

# Sinuse, un outil d'exploration des interactions distribuées entre une nappe et ses usagers

**Sarah Feuillette**  
Modélisatrice

**François Bousquet**  
Modélisateur

**Patrick Le Goulven**  
Hydrologue

L'objectif de cette contribution est de présenter un modèle destiné à l'exploration de la dynamique entre une ressource en eau souterraine et ses usages, dans l'objectif de rechercher des voies de gestion par une maîtrise de la demande. Le cas d'étude de la nappe de Kairouan, en Tunisie centrale, représente un archétype des nappes en accès libre surexploitées.

L'observation de liens multiples et forts entre usages et ressource *via* les stratégies des différents acteurs nous a conduit à adopter une démarche systémique centrée sur les interactions, tant pour mener le travail de terrain que pour formaliser les données collectées. Les premières recherches de terrain ont montré que le système est caractérisé par un grand nombre d'éléments spatialisés, déterminants dans les processus qui nous intéressent et par *plusieurs types d'interactions simultanées usagers/usagers et usagers/nappe, distribuées dans le temps et dans l'espace – dont il est par conséquent difficile de prévoir le jeu*. Nous faisons l'hypothèse que ces interactions ont un impact important sur la

dynamique globale et que leur simulation dans un monde artificiel, reconstitué en laboratoire, permet d'explorer la dynamique du système : c'est l'expérience qui a été réalisée avec la construction du modèle multi-agents « Sinuse » (*Simulation des interactions entre la nappe et les usages de l'eau*).

Nous présentons en premier lieu la problématique qui a motivé notre travail et la démarche que nous avons adoptée, puis la structure du modèle Sinuse, et enfin son fonctionnement.

## I Problématique et démarche

### *Le problème : la gestion par la demande d'une nappe surexploitée*

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 du fait de sa surexploitation. L'abaissement se fait ressentir sur l'ensemble de la zone et s'est accru ces dernières années (il est actuellement de 0,7 mètres par an en moyenne). Les prélèvements sont destinés à l'irrigation à hauteur de 80 %. Les usages agricoles sont alimentés en eau par des forages collectifs desservant des périmètres d'irrigation, et surtout par des puits individuels. Bien qu'ils soient majoritaires, ces derniers sont très mal connus. Pour tenter d'enrayer la surexploitation, les autorités sont d'abord intervenues sur l'offre à travers la gestion des barrages qui retiennent les oueds alimentant le système, puis sur la demande, en instaurant une « zone de sauvegarde », censée contraindre la construction de nouveaux captages. Mais l'offre demeure insuffisante et la loi est contournée par les agriculteurs : la nappe est en accès libre *de facto* et la surexploitation se poursuit. D'où l'intérêt d'une étude approfondie portant sur l'exploration de nouvelles voies de gestion de la demande.

Plusieurs types d'instruments de gestion de la demande sont répertoriés pour améliorer l'efficacité de la distribution et/ou réallouer la ressource en eau (Montginoul, 1998 ; Strosser, 1997 ; Ollagnon, 1990). Mais lorsque la ressource en eau est un aquifère

en accès libre, *les gestionnaires ne maîtrisent pas l'allocation de l'eau* et se trouvent donc confrontés aux problèmes suivants (Laurent, 1993) :

- le caractère invisible de la ressource qui rend difficiles (i) sa délimitation, (ii) l'émergence d'une gestion commune, (iii) l'observation des résultats d'actions de gestion sur la nappe ;
- l'extension spatiale de la ressource et l'accès libre des usagers ;
- la complexité du système aquifère et la méconnaissance de son fonctionnement hydrodynamique.

On trouve néanmoins des nappes gérées « en bien commun » (Laurent, *ibid.* ; Blomquist, 1992 ; Anda-Irrimieux, 1999), par des marchés de l'eau (Palmer-Jones, 1997), ou par des quotas individuels (cas de la nappe de Beauce). Quel que soit l'instrument de gestion envisagé, toute intervention requiert une bonne connaissance du système ressource/usages (Burke *et al.*, 1999).

## Démarche adoptée

Notre travail a été effectué au sein du programme pluridisciplinaire franco-tunisien Mergusie<sup>1</sup>, qui étudie la gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant de l'oued Merguellil. L'étude approfondie des interactions entre ressource et usages ne pouvant porter sur la totalité de la nappe du fait de sa taille (plus de 3 000 km<sup>2</sup>), notre travail a été réalisé sur une zone privilégiée de la nappe, l'exutoire de l'oued Merguellil, où la densité des puits privés semble particulièrement forte. Cette zone d'étude s'étend sur 25 000 ha, et comporte plus de 2 000 chefs d'exploitation, plus de 600 puits privés et 16 périmètres d'irrigation alimentés par des forages collectifs. Après avoir appréhendé l'histoire et le fonctionnement global de cette zone, nous avons étudié en détails ses entités et les processus en jeu les plus importants par rapport à la dynamique d'abaissement de la nappe.

Les analyses des chroniques piézométriques et des bilans volumiques ont montré que la nappe s'abaisse en réaction à l'accroissement des prélèvements par les puits.

Les conséquences de cet abaissement sur les comportements des agriculteurs, d'une part, et les impacts des stratégies individuelles

---

<sup>1</sup> Pour Merguellil : ressources, gestion et usages intégrés de l'eau.

et des interactions entre agriculteurs, d'autre part, ont été étudiés sur la base d'enquêtes portant sur les stratégies des agriculteurs, réalisées selon deux modes complémentaires :

- une dizaine d'enquêtes approfondies auprès d'usagers types portant sur les caractéristiques de leur exploitation, (en particulier leurs prélèvements saisonniers et interannuels), leur stratégie et leur trajectoire ;
- et 272 enquêtes statistiques auprès d'un échantillon aléatoire stratifié de 10 % de la population.

Les résultats des enquêtes nous ont conduit à poser l'hypothèse suivante : tous les agriculteurs de la plaine de Kairouan ont un même objectif global d'acquisition ou d'extension de l'irrigation pour pallier l'aridité du climat.

Les stratégies mises en œuvre dans ce but dépendent de leurs conditions parcellaires, familiales, économiques, d'accès à la ressource et de voisinage :

- le parcellaire des agriculteurs fait partie des éléments qui conditionnent la possibilité et le coût d'accès à la ressource ;
- leur localisation dans la zone influence également leur comportement : ainsi les séquences où l'on voit un agriculteur prendre une parcelle en faire valoir indirect, y creuser un puits à ses frais puis restituer la parcelle aménagée au propriétaire au bout de plusieurs années, n'ont lieu que dans certaines zones ;
- leur voisinage immédiat est un indicateur sur la possibilité de faire un puits, un stimulant social et une source d'échanges de terre et d'associations permettant aux agriculteurs de s'affranchir des limites de leur exploitation.

Les données de terrain confirment donc bien l'importance de l'environnement spatial dans les interactions dynamiques entre agriculteurs et avec la ressource. Les choix de modélisation découlent de cette caractéristique.

### *Choix du type de modèle*

Les caractéristiques du système qui ont déterminé le choix du modèle se résument ainsi :

- diversité des types de processus en jeu (physiques, économiques, décisionnels) exprimant les interactions entre usagers et ressource et au sein du groupe des usagers ;

- distribution spatiale et temporelle de ces processus (hétérogénéité de la nappe, dispersion des agriculteurs, type de parcellaire, décisions tactiques et stratégiques) ;
- diversité des niveaux d'agrégation (parcelles, exploitations, périmètres irrigués, zones de la nappe) ;
- interactions locales entre les usagers et la nappe ;
- comportements non marchands (imitation) et importance des stratégies à long terme (creusage des puits) des usagers.

La complexité du système et son caractère distribué ont justifié une approche par « intelligence artificielle distribuée » (Lièvre et Traoré, 1998). Dans ce cadre, nous avons opté plus précisément pour une modélisation par les systèmes multi-agents (SMA), car ils permettent de représenter différentes entités autonomes interagissant dans un environnement et sont particulièrement adaptés pour aborder l'interaction de dynamiques écologiques et de dynamiques sociales (Bousquet *et al.*, 1996), surtout lorsque des comportements non marchands et des interactions sociales locales doivent être pris en compte. Dans le modèle Sinuse (Simulation des interactions entre une nappe et les usages de l'eau), programmé en langage orienté objet *Smalltalk* sur la plateforme de simulation *Cormas*<sup>2</sup> (Bousquet *et al.*, 1998), les différentes entités sont chacune un agent doué d'attributs et de processus propres. Une fois choisis les systèmes multi-agents pour la modélisation, de nombreuses options demeurent : quelles variables du système vaut-il mieux représenter en tant qu'objet ? Quels processus modéliser ? A quel niveau d'agrégation doit-on se tenir ? A quelle classe rattacher un processus lorsque le choix est ambigu ?

## Structure du modèle Sinuse

Le modèle Sinuse représente un schéma très simplifié et réduit du système étudié, tout en respectant les proportions des paramètres essentiels dans la mesure du possible, afin de retrouver la cohérence des phénomènes observés sur le terrain et de pouvoir utiliser efficacement les données collectées. La définition de

---

<sup>2</sup> Common-pool resources and multi-agent systems, programme développé dans l'environnement de programmation *Visualworks*.

l'espace du modèle se fait sur une grille rectangulaire de 40 cellules sur 60 cellules, chaque cellule représentant 1 hectare. La grille représente donc au total 2 400 hectares, soit environ 10 % en surface du système étudié. Le voisinage de chaque cellule est constitué par l'ensemble des 8 cellules adjacentes, les frontières de la grille étant considérées fermées. Une grille d'observation permet de représenter les différentes entités spatiales, définies pour la plupart à partir de cartes saisies au préalable. Le choix des entités est une étape déterminante pour la simulation des interactions à suivre. Le modèle Sinuse comporte trois types d'entités :

- des entités sociales, les exploitants, qui représentent les agriculteurs du terrain ;
- des entités spatiales plus ou moins agrégées, comme les zones de la nappe, les parcelles, les périmètres d'irrigation ;
- des entités passives (et situées) comme les puits, qui apparaissent et disparaissent au cours de la simulation (construction et abandon).

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

## *Représentation de la ressource*

Les caractéristiques de la ressource sont issues pour la plupart d'un traitement et d'une simplification des données fournies par l'équipe ressource de Mergusie, et d'une analyse des diverses études menées sur la nappe (Castany, 1968 ; Besbes, 1971 ; Besbes, 1975 ; Besbes et de Marsily, 1976 ; Chaieb, 1990 ; Nazoumou et Besbes, sous-presse...).

La différenciation spatiale de la nappe de Kairouan a conduit à son découpage en deux zones d'alimentation et de paramètres hydrogéologiques différents, chacune étant divisée respectivement en 2 et 3 zones de profondeurs différentes, selon un gradient croissant Est-Ouest. La géométrie lenticulaire de la nappe est prise en compte implicitement dans les processus de construction d'un puits : la probabilité d'échec du creusage varie selon les zones de la nappe pour symboliser la présence de lentilles argileuses épaisses, et les zones sableuses des piémonts. Les deux zones de la nappe constituent les instances de la classe #ZoneNappe qui est un objet de type #AgrégatSpatial (fig. 1).

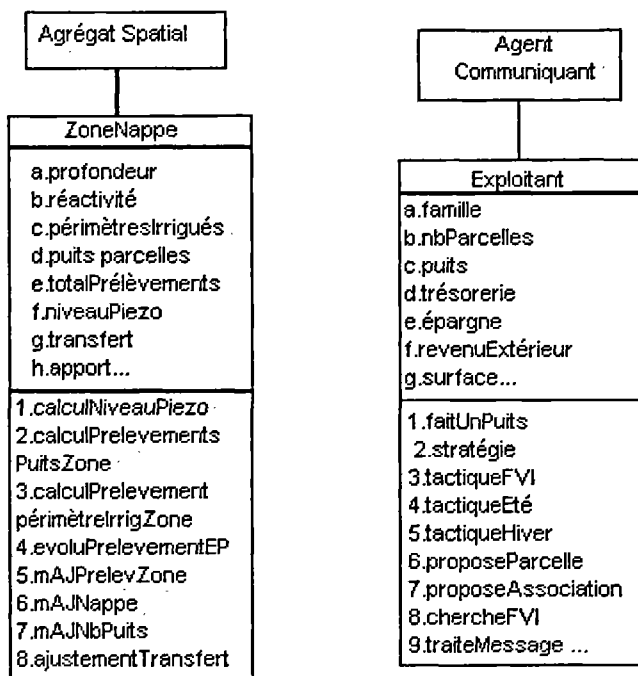


Figure 1  
Diagramme UML de la classe  
ZoneNappe.  
mAJ = mise à jour.

Figure 2  
Diagramme UML de la classe  
Exploitant.  
mAJ = mise à jour.

Le diagramme UML<sup>3</sup> présente les principales caractéristiques (attributs et procédures) de la classe #ZoneNappe. Retenons que les zones de la nappe sont dotées d'une profondeur, d'un niveau piézométrique, d'un paramètre de sensibilité au forçage, d'un apport en eau. Elles sont susceptibles de réagir aux apports ainsi qu'aux prélèvements, en fonction de leurs caractéristiques hydrogéologiques, et d'échanger entre elles selon le gradient piézométrique qui les sépare. Les zones de la nappe peuvent intégrer les prélèvements qui leur ont été transmis par les puits et les périmètres qui l'exploitent (procédures 2 et 3), et réajuster leur

<sup>3</sup> "Unified modelling language", selon les modèles proposés par Muller (1998).

profondeur en conséquence (procédure 6) en vertu d'un paramètre de sensibilité au forçage (attribut b). Des transferts souterrains ont lieu entre les zones en fonction de leurs différences de niveaux piézométriques, ce qui entraîne un réajustement des niveaux (procédure 8). Les prélèvements en eau potable sont définis selon une fonction d'évolution fidèle aux tendances actuelles, au niveau de chaque zone de la nappe (procédure 4). La nappe est alimentée par des apports moyens (attribut h) : écoulements souterrains sous-jacents au barrage et ruissellements des piémonts.

### *Représentation des usagers*

Nous avons fait le choix de ne représenter parmi les acteurs du système que les agriculteurs, qu'ils soient irriguants privés, en collectivité, ou non irriguants. Les 330 agriculteurs du modèle sont représentés par le même type d'agent #Exploitant, dont le comportement dépend d'une combinaison de facteurs locaux.

Les règles d'action de ces agents sont basées sur les enquêtes réalisées au cours de notre travail, sur un travail bibliographique de la zone étudiée, et sur des hypothèses. Les instances de la classe #Exploitant, entité sociale qui hérite de la super-classe #AgentCommuniquant (fig. 2), sont dotées d'attributs caractérisant leur situation familiale, leur parcellaire, leurs contraintes d'accès à l'eau, leur épargne. Elles sont susceptibles de prendre des décisions tactiques (prise ou don de parcelles en faire valoir indirect, assolement saisonnier de leur parcelle, diversification des revenus, etc.), ou stratégiques (construction d'un puits avec possibilité de s'associer avec un voisin si nécessaire, achat ou vente d'une parcelle, etc.).

Les exploitants peuvent s'envoyer des messages pour les échanges de parcelles et les associations. Les exploitants sont caractérisés par leur famille (attribut a), la structure de leur exploitation (attributs b, c, g), leur situation économique (attributs d, e, f). Ils peuvent prendre des parcelles voisines en faire-valoir indirect (procédures 3 et 8) ou s'associer à un voisin pour construire un puits (procédures 7 et 9) pour s'affranchir en partie des limites de leur condition. Ces interactions locales entre agriculteurs semblent avoir un impact sur la dynamique globale, que les simulations permettront d'évaluer.



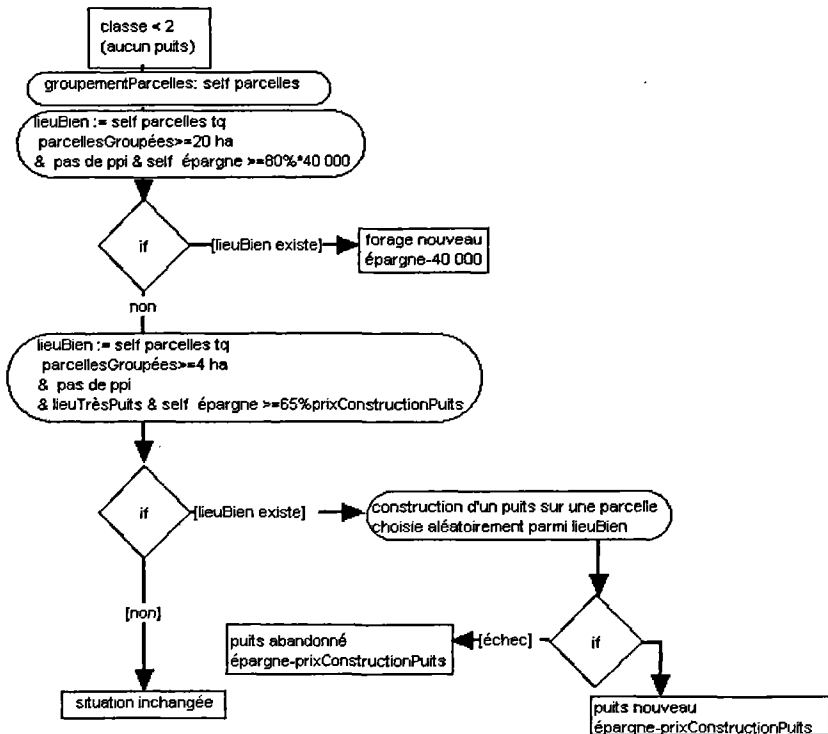


Figure 3  
 Diagramme UML de la procédure « faitUnPuits ».  
 LieuPuits = lieu intéressant pour la construction d'un puits.

Dans certaines conditions, l'exploitant peut vouloir construire un puits. Nous présentons ici la procédure de construction d'un agent qui n'a initialement aucun puits (fig. 3). Cet agent regroupe d'abord ses parcelles adjacentes de manière à obtenir une surface suffisante, afin de rentabiliser la construction. Il ne s'engage dans la construction d'un forage profond que dans certaines conditions de surface et d'épargne. Dans le cas contraire, il sélectionne les groupes dont les parcelles sont aptes à la construction du puits. Elles doivent pour cela remplir plusieurs conditions :

- la parcelle sur laquelle se construit le puits ne doit pas avoir été irriguée depuis au moins un an ;
- son voisinage (au plus d'ordre 2) doit comporter des puits dont les propriétaires réussissent (ce qui se traduit par un niveau de revenu fixé à 1 000 dinars tunisiens), ce facteur exprimant

l'importance de la pression sociale, du phénomène d'imitation, et indiquant un accès probable à la nappe ;

– son voisinage (d'ordre 1 et d'ordre 2) ne doit pas comporter de puits abandonné ;

– l'exploitant doit disposer de 65 % au moins du coût potentiel de construction, lequel est connu grâce à la profondeur des puits voisins ;

– si la parcelle est en petit périmètre irrigué (PPI), la construction reste justifiée à condition que le rapport entre le prix de l'eau et le coefficient d'efficacité soit élevé (le seuil a été fixé à 0,1, en référence au prix actuel de l'eau et au plus petit coefficient d'efficacité).

S'il possède des parcelles remplissant ces conditions, l'exploitant en sélectionne une aléatoirement et y construit son puits. Dans la réalité, cette sélection dépend de la combinaison de plusieurs paramètres difficiles à prendre en compte ici (attachement à la terre, qualité du sol, éloignement du domicile...), dont la hiérarchie varie suivant les individus. La construction d'un puits peut déboucher sur un échec, selon la profondeur d'accès de la nappe (au-delà de 70 m, le creusage devient techniquement difficile) et en fonction d'une probabilité représentant la structure lenticulaire de la nappe (présence de lentilles imperméables infranchissables ou au contraire de bancs de sable).

### *A l'interface entre ressource et usagers : les parcelles, les puits et les périmètres irrigués*

Les interactions du système qui semblent importantes par rapport à la question étudiée, à l'intérieur du groupe des exploitants et entre exploitants et ressource, mettent en jeu :

– les parcelles des exploitants (qui conditionnent leur accès et leur demande en eau) ;

– et les deux types d'accès à l'eau que sont les puits et les périmètres collectifs irrigués. Ces derniers sont caractérisés par un forage collectif, un prix de l'eau qui progresse au fil du temps et une plus ou moins bonne efficacité de la distribution.

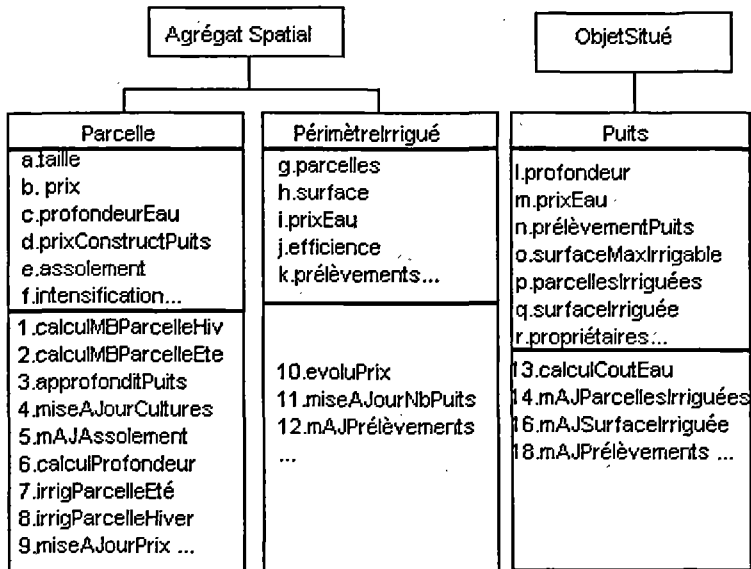


Figure 4  
Diagramme UML des classes #Parcelle, #PPI, #Puits.  
mAJ = mise à jour ; MB = marge brute.

Comme le montre la figure 4, les objets parcelles sont caractérisés par leur taille, leur prix (évolutif, selon l'accès à l'eau et le voisinage), leur assolement fixé à la saison (méthodes 4, 5, 7 et 8), leur accès à l'eau. Le prix de construction d'un puits dépend de la profondeur de l'eau (attribut c, remis à jour selon l'abaissement de la nappe par la méthode 6). Les marges brutes saisonnières sont calculées au niveau des parcelles (1 et 2). Les objets PPI ont un prix de l'eau (l, qui évolue annuellement selon la méthode 10) et intègrent les prélèvements des parcelles qui les constituent. L'efficience technique de la distribution du point d'extraction à la plante est caractérisée par (g) pour les parcelles, et remplacée par (k) en PPI, compte tenu des pertes en amont de la parcelle. Les objets PPI sont également caractérisés par une efficience de gestion (i), qui recouvre à la fois le type de gestion, la longueur des tours d'eau, la fréquence des pannes...

Les objets puits ont un coût d'extraction de l'eau (o) calculé selon la procédure 13 en fonction de la profondeur (n). Chaque saison, ils irriguent une ou plusieurs parcelles (15) selon leur capacité (q, qui dépend de leur équipement) et la stratégie de leur propriétaire.

Si la carte des périmètres irrigués a été saisie (tout comme celle de la nappe), le nombre important des parcelles (environ 800 étant donnée la surface représentée dans le modèle) et le nombre de contraintes à respecter (taille, dispersion) nous ont dissuadé de saisir cette information à partir d'une carte : il s'est avéré plus commode de générer un parcellaire automatiquement, en respectant la distribution des classes de taille, la cohésion des parcelles et leur distribution aléatoire dans l'espace. De même, le regroupement des parcelles en exploitations repose sur un algorithme contraint par les classes de taille observées sur le terrain, la proximité relative des parcelles et la distribution aléatoire des exploitations de tailles différentes sur la zone (rappelons que, dans le modèle, les exploitations ne sont pas des objets spatiaux mais simplement des unités de gestion). La localisation des puits à l'initialisation est également générée en respectant les données de terrain.

### *Les interactions entre ressource et usagers*

Les entités spatiales et sociales fonctionnent de manière autonome, chacune avec ses règles d'action, et interagissent entre elles (fig. 5). Les exploitants procèdent à des échanges fonciers et à des décisions d'assolement. L'irrigation des parcelles<sup>4</sup> entraîne un prélèvement au niveau des points d'eau qui transmettent l'information 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 peut donner lieu à un approfondissement des puits (sous réserve de non endettement). Les résultats de chaque campagne agricole sont calculés et en fin d'année, selon sa trésorerie, son épargne et sa situation, l'agriculteur peut envisager la construction d'un puits (au besoin en s'associant avec un voisin) ou bien l'achat ou la vente d'une parcelle. Compte-tenu des nombreux processus formalisés et des incertitudes sur le système, le modèle est régi par une quarantaine de paramètres, parmi lesquels des paramètres

---

<sup>4</sup> Les demandes en eau des cultures reposent sur une estimation des besoins en eau calculée par bilans hydriques à partir de l'évapotranspiration locale, des coefficients culturaux, de l'efficacité moyenne des systèmes de distribution, et des enquêtes effectuées localement.

économiques (aléa sur la valorisation de l'épargne, prix des intrants et produits agricoles, seuils d'endettement pour la vente de parcelle...), des paramètres sociaux (nombre minimal d'actifs pour la construction d'un puits, portée des interactions...), des paramètres techniques (profondeur limite du creusage, capacité moyenne d'irrigation des puits...) et des paramètres liés au milieu (transmissivité et porosité des zones de la nappe, apports à la nappe, climat...). La modélisation de type SMA permet en effet de représenter des systèmes comportant un grand nombre de paramètres. Ces paramètres sont inventoriés et soumis à une analyse de sensibilité partielle (Feuillette, 2001).

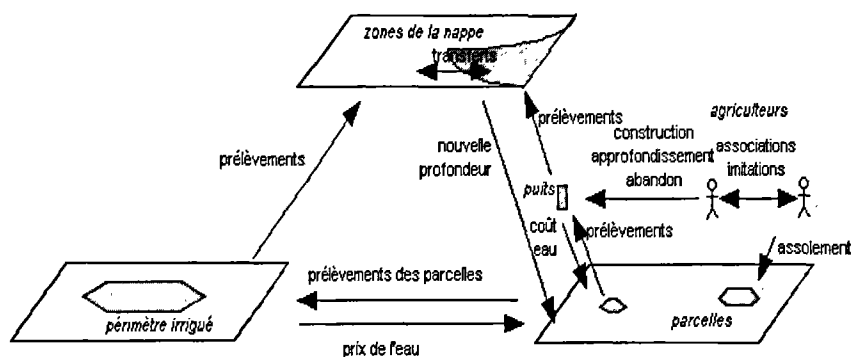


Figure 5  
Principales interactions entre entités du modèle Sinuse.

## Le modèle en fonctionnement

### Déroulement d'un pas de temps

La figure 6 représente le fonctionnement simplifié<sup>5</sup> du modèle en UML. Par cet algorithme, le contrôleur de la simulation ordonne le déroulement d'un pas de temps, en « passant la main » à tour de rôle aux différentes classes, qui actionnent leurs méthodes propres, parfois sous conditions, et dans un ordre chronologique donné.

<sup>5</sup> Les envois de messages intra-procéduraux et la mise à jour des variables ne figurent pas sur ce schéma.

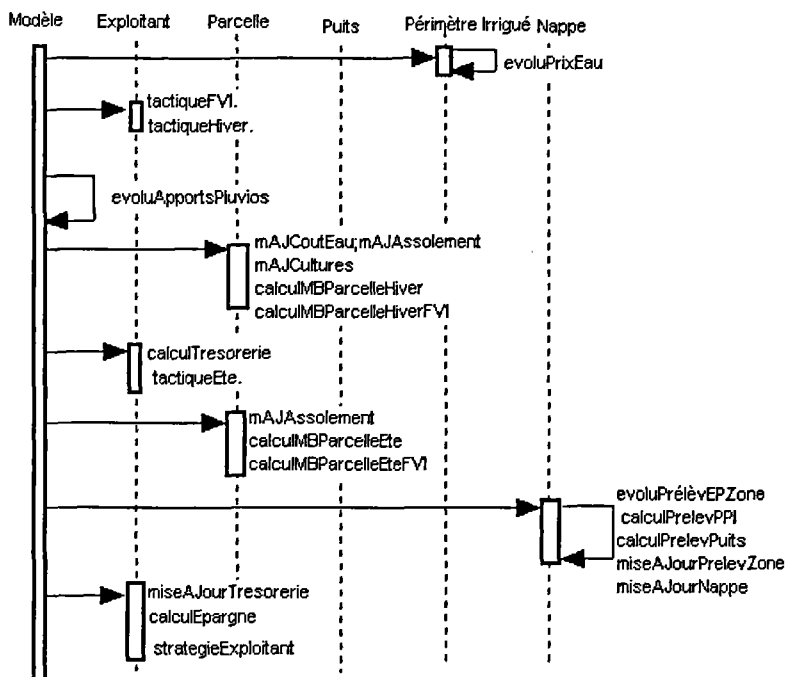


Figure 6

Diagramme de séquence simplifié du modèle Sinuse.

Chaque classe est figurée par une ligne verticale en pointillés ; l'activation des objets de la classe est matérialisée par un rectangle sur sa ligne de vie. Les objets communiquent en échangeant des messages représentés au moyen de flèches horizontales, orientées de l'émetteur vers le destinataire.

mAJ = mise à jour ; MB = marge brute ; EP = eau potable.

On retrouve dans la figure 6 les procédures schématisées dans la figure 5 :

- un pas de temps d'une année découpé en deux saisons, avec des règles d'action tactiques des exploitants (une règle annuelle d'échange foncier, « tactiqueFVI », et des règles saisonnières d'irrigation, « tactiqueHiver » et « tactiqueEte ») ;
- l'abaissement des zones de la nappe en réaction aux prélèvements, « miseAJourNappe », qui entraîne implicitement l'approfondissement du puits si nécessaire ou son abandon ;
- un investissement stratégique en fin d'année ou au contraire une décapitalisation, « strategieExploitant », selon le niveau d'épargne ;

– des possibilités d'interactions entre agriculteurs, enclenchées par la procédure « stratégie Exploitant » (association pour la construction d'un puits, vente ou achat d'une parcelle, association foncière à moyen terme pour la construction d'un puits).

Les simulations sont lancées sur 30 pas de temps. En effet, les scénarios simulés ne peuvent être interprétés au-delà de cette période, des bouleversements techniques, économiques ou politiques ayant toute chance de survenir, et le système devenant sensible au-delà du fait de certains processus non pris en compte (morcellement des parcelles par héritage).

### *Evolution du système au cours d'une simulation*

La dynamique d'évolution des puits sur 4 pas de temps est illustrée par la figure 7. Les puits sont initialement concentrés dans les zones peu profondes de la nappe. La succession de ces images permet d'observer le processus d'apparition des puits : la construction de puits étant encouragée par la présence de puits dans le voisinage immédiat, la progression des puits se fait plus par densification de zones déjà occupées que par colonisation de zones pionnières. Un coefficient d'aversion au risque permet d'exprimer la faible propension à construire dans les zones non colonisées que l'on observe dans la réalité.

Ainsi, parmi les nombreux puits qui se construisent au fil de ces quatre années, un seul apparaît en zone vierge (à la deuxième image), aussitôt suivi d'autres constructions de puits dans son voisinage. Le rythme d'apparition des puits ralentit très vite du fait des contraintes de construction (parcellaire, épargne, voisinage) et de l'abaissement de la nappe (augmentation des coûts de construction). Deux puits sont abandonnés suite à leur approfondissement en zone peu favorable.

Le suivi graphique d'indicateurs globaux tels que la profondeur moyenne de la nappe, le nombre de puits, le nombre d'exploitant en faillite, le nombre de terres échangées, permet d'analyser l'évolution du système au cours des simulations et d'évaluer la cohérence des processus (Feuillette *et al.*, 2000). Le traçage au cours du temps des agents et des objets permet également de suivre le déroulement d'une simulation, et peut notamment être utilisé pour vérifier la cohérence des trajectoires individuelles.

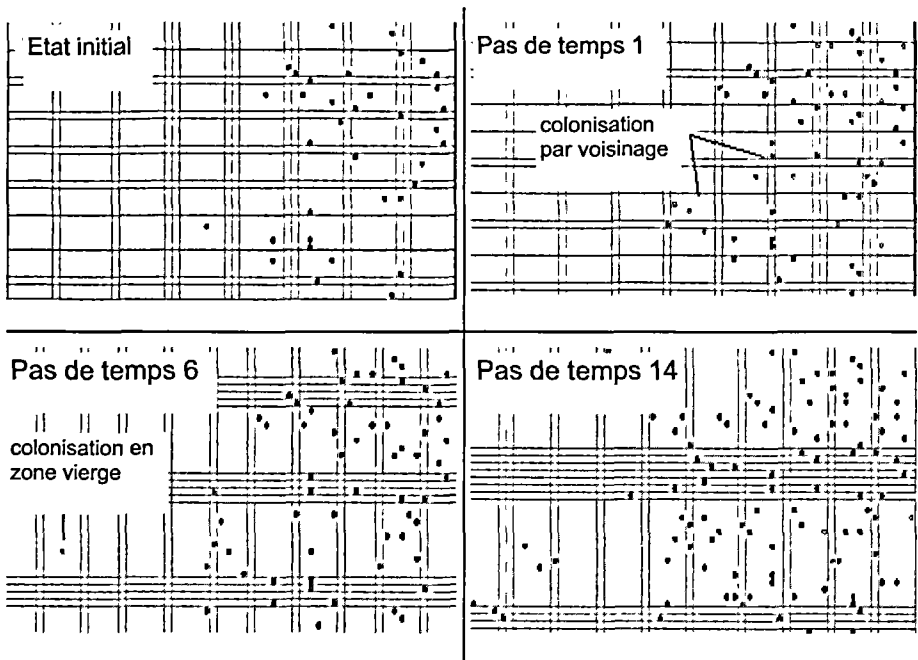


Figure 7  
 Visualisation de la dynamique d'apparition des puits  
 sur l'interface spatiale de Cormas.  
 Les puits anciens figurent en noir, les nouveaux en grisé.

## Conclusion et discussion

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 et de la formalisation de comportements humains (Barreteau, 1998). Néanmoins, le modèle Sinuse a été soumis à une série de tests inspirés des procédures classiques de vérification et validation, afin d'être « accrédité » (Feuillette, 2001). Ces opérations ont notamment permis de montrer (i) que l'évolution des principaux indicateurs correspond bien aux tendances observées sur le terrain ; (ii) que malgré sa variabilité aléatoire, le système modélisé suit toujours les mêmes trajectoires d'évolution ; (iii) que le modèle réagit correctement à différents tests de mise en situations



extrêmes. Ces expériences ont donc conduit à accroître la confiance du modélisateur et des usagers potentiels dans le modèle. Par ailleurs, elles ont révélé certaines distorsions du modèle par rapport à la réalité, dont l'origine est attribuée à différentes incertitudes dans la formalisation des comportements économiques des agents, qui reposent surtout sur des hypothèses, faute d'un retour post-modélisation sur le terrain. Ces comportements gagneraient à être soumis à la critique des exploitants, en d'autres termes à une « validation sociale » (Barreteau et Bousquet, 1999).

Le modèle Sinuse mériterait donc d'être encore amélioré par l'approfondissement des connaissances de plusieurs paramètres, notamment des règles de comportement des acteurs. Mais tel quel, il permet déjà d'explorer la sensibilité du système aux paramètres et aux interventions. Notre démarche nous a permis jusqu'alors :

- d'interroger les données efficacement pour faire émerger d'une multitude de facteurs les variables et les comportements les plus importants relativement à la question ;
- de rendre compte du lien entre une dynamique globale et une multitude d'actions et d'interactions individuelles ;
- de formaliser un système extrêmement complexe, en respectant la structure objectale et la variété des descripteurs (Ferrand et Deffuant, 1998).

En cela, le modèle a constitué une aide considérable au traitement des données, à la compréhension du système et au transfert des connaissances acquises. La simulation de plusieurs types de scénarios d'intervention montre que ce modèle est susceptible d'éveiller des questions sur les effets inattendus de certains outils de gestion de la demande (Feuillette *et al.*, 2000). De plus, il permet d'explorer les situations les plus improbables ou de simuler des scénarios fictifs de changement de règles. Par la suite, il peut donc constituer un support intéressant pour mener des discussions sur la gestion du système, entre les directions techniques du Ministère de l'agriculture et les institutions locales.

## Bibliographie

- Anda-Irrimieux, 1999 – *Gestion collective d'une ressource commune : des "droits à l'eau" à la gestion collective de l'eau*. Doc. Association nationale pour le développement agricole, Paris, études de cas, t. 1 et 2.
- Barreteau O., 1998 – *Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et mode d'organisation*. Thèse doct., univ. Montpellier, Engref.
- Barreteau O., Bousquet F., 1999 – « Jeux de rôles et validation des systèmes multi-agents ». In Gleizes M.-P., Marcenac P. (éd.) : *Ingénierie des systèmes multi-agents*, Hermès Sciences publ., Paris : 67-80.
- Besbes M., 1971 – *Note sur la géométrie du réservoir profond de la plaine de Kairouan*. Doc. DRE, Tunis.
- Besbes M., 1975 – *Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques*. Doc. DRE, Tunis.
- Besbes M., de Marsily G., 1976 – « L'analyse d'un grand réservoir aquifère en vue de sa modélisation ». In : *L'hydrologie des grands bassins sédimentaires*, conf. AISH, Budapest.
- Blomquist W., 1992 – *Dividing the Waters - Governing Groundwater in Southern California*. ICS Press, San Francisco.
- Bousquet F., Barreteau O., Mullon C., Weber J., 1996 – « Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables ». In : *Quel environnement au XXI<sup>e</sup> siècle ?* coll. int., sept. 1996, Abbaye de Fontevraud.
- Bousquet F., Bakam I., Proton H., Le Page C., 1998 – CORMAS: common-pool resources and multi-agent systems. *Artificial intelligence*, lecture notes, 1416 : 826-838.
- Burke J.-J., Sauveplane, C., Moench M., 1999 – Groundwater management and socio-economic responses. *Natural Resources Forum*, 23 : 303-313
- 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*. Doc. Orstom, Tunis, 15 p.
- Chaieb H., 1990 – *Modèle de Kairouan : effet de la fermeture des barrages et des lâchures d'eau dans les lits des oueds sur la nappe de Kairouan*. Doc. DGRE, Tunis
- Ferrand N., Deffuant G., 1998 – « Trois apports potentiels des approches "multi-agents" pour l'aide à la décision publique ». In : *Gestion des territoires ruraux, connaissances et méthodes pour la décision publique*, Cemagref, Clermont-Ferrand, 1 : 373-385.
- Feuillette S., 2001 – *Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource/usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale*. Thèse doct., univ. Montpellier II.
- Feuillette S., Garin P., Bousquet F., Le Goulven P., 2000 – « Un modèle d'exploration des dynamiques nappe-usages pour la gestion intégrée d'une nappe surexploitée ». In : *Hydrologie des régions méditerranéennes*, actes de

colloque, IRD-Unesco, 11-13 octobre, Montpellier.

Laurent A., 1993 –  
*La gestion en bien commun des eaux souterraines : La nappe des sables astiens de Valras (Hérault), une opération pilote en Languedoc-Roussillon*. Thèse doct., univ. Montpellier II.

Lièvre P., Traoré M. K., 1998 –  
« Prospective en milieu rural, modélisation des systèmes complexes et intelligence artificielle distribuée ». In : *Gestion des territoires ruraux, connaissances et méthodes pour la décision publique*, Cemagref, Clermont-Ferrand : 343-357.

Montginoul M., 1998 –  
« Des instruments économiques pour la gestion de l'eau : concurrence ou complémentarité ? »  
In : *L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde*, colloque SFER, 19-20 novembre 1998, Montpellier.

Muller P.-A., 1998 –  
*Modélisation objet avec UML*. Eyrolles, Paris

Nazoumou Y., Besbes M., sous-presse –  
"Recharge assessment and groundwater modelling in arid conditions. Case study at Kairouan, Tunisia". In Gehrels H. (éd.): *actes 6<sup>e</sup> assemblée scientifique AISH*, 18-27 Juillet 2001, Maastricht.

Ollagnon H., 1990 –  
« Stratégie patrimoniale pour les gestion des ressources et des milieux naturels - Approche intégrée de la gestion du milieu rural ». In : *Gérer la nature* : 195-222

Palmer-Jones R., 1997 –  
"Groundwater management in South Asia: what role for the market?" In Melvyn Kay L. S. (éd.): *Water: economics, management and demand*, E & FN Spon : 381-389.

Strosser P., 1997 –  
*Analyzing alternative policy instruments for the Irrigation sector- An assessment of the potential for water market development in the Christian sub-division, Pakistan*. PhD thesis, Wageningen.