État de l'art : Modéliser les inefficacités de l'exploitation privée des ressources en eau souterraine ?

Modeling the inefficiencies of private groundwater resources extraction?

Elsa Martin

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/economierurale/3099>

DOI : 10.4000/economierurale.3099

ISSN : 2105-2581

Éditeur

Société Française d'Économie Rurale (SFER)

Édition imprimée

Date de publication : 30 juillet 2011

Pagination : 50-59

ISSN : 0013-0559

Référence électronique

Elsa Martin, « État de l'art : Modéliser les inefficacités de l'exploitation privée des ressources en eau souterraine ? », *Économie rurale* [En ligne], 324 | juillet-août 2011, mis en ligne le 20 juillet 2013, consulté le 22 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/economierurale/3099> ; DOI : 10.4000/economierurale.3099

Modéliser les inefficacités de l'exploitation privée des ressources en eau souterraine ?

Elsa MARTIN • Centre d'économie et sociologie appliquées à l'agriculture et aux espaces ruraux (CESAER), UMR INRA, AgroSup Dijon,
elsa.martin@dijon.inra.fr

Les aspects économiques de la gestion quantitative de la ressource en eau souterraine ont donné lieu à une importante littérature modélisée. De tels modèles mathématiques se basent sur des hypothèses simplificatrices et éloignées de la réalité. Pour l'auteure, ils ne sont donc pas particulièrement clairs et performants. Dans ce cas, quelles sont les autres possibilités qui s'offrent au modélisateur ? Comment mieux prendre en compte certains phénomènes économiques dans la modélisation des inefficacités de la gestion privée de l'eau souterraine ? Le choix de l'auteure est de proposer une autre approche pour une exploitation optimale de la ressource (NDLR).

Introduction

Une partie de la littérature sur les aspects économiques de gestion quantitative de l'eau souterraine est formalisée mathématiquement. Pour admettre des solutions interprétables, ces modèles passent nécessairement par une simplification de la réalité. Leur objectif est de mieux comprendre et quantifier les phénomènes économiques à l'œuvre en les isolant. Le problème est que la sélection desdits phénomènes conditionne fortement les préconisations en termes de politique économique. La simplification de base opérée par les économistes consiste à considérer que les nappes d'eau souterraine sont des baignoires à fond plat ; la variabilité naturelle des systèmes aquifères réels est aussi purement et simplement omise, ce qui peut s'avérer particulièrement ennuyeux quand la pertinence des comportements mis en évidence en dépend. À supposer que de telles réductions sont valides et constituent une simplification adéquate de la réalité traitée, quelles sont les possibilités de représentation des phénomènes économiques qui s'offrent au modélisateur dans un tel cadre ?

Que signifient-elles exactement ? Ce sont les questions auxquelles nous souhaitons répondre dans cet rubrique.

Plus précisément, nous allons nous concentrer sur la modélisation mathématique des inefficacités d'une exploitation privée de l'eau souterraine. Ce choix présuppose que cette exploitation est inefficace et qu'il existe une exploitation optimale de l'eau souterraine. Une discussion de ces hypothèses qui sont à la base de la littérature analysée sera proposée en conclusion de ce travail. Afin de caractériser les correctifs à mettre en œuvre pour décentraliser l'optimum économique qui correspond à la solution d'un planificateur central, deux situations sont généralement comparées : celle correspondant au cas centralisé (socialement optimal) et une autre au cas privé (généralement inefficace). La différence entre les deux permet de mettre en évidence ce que nous appellerons les inefficacités de l'exploitation privée de l'eau souterraine. La caractérisation de ces inefficacités peut varier d'un auteur à l'autre ; aussi étrange que cela puisse paraître, l'interprétation d'une même formulation mathématique

peut, elle aussi, être différente. Ainsi, par exemple, Provencher et Burt (1993) expliquent que des auteurs comme Gisser et Sanchez (1980) ou Negri (1989) capturent mathématiquement un effet externe dit de coût de pompage, mais l'interprètent improprement comme un effet externe de stock. De même, Burness et Brill (2001), Griffin (2006) ou Koundouri (2004) soulignent que la plupart des travaux relatifs aux aspects économiques de la gestion de l'eau souterraine confondent les inefficacités liées à la force de la compétition entre les utilisateurs de la ressource avec celles liées aux défaillances de marché. C'est plus particulièrement le cas d'un des travaux pionniers en la matière : celui de Gisser et Sanchez (*op. cit.*). Le cas dit privé y est désigné comme étant compétitif alors que ce sont simplement les choix d'un propriétaire unique myope qui sont modélisés.

La littérature modélisée relative aux aspects économiques de la gestion quantitative de la ressource en eau souterraine n'est donc pas particulièrement claire quant aux inefficiences d'une exploitation privée de la ressource. Le principal apport de ce travail consiste à clarifier cette littérature afin de mieux cerner le degré de pertinence de ces modèles pour représenter des situations réelles. Malgré les intuitions simples et claires généralement fournies par les modèles statiques, la plupart des modèles représentant l'extraction de ressources en eau souterraine est dynamique. L'argument généralement avancé est que de tels modèles sont plus réalistes dans la mesure où le renouvellement du stock d'eau souterraine prend du temps. Ces modèles sont toutefois nettement plus complexes à résoudre et échouent toujours à prendre en compte des phénomènes comme la variabilité naturelle des nappes d'eau souterraine, par exemple. À l'instar de Herr *et al.* (1997) qui démontrent expérimentalement que la dissipation des rentes liées à l'exploitation de l'eau souterraine est aggravée par la dépendance temporelle de

l'appropriation de cette ressource. Nous proposons de distinguer effets externes statiques et inefficacités dynamiques afin de mieux cerner les apports d'une modélisation dynamique.

La première section sera donc relative à l'explicitation de la formalisation des effets externes statiques de l'exploitation privée de l'eau souterraine et la seconde à celle des inefficacités dynamiques.

Les effets externes statiques de l'exploitation de l'eau souterraine

Le fait que les agents privés exploitent directement l'eau souterraine à des coûts généralement inférieurs aux coûts réels de la ressource (qui devraient par exemple inclure sa rente de rareté) conduit à sa surexploitation¹ par rapport à un niveau qui serait socialement optimal. L'incapacité des marchés à refléter la valeur réelle de cette ressource naturelle rend ici son exploitation inefficace².

Dans un cadre déterministe dynamique, Provencher et Burt (*op. cit.*) proposent de distinguer deux effets externes de l'exploitation de l'eau souterraine sur lesquels nous allons revenir dans un cadre plutôt statique pour commencer : l'effet externe de coût de pompage et celui de stock. Selon la typologie proposée par Smith (1969), tous deux seraient des effets externes de stock étant donné qu'ils sont dus à l'effet du stock d'eau sur les décisions de pompage des agents. Mais, comme l'expliquent Provencher et Burt, la façon de les modéliser peut permettre de les différencier. Même si de nombreux auteurs (voir par exemple Montginoul et

1. Tout comme Montginoul et Rinaudo (2009), nous retenons ici la définition de surexploitation comme une situation où les prélèvements sont tels qu'ils génèrent des externalités négatives. Mais le lecteur est renvoyé à Petit (2004) pour des précisions relatives à cette notion.

2. Le terme marché ne fait pas forcément référence à une institution fonctionnant avec des prix.

Rinaudo, *op. cit.*) évoquent déjà l'existence de ce type d'effets externes, nous proposons de revenir sur leur définition précise.

1. L'effet externe de coût de pompage

En pompant une unité marginale d'eau souterraine, chaque usager affecte le coût auquel les autres utilisateurs pompent l'eau souterraine. En effet, le coût de pompage de cette ressource est principalement un coût en énergie qui dépend du niveau du stock d'eau souterraine : quand le stock augmente, la hauteur sur laquelle l'eau doit être relevée jusqu'à la surface diminue, ce qui induit des dépenses en énergie amoindries. Au final, les exploitants ont tendance à extraire trop d'eau parce que la décision de l'un d'entre eux de baisser son taux de pompage réduit les coûts de pompage de l'ensemble des autres sans qu'il ne soit rémunéré pour cette conservation. C'est ce qui est communément appelé dans la littérature sur l'eau souterraine l'effet externe de coût de pompage. Cet effet externe concerne l'ensemble des nappes d'eau souterraine mises à part celles qui affleurent la surface et pour lesquelles les coûts en énergie sont proches de zéro.

Cet effet externe a été introduit sous la dénomination plus générale d'effet externe de congestion par Brown (1974) et est lié au caractère de bien collectif de la ressource en eau souterraine : il est difficile d'en exclure l'usage, et sa consommation est rivale. Ainsi, autrement dit, la surutilisation est encouragée par le fait que des coûts réels d'entassement sont imposés par les utilisateurs les uns sur les autres, sans être reflétée par les décisions marginales d'utilisation. Dans un cadre statique, cet effet externe ne peut être présent que lorsque le nombre d'agents exploitant la ressource est supérieur à l'unité.

Le fait que les coûts de définition des droits individuels de propriété sur cette ressource sont importants empêche l'appropriation privée du bien. Ainsi chacun, pris individuellement, a intérêt à ne pas

participer à l'effort commun de préservation de la ressource. Ce comportement individualiste de sous-déclaration de son intérêt pour le bien est appelé comportement de « passer clandestin ». Ce concept d'effet externe de coût de pompage correspond donc en fait à une situation de dilemme du prisonnier dont le résultat central est que l'équilibre privé n'est pas engendré par la recherche du profit collectif maximum.

Provencher et Burt (*op. cit.*) avancent que la quasi-totalité des modèles mathématiques d'économie de l'eau souterraine de l'époque antérieure à leur article capture cet effet externe, mais l'interprète mal. Il serait en effet, selon eux, improprement confondu avec l'effet externe de stock sur lequel nous allons maintenant nous concentrer.

2. L'effet externe de stock

L'effet externe de stock apparaît lorsque la décision de pompage de chaque agent utilisant l'eau souterraine est contrainte par le stock d'eau souterraine. À l'inverse de l'effet externe de coût de pompage, cet effet disparaît donc quand le stock d'eau est infini. La « règle de capture », liée au fait que la ressource soit disponible en accès libre, gouverne ainsi l'allocation du stock d'eau souterraine, et un utilisateur ne peut prétendre à une unité du stock d'eau souterraine qu'en la pompant. Il peut s'avérer particulièrement important de distinguer ces deux types d'effets externes dans les zones dites humides où la ressource en eau souterraine est particulièrement abondante par rapport au niveau des extractions. Dans de telles situations, l'effet externe de stock n'est pas pertinent et ne doit pas être considéré.

Provencher et Burt ont-ils raison d'affirmer que les interprétations fournies, par des auteurs tels que Gisser et Sanchez (*op. cit.*) ou plus récemment, Burness et Brill (*op. cit.*), de leurs modèles mathématiques sont erronées car ils ne capturent qu'un effet externe de coût de pompage ? En se basant sur leur représentation mathématique de cet

effet externe, oui dans la mesure où de tels auteurs ne l'utilisent pas. Provencher et Burt écrivent la contrainte de stock comme :

$$S_t - x_t \geq 0$$

où S représente le stock d'eau souterraine disponible, et x les extractions. L'effet externe de stock est représenté par le multiplicateur de Lagrange associé à cette contrainte. L'effet disparaît donc quand la contrainte est stricte. Nous verrons dans la seconde section de ce travail en quoi cette représentation mathématique de l'effet de stock peut être améliorée dans un cadre dynamique avec libre entrée.

Cet effet externe est plus généralement appelé « externalité d'appropriation ». Haveman (1973), repris et complété par Newbery (1975), précise la différence entre la surexploitation liée à la congestion et celle liée à l'accès libre sans libre entrée. Tous deux expliquent que, pour ce qui est des ressources en accès libre, le fait que les quasi-rentes du producteur ne soient pas appropriables est à l'origine d'un coût négatif d'utilisation de ces ressources et à la production d'un *output* excessif par rapport à ce qui serait optimal pour la société.

La littérature sur l'utilisation conjointe de ressources en eau souterraine et de surface a mis en évidence un autre type d'effet externe appelé par Provencher et Burt l'effet externe de risque sur lequel nous allons maintenant revenir plus en détail.

3. L'effet externe de risque

Dans un cadre aléatoire où la disponibilité en eau de surface dépend des événements climatiques, la ressource en eau souterraine peut constituer une assurance contre les risques et ainsi jouer ce que Tsur et ses coauteurs (Tsur, 1990 ou Tsur et Graham-Tomasi, 1991) appellent un rôle tampon. Dans un cadre privé, un agent considère seulement le bénéfice privé de la réduction du risque, et échoue à extraire l'eau souterraine au taux socialement optimal.

Plus précisément, cet effet externe apparaît parce que le revenu risqué de tous les agents est affecté par le volume total du stock d'eau souterraine disponible pour le pompage. L'effet de la quantité totale d'eau souterraine présente dans le stock sur l'aspect risqué du revenu peut être mieux compris en considérant deux cas extrêmes. Quand le stock d'eau souterraine est complètement vidé, le revenu des agents peut être relativement variable, reflétant la variabilité de la recharge naturelle et de l'approvisionnement en eau de surface. D'un autre côté, quand le stock est plein et très peu cher à exploiter, le revenu des agents est indépendant des aléas liés à l'approvisionnement en eau de surface ; globalement, la ressource en eau n'est pas rare, même quand la sécheresse réduit l'approvisionnement en eau de surface. La conclusion que l'on peut tirer de ces cas extrêmes est que chaque unité additionnelle du stock d'eau souterraine disponible pour la consommation réduit le revenu risqué de tous les agents en augmentant le rôle de tampon contre le risque que joue la quantité totale d'eau souterraine disponible pour les pompes. Dans son processus de décision, un agent est supposé ne considérer que le bénéfice privé de la réduction du risque, et en conséquence il échoue à extraire l'eau souterraine au taux socialement optimal.

Nous proposons maintenant d'analyser ce que les modèles dynamiques peuvent apporter de plus que les modèles statiques en termes de compréhension des inefficacités privées de l'exploitation des ressources en eau souterraine.

Les inefficacités dynamiques d'une exploitation privée de l'eau souterraine

L'ensemble des effets externes statiques décrits précédemment se retrouve bien souvent dans les modèles dynamiques d'eau souterraine. Les références citées dans la section précédente sont d'ailleurs toutes

relatives à des modèles dynamiques. L'effet externe de risque est le plus direct à appréhender dans un cadre dynamique. Il tient au caractère périodique du revenu des agents : dans un tel cadre, chaque unité additionnelle du stock d'eau souterraine disponible pour la consommation future réduit le revenu risqué de tous les agents en augmentant le rôle tampon contre le risque que joue la quantité totale d'eau souterraine disponible pour les pompages futurs.

Pour ce qui est de l'effet externe de coût de pompage, extraire plus d'eau à une date t implique une baisse du stock et ainsi des coûts de pompage plus importants à la date $t+1$, quel que soit le nombre d'agents. Par conséquent, dans un cadre dynamique, cet effet externe peut aussi être évoqué dans le cas où seule la situation d'un agent représentatif est étudiée. Ceci est dû à la présence d'une défaillance de surescompte, sur laquelle nous reviendrons plus en détail par la suite. La dénomination d'effets stratégiques de long terme peut alors permettre de différencier le cas dynamique à un agent de celui avec deux agents.

Enfin, l'effet externe de stock se matérialise dynamiquement par le fait qu'en pompant une unité marginale d'eau souterraine à la période t , un utilisateur réduit l'ensemble des possibilités de pompage des autres usagers à la période $t+1$. L'équation évoquée précédemment demeure valable avec un programme intertemporel. Cependant, sur la base de la littérature sur les pêcheries, nous proposerons une autre possibilité de modélisation adaptée à cet effet lorsqu'il est complété par un phénomène de libre entrée.

1. La défaillance de surescompte

La défaillance de surescompte apparaît quand les agents opérant sur un marché le font en utilisant des taux d'escompte privés supérieurs à ceux de la société. L'hypothèse implicite, lorsqu'on souscrit à un tel raisonnement, est de considérer que le taux privé de préférence pour le présent est surévalué

par rapport au même taux social. Si l'on considère que les décisions destinées à poursuivre l'intérêt collectif sont prises dans le cadre d'un environnement où les marchés financiers déterminent ces taux privés (égaux au taux d'intérêt à l'équilibre), le taux de préférence social pour le présent doit être déterminé sur leur base. Mais alors pourquoi considérer qu'il existe une divergence entre le taux privé et le taux social telle que le premier est supérieur au second ?

L'argument est essentiellement d'ordre éthique, dans la mesure où il consiste à donner un poids non négligeable aux générations futures. En effet, un taux qui serait évalué sur la base du taux révélé par le marché courant le serait sur la base des préférences des individus intervenant sur ceux-ci. Mais qu'en est-il des générations futures ? Si elles pouvaient participer aux choix actuels, elles réduiraient certainement les taux de préférence pour le présent étant donné qu'elles sont plutôt concernées par les consommations futures de biens.

À la limite, un individu ayant un taux de préférence infini pour le présent est défini comme étant myope. En matière d'eau souterraine, un tel agent maximise le bénéfice retiré de l'utilisation présente de la ressource sans tenir compte de l'impact de ces extractions sur le niveau du stock (il ne prend pas en considération l'équation d'état gouvernant son évolution) : il extrait l'eau souterraine jusqu'à ce que son bénéfice marginal net courant soit égal à zéro. Cette hypothèse de myopie est le point de départ du travail empirique pionnier de Brown et McGuire (1967) qui recherchent le programme de taxation optimale des ressources en eau du comté de Kern (Californie) en accordant une importance toute particulière aux ressources en eau souterraine de la zone. Pour ce faire, ils comparent la solution d'une situation où les décisions d'extraction ne sont pas contrôlées à celle où elles le sont de manière optimale. La solution non contrôlée correspond au postulat de comportements privés myopes.

Le postulat de comportements myopes présuppose que les agents n'agissent pas de manière stratégique. Les développements récents de la théorie des jeux fournissent pourtant les outils nécessaires à la formalisation de stratégies précises dans un cadre dynamique. Qu'apportent ces outils ?

2. Les effets stratégiques de long terme

L'effet externe stratégique a été dénommé ainsi pour la première fois par Negri (*op. cit.*) qui étudie les implications sur le taux de pompage de l'eau souterraine de cet effet. Son idée repose sur le fait que ce qu'un agent ne pompe pas aujourd'hui sera extrait, au moins en partie, par ses rivaux. La crainte pour ces agents de ne pas pouvoir capturer demain ce qu'ils n'extraient pas aujourd'hui réduit leur incitation à renoncer au pompage actuel pour des pompages futurs. Cette explication se rapproche de celle formulée par Provencher et Burt pour l'effet externe de stock dans un cadre dynamique. Comme le mentionnent ces auteurs, cette dernière n'est pourtant pas le point central de l'analyse mathématique de Negri dont le modèle consiste à démontrer que le comportement stratégique des agents affecte le taux de pompage de l'eau souterraine. Dans ce modèle, les effets externes transitent via les coûts de pompage.

À la différence de l'effet externe de stock qui est lié au fait que le stock d'eau souterraine soit fini, ce comportement stratégique apparaît aussi lorsqu'il est infini, c'est-à-dire même lorsque la règle de capture n'est plus une stratégie pertinente pour un agent. Considérons par exemple le cas d'un aquifère dont le stock est infini et se caractérise par le fait que seul un effet externe de coût de pompage peut empêcher un taux de pompage optimal (cela revient à poser l'hypothèse d'un état stationnaire en situation privée avec des stocks positifs d'eau souterraine). Dans une situation privée, un agent pompe l'eau souterraine jusqu'à ce que le bénéfice marginal net intrapériode de la consommation d'eau souterraine soit plus

élevé que zéro : laisser une unité marginale d'eau souterraine dans le sol réduit ses coûts futurs de pompage, même légèrement. Dans la mesure où un stock légèrement plus élevé, résultant de sa propre économie d'eau, va provoquer des extractions supplémentaires de la part de ses voisins, la stratégie optimale d'un agent est de conserver moins d'eau que ce qu'il ferait si le comportement de pompage des autres agents n'était pas affecté par le niveau total du stock. Ce comportement stratégique – pomper plus d'eau en raison du fait de savoir que la laisser dans le sol augmente l'extraction future de ses voisins – est l'externalité stratégique de Negri. Il la met en évidence en comparant deux équilibres de Nash dynamiques³ : l'un en boucle ouverte et l'autre en boucle fermée⁴.

Provencher et Burt préfèrent considérer le comportement stratégique des agents comme un résultat aggravant les inefficacités existantes, plus que comme une source d'effet externe distincte. Ils justifient cette position en expliquant que Negri ne capte rien de plus qu'un effet externe de coût de pompage. Or, nous avons vu que dans un cadre dynamique, cet effet externe peut subsister avec un seul agent, en raison d'effets d'escompte. Ainsi, l'effet externe stratégique de long terme se différencie bien de l'effet externe dynamique de coût de pompage dans la mesure où il concerne plusieurs agents ; il est mis en évidence mathématiquement en comparant la solution d'un équilibre en boucle ouverte avec celle d'un équilibre en

3. Un tel équilibre est défini comme un ensemble de (M) trajectoires admissibles d'extraction d'eau souterraine dont le j-ème élément maximise la valeur de la ressource pour le j-ème joueur, connaissant les (M-1) autres trajectoires d'extraction des autres joueurs.

4. Un équilibre de Nash en boucle ouverte reflète l'inclinaison d'un joueur à prendre les trajectoires d'extraction de la ressource comme données sur tout l'horizon alors que dans le cadre d'un équilibre en boucle fermée, c'est la règle de décision utilisée par les autres joueurs à chaque instant qui est considérée.

boucle fermée. Toutefois, il est important de noter que ces concepts d'équilibre échouent à prendre en compte la capacité d'apprentissage des individus. Dans la mesure où la plupart des jeux différentiels relatifs aux ressources en eau souterraine ont un horizon temporel infini, il peut s'avérer particulièrement pertinent de prendre en compte cette capacité d'apprentissage. Le problème est que la résolution de tels modèles mathématiques devient plus que délicate. Les modèles informatiques peuvent alors s'avérer particulièrement utiles (voir par exemple Feuillette (2001) pour une application aux ressources en eau souterraine des systèmes multi-agents).

Lorsque plusieurs agents sont présents dans un cadre dynamique, un effet d'épuisement de la rente économique peut aussi apparaître à long terme si l'entrée est libre. Cet effet est à la base de la littérature économique sur les pêcheries, mais n'est que très peu, voire pas, exploré pour les ressources en eau souterraine. La sous-section suivante explicite plus en détail cette inefficacité.

3. Extraction privée et épuisement de la rente économique : tragédie des communs ?

Dans sa version de base, la libre entrée empêche l'existence de situations où les entreprises en place bénéficient de rentes. En effet, leur présence ne peut qu'attirer de nouveaux producteurs qui, en augmentant l'offre, provoquent progressivement une baisse des prix, jusqu'au moment où les rentes disparaissent. Appliqué aux ressources naturelles, ce concept d'entrée libre peut se résumer par le fait qu'à l'équilibre de long terme (ou état stationnaire), les profits liés à l'exploitation de la ressource se dissipent complètement. Depuis le célèbre article d'Hardin (1968), ce phénomène est plus communément dénommé « la tragédie des communs » et se rapproche clairement de l'effet externe de stock présenté plus haut, mais dans un cadre dynamique.

Comme nous l'explicitons plus bas, la

dénomination d'Hardin n'est pas appropriée au cas sans libre entrée et peut prêter à confusion. Nous proposerons ainsi une formalisation de l'effet de stock avec libre entrée, plus conforme à la notion de tragédie que celle proposée par Provencher et Burt.

Pour ce qui est de la notion de tragédie, la dissipation des profits d'agriculteurs irrigant avec de l'eau souterraine peut s'expliquer de deux manières.

- La première explication repose sur le fait qu'un nombre trop important d'utilisateurs d'eau souterraine ne peut être maintenu indéfiniment sans que les coûts d'extraction ne finissent par excéder les bénéfices procurés par la ressource. Compte tenu du fait que le coût d'exploitation de l'eau souterraine croît avec la baisse du stock, il va forcément arriver un moment où certains agriculteurs vont perdre de l'argent et en conséquence, arrêter d'exploiter la ressource, réduisant ainsi le nombre d'utilisateurs.
- La seconde explication est liée au fait qu'un nombre trop faible d'agriculteurs puisant l'eau d'une nappe à des fins productives ne peut être maintenu indéfiniment lorsque celle-ci est en accès libre. En effet, si des agriculteurs font des profits, d'autres seront attirés par leur activité et le nombre d'utilisateurs augmentera.

Quand la ressource en eau souterraine est exploitée par un nombre relativement (par rapport à la taille de la réserve phréatique) important d'individus, l'hypothèse de comportements myopes peut redevenir particulièrement appropriée dans la mesure où les extractions de chacun représentent alors une très faible partie de l'ensemble. Comme expliquée par Provencher (1995), l'hypothèse « preneurs de stock » représente alors aussi bien la situation que celle de « preneurs de prix » couramment utilisée pour les marchés de biens classiques. Autrement dit, dans un tel cadre, chaque utilisateur d'eau souterraine est trop petit par rapport à l'ensemble pour être en mesure d'évaluer exactement dans quelle mesure ses décisions privées affectent la disponi-

bilité future de la ressource.

Cette analogie entre myopie et atomicité est présente dans le célèbre travail de Gisser et Sanchez (*op. cit.*) qui se réfèrent au cas de propriété commune de la ressource en eau souterraine comme à celui correspondant à une situation compétitive. Elle est représentative de l'amalgame – dénoncé par des auteurs comme Ciriacy-Wantrup et Bishop (1975), Bromley (1991) et Ostrom (1990) – qui est généralement effectué entre les notions d'entrée libre et de propriété commune. L'entrée libre est relative aux stocks des ressources dont l'accès est complètement ouvert à tous alors que la propriété commune se réfère à des stocks publics (de propriété communautaire) ou régulés par des institutions (*cf.* Petit, 2002, pour plus de détails appliqués aux ressources en eau souterraine).

Dans la littérature formalisée sur l'eau souterraine, la notion de tragédie des communs est, à notre connaissance, systématiquement représentée mathématiquement par une situation inefficace où le gouvernement central n'intervient pas dans l'allocation de la ressource, mais où son accès est limité, de manière institutionnelle ou par des coûts élevés de pompage et de transport vers une zone voisine, aux agents dont les terres surplombent l'aquifère. Or, c'est plutôt quand l'effectif de ce groupe d'agents est libre que les copropriétaires de la ressource n'arrivent pas à contrôler l'utilisation de chacun des membres du groupe et qu'il peut y avoir tragédie au sens de dissipation des rentes économiques à long terme. Ainsi, la notion de tragédie devrait plutôt se rapporter à la libre entrée dans l'activité d'agriculture irriguée avec de l'eau souterraine.

À l'instar de Smith (1968), cette tragédie de la libre entrée pourrait être représentée mathématiquement en introduisant une équation dynamique du nombre d'agents entrant dans la course à l'agriculture irriguée telle que la rente s'annule à long terme. À notre connaissance, très peu, voire aucun

article n'adopte cette possibilité de formalisation qui nous semble pourtant plus cohérente avec la notion d'effet externe de stock dans un cadre dynamique.

Conclusion

Finalement, les apports d'une modélisation mathématique dynamique des inefficacités de l'exploitation privée de l'eau souterraine demeurent faibles. La défaillance de sures-compte et les effets stratégiques de long terme sont deux manières différentes de reprendre l'effet externe de coût de pompage dans un cadre dynamique, sans apport notable par rapport au cas statique. Pour capturer l'effet externe de stock dans un cadre dynamique, l'ajout d'une dynamique de libre entrée fidèle à celle utilisée dans la littérature sur les pêcheries nous semble plus approprié que l'introduction d'une contrainte de stock au programme d'optimisation. Toutefois, cette représentation n'est valide qu'à l'état stationnaire et ne nous apprend rien de pertinent quant aux trajectoires intertemporelles du stock d'eau souterraine et de son exploitation. De même, les principaux résultats tirés de ces modèles dynamiques sont bien souvent des résultats d'état stationnaire qui ressortiraient certainement aussi dans un cadre statique.

Les défenseurs de ces modèles dynamiques argumentent en leur faveur en précisant que la ressource en eau souterraine est une ressource dont le renouvellement prend du temps. Mais les deux phénomènes les plus intéressants dans un cadre dynamique, l'effet stratégique de long terme et la libre entrée, vont bien souvent de pair avec des modèles en temps continu pour des raisons de facilité de résolution. Or l'hypothèse implicite de ce type de modèles est que les phénomènes sont instantanés. Ils échouent donc à prendre en compte le fait que le renouvellement de la ressource en eau souterraine prend du temps. En outre, comme nous l'avons déjà signalé précédemment, dans un cadre dynamique, il peut s'avérer parti-

culièrement pertinent de prendre en compte les phénomènes d'apprentissage des agents économiques. Les simulations multi-agents sont des modèles informatiques de simulation qui permettent de représenter ce type de phénomènes. Elles permettent aussi de représenter le système physique de manière plus réaliste. Mais de tels modèles sont également fortement sujets à critiques dans la mesure où leurs solutions dépendent fortement des règles énoncées en entrée.

Enfin, il est important de signaler qu'il existe aussi une large littérature non formalisée relative à l'économie de la gestion quantitative des ressources en eau souterraine. Cette littérature questionne l'existence d'une exploitation optimale de l'eau souterraine, à la base de la littérature étudiée dans ce qui précède. Elle prend comme point de départ les travaux d'Ostrom (*op. cit.*), prolongés par Blomquist en 1992, qui portent sur les aspects institutionnels de l'exploitation de l'eau souterraine en Californie. En partant d'exemples précis, cette littérature montre qu'une communauté exploitant une ressource en propriété commune peut éviter la destruction de la ressource sans l'intervention d'une autorité

extérieure, car des formes d'action collective peuvent émerger afin de combler l'absence d'un marché. Toutefois, ces auteurs précisent que quand la communauté est très grande et les individus fortement hétérogènes, cette solution « non-interventionniste » ne sera efficace que dans des situations bien particulières. Petit (*op. cit.*) propose alors de rechercher des formes de gouvernance de l'eau adéquates qu'il définit comme la combinaison d'actions individuelles régulées par un marché, d'actions collectives d'intérêt public impulsées par l'État et d'actions collectives à caractère communautaire protégeant l'intérêt de l'ensemble des usagers.

Un des enjeux futurs des modèles économiques consiste à être en mesure de considérer et tester de telles possibilités. La théorie des jeux évolutionniste va dans ce sens, mais il n'existe pas, à notre connaissance, d'applications relatives à l'eau souterraine. La théorie des jeux coopératifs est aussi un outil potentiellement intéressant pour de telles considérations, sans pour autant être à ce jour particulièrement répandu dans la littérature appliquée à l'eau souterraine. ■

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Blomquist W. (1992). *Dividing the waters. Governing groundwater in Southern California*. San Francisco, California, ICS Press, 415 p.
- Bromley D.-W. (1991). *Environment and economy – Property rights and public policy*. Cambridge, MA.
- Brown G. (1974). An Optimal Program for Managing Common Property Resources with Congestion Externalities. *Journal of Political Economy*, n° 82, p. 163-174.
- Brown G., McGuire C.-B. (1967). A socially optimum pricing policy for a public water agency. *Water Resources research*, vol. 3, n° 1, p. 33-43.
- Burness S., Brill T. (2001). The role for policy in common pool groundwater use. *Resource and energy economics*, vol. 23, n° 1, p. 19-40.
- Ciriacy-Wantrup S.-V., Bishop R.-C. (1975). "Common property" as a concept in natural resources policy. *Natural resources journal*, n° 15, p. 713-27.
- Feuillet 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 de doctorat en Sciences de l'eau, Université de Montpellier II.

- Gisser M., Sanchez D. (1980). Competition versus optimal control in groundwater pumping. *Water Resources Research*, vol. 16, n°4, p. 638-642.
- Griffin R.-C. (2006). *Water resource economics - The analysis of scarcity, policies, and projects*. Cambridge, The MIT Press.
- Hardin G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, n° 162, p. 1243-1268.
- Haveman R. (1973). Common property, congestion, and environmental pollution. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 87, n° 2, p. 278-287.
- Herr A., Gardner R., Walker J., (1997). An Experimental Study of Time-Independent and Time-Dependent Externalities in the Commons. *Games and Economic Behavior*, vol. 19, n° 1, p. 77-96.
- Koundouri P. (2004). Potential for groundwater management: Gisser-Sanchez effect reconsidered. *Water resources research*, n° 40, W06S16, doi:10.1029/2003WR002164.
- Montginoul M., Rinaudo J.-D. (2009). Quels instruments pour gérer les prélèvements individuels en eau souterraine ? Le cas du Roussillon. *Économie rurale*, n° 310, p. 40-56.
- Negri D. (1989). The common property aquifer as a differential game. *Water Resources Research*, vol. 25, n° 1, p. 9-15.
- Newbery D.-M.-G. (1975). Congestion and over-exploitation of free access resources. *Economica*, New series, vol. 42, n° 167, p. 243-260.
- Ostrom E. (1990). *Governing the commons: the evolution of institution for collective action*, Cambridge university press, Cambridge.
- Petit O. (2002). *De la coordination des actions individuelles aux formes de l'action collective : une exploration des modes de gouvernance des eaux souterraines*. Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
- Petit O (2004). La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance. *Natures Sciences Sociétés*, n° 12, 146-156.
- Provencher B. (1995). Issues in the conjunctive use of surface water and groundwater. In, Blackwell D. Bromley (ed.), "The Handbook of Environmental Economics".
- Provencher B., Burt O. (1993). The externalities associated with the common property exploitation of groundwater. *Journal of Environmental Economics and Management*, n° 24, p. 139-158.
- Smith V.-L. (1968). Economics of production from natural resources. *The American Economic Review*, vol. 58, n° 3, p. 409-431.
- Smith V.-L. (1969). On models of commercial fishing. *Journal of political economy*, n° 77, p. 181-198.
- Tsur Y. (1990). The stabilization role of groundwater when surface water supply are uncertain: the implications for groundwater development. *Water Resources Research*, n°26, p. 811-818.
- Tsur Y., Graham-tomasi T. (1991). The buffer value of groundwater with stochastic surface water supplies. *Journal of Environmental Economics and Management*, n° 21, p. 201-224.