

# UN MODELE D'EXPLORATION DES DYNAMIQUES RESSOURCE-USAGES POUR LA GESTION INTEGREE D'UNE NAPPE SUREXPLOITEE. APPLICATION A LA NAPPE DE KAIROUAN, TUNISIE

Feuillette S.\*, Garin P.\*\*, Le Goulven P.\*\*\*, Bousquet F.\*\*\*\*

\*I RD, Laboratoire d'Informatique Appliquée, 32 av Varagnat, 34090, Bondy

\*\* Cemagref, UR Irrigation BP 5095 361, rue JF Breton 34033 Montpellier cedex 1

\*\*\* IRD, Mission en Tunisie, BP434, 1004 Tunis El Menzah IV, Tunisie

\*\*\*\* Cirad Tera Ere, TA 60/15, 73 Avenue Jean-François Breton, 34398 Montpellier Cedex 5

## RESUME

L'objectif de ce papier est de montrer l'intérêt d'une modélisation multi-agents pour explorer la gestion des nappes surexploitées, par une maîtrise de la demande. L'étude se base sur le cas de la nappe de Kairouan, en Tunisie Centrale. Considérée comme nécessaire dans un contexte de déséquilibre offre/demande, lorsque le développement de l'offre atteint ses limites, la gestion de la demande peut être mise en œuvre grâce à plusieurs types d'outils, plus ou moins efficaces selon le contexte de l'intervention. La modélisation des interactions entre nappe et usages permet d'étudier les effets de ces interventions. Les Systèmes Multi-Agents, particulièrement adaptés à la représentation des interactions entre ressources et sociétés, nous ont permis de construire le modèle cognitif SINUSE (Simulations des Interactions entre Nappe et Usages de l'Eau) pour formaliser le système complexe constitué par l'ensemble nappe de Kairouan/usagers, explorer les liens entre ressource et usages à travers des simulations et étudier les tendances d'évolution du système sous diverses contraintes d'interventions.

## INTRODUCTION

L'évolution des prélèvements en eau dans toutes les sociétés montre les mêmes tendances jusqu'à un niveau avancé de développement économique : les effets de l'élévation du niveau de vie et de la population se conjuguent pour accroître les besoins en eau pour tous les usages (FAO, 1993).

La première réponse à cette pression sur les ressources a été, dans la plupart des pays, une politique d'équipement destinée à accroître l'offre utilisable. Cette politique a été particulièrement volontariste ces dernières décennies dans les pays semi-arides méditerranéens, caractérisés par des écoulements violents et intermittents, donc peu utilisables sans aménagement. Cette phase d'aménagement en voie d'achèvement, l'accroissement de l'eau disponible repose désormais d'une part sur le traitement des eaux non conventionnelles, ce qui peut résoudre des contraintes locales mais contribue rarement à une augmentation significative de l'offre à l'échelle nationale compte tenu de son coût élevé, et d'autre part sur l'approfondissement des forages, rendant exploitables les nappes les plus profondes. Cette stratégie atteint ses limites dans de nombreuses régions où les prélèvements, augmentant toujours, finissent par dépasser l'offre renouvelable annuellement, entraînant une baisse continue des aquifères. Comparant alors les stratégies de plusieurs pays semi-arides confrontés à ce risque de développement non durable<sup>1</sup>, Allan et Karshenas (1996) ont montré comment certains ont évité la catastrophe écologique annoncée, en instaurant une politique capable de maîtriser puis de réduire la demande en eau, essentiellement dans le secteur agricole. La Tunisie, comme d'autres pays méditerranéens, connaît déjà des déséquilibres locaux entre offre en eau et demande et affiche sa volonté de maîtriser la demande en eau (Horchani, 1995).

Nous commencerons par présenter succinctement les principales mesures des politiques de "gestion de la demande" et les contraintes de leur application dans le cas des nappes. Nous détaillerons particulièrement les enjeux de la gestion de la nappe de Kairouan en Tunisie, dont l'évolution est une bonne illustration des difficultés d'instauration d'une gestion durable reposant sur une maîtrise de la demande des différents usages.

Le passage d'une politique de l'offre à une gestion de la demande n'est pas un processus trivial. Si de nombreux pays hésitent à suivre cette voie, c'est en partie parce que les mesures préconisées ont un coût

---

<sup>1</sup> au sens où elle ne répond pas "aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins" (rapport Brundland 1998 sur le développement durable)

politique et social élevé (Turton, 1999). **Bien connaître les termes d'élaboration de la demande en relation avec les conditions d'accès à la ressource au niveau local relève donc d'un intérêt majeur pour les régions qui cherchent à identifier les modalités de gestion de la demande les plus acceptables économiquement et socialement.** Le modèle SINUSE (Simulation des Interaction entre Nappe et Usages de l'Eau), présenté dans un deuxième temps, a pour vocation d'être un outil d'analyse prospective et de dialogue entre des représentants de différentes parties prenantes de la gestion de l'eau d'une nappe comme celle de Kairouan.

## LA GESTION DE LA DEMANDE SUR LA NAPPE DE KAIROUAN

### Les instruments de gestion de la demande et leur applicabilité au cas des nappes

Les mesures permettant d'interférer avec le comportement des usagers – donc sur leur demande – sont de natures très variées et ont donné lieu à de nombreuses classifications. Celle qui suit s'inspire de Montginoul (1997) :

*Les interventions techniques* sont destinées à améliorer l'efficacité de l'eau pour un usage donné. En agriculture, le remplacement des techniques traditionnelles d'irrigation de surface par des équipements modernes et les conseils au pilotage de l'irrigation bénéficient de soutiens publics importants et d'un large consensus politique, mais il en résulte rarement une baisse de la demande agricole, car rien n'empêche les agriculteurs de valoriser ces économies d'eau par unité de surface en augmentant leur superficie irriguée. Ce risque d'expansion est très présent sur les nappes, où les superficies sont contraintes d'abord par le débit nécessaire par hectare, pour une capacité de pompage donné.

*Les réformes des droits d'accès et des réglementations* sur les usages répondent souvent à des situations de crise nécessitant une limitation rapide d'un usage. L'accès à l'eau de nappe est ainsi fréquemment soumis à autorisation et limitations (profondeur, débit maximum). Le manque d'implication des acteurs locaux dans le choix de ces mesures fragilise leur acceptabilité sociale et elles sont d'autant plus vite contournées que les moyens de contrôle de leur application sont souvent défaillants. Ce constat vaut particulièrement pour les nappes, caractérisées par une multitude de points de prélèvements disséminés sur un territoire aux frontières floues, une absence de consensus social sur le caractère de bien commun de la ressource en eau et une vision très partielle et locale des « préleveurs » sur le fonctionnement de l'aquifère.

Les principaux *instruments économiques* sont la tarification et les marchés de l'eau. L'attribution d'un prix pour l'eau, censé refléter sa rareté, est réputée orienter le comportement des usagers dans deux voies (1) donner la priorité aux activités qui valorisent le mieux l'eau (2) optimiser la quantité d'eau accordée à chaque activité. Cependant une maîtrise de la demande par ces outils implique :

- (I) une sensibilité de la demande au prix, c'est à dire que les usages consommant beaucoup d'eau mais la valorisant peu soient dominants (par exemple les cultures de céréales) ;
- (II) une diversité des usages possibles, afin que les usagers puissent s'orienter vers des cultures valorisant mieux l'eau, parce qu'elles en demandent peu (ex : irrigation d'appoint des cultures sèches), ou parce qu'elles génèrent des revenus importants (ex : cultures légumières) ;
- (III) que le bien à la base de la tarification ou du marché soit effectivement l'eau avec des caractéristiques quantitatives (volumes ou débits) contrôlables et non des éléments connexes (ex : la superficie irrigable, la durée de l'irrigation ou le droit de prélever sans limitation).

Si (I) et (II) ne sont pas respectés, les instruments économiques provoquent une simple réduction du revenu des usagers et une sélection de ceux qui ont les moyens de la supporter. Sans (III), le prix ne reflète pas la rareté relative de l'eau. Dans le cas des nappes, c'est surtout la troisième condition qui pose problème, faute de moyens de contrôle et surtout d'acceptabilité du contrôle, et d'un prix qui ne se réduise pas aux frais d'exhaure, généralement assumés directement par "l'utilisateur-préleveur". Des marchés de l'eau en fonctionnement sur des nappes ont déjà été observés (Palmer-Jones, 1997). Mais ils sont limités au réseau social du propriétaire du puits, la confiance mutuelle autorisant des échanges sur un bien caractérisé de manière peu formelle (Strosser, 1997) ; de plus le prix de l'eau correspond seulement au coût d'exhaure *et non à la valeur de la ressource pour la collectivité*. Ces "marchés" s'apparentent donc plutôt à un partage temporaire des points d'accès à l'eau.

Les *outils contractuels* consistent à formaliser l'engagement d'un individu (ou d'un groupe) vis à vis d'une structure qui a reçu mandat de gérer la ressource. Dans le contrat sont combinés en général les trois types d'instruments précédents. Le quota d'eau est à la base de nombreux contrats. Il correspond à la répartition de la pénurie d'eau à travers la définition de volumes maximaux accordés, assortis parfois de débit maximal et d'une tarification par pallier, pour couvrir simplement les coûts de gestion pour ceux qui respectent la dotation et dissuasive pour ceux qui la dépassent. Ces contrats négociés sont de plus en plus utilisés pour gérer les nappes en France (ex : nappe de Beauce). Leurs limites sont 1) de dépendre des rapports de force entre acteurs dans la négociation, 2) de ne pas inciter à des économies d'eau en deçà du quota alloué pour chaque usage. Ces outils sont également tributaires de l'acceptabilité sociale de tous les termes du contrat, y compris le contrôle et les pénalités, et nécessitent aussi des moyens de comptage appropriés.

Les nappes se prêtent donc difficilement à ces modalités de gestion de la demande, car historiquement leur utilisation s'est développée dans un contexte d'accès libre *de facto*. Les usagers contournent les réglementations que les pouvoirs publics n'ont pas fait respecter, et leur méconnaissance du fonctionnement complexe d'aquifères invisibles depuis la surface ne favorise pas l'émergence d'une conscience collective des caractères commun et fini de ce bien. *Or ce dernier point est essentiel à l'acceptabilité sociale des mesures de gestion de la demande.*

### Cas de la nappe de Kairouan

La nappe de Kairouan, qui constitue la ressource en eau souterraine la plus importante de Tunisie Centrale, subit un rabattement continu depuis une vingtaine d'années. L'abaissement se fait ressentir sur l'ensemble de la zone et s'est accru ces dernières années (cf fig. 4). Ce rabattement semble peu inquiétant étant donnée l'importance de la réserve<sup>2</sup> (Mansouri, 1996) ; cependant l'écart entre apports et prélèvements se creuse, engendrant des risques d'ordres quantitatif, notamment une **augmentation non négligeable des coûts d'accès** à la ressource et une mise en **péril de la viabilité des ouvrages d'accès existant** (y compris les forages publics et privés) ; et qualitatif (un **risque de contamination des nappes profondes par les eaux de l'aval**, dont la salinité est élevée (Besbes, 1975)).

Les prélèvements sont destinés à l'irrigation à hauteur de 80 %. Les agriculteurs irriguants reçoivent l'eau soit dans des périmètres d'irrigation desservis par forages collectifs, soit par des puits individuels. Ces derniers sont les plus gros préleveurs au total et demeurent pourtant très mal connus. En dehors des périmètres collectifs irrigués, où l'eau est payée au gestionnaire (sans toutefois couvrir ses coûts), les agriculteurs ne payent que leurs propres coûts d'investissement et d'exhaure, ce qui rend difficile l'instauration d'un prix de l'eau pour gérer la demande. Pour tenter d'enrayer la surexploitation, les autorités sont d'abord intervenues sur l'offre à travers la gestion des barrages qui stockent les écoulements des oueds alimentant le système, puis sur la demande, en instaurant une "zone de sauvegarde" censée contraindre la construction de nouveaux captages, depuis 1991. Mais dans les faits, la nappe de Kairouan demeure une ressource collective en accès libre : la réglementation restrictive n'est pas respectée et les puits continuent de proliférer (cf fig. 2). L'outil réglementaire est d'autant plus difficile à appliquer que la police des eaux est assurée par l'institution chargée du développement régional (Feuillette *et al.*, 1998). Les autorités s'interrogent donc sur les outils de gestion de la demande efficaces -donc acceptés par les usagers-pour enrayer la surexploitation. D'où l'intérêt d'une étude approfondie de la demande.

Notre étude a porté sur la zone la plus exploitée de la nappe : les puits, les périmètres collectifs et les forages destinés à l'eau potable y sont particulièrement nombreux ; la majorité des apports y est contrôlée par le barrage El Haouareb, mis en eau en 1990. Les graphes suivants représentent l'évolution des principaux paramètres d'état du système.

---

<sup>2</sup> L'aquifère s'étend sur environ 3000 km<sup>2</sup> et sa profondeur atteint 700 m par endroits ; la nappe affleure en aval

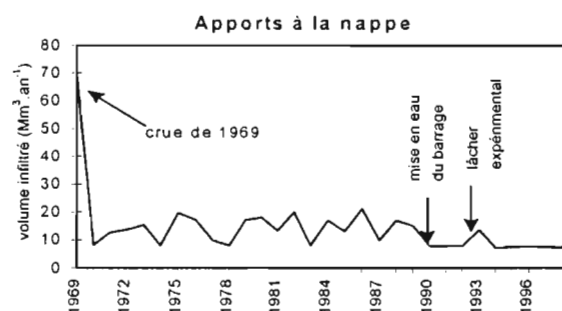


Fig.1 : Baisse des apports à la zone d'étude.  
Source : Nazoumou (1996)

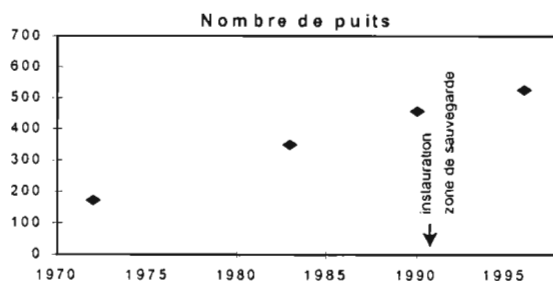


Fig.2 : Augmentation du nombre de puits dans la zone d'étude. Sources : CRDA<sup>3</sup> de Kairouan, nos enquêtes

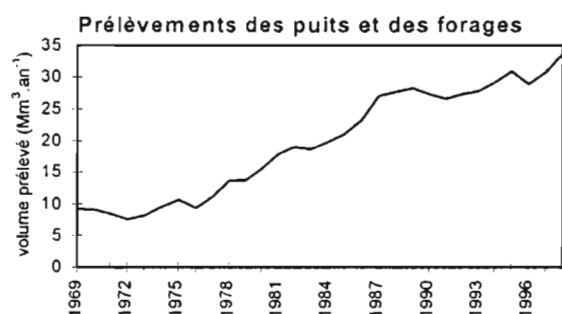


Fig.3 : Augmentation des prélèvements dans la zone d'étude. Sources : DGRE<sup>4</sup>, nos enquêtes

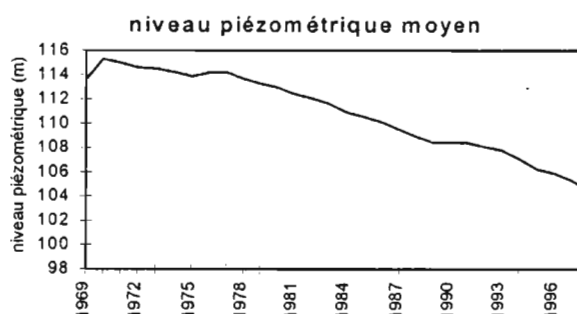


Fig.4 : Baisse du niveau piézométrique moyen dans la zone. Source : sorties moyennées du modèle de la nappe de Kairouan (Nazoumou and Besbes, 2001)

Comme le montrent les figures 1 à 4, la surexploitation se poursuit ; les faibles apports au barrage et son mode de gestion ne permettent pas de compenser le déséquilibre apports/prélèvements par l'offre, et la nappe s'abaisse.

Notre recherche de terrain sur les usagers de la nappe de Kairouan a montré que :

- les interactions entre puits ne sont pas ressenties localement, du fait de la forte transmissivité de l'aquifère ; par contre tous les irriguants sur puits ressentent l'abaissement global de la nappe ;
- les agriculteurs perçoivent peu le caractère commun de la ressource qu'ils exploitent (imaginée comme une multitude d'"oueds souterrains") et sont réticents à payer l'eau (l'eau est un "don de Dieu") ;
- le rabattement affecte peu les stratégies d'assolement et de construction des puits pour le moment ;
- les stratégies d'usages et de construction des puits sont fortement influencées par plusieurs types de paramètres locaux : le parcellaire de l'agriculteur (taille et possibilité de regroupement des parcelles), son emplacement sur la nappe (profondeur de l'eau), et ses interactions avec les agriculteurs voisins.

Les interactions entre agriculteurs, sur lesquelles s'est focalisée notre étude, sont de plusieurs ordres :

- possibilité de s'associer entre voisins pour construire un puits ;
- influence du voisinage sur les décisions d'investissement (présence de puits indiquant l'accessibilité de la nappe, importance de l'image sociale, ou présence de puits abandonnés décourageant l'investissement) ;
- influence des échanges fonciers en faire valoir indirect sur les prélèvements d'eau et les décisions d'investissement.

<sup>3</sup> Commissariat Régional de Développement Agricole

<sup>4</sup> Direction Générale des Ressources en Eau

La modélisation du système doit permettre d'explorer ses tendances d'évolution et de simuler des scénarios d'intervention. Quel type de modélisation adopter pour tenir compte des difficultés de gestion inhérentes aux nappes et des spécificités du système étudié ?

### **Intérêts des Systèmes Multi-Agents pour modéliser le système**

La recherche propose divers outils d'étude de la gestion d'une ressource collective : depuis les modèles de fonctionnement de la ressource qui considèrent la demande comme un paramètre exogène jusqu'aux modèles économiques focalisés sur la demande qui prennent l'offre en eau comme une donnée de l'environnement du système, en passant par les modèles mixtes dans lesquels ressource et usages sont en interaction. Dans notre cas, le modèle devait non seulement représenter ces interactions offre/demande, mais aussi les stratégies d'investissement des agriculteurs (l'accroissement des prélèvements provenant pour une large part de l'apparition des puits), et les interactions entre agriculteurs (du fait de leur impact sur la demande en eau). Or les modèles classiques de fonctionnement de la demande en eau agricole (modèles agro-économiques ou modèles d'action à l'échelle des exploitations, modèles d'activité de type GAMS<sup>5</sup> à l'échelle de la région) ne représentent que les décisions tactiques d'irrigation ou les stratégies d'assolement des agriculteurs (processus intra-annuels), et limitent les interactions entre agriculteurs - lorsqu'elles sont représentées - à des échanges marchands ou aux interactions indirectes ressenties *via* la ressource. De plus ils représentent rarement les processus régissant l'offre et la demande conjointement, ce qui est pourtant nécessaire à la prise en compte de leurs liens dynamiques.

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) issus de l'Intelligence Artificielle Distribuée et basés sur le principe de la distribution des interactions (Ferber, 1995) sont au contraire tout à fait adaptés à la représentation des interactions ressources/sociétés et permettent de tenir compte des comportements dans leur diversité. Le modélisateur peut manipuler et incorporer dans un même SMA des entités spatiales définies à des niveaux hiérarchiques différents, et faire jouer des agents, entités informatiques autonomes, capables d'agir localement en réponse à des stimuli de l'environnement ou à leurs communications avec d'autres agents. Les interactions entre agents peuvent avoir lieu *via* l'environnement (par encombrement spatial ou baisse d'une ressource) ou explicitement, par échanges de messages ou transactions. Ces caractéristiques nous ont paru particulièrement adaptées à la représentation du système étudié. Nous avons construit le modèle SINUSE (Simulations des Interactions entre Nappe et Usages de l'Eau) en langage SMALLTALK, sur la plateforme de simulation multi-agents CORMAS (Common-pool Ressources and Multi-Agent Systems), spécialement conçue par (Bousquet *et al.*, 1998) pour la gestion des ressources renouvelables. SINUSE représente les interactions entre agriculteurs et nappe, aux échelles de temps saisonnières et interannuelles.

## **PRESENTATION DU MODELE SINUSE**

La zone d'étude s'étend sur environ 25 000 hectares. Le modèle SINUSE représente un schéma réduit du système étudié, tout en respectant les proportions des paramètres essentiels, afin de retrouver la cohérence des phénomènes observés sur le terrain. La définition de l'espace du modèle se fait sur une grille rectangulaire dont chaque cellule représente 1 hectare, la grille représentant 2 400 hectares au total. Pour une description détaillée de la démarche et du modèle, se référer à (Feuillette *et al.*, 2000).

### **Hypothèses du modèle**

L'hypothèse centrale du modèle SINUSE est l'importance des interactions entre les entités du système nappe-agriculteurs.

Le modèle SINUSE comporte trois types d'entités :

- **des entités sociales**, les exploitants, qui représentent les agriculteurs du terrain<sup>6</sup> ;
- **des entités spatiales** de niveaux d'aggrégation différents, comme les zones de la nappe, les parcelles, les périmètres collectifs d'irrigation ;

<sup>5</sup> General Algebraic Modeling System, modèle mathématique élaboré par la BIRD et très utilisé

<sup>6</sup> Nous avons choisi de centrer la partie usages du modèle sur le fonctionnement de la demande agricole, celle-ci étant majoritaire, non maîtrisée et mal connue

- **des entités passives** (et situées) comme les puits, qui apparaissent et disparaissent au cours de la simulation (construction et abandon).

Le pas de temps adopté pour la description des interactions entre ces entités est l'année, découpée en deux saisons de culture. Les décisions d'investissement s'opèrent à une échelle interannuelle. Les apports pluviométriques pour chaque type de culture reposent sur la chronique locale des 20 dernières années.

*Les exploitants* sont caractérisés par des attributs descriptifs de leur exploitation (parcelles, puits, surface...), de leur famille (nombre de membres familiaux, disponibles, revenus extra-agricoles...), de leur épargne, et prennent plusieurs types de décisions de manière à assurer le fonctionnement et la progression du système exploitation-famille :

- des **décisions d'assolement saisonnier** de leurs parcelles qui dépendent essentiellement du type de faire valoir, des contraintes d'accès à l'eau, de la taille de l'exploitation et de la parcelle, de leurs revenus<sup>7</sup>,
- des **décisions d'échanges fonciers annuels** en fonction de leur main d'œuvre, de leur accès à l'eau, de leur situation économique,
- des **décisions annuelles de diversification des revenus** en fonction de la main d'œuvre familiale disponible,
- des **décisions stratégiques de construction de puits** en fonction de contraintes parcellaires et économiques, avec la possibilité de s'associer à un voisin pour s'en affranchir,
- et des **décisions stratégiques de vente ou d'achat de terre**.

La descriptions des règles qui régissent ces comportements repose sur un important travail d'enquêtes sur le terrain (approfondies et statistiques).

*La ressource* est représentée par deux zones de paramètres hydrogéologiques différents, en interaction entre elles, et avec le reste de la nappe. Différentes zones de profondeur symbolisent le gradient croissant est-ouest observé dans la réalité. La géométrie lenticulaire de la nappe est prise en compte implicitement à travers la probabilité d'échec de la construction des puits. La représentation structurelle de la ressource est basée sur les diverses études menées sur la nappe (celles de Castany (1968), Besbes (1971), Besbes et de Marsily (1976) et Chaieb (1988)); tandis que son fonctionnement repose sur les données simplifiées du modèle de nappe conçu par Besbes (1975) et actuellement repris par Nazoumou (2001).

*Les parcelles* ont pour attributs leur taille, leur assolement, leur accès à l'eau. L'impact de leurs caractéristiques pédologiques est supposé marginal (sur la base de la bibliographie et des observations de terrain).

*Les périmètres collectifs* d'irrigation sont caractérisés par un prix de l'eau et une efficacité de distribution. Leur fonctionnement interne est supposé homogène.

Les caractéristiques techniques des *puits* reposent sur des mesures et des enquêtes effectuées auprès d'entreprise de creusage et d'équipement, et des agriculteurs.

## Structure et fonctionnement du modèle

Le simulateur SINUSE est organisé en deux parties : le monde artificiel constitué des différents agents qui interagissent dans le temps et la structure de contrôle qui gère la simulation.

La figure 5 montre que les entités spatiales et sociales fonctionnent de manière autonome, chacune avec ses règles d'action, et interagissent entre elles.

---

<sup>7</sup> Un coefficient aléatoire sur l'espérance de produit brut des cultures maraîchères intègre les fluctuations des prix et le risque d'accident phyto-sanitaire ; le rendement des cultures en sec dépend de la pluviométrie ; les produits bruts des autres cultures sont fixés.

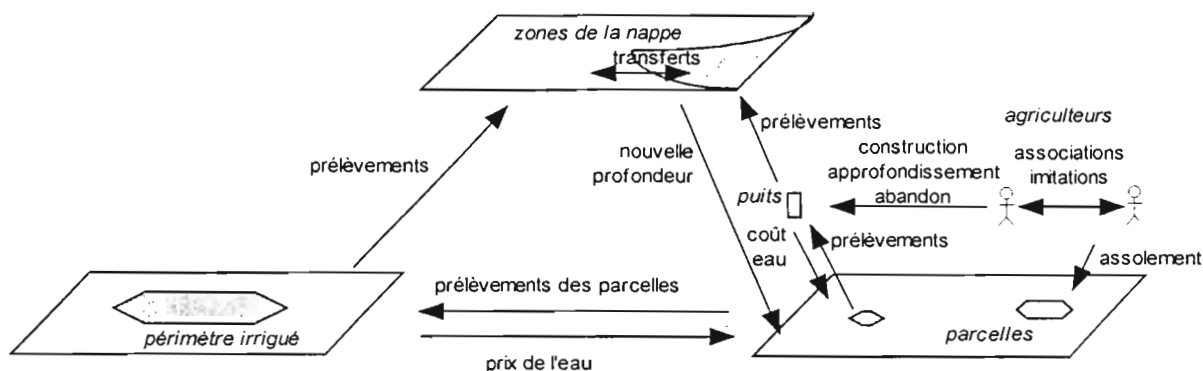


Fig.5: Les exploitants procèdent à des décisions tactiques (échanges fonciers , proportion de la sole cultivée). La composition de la sole irriguée entraîne un prélèvement au niveau des points d'eau qui le répercutent à la zone de la nappe à laquelle ils sont rattachés. Celle-ci réagit en s'abaissant, et le gradient piézométrique résultant entraîne des transferts de volume entre zones. Chaque ZoneNappe communique sa nouvelle profondeur aux parcelles ce qui donne lieu si nécessaire à un approfondissement des puits (quand le niveau d'endettement de l'exploitant le permet). Entre temps les résultats de chaque campagne agricole ont été calculés à partir du prix de l'eau. En fin d'année, selon sa trésorerie, son épargne et sa situation, l'agriculteur peut envisager la construction d'un puits, en essayant si besoin de s'associer avec un voisin, ou d'acheter ou de vendre une parcelle.

Les simulations sont lancées sur 15 pas de temps, des bouleversements techniques ou économiques ayant toute chance de survenir, et le système devenant sensible à certains processus non pris en compte (comme l'héritage) au-delà de cette période.

### Simulations d'interventions

Nous avons envisagé la simulation des interventions suivantes :

1. une gestion par la demande de type économique (paiement d'un prix au mètre cube via la facture d'électricité permise par une généralisation des pompes électrifiées) ;
2. une adoption généralisée de la micro-irrigation et de systèmes de culture majoritairement constitués d'oliveraies, qui pourraient être le résultat d'une coordination entre agriculteurs accompagnée d'incitations économiques de la part de l'Etat ;
3. la mise en place de quotas d'utilisation sur les volumes ou par une restriction de la surface irriguée compte tenu de l'assolement.

Les figures 6, 7 et 8 présentent les résultats de simulations de scénarios du type (1) : un scénario "prix élevé" (prix de l'eau fixé à 0,2<sup>8</sup> Dinars Tunisiens par mètre cube, soit environ), et un scénario "prix très élevé" (prix de l'eau fixé à 0,9 Dinars Tunisiens par mètre cube) sont comparés à un scénario "neutre" à travers une quinzaine de simulations chacun (pour tenir compte de la variabilité "intra-scénario"), sur 15 pas de temps, et à travers 3 indicateurs : le nombre de puits total, la profondeur moyenne de la nappe, et le nombre d'agriculteurs "satisfaits" (l'indicateur de satisfaction reposant sur une épargne et une trésorerie positives).

<sup>8</sup> Dans les périmètres collectifs le prix de l'eau au moment de notre étude était environ de 0,06 dinars tunisiens/mètre cube, et le coût d'accès à l'eau par un puits pour les agriculteurs privés était compris entre 0,04 et 0,1 dinars/mètre cube (sans compter l'amortissement des équipements)

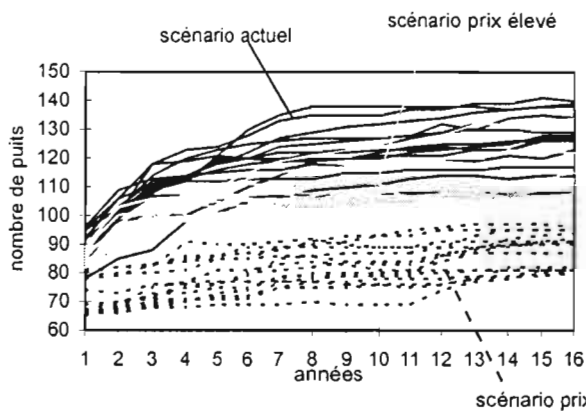


Fig.6 : Comparaison du nombre de puits entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix

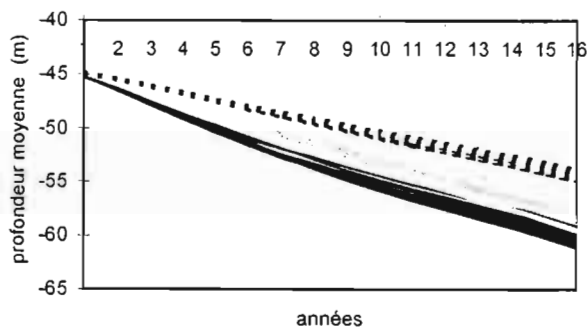


Fig.7 : Comparaison de la profondeur de nappe entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix

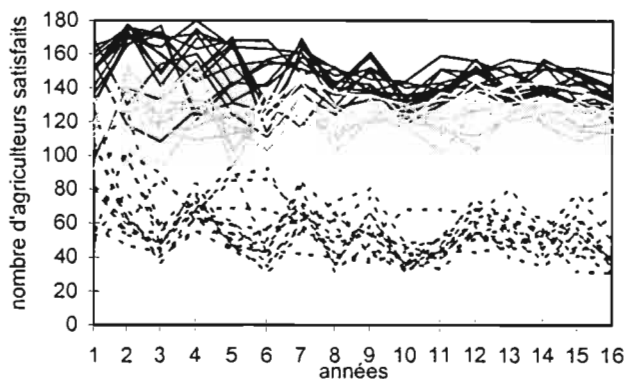


Fig.8 : Comparaison du nombre d'agriculteurs satisfaits entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix

La variabilité des résultats pour un même scénario provient des paramètres stochastiques de la simulation<sup>9</sup> ; elle est acceptable relativement au grand nombre de phénomènes aléatoires dont les effets se cumulent au fil des simulations, notre objectif étant d'analyser des tendances d'évolution. Le scénario "prix très élevé" montre que, dans le contexte de nos hypothèses, un prix de l'eau fixé à 0,9 DT/m<sup>3</sup> a un effet significatif sur le nombre de puits construits et sur la baisse de la nappe sans toutefois permettre un retour à l'équilibre offre/demande. Toutefois ce scénario suppose l'instauration d'un prix de l'eau équivalent à 15 fois le prix de l'eau actuel dans les périmètres collectifs, considéré déjà non supportable pour certaines catégories d'agriculteurs<sup>10</sup>. La simulation d'un scénario d'intervention plus raisonnable reposant sur l'instauration d'un prix de l'eau de 0,2 DT/m<sup>3</sup> (soit plus de trois fois le prix actuel dans les périmètres publics) ne donne pas de résultats significativement différents du scénario neutre concernant l'abaissement de la nappe : le test de Wilcoxon Mann-Whitney effectué sur la moyenne des 5 derniers pas de temps montre que l'hypothèse H<sub>0</sub> d'égalité des deux distributions est acceptée au seuil  $\alpha$  de 5% tandis qu'elle est rejetée au même seuil pour l'indicateur de satisfaction des agriculteurs (pour les puits elle est acceptée au seuil  $\alpha$  de 2%), ce qui signifie que les agriculteurs s'appauvrissent sans que pour autant la surexploitation de la nappe soit enrayerée.

Ce type de résultat, inhérent aux règles d'action des exploitants définies dans le modèle, mais difficilement prévisible en raison de la multitude et de la complexité des interactions caractérisant ce système, **pose question sur l'acceptation sociale de l'instauration d'un prix de l'eau, intervention pourtant très souvent adoptée à des fins de maîtrise de la demande.** La faible sensibilité du système au

<sup>9</sup> Par exemple la probabilité de prise de risque qui pousse les agriculteurs à construire un puits dans une zone sans puits, conduisant à l'apparition de fronts pionniers.

<sup>10</sup> sources : nos enquêtes et le travail de (Kefi, 1999)



prix de l'eau est finalement peu surprenante dans le contexte d'étude : climat semi-aride, importance économiques des cultures irriguées, manque d'alternatives (Montginoul, op. cité).

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le calage et la validation de ce type de modèle ne correspondent pas aux opérations classiquement décrites en modélisation mathématique, du fait du grand nombre de paramètres en jeu (Barreteau, 1998). La plupart des étapes de validation décrites par Rykiel (1996) (comparaison des sorties avec les données de terrain, cohérence de l'évolution globale du système, réaction à des situations extrêmes, cohérence des trajectoires individuelles, variabilité stochastique...) nous ont jusqu'alors permis d'accréditer le modèle SINUSE, compte tenu de notre objectif, sachant que valider revient à démontrer que le modèle fournit des résultats avec une précision suffisante dans son domaine d'application, par rapport aux intentions d'utilisation (Lewis, 1993).

En conclusion la modélisation du système par les SMA nous a pour l'instant conduit :

- à interroger efficacement nos données pour en faire émerger les variables et les comportements les plus importants relativement à la question posée ;
- à mettre en évidence le lien entre une dynamique globale et une multitude d'actions et d'interactions individuelles ;
- à formaliser un système extrêmement complexe, en respectant sa "structure objectale" et la variété de ses descripteurs (Ferrand et Deffuant, 1998).

En cela le modèle a constitué une aide considérable au traitement des données et à la compréhension du système.

Utilisé à des fins exploratoires par les chercheurs, il pourrait devenir le support de discussions entre acteurs et gestionnaires dans un objectif d'acceptabilité des mesures de contrôle de la demande. Ceci impliquerait de procéder à une validation du modèle par les acteurs, telle que celle expérimentée et décrite par Barreteau et Bousquet (1999).

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLAN, J. A., et KARSHENAS, M. (1996). Managing Environmental Capital : the case of water in Israel, Jordan, the West bank and Gaza. 1947 to 1995. In "Water, Peace and the middle east : negotiating resources in the Jordan basin" (A. J. A. e. C. J.H., ed.). I.B. taurus Publishers, London.
- BARRETEAU, O. (1998). Un Système Multi-Agents pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et mode d'organisation. Thèse de Doctorat, ENGREF, Montpellier.
- BARRETEAU, O., et BOUSQUET, F. (1999). Jeux de rôles et validation des systèmes multi-agents. In "Ingénierie des systèmes multi-agents" (M.-P. Gleizes and P. Marcenac, eds.), pp. 67-80. Hermès Sciences Publications, Paris.
- BESBES, M. (1971). "Note sur la géométrie du réservoir profond de la plaine de Kairouan," DRE, Tunis.
- BESBES, M. (1975). "Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques," DRE, Tunis.
- BESBES, M., et de MARSILY, G. (1976). L'analyse d'un grand réservoir aquifère en vue de sa modélisation. In "Conférence AIH - L'hydrologie des grands bassins sédimentaires", Budapest.
- BOUSQUET, F., BAKAM, I., PROTON, H., et LEPAGE, C. (1998). Cormas : common-pool resources and multi-agent systems. In "11th conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Lecture Notes in Artificial Intelligence" (A. P. d. Pobil, J. Mira and M. Ali, eds.), Vol. 1416, pp. 826-837. Springer-Verlag, Barcelone.
- CASTANY, G. (1968). Aménagement des oueds Zeroud et Merguellil - Alimentation des nappes de la plaine de Kairouan par les eaux des oueds Merguellil et Zeroud. , pp. 15 p, Tunis.
- CHAJEB, H. (1988). "Contribution à la réactualisation des modèles hydrogéologiques," Faculté des Sciences, Tunis.
- FAO (1993). "The state of the world : water policies and agriculture," FAO, Rome, Italie.
- FERBER, J. (1995). "Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective," InterEditions.
- FERRAND, N., et DEFFUANT, G. (1998). Trois apports potentiels des approche "multi-agents" pour l'aide à la décision publique. In "Gestion des Territoires Ruraux".
- FEUILLETTE, S., LE GOULVEN, P., et BACHTA, M. S. (1998). Les pouvoirs législatifs, réglementaires et juridiques en Tunisie confrontés à la gestion des nappes souterraines : cas de la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. In "Colloque SFER : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde", Montpellier.
- FEUILLETTE, S., LE GOULVEN, P., et BOUSQUET, F. (2000). SINUSE, un outil d'exploration des interactions entre une nappe et ses usagers. In "séminaire international GIRN-ZIT", Bamako. A paraître dans les Cahiers de l'IRD.

- HORCHANI, A. (1995). Gestion des ressources en eau en Tunisie. *Agriculture de Tunisie*.
- KEFI, M. (1999). "Estimation de la rente économique de l'eau dans les PPI de Chébika," INAT, Tunis.
- LEWIS, R. O. (1993). Verification, validation and accreditation (V V&A) of models and simulations used in distributed interactive environments. In "Modelling and Simulation ESM 93" (A. Pavé, ed.), pp. 632-636. Society for Computer Simulation International, Ecole Normale Supérieure, Lyon.
- MANSOURI (1996). "Bilan de la nappe mio-plio-quadernaire de la plaine de Kairouan," SONEDE, Tunis.
- MONTGINOUL, M. (1997). Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : Des instruments, de l'information et des acteurs. Thèse de Docteur, Faculté des Sciences Economiques de Montpellier I, Montpellier.
- NAZOU MOU, Y. (1996). "Modélisation de la recharge artificielle des nappes de la plaine de Kairouan," Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis.
- NAZOU MOU, Y., et Besbes, M. (2001). Recharge assessment and groundwater modeling in arid conditions. Cas study at Kairouan, Tunisia. In "6ème Assemblée Scientifique de l'IAHS" (H. Gehrels, ed.), Maastricht. A paraître.
- PALMER-JONES, R. (1997). Groundwater management in South Asia : what role for the market ? In "Water : economics, management and demand" (T. F. a. L. S. Melvyn Kay, ed.), pp. 381-389. E & FN Spon.
- RYKIEL, E. J. (1996). Testing ecological models : the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90, 229-244.
- STROSSER, P. (1997). Analyzing Alternative Policy Instruments for the Irrigation Sector-An assesment of the Potential for Water Market Development in the Chishtian Sub-division, Pakistan. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- TURTON, A. R. (1999). Water scarcity and social adaptative capacity : towards an understanding of the social dynamics of water demand management in developping countries. . School of Oriental and African Studies (SOAS).