



HAL
open science

L'eau et la société dans un milieu rural aride. De l'analyse vers la modélisation d'un système fragile et complexe

Karima Askassay, Kawtar Najib

► **To cite this version:**

Karima Askassay, Kawtar Najib. L'eau et la société dans un milieu rural aride. De l'analyse vers la modélisation d'un système fragile et complexe. 13ème Congrès Mondial de l'eau, Sep 2008, Montpellier, France. pp.16. <hal-00767189>

HAL Id: hal-00767189

<https://hal.science/hal-00767189v1>

Submitted on 30 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

L'eau et la société dans un milieu rural aride De l'analyse vers la modélisation d'un système fragile et complexe Le cas du bassin versant du Souss au Sud-ouest du Maroc

Karima ASKASSAY, Kawtar NAJIB

Doctorantes au laboratoire THéMA UMR 6049 CNRS - Université de Franche-Comté

Résumé

Quelles que soient les causes du déficit hydrique dans le bassin versant du Souss, l'objectif visant la gestion des ressources en eau reste le même : préserver ces ressources pour la satisfaction des besoins à long terme. Ce bassin, qui s'étend sur une superficie de 16 200 km², est encadré par des reliefs volumineux ; le Haut-Atlas au Nord, l'Anti-Atlas au Sud, la jonction de ces deux chaînes précitées à l'Est et l'océan Atlantique à l'Ouest. Dans cet espace contrasté, l'aridité du climat et la sécheresse auxquelles s'ajoute l'irrégularité des précipitations, expliquent le recours fluctuant des usagers dans l'exploitation de la nappe phréatique. En effet, la demande en eau augmente surtout dans le monde rural. Ainsi, la concurrence entre les différents types de consommateurs d'eau et les gestionnaires concernés risque de perturber l'équilibre territorial de cette région. Il s'agit d'une relation complexe où interfèrent des facteurs naturels, économiques et sociales et divers acteurs, aménageurs et gestionnaires de l'eau aux intérêts parfois contradictoires. Dans ce contexte, nous proposons une analyse de la situation observée qui doit servir d'assise à une modélisation plus ambitieuse. Ainsi, on s'appuiera sur une formalisation systémique des interactions entre ressources naturelles et jeux d'acteurs. L'élaboration d'un éventuel outil d'aide à la décision permettra de présenter différents scénarios d'évolution et de simuler leurs conséquences sur la disponibilité et la gestion de la ressource en eau.

Mots clés : Ressource en eau, climat aride, nappe phréatique, gestion, acteurs, dynamique de système, modèle.

Abstract

Whatever the causes of the hydrological deficit in the catchment area of Souss, the objective of water management remains the same : to preserve these resources so as to satisfy long-term needs. This basin, which covers an area of 16,200 km², is framed by mountains: the High-Atlas in the North, the Anti-Atlas in the South, the meeting point of these two chains in the East and the Atlantic Ocean to the West. In this space of contrasts, the aridity of the climate and its dryness, combined with irregular precipitation, explain the variability in ground water use. Indeed, the demand for water is increasing especially in rural areas. Thus, competition between the various types of water consumers and water managers are likely to disturb the territorial balance of the area. There is a complex relationship where natural, economic and social factors interact and diverse actors, developers and water managers sometimes have contradictory interests. In this context, we propose an analysis of the situation that should serve as the basis for more ambitious modelling. So, we base our analysis on a systematic formalization of the interactions between natural resources and actor choices. The elaboration of an adequate tool to aid decision-making will allow us to present various trend scenarios and to simulate their consequences for the availability and the management of water resources.

Key-words : Water resources, arid climate, groundwater, management, actors, dynamic system, model.

Introduction

Aujourd'hui plus que par le passé, la question de l'eau se pose avec acuité au Maroc. Cette inquiétude est due à la fois à la succession des années de sécheresse dans la majorité des régions du pays et aux comportements non maîtrisés des usagers. Afin de réfléchir à une gestion raisonnée des ressources en eau et d'assurer un cadre de vie de qualité, le Maroc a fourni depuis les années soixante dix d'importants efforts de mobilisation de son potentiel hydraulique pour faire face à ses changements socio-économiques. Cependant, cette mobilisation insuffisante face à une demande croissante et à une offre très limitée, nécessite une vision large de la gestion de l'eau intégrant tous les acteurs et les aménageurs concernés.

Dans le cadre de cet article, nous proposons de traiter ces aspects à partir du bassin versant du Souss, situé au Sud-Ouest du Maroc. Le choix de ce milieu s'explique par le fait qu'il existe de sérieuses menaces hydriques pesant sur son équilibre territorial que se soit dans le milieu urbain ou rural. En effet, notre objectif est d'associer cet espace géographiquement fragile à tous ses composants naturels, économiques et sociaux afin d'évaluer le système eau et ses interactions.

C'est dans cet esprit que nous avons décidé de réaliser un modèle de simulation de la nappe phréatique du Souss. L'idée est de construire un modèle montrant à l'évolution enregistrée de la nappe du Souss depuis l'année 2003 (date correspondant aux dernières données accessibles). Ce modèle permettra de représenter le déséquilibre dynamique de la nappe qui subit plusieurs flux, climatiques et anthropiques, n'assurant pas son alimentation totale. Le pompage intensif est un des principaux flux qui aggravent cette situation. L'approche que nous proposons de développer, ici, tend à déterminer les différentes variables qui participent au système dynamique de la nappe du Souss et à comprendre les diverses relations entre ces variables. Notre modèle s'inscrit dans une nouvelle gestion des ressources en eau de la nappe du Souss. Cette étude consiste en un essai de réorientation des comportements des différents consommateurs de l'eau notamment l'agriculture qui épuise la nappe. Il s'agit donc d'adapter un nouveau système d'exploitation mieux maîtrisé et plus économe dans l'optique de reconstruire une nouvelle nappe du Souss.

1. L'eau dans le bassin versant du Souss : un système naturel fragile

1. 1. Un cadre climatique aride contraignant

De nombreux auteurs parmi des géographes, géologues, hydrologues, ont observé que le bassin versant du Souss est le plus clairement individualisé du Maroc (Dijon, 1969). Cette qualification attribuée au bassin du Souss est due à ses dimensions caractéristiques naturelles par rapport aux autres bassins hydrauliques du Maroc. La région du Souss s'étend sur une superficie de 16 200 km² et se situe aux environs des latitudes 30 et 31° Nord et des longitudes 10 et 8°. Elle est limitée au Nord et au Sud respectivement par les montagnes du Haut et de l'Anti-Atlas, à l'Est par *Jbel* (montagne) Siroua qui constitue la jonction des deux chaînes précitées et à l'Ouest par l'Océan Atlantique (figure 1).

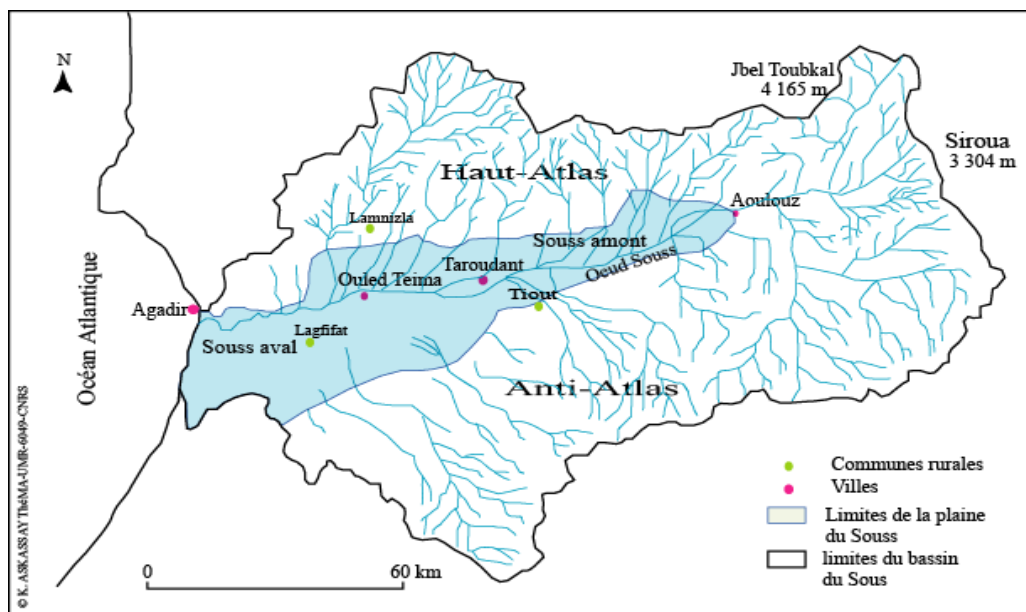


Figure 1 : Limites géographiques du bassin versant du Souss

De plus, le climat, dans le bassin du Souss, est complexe. Il est influencé par trois facteurs naturels principaux : la côte océanique, le cadre montagneux et le Sahara. De façon générale, le climat du bassin est aride et l'intensité de l'aridité augmente au fur et à mesure qu'on se déplace d'Ouest en Est.

La figure 2 donne un premier aperçu chronologique des périodes successives de la sécheresse depuis les premières décennies du vingtième siècle. Ces données choisies ont été obtenues par l'étude de l'Agence des Bassins Hydraulique du Souss-Massa (ABH/S-M, 2005). Nous remarquons que, de 1921 à 2001, il existe trois périodes différentes : une période de précipitations importantes qui a duré environ 16 ans entre 1955 et 1971, une période équilibrée entre 1941 et 1954 et une période composée de quatre sous-périodes de sécheresse dont les trois dernières sont successives. Ces dernières ont un impact considérable sur les réserves en eaux aussi bien de surface que souterraines.

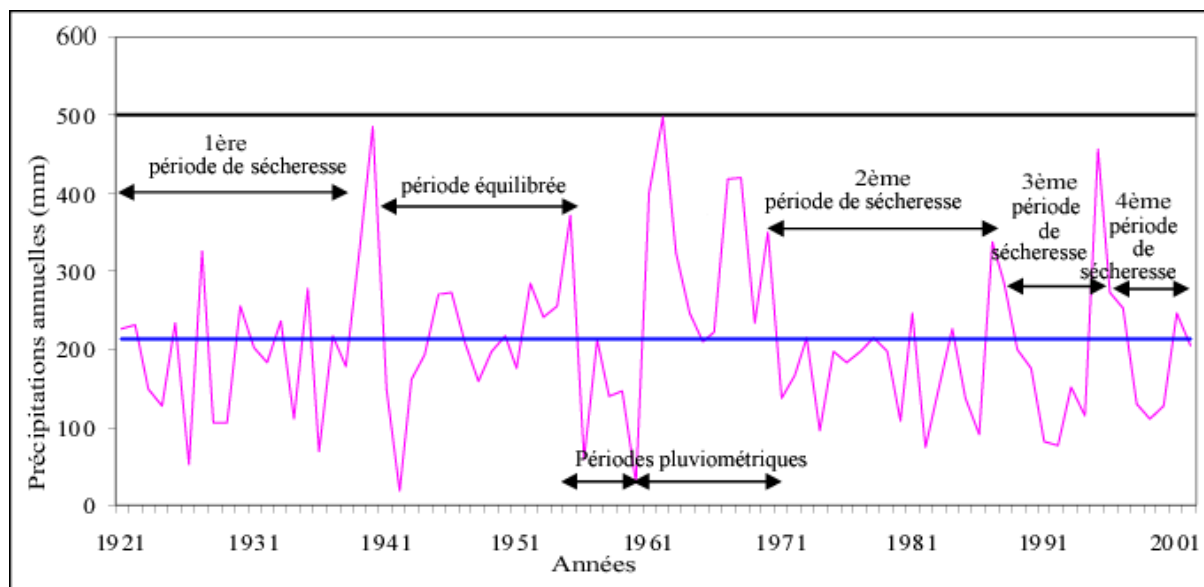


Figure 2 : Précipitations annuelles de la station du Taroudant entre 1921 et 2001

De part son contexte naturel et l'aridité de son climat, le bassin versant du Souss est un espace vulnérable et difficile à gérer. La sécheresse qui sévit périodiquement dans cette région, ajoutés à l'irrégularité habituelle des pluies et des cours d'eau, expliquent le recours à l'exploitation de la nappe phréatique. Le climat est caractérisé par une forte variabilité dans le temps et l'espace des précipitations et par une intensité de l'évaporation. Ceci a conduit à l'apparition des phénomènes érosifs, à la surexploitation des systèmes écologiques naturellement fragiles (par exemple, l'Arganier) et à la dégradation des potentiels de production.

1.2. Une baisse piézométrique hydraulique continue de la nappe phréatique du Souss

L'évolution de la situation hydrologique du bassin du Souss résulte de l'interaction des différents paramètres physiques, géologiques et climatiques. La détermination des ressources en eau et leurs disponibilités potentielles sont étroitement liées à cette évolution. Le tarissement et la diminution du débit des sources sont la conséquence directe de l'abaissement de la nappe phréatique du Souss. Cette nappe connaît depuis quelques années des fluctuations du niveau piézométrique. Elle est très sensible au caractère climatique et à la surexploitation humaine. En effet, ces ressources n'arrivent pas à couvrir l'ensemble des besoins actuels des différents usagers du bassin. Devant cette situation, les agriculteurs n'hésitent pas à augmenter la profondeur de leur puits pour atteindre la nappe. L'appel d'urgence d'une gestion rationnelle des ressources en eau a pris une ampleur remarquable dans la région du Souss.

La nappe du Souss est la plus importante du Sud du pays. Son exploitation se fait aujourd'hui en régime déficitaire à cause d'une progression vertigineuse du développement agricole du secteur moderne privé, ce qui a conduit à une croissance importante des prélèvements par pompage (EL Mahdad, 2003). La baisse piézométrique continue de la nappe est la conséquence d'une surexploitation des puits et des forages mais aussi du déficit d'alimentation généré par la succession des années de sécheresse depuis 1970. Ce phénomène s'est traduit par l'assèchement progressif des résurgences, des sources et des *khattaras* (galerie de captage souterraine permettant le drainage des eaux et leur distribution à l'air libre en aval, se traduisant en surface par un chapelet de puits d'évent).

L'analyse du bilan actualisé de l'année 2003, montre qu'un déficit annuel de près de 228 Mm³ est enregistré dans la nappe du Souss (tableau 1). Les sorties sont en effet estimées à 551 Mm³ alors que la moyenne annuelle de la recharge est de 323 Mm³. Le tableau montre un déficit hydrique continu de 27 ans entre 1976 et 2003 dans la nappe du Souss, excepté en 1996 où les valeurs des entrées sont supérieures aux sorties grâce à une quantité importante des précipitations.

	Bassin du Souss	1976	1979	1985	1994	1996	1998	2003
Recharge de la nappe (en Mm³)	Infiltration de la pluie et du ruissellement dispersé	66,2	62,8	57,8	31,3	105,0	29,7	39,6
	Infiltration dans les lits des oueds	88,7	208,5	50,2	17,3	490,0	31,0	199,3
	Retour des eaux d'irrigation superficielles	14,3	13,7	8,0	10,2	80,0	17,4	15,8
	Drainage ascendant à partir des nappes profondes	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	Apport par abouchement des nappes	48,0	48,8	43,7	46,2	192,0	174,9	65,0
	Total d'entrées	220	337	163	108	870	256	323
Sorties de la nappe (en Mm³)	Écoulement souterrain vers la mer	22,0	19,9	15,0	19,0	142,0	16,4	3,8
	Drainage par le Souss aval	8,2	60,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Prélèvement net d'irrigation du secteur traditionnel	116,0	73,7	11,1	65,4	33,8	67,6	62
	Prélèvement net d'irrigation par pompage des secteurs publics et privés modernes	250,6	278,1	365,4	375,0	431,0	488,0	454,6
	Sorties par drains et sources	8,1	9,8	16,8	18,6	30,0	41,9	2,3
	Prélèvement d'eau potable et industrielle							28,7
	Total de sorties	405	442	408	478	637	614	551
Bilan	-185	-105	-245	-370	233	-358	-228	

Tableau 1 : Le bilan de la nappe phréatique du Souss

D'après les cartes ci-après, la baisse globale de la nappe de 1968 à 1993 varie entre 10 m pour Taroudant et 40 m pour Sebt El Guerdane (figure 3). Cette baisse est la conséquence d'un déficit moyen annuel du bilan de la nappe de l'ordre de 300 Mm³, déficit qui peut atteindre des valeurs plus élevées pendant les périodes de sécheresse. Le volume d'eau prélevé dans la nappe dépasse largement sa capacité de renouvellement, ce qui a entraîné le tarissement des khattaras et des *séguias* (canaux d'irrigation creusés dans la terre) traditionnelles le long du lit de l'oued Souss depuis plusieurs années.

Il convient de signaler que les zones d'Ouled Teima et de Sebt El Guerdane connaissent une activité agricole intensive depuis les années 1970. Ceci a affecté les ressources en eau souterraine et a suscité l'intervention de l'Etat pour la réalisation du projet hydro-agricole de l'Issen dans le cadre du premier plan de développement hydro-agricole du Souss. Cependant, la nappe reste largement surexploitée du fait de la succession des années de sécheresse et de l'accroissement des superficies irriguées.

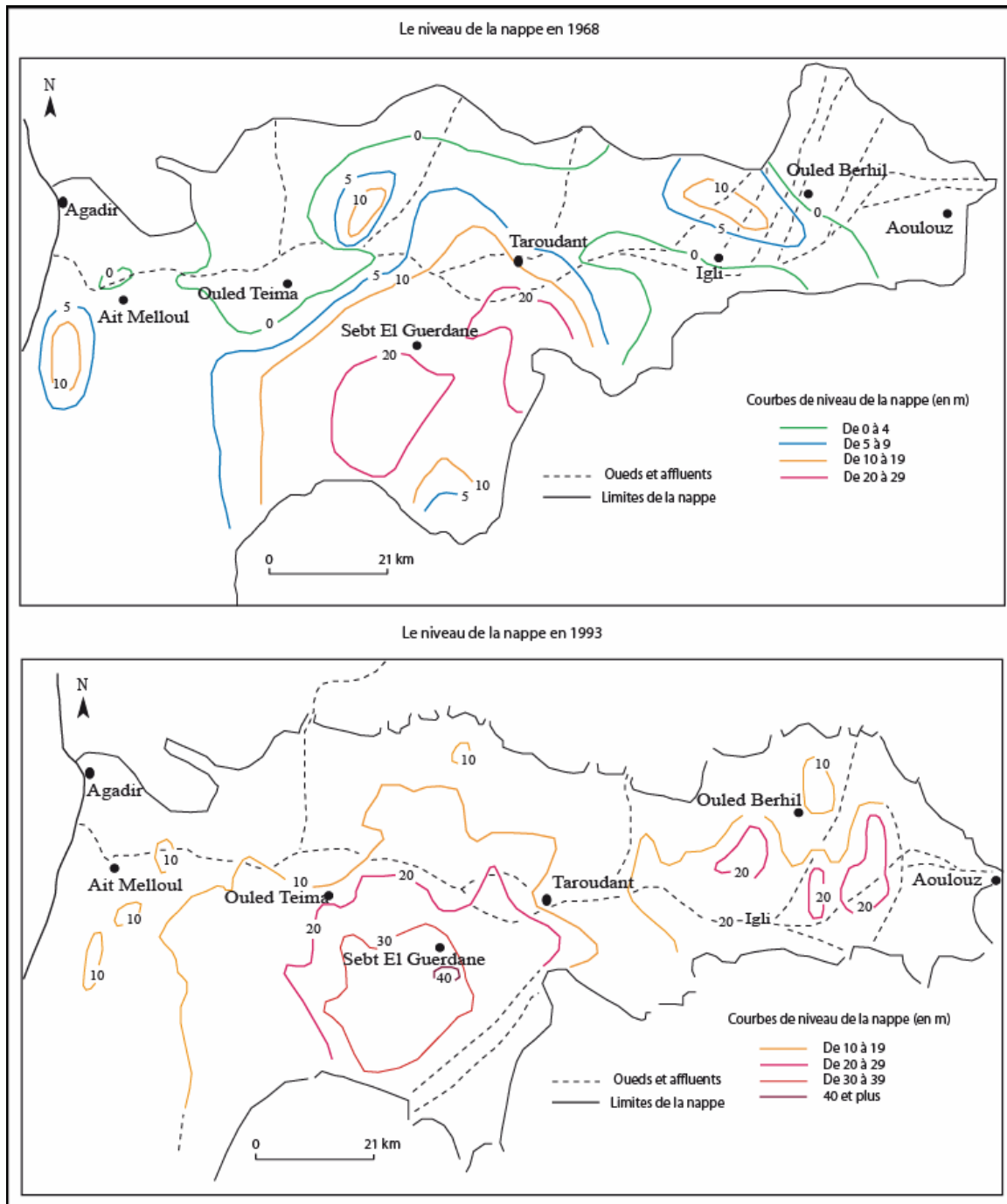


Figure 3 : Le niveau de la nappe phréatique du Souss en 1968 et en 1993

Dans le bassin du Souss, les grands ouvrages hydrauliques réalisés permettent de mobiliser les ressources en eau de surface pour l'irrigation, la fourniture de l'eau potable des agglomérations du Grand Agadir et la recharge artificielle de la nappe du Souss.

Comme nous pouvons le constater d'après le tableau 2, le bassin du Souss contient cinq barrages aux capacités et utilisations diverses. Un nouveau barrage nommé barrage Moulay Abdellah est en cours de réalisation. Ce barrage d'une capacité de 110 Mm³ sera destiné à renforcer l'alimentation en eau potable de la ville d'Agadir et à l'irrigation de petit et moyen hydraulique du bassin du Tamri (Direction Provinciale de l'Équipement de Taroudant, 2005). Malgré les efforts déployés par l'État pour développer les aménagements hydrauliques de la région, d'autres facteurs naturels, techniques et financiers bloquent ces opérations de développement hydrique de la région.

Barrages	Capacité (Mm ³)	Volume régularisé (Mm ³)	Année de mise en service	Observations
Abdelmoumen	214	80	1986	Le volume régularisé est de 80 Mm ³ dont 70 Mm ³ pour l'irrigation du périmètre d'Issen et 10 Mm ³ pour l'Alimentation en Eau Potable de la ville d'Agadir
Dkhila	0,7	-	1986	Ce barrage est destiné à l'irrigation et à l'Alimentation en Eau Potable du grand Agadir
Aoulouz	108	108	1991	Volume emmagasiné est restitué pour la recharge de la nappe et l'irrigation des secteurs traditionnels
Imi El Kheng	11	5	1993	Ce barrage est destiné à l'irrigation et la recharge de la nappe
Mokhtar Soussi	52	50	2002	45 Mm ³ seront réservés à l'irrigation d'appoint de la zone agrumicole El Guerdane

Tableau 2 : Les aménagements hydrauliques existants dans le bassin du Souss

En général, l'ensemble de la problématique de l'eau et notamment dans la bassin du Souss concerne toutes les composantes naturelles du bassin qui rendent difficile sa gestion. La figure ci-dessous montre ces composantes : le cadre physique, l'aridité du climat et l'irrégularité des pluies influencent directement les ressources en eau souterraines et superficielles, d'où la nécessité d'une planification durable.

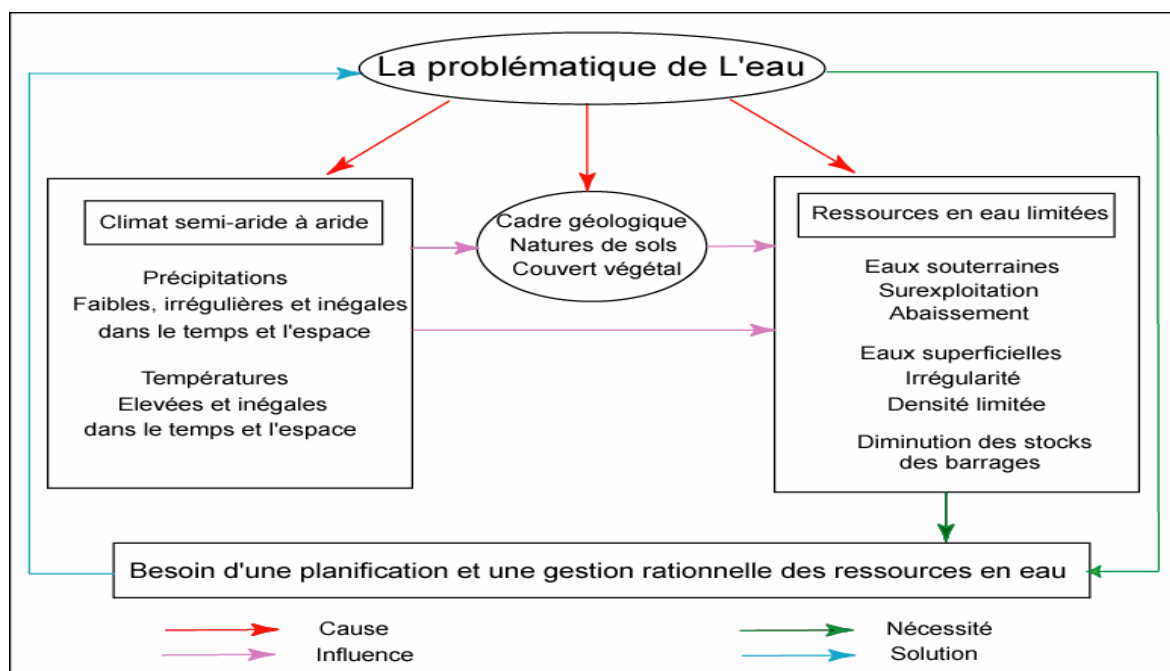


Figure 4 : La problématique de l'eau dans le système naturel du bassin du Souss

2. Un système global complexe et fragile

2.1. Une composition complexe

Le système global de l'eau du bassin du Souss fonctionne sous des pressions naturelles, économiques et humaines. La multiplication de ces influences nécessite une gestion intégrée qui doit permettre simultanément d'assurer la conservation et la pérennité de la ressource en eau, d'augmenter la productivité agricole de l'eau, de répondre aux demandes croissantes des autres usages et de préserver les besoins des écosystèmes afin de contribuer à la protection de l'environnement. Le fonctionnement global d'un système d'eau, sa sensibilité et ses performances à différents forçages nécessitent inévitablement l'appui d'un jeu, d'une organisation, d'une gestion raisonnée et méthodique d'acteurs primordiaux. L'approche géographique a permis d'élaborer avec les partenaires et les usagers des outils de gestion adaptés qui répondent aux questions sociales posées sur le bassin du Souss, bassin d'une envergure remarquables au Maroc.

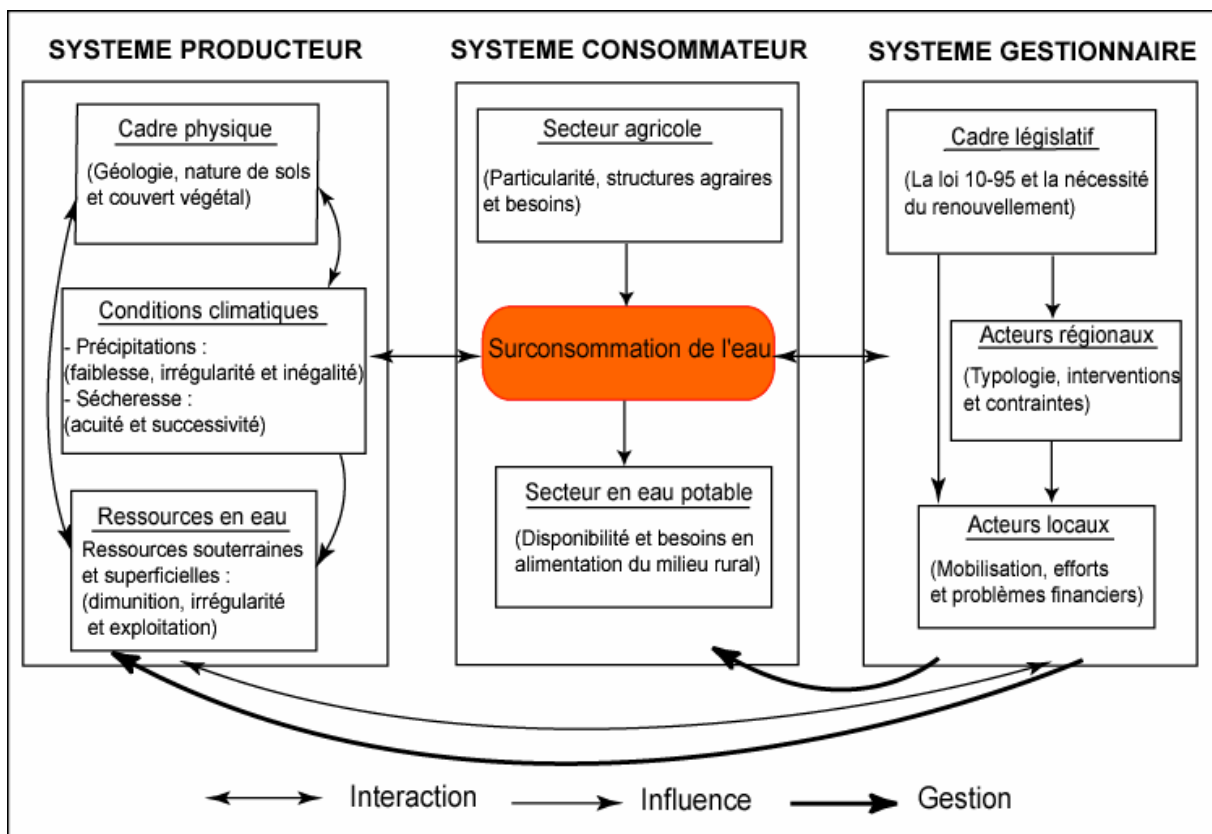


Figure 5 : Le système global conceptuel de la ressource en eau dans le bassin du Souss

Le système global de l'eau dans le bassin versant du Souss est composé de trois sous-systèmes : le système producteur constituant l'ensemble des composants naturels du bassin (figure 5), le système consommateur comprenant les différents types d'usages et d'usagers de l'eau et enfin, le système gestionnaire identifiant les acteurs et leurs interventions sur le milieu. La relation entre ces systèmes reste étroite. Le système global dégage un risque naturel lié à un risque social qu'il est possible de prévenir.

- La composante physique du système producteur regroupe les éléments naturels stables (géologie, nature des sols...) qui modèlent le bassin. Sa composante climatique comprend un ensemble de facteurs variables (précipitations et sécheresse) influençant directement sur la ressource en eau. Enfin, la composante des ressources en eau place la nappe phréatique comme l'axe le plus sensible dans ce système du fait de son statut de moteur principal du fonctionnement du système « eau » dans le Souss.

- L'intégration du système consommateur de l'eau est également un élément important dans le fonctionnement du système global. Dans ce bassin, le territoire est approprié principalement par l'agriculture qui représente une activité pratiquée de façon intensive et un élément sensible dans la problématique de l'eau dans le Souss. Les potentialités agricoles régionales sont fortement dépendantes des ressources en eau et des conditions climatiques et pédologiques locales. Ces conditions naturelles ont déterminé l'activité agricole de la région. De plus, les agriculteurs ont longtemps participé à la modification de ce système. La sécheresse ne peut pas être

tenue pour seul responsable de ce constat car elle pose la question de la répartition de l'usage de l'eau dans le Souss avec aujourd'hui, plus de 90 % d'eau mobilisée pour l'irrigation moderne. La surexploitation des eaux souterraines pour les besoins de l'irrigation moderne privée renvoie à la réflexion des différents choix des modes de développement agricole existants. La pérennité de cette activité agricole intensive à partir de l'irrigation de la nappe est toutefois remise en cause en raison de la baisse continue de la disponibilité de la ressource en eau. La consommation abusive de l'eau par le secteur agricole a causé une diminution du niveau de la nappe. Ainsi, apparaît le problème majeur de l'alimentation en eau des populations rurales de la plaine où il se trouve certains puits avec un creusement dépassant les 100 m de profondeur. Dans notre recherche, nous avons exclu les autres activités consommatrices d'eau (l'usage industriel et touristique), activités considérées comme secondaires après l'agriculture et l'alimentation en eau potable.

- Le système gestionnaire est en charge de gérer au mieux les besoins continuels des ressources en eau avec l'aide des principaux acteurs et des principales législations.

2.2. Un jeu d'acteurs limité

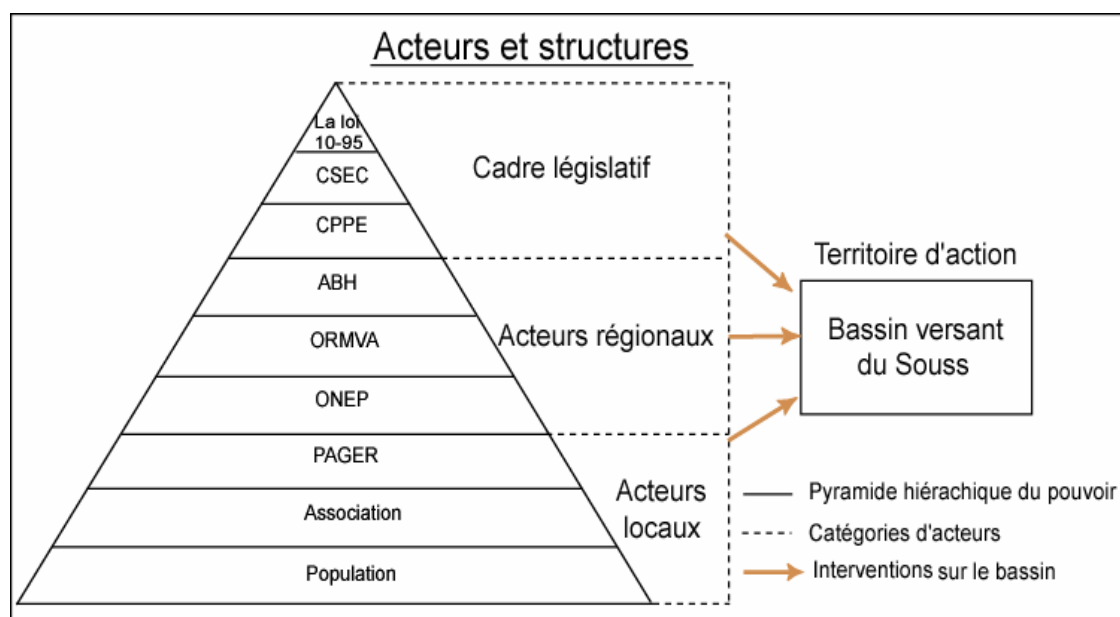


Figure 6 : Identification des catégories d'acteurs de la gestion de l'eau dans le bassin du Souss

La figure ci-dessus montre trois catégories d'acteurs classés par ordre de pouvoir et identifiables dans le système de gestion de l'eau dans le bassin du Souss. Le cadre législatif positionne en tête de pyramide la loi 10-95 car elle représente le premier acteur de la gestion de l'eau suivi par le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat et les Commissions Préfectorales et Provinciales de l'Eau. Les acteurs régionaux (l'Agence du Bassin Hydraulique de Souss-Massa, l'Office Régional de la mise en Valeur Agricole et l'Office National de l'Eau Potable) sont classés en deuxième place du fait de leurs importantes interventions sur la zone d'action, administrant toute action pouvant améliorer l'utilisation de la ressource en eau. Enfin, les acteurs locaux (le Programme National d'Approvisionnement Groupé en Eau du monde Rural, les Associations, la Population) c'est-à-dire des groupes individuels de population et des structures participant à la gestion de l'eau, sont en contact direct avec les ressources en eau. L'intégration d'une population consommatrice d'eau est très importante dans les programmes de gestion participative. La recherche d'une application positive et efficace reste une question fondamentale. L'avenir des ressources en eau de la région repose sur la volonté des usagers à appliquer des techniques économisatrices et à adapter leurs comportements afin d'assurer la réussite de toute intervention entreprise par les acteurs et de garantir la durabilité de ces ressources indispensables à la vie économique de la région.

En général, la gestion globale des ressources en eau d'un bassin versant se heurte fréquemment à la multiplicité des enjeux et des intérêts des différents acteurs. Pour ne pas bloquer le processus de gestion proposée, il est important qu'un dialogue s'établisse entre les principaux intervenants. L'idée d'intérêt commun peut être le moyen de pérenniser les contacts (Petrella, 2004).

3. Construction du modèle de la nappe phréatique du Souss

Pour réaliser le modèle de la nappe phréatique du Souss, nous nous sommes inspirés du modèle Var fondé par Guigo M. et Le Berre M. en 1989. Le modèle Var décrit l'impact des aménagements sur le comportement de la nappe phréatique d'une plaine alluviale. Le choix de se baser sur ce modèle n'est pas anodin. Ces deux modèles partagent des points communs, ils sont soumis à des forces qui perturbent leur système dynamique même si le modèle Var est en état d'équilibre et le modèle de la nappe du Souss est en état de déséquilibre. La figure 7 montre que le niveau de la nappe phréatique du Souss dépend de son remplissage et de son vidage en quantité d'eau au cours du temps. Ici, les flux de sorties sont supérieurs aux flux d'entrées, ce qui crée un état de déséquilibre car la soustraction des flux d'entrées avec les flux de sorties montre un résultat négatif.

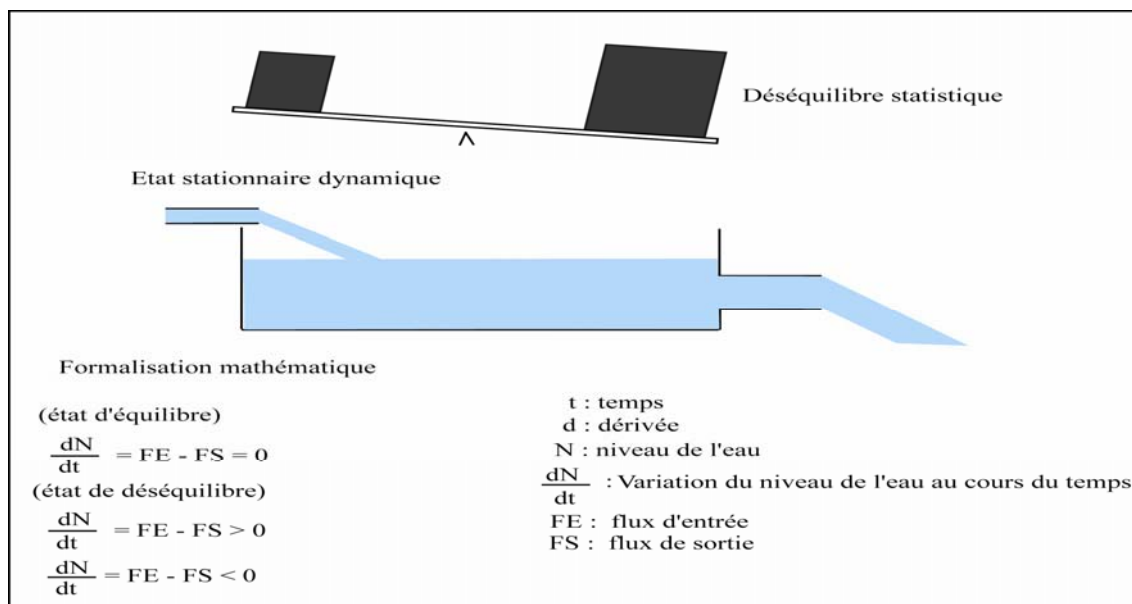


Figure 7 : La notion de déséquilibre dynamique de la nappe phréatique du Souss

Afin de construire le modèle de la nappe du Souss (Askassay, 2007), la première étape consiste à identifier et à définir globalement les composants du système et leurs interactions. Il s'agit d'une première conceptualisation du système qui va définir un corps d'hypothèses sur le fonctionnement de l'objet d'étude en tant que système. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Les variations de la nappe phréatique du Souss sont un indicateur de sa dynamique en tant que système hydrologique.
- La quantité d'eau de la nappe dépend des deux flux d'alimentation et de sortie.

Nos hypothèses se basent sur l'étude de la nappe phréatique du Souss. Le niveau de la nappe dépend pour son alimentation des infiltrations naturelles variant en fonction des précipitations, du retour des eaux d'irrigation superficielle, du drainage ascendant à partir des nappes profondes, de l'apport par abouchement des nappes et enfin de l'apport de recharge du barrage Aoulouz (tableau 1). Pour son évacuation, les sorties reposent sur les prélèvements d'irrigation traditionnelle et moderne, l'écoulement souterrain vers la mer, le prélèvement d'eau potable et industrielle et enfin les drains et les sources. Les variations du niveau de la nappe phréatique sont donc très fortement liées à la dynamique de ces composants. Autrement dit, la nappe phréatique fonctionne comme un réservoir qui se vide et se remplit.

3.1. Elaboration du diagramme stock-flux de la nappe du Souss

La réalisation d'un diagramme stock-flux (figure 8) consiste à transcrire les composants du système liés par des relations causales en termes de variables d'état, de flux et de fonctions tabulées selon la codification établie par la méthode de (Forrester, 1984) (figure 9). Dans ce sens, nous allons identifier les différents composants permettant la construction du diagramme stock-flux.

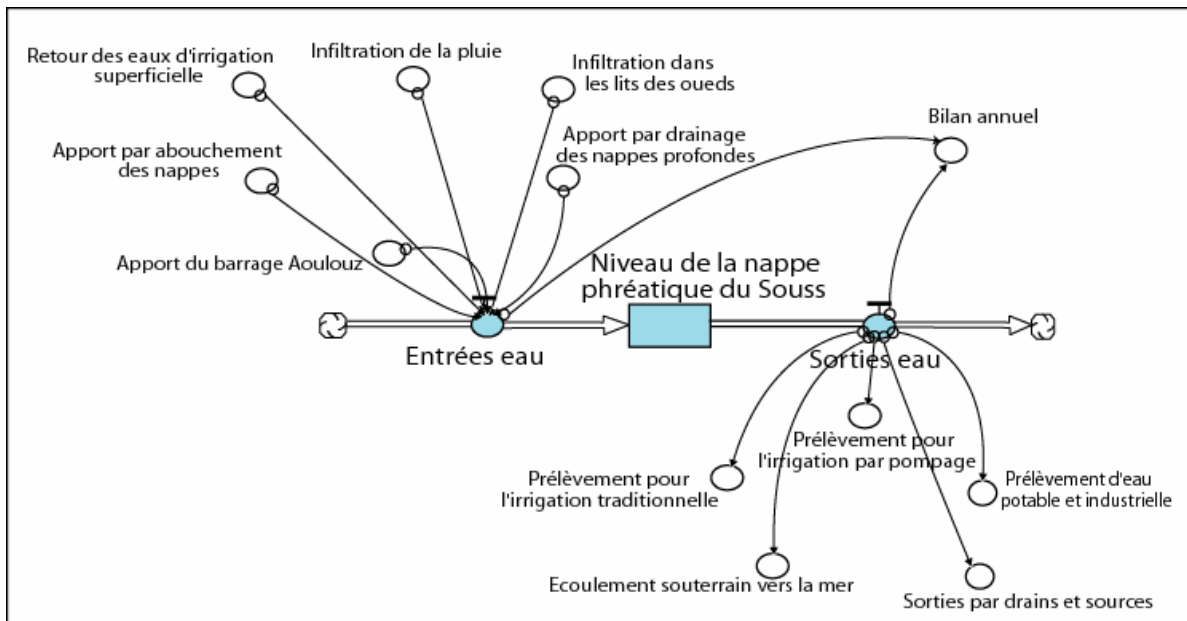


Figure 8 : Diagramme stock-flux du modèle de la nappe du Souss

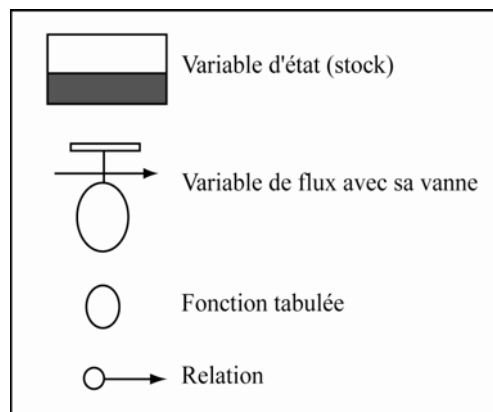


Figure 9 : Les principaux éléments de la réalisation d'un diagramme stock-flux avec le logiciel Stella

Pour la variable d'état

La nappe phréatique a été choisie comme stock car elle est assimilée à un réservoir qui se remplit et se vide. Dans le cadre de notre modèle de simulation, un stock est une variable quantitative. Il convient donc d'exprimer la capacité en eau dans l'unité de mesure la mieux appropriée c'est-à-dire le Millions mètres cubes, noté Mm³. Selon le principe de l'équation différentielle, les valeurs de cette variable d'état dépendent :

- des flux d'eau qui alimentent la variable d'état,
- des flux d'eau qui vident la nappe.

Niveau de la nappe du Souss (t) = flux d'entrée d'eau + (- flux de sortie d'eau) * dt

Pour les variables de flux

Elles sont nécessairement exprimées dans la même unité de mesure que la variable d'état puisqu'elles agissent entre elles. Elles sont définies de la façon suivante : les entrées représentent une variation de la nappe due à la quantité d'eau entrante et les sorties correspondent à la variation de la nappe due à la quantité d'eau sortante.

Pour les flux d'entrées d'eau de la nappe du Souss, nous avons utilisé l'équation suivante :

Entrées de la nappe (en Mm³) = infiltration de la pluie + infiltration dans les lits des oueds + retour des eaux d'irrigation superficielles + drainage ascendante à partir des nappes profondes + apport par abouchement des nappes + apport du barrage Aoulouz (le seul barrage qui a fonctionné en 2003).

Pour les flux de sorties de la nappe, nous avons appliqué l'équation suivante :

Sorties de la nappe (en Mm³) = écoulement souterrain vers la mer + prélèvement net d'irrigation du secteur traditionnel + prélèvement net d'irrigation par pompage du secteur moderne + sorties par drains et sources + prélèvement d'eau potable et industrielle.

Ces deux variables de flux sont donc fonctions de nombreux paramètres qui sont introduits dans notre modèle sous forme de tables ou de fonctions tabulées.

Tables ou fonctions tabulées

Les fonctions tabulées s'expriment aussi en Mm³ et varient dans le temps. On distingue deux types de fonctions tabulées :

Les Entrées : (qui ne varient pas de 2003 à 2025 dans le scénario 1 et 2 pour laisser aux gestionnaires un temps de réaction)

L'infiltration de la pluie et du ruissellement dispersé = 39,6 Mm³

L'infiltration dans les lits des oueds = 199,3 Mm³

Le retour des eaux d'irrigation superficielles = 15,8 Mm³

Le drainage ascendant à partir des nappes profondes = 3,0 Mm³

L'apport par abouchement des nappes = 65,0 Mm³

L'apport du barrage Aoulouz = 39,4 Mm³

(Données collectées auprès de l'Agence des Bassins Hydrauliques du Souss-Massa en 2006)

(Nous remarquons, d'après ces valeurs, que la nappe est alimentée en grande partie par l'infiltration des pluies dans les lits des oueds)

Les sorties : (qui varient de 2003 à 2025 dans les trois scénarios)

Le prélèvement net d'irrigation du secteur traditionnel = 62 Mm³

Le prélèvement net d'irrigation par pompage des secteurs publics et privés modernes = 454,6 Mm³

L'écoulement souterrain vers la mer = 3,8 Mm³

Les sorties par drains et sources = 2,3 Mm³

Les prélèvements d'eau potable et industrielle = 28,7 Mm³

(Le prélèvement net d'irrigation par pompage constitue le premier consommateur qui est le responsable principal de l'épuisement de la nappe du Souss)

Le bilan annuel : qui représente la balance entre les entrées et les sorties annuelles.

Afin de prévoir le fonctionnement de la nappe du Souss dans le temps plusieurs scénarios peuvent être réalisés. D'un point de vue méthodologique, il serait intéressant de réaliser un ensemble de scénarios afin de repérer des configurations conduisant à l'amélioration du comportement de la nappe phréatique. Chaque scénario doit donc faire l'objet d'une réflexion approfondie sur les objectifs que l'on souhaite atteindre avant de lancer la simulation. Trois scénarios de simulation, traduisant trois situations différentes, sont réalisés pour étudier la dynamique de la nappe phréatique du Souss.

3.2. Elaboration de trois scénarios de simulation

- **Scénario 1 : une prolongation de la même situation hydrique existante**

Le premier scénario (figure 10) a pour objectif de simuler la situation prévisionnelle de la nappe du Souss de 2003 à 2025. Ce scénario gardera les mêmes valeurs pour les flux d'entrées de la nappe. Ce choix résulte du fait de la succession des années de sécheresse qui a maintenu ces valeurs. De plus, nous supposons que les prélèvements continueront à se dérouler de la même façon jusqu'en 2025.

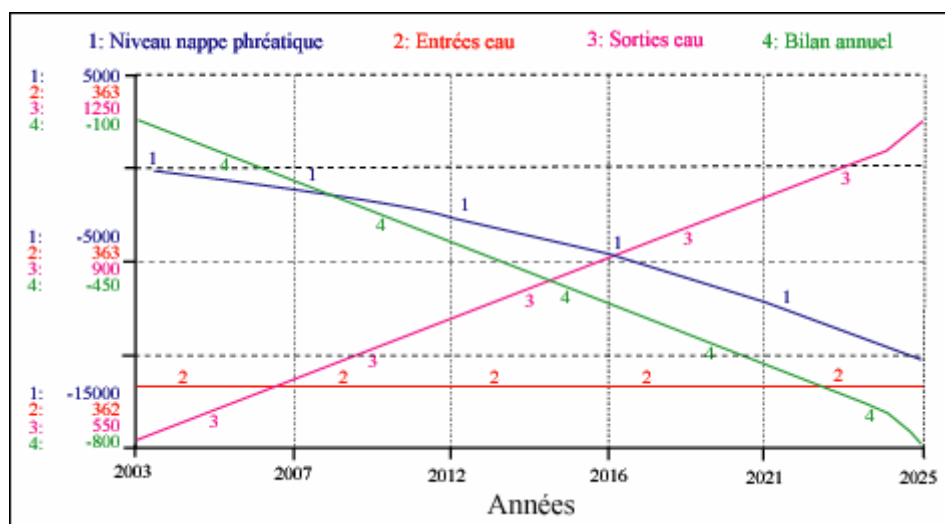


Figure 10 : Simulation prévisionnelle de la nappe du Souss, simulation 1

Le résultat obtenu est déficitaire et déclenche un risque très lourd d'épuisement total de la nappe du fait de l'augmentation des sorties. Ainsi, la nappe sera dans l'incapacité de répondre aux besoins en eau (agriculture, population locale...) à partir de l'année 2017 car le graphique ci-dessus montre que les sorties commenceront à être supérieures au niveau de la nappe.

- **Scénario 2 : vers une diminution du pompage de la nappe phréatique**

Actuellement, la nappe du Souss est en état de déséquilibre hydraulique. Pour essayer d'atteindre un état d'équilibre, nous allons proposer un deuxième scénario. Le scénario 2 considère l'agriculture comme un pivot ou un axe de changement total de la nappe car dans le Souss, les besoins en eau pour l'agriculture représentent 95 % des prélèvements nets de la nappe. Le principal consommateur est donc l'exploitation agricole. Nous constatons, d'après le tableau ci-dessous, que l'irrigation par pompage représente plus de 75 % des prélèvements nets de la nappe. En effet, le fort rabattement de la nappe est dû à un pompage incontrôlé et mal maîtrisé. Son évolution dans le temps par rapport au prélèvement d'irrigation traditionnelle influence négativement l'équilibre naturel de la nappe.

Années	Prélèvement net d'irrigation traditionnelle (en Mm ³)	Pourcentage	Prélèvement net d'irrigation par pompage (en Mm ³)	Pourcentage	Total (en Mm ³)
1976	116	12	250,6	88	366,6
1979	73,7	25	278,1	75	351,8
1985	11,1	3	365,4	97	376,5
1994	65,4	15	375	85	440,5
1996	33,8	7	431	93	464,8
1998	67,6	12	488	88	555,6
2003	62	12	454,6	88	516,6

Tableau 3 : Evolution des prélèvements nets de la nappe du Souss

Pour réaliser une deuxième simulation, les données récoltées sont rares et discontinues dans le temps. En effet, nous disposons seulement de sept années s'étalant de 1976 à 2003. Comme les entrées d'eau ne changent pas (toujours un volume de 362,16 Mm³), nous nous intéressons donc aux valeurs des flux de sortie. Ces derniers évoluent fortement dans le temps et sont dépendants les uns des autres c'est-à-dire que si on modifie un flux alors l'ensemble des sorties se transforme. Nous avons choisi d'analyser l'évolution des prélèvements nets d'irrigation par pompage, un grand consommateur d'eau, pour ce deuxième scénario. Nous allons diminuer à partir de 2004 le coût de pompage de 5 % tous les deux ans, soit une baisse de 27,57 Mm³. Le choix de ce pourcentage est tout à fait envisageable si les agriculteurs adaptent des techniques agricoles économisatrices d'eau. La réduction traduit une modération de la valeur dans le temps. Ce gain de volume d'eau dans la nappe va permettre d'alimenter les besoins croissants en eau potable et industrielle de la population sur une base de 2 % tous les deux ans, soit 1,936 Mm³.

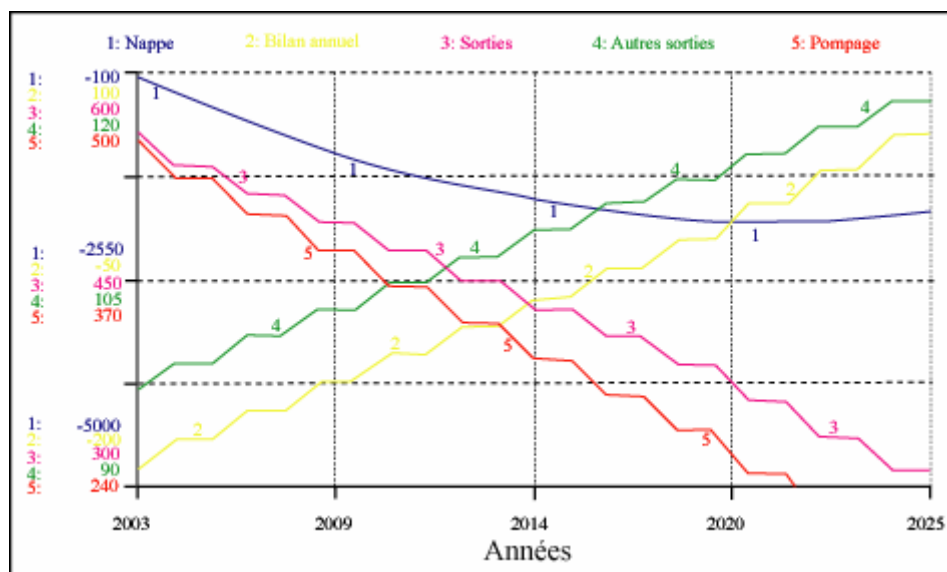


Figure 11 : Modèle de la nappe du Souss avec un changement de la valeur du pompage, simulation 2

Cette diminution du pompage a permis de rétablir un état d'équilibre du niveau de la nappe car la figure ci-dessus montre qu'à partir de 2020 la courbe de la nappe change de direction. En effet, en 2019, la nappe sera en faible déficit hydrique et en 2020, la nappe connaîtra une réalimentation positive d'un volume d'eau de 3,01 Mm³. La réduction du pompage influence positivement le fonctionnement de la nappe du Souss qui connaîtra une amélioration dans l'avenir.

En résumé, cette deuxième simulation propose une solution satisfaisante. Le système doit développer un comportement régulier et stable. Ainsi, le niveau de l'eau de la nappe phréatique peut se régénérer et retrouver un état d'équilibre avec l'aide d'une prise de conscience des acteurs concernés et une éventuelle amélioration des conditions climatiques.

- **Scénario 3 : vers une amélioration climatique**

Le scénario 3 consiste à montrer l'influence directe des conditions climatiques sur l'alimentation en eau de la nappe phréatique du Souss. A l'inverse des deux premiers scénarios, celui-ci garde les mêmes valeurs pour les flux d'entrées de 2003 à 2010. A partir de cette date, nous prévoyons une augmentation des pluies précipitées dans le bassin jusqu'en 2025 ; ce qui va alimenter directement la nappe phréatique. Ici, nous augmenterons les entrées de la nappe de 50 % tous les ans (soit 181,08 Mm³/an). Le choix de ce pourcentage provient d'observations des spécialistes de l'eau qui ont approuvé une diminution des précipitations dans les pays du Maghreb de 50 % pendant seulement un demi siècle. Ce constat n'est pas sans intérêt, il tend à prouver que la nappe phréatique du Souss fonctionne comme un système dépendant du changement climatique. Pour réaliser ce scénario, nous avons dû effectuer une modification sur le modèle de base (figure 8). Le flux d'entrée est désormais une fonction graphique qui dépend du temps et non de l'ensemble des paramètres. L'ensemble des données a donc été agrégé. En ce qui concerne les flux de sorties, nous augmenterons ces valeurs de 2 % par an de 2003 à 2025 (soit 11,03 Mm³/an).

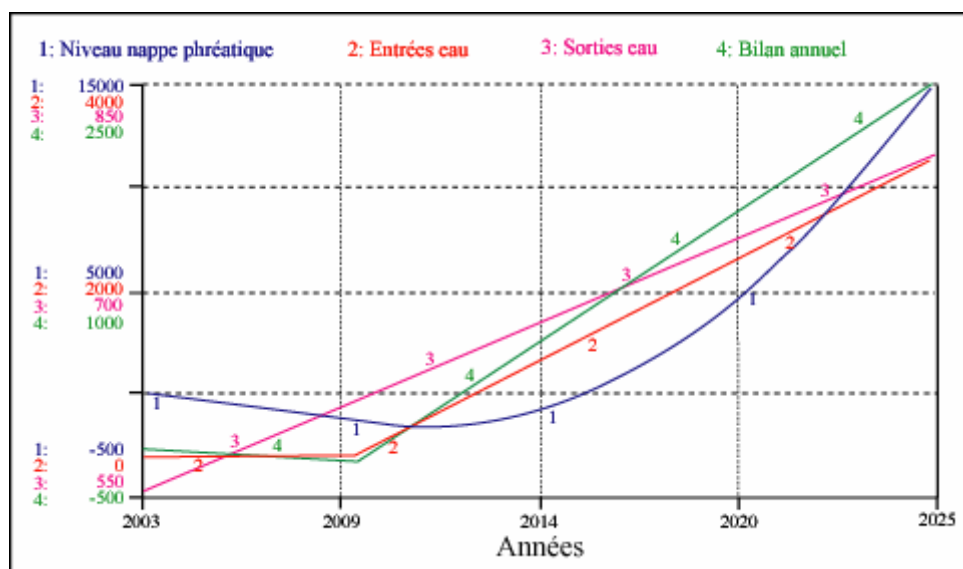


Figure 12 : L'effet de changements climatiques sur l'alimentation de la nappe du Souss, simulation 3

La figure ci-dessus présente les résultats obtenus lors de cette importante augmentation des pluies. Ici, les courbes sont toutes en évolution croissante. Ainsi, nous constatons que la courbe bleue qui définit la nappe phréatique reprend un rythme positif à partir de 2016. Les résultats acquis sont importants car la nappe se recharge de nouveau et permettra une évolution de son niveau d'eau. En effet, la variation de la valeur des entrées de la nappe en eau grâce aux pluies, entraîne un changement positif dans son système dynamique. Ceci indique que les conditions climatiques interviennent profondément dans l'alimentation de la nappe. Ce dernier scénario renforce donc la loi des effets climatiques sur l'alimentation et le tarissement en eau de la nappe.

Dans le cas de notre modèle de simulation de la nappe phréatique du Souss, il faut adapter le comportement des usagers aux différents changements et conditions climatiques qui ont un impact fondamental dans le fonctionnement des systèmes naturels dynamiques. Aucun acteur, consommateur, ou aménageur et aucune action participant à ce dysfonctionnement ne peuvent être exclus (Askassay, 2006). La recherche de solutions efficaces par rapport à la dégradation et à l'aggravation de l'état actuel des ressources en eau devient extrêmement urgente.

Conclusion

Le contexte multidimensionnel de l'eau (socio-spatial, politique et culturel) permet de positionner la ressource en eau comme un vecteur de jeux d'acteurs. L'eau dans le bassin du Souss ne fait pas seulement l'objet d'une représentation sociale ou de relations entre acteurs mais elle constitue aussi un réel enchevêtrement de dynamiques fonctionnant sur différentes échelles. De ce fait, l'eau permet d'intégrer la participation de divers acteurs nationaux, régionaux et locaux et de leurs logiques d'action dans des stratégies plus globales. Ainsi, l'objet « eau » dans le bassin versant du Souss devient constitutif de plusieurs systèmes qui participent à son identification :

- son système naturel, spécifié par ses caractéristiques physiques ;
- son système économique, dégageant les grands consommateurs d'eau ;
- son système social, matérialisé par la négociation des acteurs et par les normes de gestion des usagers.

Bibliographie

- Agence des Bassins Hydrauliques du Souss-Masa, (2005) : *Le renforcement de la recharge artificielle de la nappe du Souss-Massa*, Rapport de l'Agence des bassins hydrauliques du Souss-Masa, 9 p.
- Askassay K., (2006) : La gestion des ressources en eau dans le bassin versant de Souss, de l'analyse vers la modélisation d'un système fragile et complexe [en ligne], in *Actes du Colloque International Interactions Nature-Société : analyse et modèles*, UMR 6554 LETG, La Baule, 3-6 mai 2006, Article disponible sur : http://letg.univnantes.fr/COLLOQUE/pdf/PO_ASKASSAY.pdf
- Askassay K., (2007) : L'Eau et la Société dans un milieu Rural Aride, De l'Analyse vers la Modélisation d'un Système Fragile et Complexe, le cas du Bassin du Souss au Sud –ouest du Maroc, Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté, 318 p.
- Bouchaou L., El Mahdad H., Ouhajou L., Tazi H., (2005) : Politique de gestion des ressources en eau et équité hydraulique : cas des bassins du Souss et du Dra, in *Actes du Colloque International : Pauvreté hydraulique et crises sociales*, Agadir, 12-15 décembre 2005, 13 p.
- Dijon R., (1969) : *Etude Hydrogéologique et inventaire des ressources en eau de la vallée du Souss. Notes et mémoire service géologique*, Maroc: Editions du service géologique du Maroc, Rabat, 291 p.
- Direction de l'Aménagement du Territoire du Souss-Massa-Draâ, (2002) : *Débat national sur l'aménagement du territoire*, Rapport de la Direction de l'Aménagement du Territoire du Souss-Massa-Draâ, 50 p.
- Direction Provinciale de l'Equipement de Taroudant, (2005) : *Etude du Schéma directeur d'alimentation en eau potable des populations rurales de la province de Taroudant*, Rapport de la Direction Provinciale de l'Equipement de Taroudant, 29 p.
- El Mahdad H., (2003) : *L'eau et l'Homme dans le bassin du Souss, Contribution à l'étude d'un hydrosystème marocain*, Agadir : Publication du Centre Ibn Toumart, 496 p.
- Forrester J-W., (1984) : *Principes des Systèmes*, Lyon, Presses Universitaires de Lyon, 404 p.
- Groupe de Recherche Scientifique du Sud (dir.), (1996) : *L'Espace rural dans le Souss, Héritage et changements*, Agadir : Ed. Sud contact, 209 p.
- Guermond Y., (1984) : *Analyse de système en géographie*, Lyon : Presses Universitaires de Lyon, 321 p.
- Guigo M., Le Berre M., (1989) : *Ecrire un modèle de simulation systémique : impact des aménagements sur le comportement de la nappe phréatique d'une plaine alluviale : essai pédagogique*, Grenoble : Université Joseph Fourier, 102 p.

- Hnaka A., (1987) : *Taroudant et Ouled Teima. Bipôle urbain du Souss*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Tours, 422 p.
- Lamy M., (1995) : *L'eau de la Nature et des hommes*, Talence : Presses universitaires de Bordeaux, 230 p.
- Le Moigne J.-L., (1999) : *La modélisation des systèmes complexes*, Paris : Dunod, 178 p.
- Malouki A., (1994) : *L'agriculture irriguée dans le Souss-Amont (Maroc)*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Montpellier III, 385 p.
- Office National de l'Eau Potable du Taroudant, (1999) : *Etude d'Alimentation en eau potable des populations rurales de la province de Taroudant. Inventaire et localisation des SAEP existants*, Rapport de l'Office National de l'Eau Potable du Taroudant, 80 p.
- Office Régional de la Mise en Valeur Agricole du Souss-Massa, (2006) : *Stratégie de préservation des ressources en eau souterraines dans le bassin du Souss-Massa. Plan d'action 2005-2020*, Rapport de l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole du Souss-Massa, Maroc, 59 p.
- Ouhajou L., (1996) *Espace hydraulique et société au Maroc, cas des systèmes d'irrigation dans la vallée du Dra*, [Agadir] : Faculté des lettres et des sciences humaines, série thèses et mémoires n°7, 343 p.
- Petrella R., (2004) : *L'eau, bien commun public : alternatives à la « pétrolisation » de l'eau*, Tour de l'Aigues : Editions de l'Aube, 49 p.
- Provitolo D., (2007) : *Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique*, *Les Annales de géographie*, n° 653, pp. 23-40.
- Troin J.-F., (2002) : *Maroc : régions, pays, territoires*, Paris : Maisonneuve et Larose, 502 p.