et radioactifs (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl) sont actuellement utilisés et montrent une grande efficacité pour l'obtention d'informations essentielles, parfois inaccessibles par les autres moyens d'investigation (Verhagen, et al., 1991 ; Zine et al., 2003 ; Marah et al., 2007 ; Bouchaou et al., 2008).

Après avoir inventorié les diverses études isotopiques menées au Maroc par la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), le présent article exposera deux cas d'études isotopiques marocaines, traitant d'un contexte climatique différent.

UTILISATION DE LA METHODE ISOTOPIQUE AU MAROC

Les premières études isotopiques au Maroc datent des années 1970. Depuis les années 1990 et grâce à l'appui technique de l'Agence Internationale de l'Energie Nucléaire (AIEA),

l'intégration des techniques isotopiques a pris une grande ampleur et est devenue incontournable pour la compréhension du fonctionnement des eaux souterraines. Le recours aux techniques isotopiques pour étudier les eaux souterraines a permis de déterminer leur origine, leur âge, leur mode de réalimentation, le risque de contamination par la pollution ou par l'intrusion d'eaux salées, et les possibilités de leur exploitation de manière durable.

La Figure 1 présente quelques principales nappes marocaines qui ont fait l'objet d'études et d'analyses isotopiques pour atteindre les objectifs suivants :

- Bassin du Guelmim (Projet RAF8/022 / 1995-1999) : Evaluation des bilans hydriques de l'aquifère, étude de la zone non saturée et détermination de l'origine de la dégradation de la qualité de l'eau (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et al., 1996) ;
- Bassins d'Errachidia et de Tafilalet (Marché N°89/2003) : Détermination de l'origine de l'eau et de sa minéralisation, estimation du temps de séjour de l'eau et évaluation des bilans hydriques des aquifères (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et al., 2003a) ;
- Bassins du Tadla (Projet MOR8/008 et MOR8/009 / 1999-2003) : Compréhension du fonctionnement hydrodynamique des nappes et actualisation des termes de bilan du modèle mathématique du système aquifère (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et al., 2003b) ;
- Bassin de la Moyenne Moulouya (Projet MOR8/008 et MOR8/009 / 1999-2003) : Compréhension du fonctionnement hydrodynamique des nappes, datation des eaux et évaluation des ressources en eau (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et al., 2003b) ;
- Bassin d'Essaouira (Projet MOR8/011 / 2003-2004) : Etude du fonctionnement hydrodynamique des aquifères du bassin et évaluation des potentialités de la région (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et al., 2004) ;
- Bassin du Sebou (Fés, Meknes) (étude en cours) (Projet MOR8/012 / 2005-2007) : Compréhension du fonctionnement des sources, délimitation des aires de recharge des sources, et détermination du taux de renouvellement des eaux (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau et al., 2006) ;
- Nappe alluviale de Guelta Zergua (Tan Tan) : Détermination de l'origine de la salinité de la nappe (Zine, 2001) ;
- Bassin du Sahara (Région Laayoune-Dakhla) (Marché N°8/2001) : Détermination de l'âge de l'eau, de l'origine de l'alimentation et des interactions entre aquifères (Direction Régionale de l'hydraulique du Sahara et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires, 2001) ;
- Dorsale calcaire du Rif (étude en cours) : Compréhension du fonctionnement hydrodynamique des systèmes karstiques, estimation du temps de transit des eaux et détermination des aires d'alimentation des sources (Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires, 2004).



Figure 1. Situation de quelques principales nappes au Maroc qui ont fait l'objet d'études et d'analyses isotopiques

METHODES D'ANALYSE

Les analyses isotopiques menées dans le cadre des études réalisées par le Secrétariat d'Etat Chargé de L'Eau et de L'Environnement sont réalisées par le laboratoire de l'unité Eau et Climat du Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN) à Rabat. Ce dernier est doté de moyens nécessaires pour les analyses isotopiques en respectant les procédures en vigueur. Ce laboratoire maintient des relations de coopération étroite avec l'AIEA et bénéficie de l'assistance technique en la matière. Les méthodes utilisées sont :

- Mesure de l'oxygène 18 et du deutérium : Les teneurs en isotopes lourds de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H) sont mesurées par le spectromètre de masse Finnegan Delta après équilibration avec le dioxyde de carbone (CO_2) et l'hydrogène (H_2). La reproductibilité

des mesures est respectivement de 1‰ vs V-SMOW¹ pour le deutérium et de 0,1‰ vs V-SMOW pour l'oxygène-18 ;

- Datation par le tritium : Le tritium a été mesuré par scintillation liquide après enrichissement électrolytique. Les concentrations sont exprimées en Unité Tritium (1 atome de tritium pour 1018 atomes d'H₂) ;
- Datation par le carbone 14 : Le carbone 14 est déterminé par scintillation liquide (LSC) après avoir converti l'échantillon en benzène. Les résultats sont exprimés en Pourcentage de Carbone Moderne (PCM) Les teneurs en carbone 13 sont mesurées par spectrométrie de masse. Les résultats sont donnés en ‰ par rapport au V-PDB² à ± 0.1‰.

ETUDE DE CAS

A titre d'illustration, deux cas d'étude isotopique sont présentés ci-après. Elle traite de deux contextes différents : le cas de la dorsale calcaire qui se situe dans une zone bien arrosée au Nord du pays, et le cas du bassin Laayoune Dakhla au Sud dans une région désertique.

Cas du bassin de la Dorsale calcaire

La région du Rif, conçu comme un des châteaux d'eau du Maroc, abrite un système karstique complexe dans les formations calcaires du secondaire. Dans un souci de protection des sources et d'amélioration de la gestion de l'eau potable dans les régions du Rif, une étude préliminaire, lancée par l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL) en 2004 (Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires, 2004), basée sur les techniques isotopiques, a été menée au niveau de la région et avait pour objectif d'apporter des informations sur le fonctionnement des systèmes karstiques.

Un suivi régulier des sources (Tableau 1), d'avril 2005 jusqu'à avril 2006, a été assuré par l'ABHL et le CNESTEN. Il est à signaler que l'étude est en cours et les premiers résultats obtenus ont consisté en un calcul des altitudes de recharge des sources et une datation des eaux par le tritium.

Calcul des altitudes de recharge des sources suivies

Le gradient en oxygène 18 a été calculé à partir de l'oxygène 18 des précipitations collectées au niveau des stations hydrologiques présentées dans le Tableau 2, par la corrélation de l'altitude des précipitations Z (m) et de leurs taux en ¹⁸O. Il en ressort ainsi l'équation suivante :

$$\delta O18 = -0,0027 \times Z - 4,25 \quad (1)$$

soit un gradient altitudinal de l'ordre de -0,27‰-4,25 par 100 m.

¹ V-SMOW : Les résultats sont exprimés en notation conventionnelle δ en ‰ par rapport Vienna-Standard Mean Ocean Water

² V-PDB : Les résultats sont exprimés en notation conventionnelle δ en ‰ par rapport Vienna-PeeDee Belemnite (Rostre de Belemnite de la formation Pee Dee en Caroline du Nord, USA)

Tableau 1. Sources étudiées du Bassin du Loukkos

Source	Localisation	Utilisation
Samsa	3 km au Nord-Ouest de Tetouan	AEP* du village de Samsa
Ras El Ma	Chefchaouen	AEP de Chefchaouen
Ben Karrich	12 km de Tetouan	AEP du village Ben Karich
Zerka	8 km au Sud-Est de Tetouan	Irrigation
Torreta	3 km au Sud-Est de Tetouan	AEP des douars avoisinants et irrigation
Cherafate	60 km de Tetouan	AEP de douar cherafate

*AEP : Alimentation en Eau Potable

Tableau 2. Stations hydrologiques choisies pour les mesures isotopiques des précipitations

Station	X (km)	Y (m)	Z (m)	¹⁸ O moyen (‰ vs V-SMOW)
Barrage Nakhla	499 100	538 070	210	-5,12
Barrage Smir	503 000	566 700	10	-4,41
A. Ayacha	455 200	523 500	35	-5,29
B. Khatabi	644 150	499 650	115	-5,82
B. 09-avril	460 500	547 950	48	-5,38
B.O.El Makhazine	460 050	482 150	60	-4,63
B.Joumouaa	598 768	481 975	996	-7,50
Afghal	563 450	507 450	40	-5,73

A partir de ce gradient altitudinal, les altitudes estimées de l'aire de recharge des sources suivies sont représentées dans le Tableau 3. L'altitude d'émergence de la source correspond à l'altitude où la source apparaît à l'air libre, alors que l'altitude de recharge est l'altitude où s'infiltre l'eau qui donnera naissance à cette source suite à un parcours court ou long.

L'importance de ce gradient d'altitude vient du fait qu'il reste valable dans le temps, tant qu'il n'y a pas de changement climatique notable et qu'il est utilisable pour toute la région. Ceci a permis d'approcher l'altitude de recharge des sources de la région

et par conséquent d'identifier et de prévoir les sources de pollution et les risques de contamination.

Tableau 3. Altitude estimée de l'aire de recharge des sources suivies

Source	Altitude d'émergence Z (m)	^{18}O moyen (‰ vs V-SMOW)	Altitude de recharge estimée Z1(m)
Samsa	100	-5,56	467
Ras El Ma	690	-7,00	1000
Torreta	200	-5,49	441
Zerka	180	-5,85	574
Yarghist	340	-6,26	726
Cherafate	960	-7,38	1141
Ben Karrich	210	-5,94	607
Ansar Oued Lille	355	-5,53	456

Datation des eaux par le tritium

A défaut d'une mesure de tritium dans les précipitations au niveau de la région, l'étude a porté sur une interprétation qualitative des teneurs en tritium en se basant sur le Tableau 4 (Clark et Fritz, 1997).

D'après l'analyse des valeurs de tritium d'une trentaine d'échantillons, qui étaient comprises entre 2 et 7 UT, il en ressort que la gamme d'âge de l'eau du Rif peut être située entre 5 et 10 ans. La corrélation de plusieurs données hydrochimiques et hydrologiques sur les sources et des mesures régulières du tritium des sources et des précipitations dans le futur seront utiles pour approcher le type de circulation (tel que de type piston ou de modèle de mélange) au niveau de chaque source et par conséquent d'estimer le taux de renouvellement de l'eau (Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires, 2004).

Cas du bassin de Laayoune Dakhla

Situé au Sud du Maroc, c'est un des bassins les plus importants du Maroc, avec une superficie de 110 000 km². L'absence des ressources en eau superficielles et la rareté des nappes phréatiques au niveau de ce bassin ont incité les gestionnaires de l'eau à axer leur effort sur les eaux souterraines.

Tableau 4. Interprétation qualitative des teneurs en tritium (Clark et Fritz, 1997)

Teneur (UT)	Interprétation Qualitative
< 0,8	Recharge avant 1952
0,8 à 2	Mélange entre des eaux anciennes et actuelles
2 à 8	Eau actuelle (âge < 5 à 10 ans)
10 à 20	Résidu à la bombe
> 20	Recharge entre 1960 et 1970

La nappe du crétacé inférieur, s'étendant sur toute la longueur du bassin, constitue un réservoir important au niveau de ce bassin avec la même superficie. Le recours aux applications des techniques isotopiques a été effectué pour répondre aux inconnues suivantes :

- Datation des eaux au niveau du bassin sédimentaire de Laayoune Dakhla ;
- Taux de recharge des nappes existantes ;
- Interactions probables entre les aquifères du crétacé inférieur et du paléocène, notamment au Sud du bassin ;
- Temps de résidence des eaux.

Plus d'une trentaine d'échantillons, réalisés principalement au niveau du crétacé inférieur et au niveau du paléocène, ont fait l'objet d'analyses en éléments stables (^{18}O et ^2H) et radioactifs (^3H et ^{14}C) (Tableau 5).

Les valeurs obtenues en éléments stables ^{18}O montrent que la quasi-totalité des points captant les aquifères du crétacé et du paléocène sont de l'ordre de -8 à -9‰ vs V-SMOW, indiquant que la recharge s'est effectuée à des altitudes élevées ou sous des conditions climatiques plus froide qu'actuellement ; introduisant ainsi des eaux anciennes, excepté au niveau des affleurements du crétacé inférieur, où les valeurs sont de l'ordre de -4‰ vs V-SMOW. Les eaux sont exemptes de tritium et les activités en ^{14}C sont très faibles, n'excédant pas 2% PCM, sauf au niveau du champ captant Fom El Oued, de la région de Dakhla et du puits Bir Anzarane, captant les affleurements du crétacé inférieur. L'absence de tritium dans les eaux indique un âge d'eau d'au moins 50 ans et les activités en carbone moderne très faible traduisent des âges très anciens de l'ordre de milliers d'années.

Les mêmes caractéristiques ont pu être octroyées à la nappe paléocène. Cependant, il n'est pas possible de cerner les liens et les taux de mélange probable entre les aquifères du crétacé et du paléocène à ce stade de l'étude.

Tableau 5. Résultats des analyses isotopiques au niveau du bassin de Laayoune-Dakhla

Echantillon	^{18}O (‰ vs V-SMOW)	^2H	^{13}C (‰V-PDB)	^{14}C (PCM)	^3H (UT)
LA01	-5,51	-61,32	-6,03	55,7	$0 \pm 0,13$
LA02	-8,09	-58,76	-8,83	1,6	$0 \pm 0,13$
LA04	-8,78	-64,10	-8,70	0,5	$0 \pm 0,13$
LA05	-8,63	-62,55			$0 \pm 0,13$
LA06	-8,93	-63,55			$0 \pm 0,13$
LA07	-8,55	-63,05	-9,81	0,5	$0 \pm 0,12$
SM02	-8,78	-63,90	-9,11	0,8	$0 \pm 0,13$
SM04	-8,77	-65,00			$0 \pm 0,13$
SM05	-8,76	-65,56			$0 \pm 0,13$
BO01	-8,23	-58,13	-12,10	0,8	$0 \pm 0,13$
BO04	-7,61	-51,70	-8,36	63,8	$0 \pm 0,13$
BO04BIS	-6,71	-45,05			
BO05	-8,57	-63,60	-11,76	2	$0 \pm 0,13$
BO06	-8,32	-60,90			$0 \pm 0,12$
BO07	-8,70	-63,25	-10,33	0,9	
BO08	-7,76	-58,50			
BC01	-7,31	-57,64			
BC02	-8,82	-60,10	-13,84	1,2	
DA01	-8,32	-63,22	-10,45	0,8	$0 \pm 0,12$
DA02	-8,26	-63,31	-9,69	1,9	$0 \pm 0,13$
DA03	-8,37	-62,23	-12,95	0,7	$0 \pm 0,12$
DA04	-8,39	-62,67	-8,55	0,8	$0 \pm 0,12$
DA05	-8,42	-63,13	-7,73	0,6	$0 \pm 0,12$
DA06	-8,48	-62,36	-9,13	0,6	$0 \pm 0,12$
DA07	-8,65	-60,65	-17,40	0,3	$0 \pm 0,12$
DA08	-8,27	-63,00	-10,76	0,4	$0 \pm 0,12$
DA09	-8,43	-62,25			$0 \pm 0,12$
DA10	-8,59	-62,65			$0 \pm 0,12$
DA11	-6,96	-51,50	-10,74		$0 \pm 0,12$
DA12	-7,73	-58,25	-7,23	30,8	$0 \pm 0,12$
DA13	-8,40	-62,55	-6,54	49,9	$0 \pm 0,12$
DA14	-8,63	-62,75			$0 \pm 0,12$
DA15	-8,66	-62,85			$0 \pm 0,12$

La corrélation des éléments ci-dessus indique que la nappe du crétacé inférieur serait une nappe fossile, dont la recharge remonte à plusieurs milliers d'années et qui pourrait correspondre à des conditions climatiques plus humides et plus froides qu'actuellement. Cependant, il existe un rajeunissement sensible au niveau des eaux du bassin de Dakhla, au niveau des forages Oum Dreiga (DA013) et Bir Anzarane (DA012), révélateur d'une recharge actuelle sans effet notable sur les réserves préexistantes.

CONCLUSION

Les études isotopiques menées dans le Nord du Maroc au niveau de la dorsale calcaire et au Sud au niveau du bassin du Sahara confirment la répartition spatiale des ressources en eau au Maroc. Ces ressources, constituant des réserves importantes au Nord, se trouvent cependant menacées par la pollution et les aléas climatiques. Au Sud, les réserves en eau sont non renouvelables.

Les techniques isotopiques restent un moyen précieux de connaissance, d'information et d'aide à la décision et surtout un moyen efficace pour répondre aux indéterminations spécifiques de chaque région.

Toutefois, la protection des ressources en eau au Maroc et leur préservation pour les générations futures nécessitent des stratégies de gestion appropriées à chaque contexte. La mise en œuvre de la loi 10/95 sur l'eau et son application rigoureuse s'avère primordiale. Une prise de conscience par les citoyens sur les facteurs menaçant les ressources en eau et leur sensibilisation permanente pour l'économie et la protection de l'eau ne peuvent être qu'en faveur du processus de protection et de préservation de leur première ressource vitale.

REFERENCES

Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL) et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (2004) Etude isotopique de la dorsale calcaire du Rif. Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL), Marché 11/2004.

Bouchaou L., Michelot J.L., Vengosh A., Hsissou Y., Qurtobi M., Gaye C.B., Bullen T.D. et Zuppi G.M. (2008) Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization and residence time of water in the Sous Massa aquifer, Southwest of Morocco. *J. Hydrol.*, 352, 267-287.

Clark I. et Fritz P. (1997) Environmental isotopes in Hydrogeology. Eds. Lewis Publishers, New York, 352 p.

Direction Régionale de l'hydraulique du Sahara (DRHS) et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) (2001) Etude de la datation des eaux souterraines du Bassin sédimentaire de Laayoune – Dakhla par la méthode des isotopes. Direction Régionale de l'hydraulique du Sahara (DRHS), Marché N°8/2001.

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE) et Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) (2003a) Analyses isotopiques (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C et ^{13}C) des eaux souterraines des bassins de Laayoune et d'Errachidia, Marché N°89/2003.

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) et Agence Internationale de l'Energie Nucléaire (AIEA) (1996) Utilisation des techniques isotopiques pour le développement et la gestion des ressources en eau en zone aride et semi aride. Projet RAF8/022 (1995-1999).

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) et Agence Internationale de l'Energie Nucléaire (AIEA) (2003b) Optimisation de la gestion des ressources en eau souterraine de la plaine de Tadla et de la Moulouya. Projet MOR8/008 et MOR8/009 (1999-2003).

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) et Agence Internationale de l'Energie Nucléaire (AIEA) (2004) Application des techniques isotopiques à l'évaluation et à la gestion des ressources en eau souterraine du Bassin d'Essaouira. Projet MOR8/011 (2003-2004).

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) et Agence Internationale de l'Energie Nucléaire (AIEA) (2006) Utilisation des techniques isotopiques pour l'étude de fonctionnement, de délimitation des zones d'alimentation et de protection des sources d'eau à fort débit au Maroc. Projet MOR8/012 (2005-2007).

Marah H., Qurtobi M., Zine N. et Zerouali A. (2007) Dating by tritium of water of multilayered aquifer of Tadla (Morocco). *Phys. Chem. News*, 33, 48-58.

Verhagen B.Th., Geyh M.A., Frolich K. et Wirth K. (1991) Isotope Hydrological Methods for the Quantitative Evaluation of Ground Water Resources in Arid and Semi-arid Areas. Development of a Methodology. Federal Ministry for Economic Cooperation, Federal Republic of Germany, ISBN 3-8039-0352-1, 164 p.

Zine N., Zerouali A., Krimissa M. et Bouabdallaoui Y. (2001) Origine de la salinité de la nappe alluviale de Guelta Zergua, Maroc. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers (SWICA) – Monitoring, Modeling, and Management, 23-25 avril 2001, Essaouira, Maroc.

Zine N., Zerouali A., Taleb M., Qurtobi M., Ibn Majah M., Marah H., Safsaf N., Gaye C.B., Aggarwal P., Krimissa M., Michelot J.L. (2003) Origin and residence times of the Groundwater in the multilayered aquifer of Tadla (Morocco). International Symposium on Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management, International Atomic Energy Agency (IAEA), 18-23 mai 2003, Vienne, Autriche, IAEA-CN-104/170.

LIENS UTILES

EN GENERAL...

UNESCO-Sciences Exactes et Naturelles

<http://www.unesco.org/science/>

Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat

<http://rabat.unesco.org/>

Chaires UNESCO / Réseaux UNITWIN

http://www.unesco.org/education/unitwin/TB_Chaires_21042009.pdf

Réseau Maghrébin des Experts en Environnement (Environnement-Maghreb)

<http://www.environnement-maghreb.net/>

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)

<http://www.oss-online.org/>

Rapport mondial sur le développement humain (HDR)

<http://hdr.undp.org/>

SUR L'EAU...

Réseau Maghrébin des Experts en Eau (RésEAU)

<http://www.reseau-maghreb.net/>

Programme Mondial pour l'Évaluation des Ressources en Eau (WWAP)

<http://www.unesco.org/water/wwap/>

Programme hydrologique international (PHI)

<http://www.unesco.org/water/ihp>

Centre international PHIHELP sur la législation, les politiques et les sciences relatives à l'eau

www.dundee.ac.uk/water

Institut UNESCO-IHE pour l'éducation relative à l'eau (IHE)

<http://www.unesco-ihe.org/>

Centre international sur les risques liés à l'eau et leur gestion (ICHARM)

<http://www.icharm.pwri.go.jp>

Centre regional européen d'écohydrologie

<http://www.erce.unesco.lodz.pl>

Centre régional sur la gestion des eaux urbaines (RCUWM)

<http://www.rcuwm.org.ir>

Centre régional de formation et d'étude des problèmes de l'eau en zones arides et semiarides (RCTWS)

<http://www.rctws.com>

Centre international de formation et de recherche sur l'érosion et la sédimentation (IRTCES)

<http://www.irtces.org/old/english/index.htm>

Commission océanographique intergouvernementale

<http://ioc.unesco.org/iocweb/index.php>

International Water Association

<http://www.iwahq.org>

Rapport sur le Développement Région MENA

<http://go.worldbank.org/WDPAMJ5290>

Sound of our water

<http://unesco.uiah.fi/water/>

Afin de satisfaire les engagements internationaux relatifs à l'eau, en particulier les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMDs), l'Organisation des Nations Unies (ONU) a ouvert, à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau, le 22 mars 2005, la seconde décennie internationale consacrée aux questions liées à l'eau : la Décennie internationale d'action « L'eau, source de vie » (2005-2015).

Dans le cadre de cette décennie et en tant qu'agence chef de file de la Décennie des Nations Unies pour l'Éducation au Développement Durable (2005-2014), l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) se consacre, avec son Programme Hydrologique International (PHI), à réduire au minimum les risques qui pèsent sur les systèmes hydriques, en tenant pleinement compte des exigences et interactions sociales.

Dans ce contexte, le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat réserve une attention particulière aux problèmes ayant trait à l'eau dans la région du Maghreb. Parmi ses actions, le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat a décidé de publier cet ouvrage, qui regroupe plusieurs articles de divers spécialistes de l'eau du Maghreb, l'objectif étant de présenter, au jour d'aujourd'hui, l'état des ressources en eau dans cette région. Pour cela, plusieurs domaines relatifs à l'eau ont dû être abordés : la gouvernance, l'état des eaux douces, l'agriculture, la qualité des eaux potables, les eaux usées et la recherche.

Cet ouvrage montre d'une part que l'eau est une valeur inestimable, car composant essentiel du développement socio-économique et de la réduction de la pauvreté, indispensables pour atteindre le développement durable et les OMDs, et d'autre part que la croissance démographique, le niveau de vie amélioré et les activités anthropiques au Maghreb exercent d'importantes pressions sur les ressources en eau. Ainsi, l'eau doit être correctement gérée et son utilisation contrôlée. Un autre aspect de cet ouvrage porte sur la recherche, moteur indispensable d'innovations technologiques qui permettront de répondre aux pressions que subissent les ressources en eau au Maghreb.

Par ses projets, le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat contribue ainsi aux OMDs, en particulier aux objectifs 1 (« Réduire l'extrême pauvreté et la faim »), 4 (« Réduire la moratalité infantile ») et 7 (« Préserver l'environnement »).

ISBN : 978-9954-8068-3-0



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization

Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture

منظمة الأمم المتحدة
للتربية والعلم والثقافة

Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat
35, Av. du 16 novembre
B.P. 1777, Rabat, Maroc
rabat@unesco.org
<http://rabat.unesco.org/>