

Modèles d'exploration des dynamiques entre ressources et usages de l'eau pour une gestion intégrée des nappes souterraines Application à la nappe de Kairouan en Tunisie

Attalah KADI*, Sarah FEUILLETTE**, Patrick LE GOULVEN***, Philippe LE GRUSSE****

*CIHEAM-IAMM, 3191 route de Mende, BP 5056, Montpellier, France

**AESN, Nanterre, France

***IRD, US DIVHA, 911 avenue Agropolis, BP 5045, Montpellier, France

Résumé – L'objectif de ce papier est de montrer l'intérêt d'une modélisation 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. Deux types de modèles sont utilisés, un simulateur agro-économique Olympe et un modèle multi-agents Sinuse, pour formaliser le système complexe nappe de Kairouan et ses usagers, explorer les liens entre ressource et usages à travers des simulations et étudier les évolutions du système sous diverses contraintes d'interventions.

Abstract — **Dynamic exploration models on water use and water resources for water tables management.** The objective of this paper is to show the interest of models to explore the management of overexploited water tables using management of demand. The surveys are on this case on Kairouan's water table in the Center of Tunisia. In a context of water unbalance demand/offer, when the development of the offer reaches limits, the management of the demand can be a solution with different types of tools, with different efficiency according to the intervention context. Interactions models between water table and water uses permit to study effects of these interventions. Two types of models are used, an Agro-Economic model OLYMPE and a multi-actors model SINUSE, to formalize Kairouan's water table and stakeholders complex system; to explore relations between water resources and water uses through simulations studying evolutions of the system with different interventions constraints.

Introduction

L'élévation générale du niveau de vie et l'accroissement 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 le pourtour méditerranéen.

Cette phase d'aménagement est en voie d'achèvement et l'accroissement de l'eau disponible repose désormais, d'une part, sur le traitement des eaux non conventionnelles et, d'autre part, sur l'approfondissement des forages. Mais cette stratégie atteint ses limites dans les régions où les prélèvements 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, 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 car les mesures préconisées ont un coût 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. Les modèles OLYMPE et SINUSE (Simulation des interactions entre nappe et usages de l'eau), présentés dans un deuxième temps, sont des outils 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 dans le cas des nappes

Les mesures permettant d'interférer sur 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 destinées à améliorer l'efficacité de l'eau pour un usage donné ;
- les réformes des droits d'accès et des réglementations qui répondent souvent à des situations de crise nécessitant une limitation rapide d'un usage ;
- les principaux instruments économiques que sont la tarification et les marchés de l'eau ;
- les outils contractuels qui 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.

L'attribution d'un prix pour l'eau, censé refléter sa rareté, doit orienter les usagers dans deux voies : (1) donner la priorité aux activités qui valorisent le mieux l'eau et (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 d'usages possibles, afin que les usagers puissent s'orienter vers des cultures valorisant mieux l'eau ;
- (iii) que la base de la tarification ou du marché soit l'eau avec des caractéristiques quantitatives (volumes ou débits) contrôlables et non des éléments connexes.

Si (i) et (ii) ne sont pas respectés, les instruments économiques provoquent une simple réduction du revenu des usagers. 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 fonctionnant 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 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 plutôt à un partage temporaire des points d'accès à l'eau.

Les nappes se prêtent difficilement aux 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 communs et finis 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 (Figure 4). Ce rabattement semble peu inquiétant étant donnée l'importance de la réserve (L'aquifère s'étend sur environ 3 000 km² et sa profondeur atteint 700 m par endroits ; la nappe affleure en aval), cependant il engendre une augmentation non négligeable des coûts d'accès à la ressource, une mise en péril de la viabilité des ouvrages d'accès et 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 irrigants 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, 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. figure 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.

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. 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 irrigants 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.

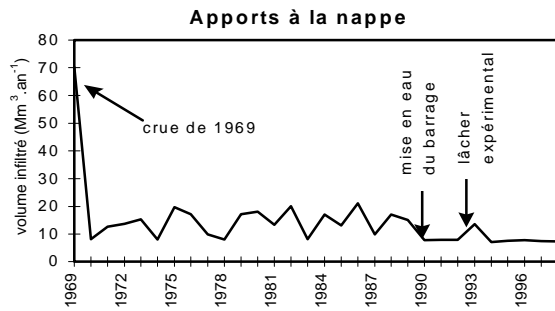


Figure 1. Baisse des apports à la zone d'étude (Source : Nazoumou, 1996).

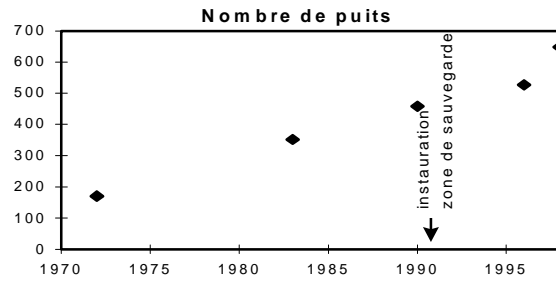


Figure 2. Augmentation du nombre de puits dans la zone d'étude (Sources : Commissariat régional de développement agricole de Kairouan, nos enquêtes).

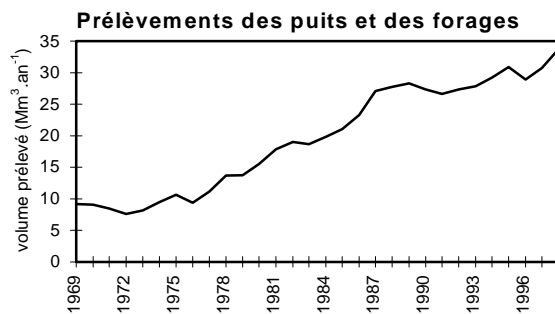


Figure 3. Augmentation des prélèvements dans la zone d'étude (Sources : Direction générale des ressources en Eau, nos enquêtes).

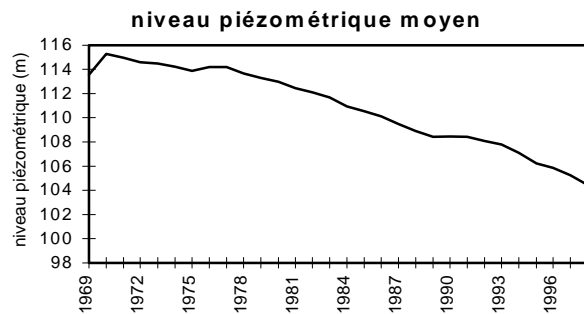


Figure 4. Baisse du niveau piézométrique moyen dans la zone (Source : Nazoumou et Besbes, 2001).

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 ? On se propose d'utiliser deux types d'outils exploratoires : le simulateur Olympe fondé sur des calculs économiques au niveau des exploitations et un simulateur multi-agents, le modèle Sinuse.

Utilisation du simulateur Olympe

Olympe, une plateforme de modélisation agricole au niveau régional

Les problèmes de la gestion de la ressource en eau au niveau agricole nous obligent à développer une réflexion et une méthodologie permettant le passage direct d'une analyse au niveau individuel (l'exploitation) à un niveau collectif (le périmètre irrigué, le bassin versant). La gestion de l'offre en eau agricole passe inévitablement par une gestion de la demande. L'évaluation de la demande en eau au niveau collectif en agriculture reste un exercice complexe face à la multitude des centres de décision, leur diversité et la variabilité de leur dynamique sous contraintes économiques.

Dans une optique de développement d'outils et de méthodes pour une gestion intégrée de la ressource en eau au niveau d'une « région » nous avons développé un modèle de simulation régional permettant d'évaluer les variations de la demande en eau en fonction de changements de spéculations agricoles, de systèmes techniques, et d'évaluer les impacts économiques au niveau des exploitations agricoles, au niveau de sous régions et au niveau global (Attonaty *et al.*, 2000). La plateforme de modélisation utilisée, Olympe, est un modèle de simulation régional agricole générique, développé par J.M. Attonaty de l'INRA Paris Grignon (figure 5).

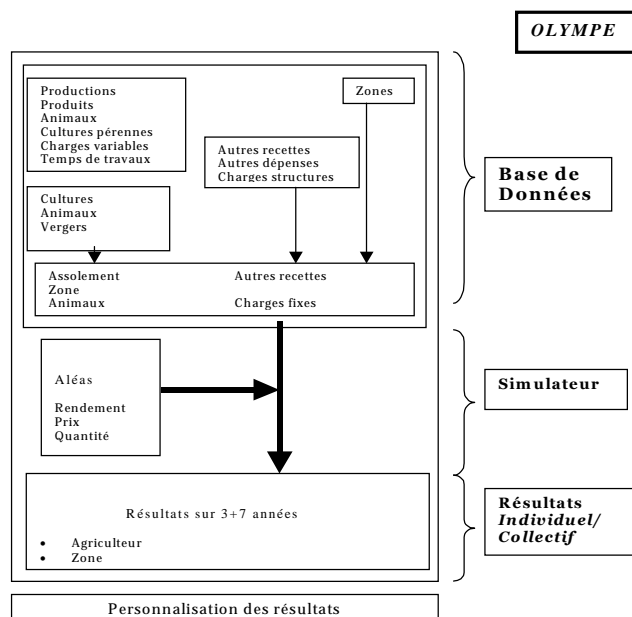


Figure5. Modèle Olympe.

Le modèle de simulation Olympe permet de développer une approche de modélisation fonctionnelle des acteurs agricoles d'une région au travers de leurs productions et de leurs consommations. (Le Grusse, 2001). A partir des différents éléments de caractérisation du territoire le premier objectif est de dégager les éléments de production et de consommation utiles pour répondre aux questions que se posent les différents acteurs. Le travail est mené en quatre étapes.

- Des enquêtes de terrain sur les différents acteurs ou types d'acteurs ainsi que la collecte des données sur leur environnement socio-économique.

Le programme au niveau de la représentation des acteurs agricoles se décompose en trois parties :

- une partie de définition générale qui permet de clarifier les variables en matière de charges et produits afférents à l'activité agricole dans la région suivant différents itinéraires techniques ;
- une partie de définition des types d'exploitations agricoles avec l'élaboration d'une typologie ; chaque exploitation est repérée par un titre et une zone à laquelle elle appartient ; son activité est identifiée, par campagne agricole, à partir de l'occupation du sol, du verger, de la composition du cheptel, des charges fixes, des recettes et des dépenses diverses ; cette fonction permet aussi de déterminer la représentativité de chaque exploitation dans sa région ;
- et une partie de caractérisation des « aléas » qui jouent un double rôle en permettant de caler les exploitations ainsi définies et de représenter les différents scénarios de simulation. En effet, les exploitations ne produisent pas au même coût, au même rendement, et avec la même fonction de pilotage. Cette fonction va nous permettre de traduire cette diversification en pourcentage par rapport aux normes déjà définies dans la base de données. En affectant à chaque exploitation ses propres pourcentages, nous allons pouvoir nous rapprocher de ses résultats réels. (Chemak *et al.*, 1998)

- La construction du modèle de simulation du territoire.

Ce modèle sera à la fois une base de données sur les systèmes et un outil de simulation.

- Le calage du modèle.

Pour la validation, nous comparons les résultats du modèle aux données des statistiques de la zone sur des années antérieures significativement différentes en matière de superficies cultivées, de productions et de consommations en eau ou de tout autre facteur permettant un calage.

- La simulation de scénarios.

Les simulations permettent de tester les impacts en termes de flux des décisions des différents acteurs. Ces analyses d'impacts définissent alors le champ du possible et font émerger les éléments d'analyse et de négociation. Le simulateur agit comme un révélateur de l'impact de changements mais ne permet pas de comprendre les règles de gestion des acteurs et d'anticiper leurs réactions face à des modifications de facteurs de leur environnement.

Un modèle de fonctionnement de l'agriculture de l'aval du bassin du Merguellil (zonage Mergusie I)

La première étape d'élaboration du modèle passe par la construction d'une typologie des systèmes de production spatialisée. L'analyse a permis de dégager 17 classes réparties selon le mode d'accès à l'eau, l'orientation de système de culture et le mode de fonctionnement des exploitations réparties dans 7 secteurs composant la zone d'étude. Nous avons retenu 12 classes 11 en irriguée et une seule classe en sec. La classification effectuée sur la base d'un recensement global des agriculteurs, nous a permis de pondérer l'effectif pour chaque type par secteur afin d'obtenir un modèle d'agrégé. L'organisation du modèle nous permet d'introduire les différents tarifs d'eau d'irrigation, et les différents itinéraires techniques constatés.

La deuxième étape consiste à caler le modèle sur des variables de surface, de consommation d'eau et de production au niveau des exploitations et au niveau agrégé.

La troisième étape est l'élaboration de scénarios d'évolution et de gestion. Nous avons testé dans ce cas trois grands types de scénarios :

- un scénario d'impact de changement technique avec l'introduction du goutte à goutte sur certaines cultures et sa généralisation au niveau régional sur toutes les cultures adaptées ;
- un scénario d'analyse d'impact de baisse de prix sur les céréales et le maraîchage avec des stratégies de substitution et d'extension des productions pour compenser les pertes économiques ;
- enfin un scénario combinant les deux précédents permettant ainsi de mesurer le niveau de compensation pouvant exister entre un changement technique améliorant des résultats économiques en diminuant la pression sur la ressource en eau et la nécessité de compenser des pertes de revenu dues à des baisses de prix sur les marchés (tableau I).

Dans le scénario du goutte à goutte partiel, les résultats économiques peuvent atteindre une progression moyenne de 12 % par rapport à la situation de base, et les gains sur les quantités d'eau d'environ 11 %. Avec l'introduction d'un scénario de généralisation du goutte à goutte, les résultats économiques peuvent augmenter de plus de 20 % et les quantités d'eau économisées approcher également les 20 %.

Tableau I. Synthèse des calculs avec Olympe pour les deux scénarios du goutte à goutte.

Situations	Marge directe DT	Gains DT	Q eau m ³	Gains Q m ³	Investissement DT
Etat actuel	10 430 922		31 606 954		
Sc g à g partiel	11 716 720	1 675 798	28 197 826	3 409 128	3 700 000
Sc g à g généralisé	12 803 133	2 372 210	25 315 954	6 291 000	6 600 000

Par contre les scénarios de baisse des prix des céréales et des cultures maraîchères conduisent à des pertes de revenus importantes. La compensation des pertes par substitution maraîchage céréales se fait à quantité d'eau constante mais conduit à la quasi-disparition des surfaces en céréales. La compensation par des solutions d'extension des cultures en céréales ou en maraîchage induit des pressions sur la ressource en eau importantes.

La combinaison des deux types de scénarios permet d'évaluer la zone de compensation du gain d'un changement technique par rapport aux contraintes potentielles d'une baisse des prix de marché à la fois en terme économique, en termes de pression sur la ressource en eau et au niveau de la valorisation du m³ d'eau. Avec l'introduction de la technique du goutte à goutte sur les scénarios de baisse des prix des céréales et des cultures maraîchères, la valorisation de l'eau varie entre 0,49 et 0,37 DT/m³ par rapport à une situation initiale de 0,33 DT / m³. Les gains du changement technique permettent d'améliorer la valorisation de l'eau et de maintenir les revenus dans les deux premiers scénarios (-30 % de baisse sur les céréales et -10 % sur le maraîchage). Pour les scénarios introduisant une baisse plus importante des prix du maraîchage, des pertes de revenus sont toujours constatées et une extension des surfaces est nécessaire pour maintenir le revenu initial. Dans ces derniers scénarios, la valorisation moyenne de l'eau se rapproche de son niveau initial. Les baisses de prix des deux derniers scénarios (-30 % céréales et à partir de -15 % sur le maraîchage) absorbent ainsi la totalité des gains dus à l'introduction du goutte à goutte tant en terme économique qu'en termes de consommation d'eau (tableau II).

Tableau II. Synthèse des calculs avec Olympe pour les différents scénarios de baisse de prix avec goutte à goutte et avec coûts d'investissement.

Situations	Résultats (DT)	Gains (DT)	Pourcentage de gains %	Valorisation de l'eau DT/m ³
Etat actuel	10 430 922	-	-	0,33
Sc-30 % céréal	12 326 000	1 896 000	18	0,49
Sc -30 % cérl -10maraîch	10 747000	317 000	3	0,43
Sc-30 % cérl -15maraîch	9 957 000	-473 000	-5	0,40
Sc-30 %cérl -20 %maraîch	9 168 000	-1 262 000	-12	0,37

La marge de manœuvre dans un tel contexte économique reste donc très faible et toute baisse significative de la rentabilité des cultures conduira à un accroissement de la pression sur la ressource. Sachant que les hypothèses de gains dus à l'introduction du goutte à goutte généralisé sont optimistes par rapport aux potentialités d'aménagement en terme de réseau, et que les agriculteurs cherchent à améliorer leurs revenus actuels en augmentant leur production, toute détérioration des marchés devrait accroître rapidement la pression sur la ressource. Les combinaisons des différents scénarios permettent d'évaluer les ordres de grandeur de compensation entre des gains techniques probables et des pertes économiques envisageables. Les résultats montrent l'extrême tension des niveaux de compensation envisageables et les risques importants d'accroissement des pompages et d'extension des cultures dans cette région si aucun encadrement n'est instauré.

Utilisation du modèle Sinuse

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 jusqu'aux modèles économiques focalisés sur la demande, en passant par les modèles mixtes dans lesquels ressource et usages sont en interaction. Dans notre cas, le modèle doit 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 – General Algebraic Modeling System, modèle mathématique élaboré par la BIRD et très utilisé – 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.

Présentation du modèle 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, 2003).

Hypothèses du modèle

L'hypothèse centrale du modèle Sinuse est l'importance des interactions entre les entités du système nappe-agriculteurs. Le modèle comporte trois types d'entités :

- des entités sociales, les exploitants, qui représentent les agriculteurs du terrain ;
- des entités spatiales de niveaux d'agrégation différents, comme les zones de la nappe, les parcelles, les périmètres collectifs d'irrigation ;
- 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, de leur famille, 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 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 ;
- 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 selon 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 description 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 : Castany (1968), Besbes (1971), Besbes et de Marsily (1976) et Chaieb (1988). Son fonctionnement repose sur les données simplifiées du modèle de nappe conçu par Besbes (1975) et repris par Nazoumou (2001).

Les parcelles ont pour attributs leur taille, leur assolement, leur accès à l'eau. 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'entreprises 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 6 montre que les entités spatiales et sociales fonctionnent de manière autonome, chacune avec ses règles d'action, et interagissent entre elles.

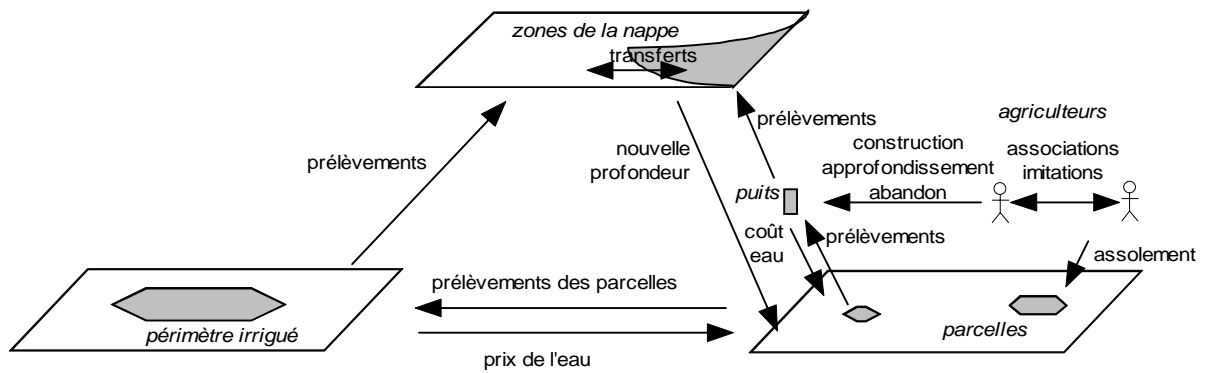


Figure 6. Les exploitants procèdent à des décisions tactiques (échanges fonciers, proportion de la sole cultivée). La composition de la sole irriguée entraîne un prélèvement au niveau des points d'eau qui répercutent à la zone de la nappe à laquelle ils sont rattachés. Celle-ci réagit en s'abaissant, 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 :

- 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) ;
- 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 ;
- 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 7, 8 et 9 présentent les résultats de simulations de scénarios du type (1) : un scénario « prix élevé » (prix de l'eau fixé à 0,2 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, 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).

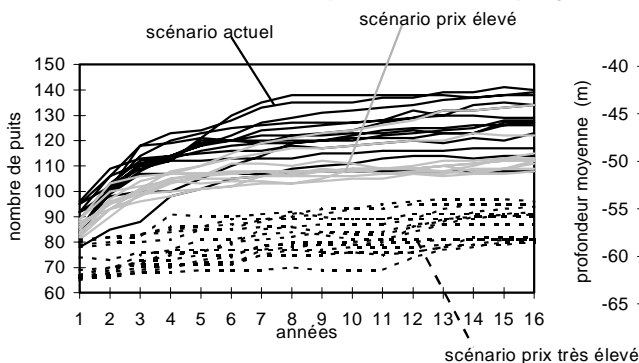


Figure 7. Comparaison du nombre de puits entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix.

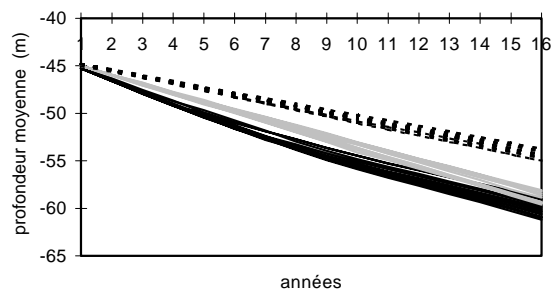


Figure 8. Comparaison de la profondeur de nappe entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix.

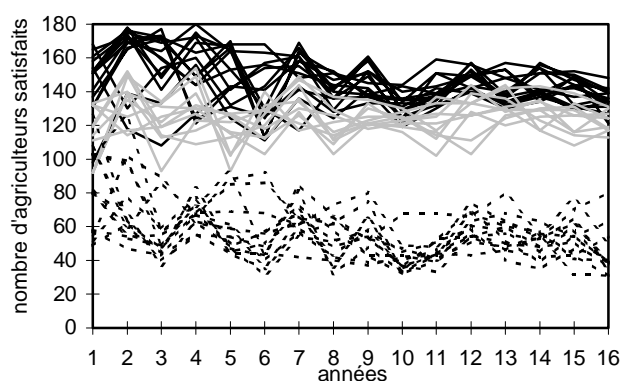


Figure 9. Comparaison du nombre d'agriculteurs satisfaits entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix.

La variabilité des résultats pour un même scénario provient des paramètres stochastiques de la simulation ; 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/m³ 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. La simulation d'un scénario d'intervention plus raisonnable reposant sur l'instauration d'un prix de l'eau de 0,2 DT/m³ (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 : les agriculteurs s'appauvrissent sans que la surexploitation de la nappe soit enrayée. 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 prix de l'eau est finalement peu surprenante dans le contexte d'étude : climat semi-aride, importance économique des cultures irriguées, manque d'alternatives (Montginoul, 1997).

Conclusion

L'utilisation d'un modèle de simulation régionale de type Olympe trouve toute son expression d'utilité comme support dans la négociation au travers de la réaction des différents acteurs face à de nouvelles situations. L'étude de la réaction des acteurs, c'est-à-dire l'analyse des impacts de leurs comportements sur les autres acteurs et, par agrégation sur l'ensemble du système étudié, concrétise une avancée dans l'émergence de facteurs de négociation et l'évaluation des limites d'actions. De fait, elle contribue à la construction de règles de comportements. Ainsi, suite à diverses expériences de modélisations territoriales et à la confrontation de scénarios d'évolution avec les acteurs concernés, le prolongement de la démarche conduit par la suite à élaborer un jeu d'acteurs permettant de mettre en situation de décision les acteurs d'une négociation. Nous retrouvons, ici, une démarche d'apprentissage « virtuelle » afin de mieux agir sur le « réel ». Une telle approche devrait permettre la mise en place d'une réflexion prospective tant en termes de dynamique des aménagements devant redéfinir les règles de l'offre face à une nécessité de cerner les dynamiques de demande en fonction d'hypothèses d'évolution des systèmes dans un contexte économique donné. Le modèle ne se situe en aucun cas dans une approche normative, mais propose une base de simulation pour construire une réflexion prospective et orienter les politiques économiques et d'aménagement.

Le calage et la validation du modèle multi-agents ne correspondent pas aux opérations classiques du fait du grand nombre de paramètres en jeu (Barreteau, 1998). La plupart des étapes de validation décrites par Rykiel (1996) ont permis d'accréditer le modèle Sinuse, sachant que valider revient à démontrer que le

modèle fournit des résultats avec une précision suffisante par rapport aux intentions d'utilisation (Lewis, 1993). En conclusion la modélisation du système par les SMA nous a permis de mettre en évidence le lien entre une dynamique globale et une multitude d'interactions individuelles et de formaliser un système extrêmement complexe, en respectant sa « structure objectale » et la variété de ses descripteurs (Ferrand et Deffuant, 1998). 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).

Références bibliographiques

ALLAN J. A., 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. I.B. Taurus Publishers, London.

ATTONATY J.M., LE GRUSSE Ph, LE BARS M. 2000. Toward new instruments to help negotiation concerning irrigation. International Symposium of Intelligent Information Technology 2000 (ISIAIT 2000), December 1-4, Beijing, China.

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., BOUSQUET F., 1999. Jeux de rôles et validation des systèmes multi-agents. *In* Ingénierie des systèmes multi-agents. Hermès Sciences Publications, Paris, p. 67-80.

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., 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., 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, p. 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, Tunis, Tunisie, 15 p

CHEMAK F, LE GRUSSE Ph (1998). Modèle de simulation et aide à la négociation dans un périmètre irrigué tunisien. Communication et actes du colloque de la SFER sur l'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde, Montpellier, 19 et 20 Novembre 1998.

CHAIEB 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., DEFFUANT G., 1998. Trois apports potentiels des approches « multi-agents » pour l'aide à la décision publique. *In* Gestion des territoires ruraux.

FEUILLETTE S., LE GOULVEN P., 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., BOUSQUET F., 2000. SINUSE, un outil d'exploration des interactions entre une nappe et ses usagers. *In* séminaire international GIRN-ZIT, Bamako.

- FEUILLETTE S., BOUSQUET F., LE GOULVEN P., 2003. SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. *Environmental Modelling and Software*, 18 (5) : 413-427.
- HORCHANI A., 1995. Gestion des ressources en eau en Tunisie. Agriculture de Tunisie.
- LE GRUSSE Ph , 2001- Du local au global les dynamiques agro-alimentaires territoriales face au marché mondial. Quels instruments d'aide à la décision pour l'élaboration de Stratégies territoriales ? Options méditerranéennes Série B Etudes et recherche numéro 32. Les filières et marchés du lait et dérivés en Méditerranée. Méthodologies de recherche.
- 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.), p. 632-636. Society for Computer Simulation International, Ecole normale supérieure, Lyon.
- 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 économiques de Montpellier I, Montpellier.
- NAZOUMOU Y., 1996. Modélisation de la recharge artificielle des nappes de la plaine de Kairouan. Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunis.
- NAZOUMOU Y., BESBES M., 2001. Recharge assessment and groundwater modeling in arid conditions. Cas study at Kairouan, Tunisia. *In 6^e Assemblée scientifique de l'IAHS* (H. Gehrels, ed.), Maastricht.
- PALMER-JONES R., 1997. Groundwater management in South Asia : what role for the market ? *In Water : economics, management and demand* (Melvyn Kay, ed.), p. 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 assessment 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).