

Comment réguler les prélèvements agricoles d'eau souterraine ?

Une étude de cas sur l'aquifère du Roussillon

Gaston Giordana ^a, Marielle Montginoul ^b et Marc Willinger ^a

Si la pression des prélèvements agricoles d'eau dans une nappe aquifère pose déjà la question de la pérennité de cette ressource, le problème prend une acuité toute particulière en zone littorale, lorsque ces prélèvements peuvent entraîner un transfert diffus des eaux marines dans la nappe d'eau douce. À partir de l'étude qu'ils ont conduite en Roussillon, les auteurs dressent un bilan des types de captages en place et décrivent les comportements des exploitants. Ils commentent la perception des usagers face à différents scénarios de limitation et de régulation des pompages, et posent les conditions d'acceptabilité des mesures proposées.

En France, l'accès à l'eau souterraine pour des usages non domestiques est encadré juridiquement. Il existe cependant encore un certain nombre de situations dans lesquelles il n'est pas suffisamment contrôlé. Ainsi, du fait de besoins en eau toujours croissants, en particulier en zones littorales, cette ressource est parfois confrontée à la « tragédie des communs » (Hardin, 1968) : le plus ou moins libre accès à cette ressource limitée conduit alors inévitablement à sa surexploitation et à sa disparition, chaque individu cherchant à maximiser son intérêt personnel. Et ce problème est d'autant plus important à traiter que la ressource peut être peu ou pas renouvelable, ou bien menacée d'intrusion d'eau salée en cas de surexploitation.

Face à cette menace de surexploitation, les pouvoirs publics ont tout d'abord tendance à accroître l'offre en eau, en rechargeant artificiellement les nappes, en développant des substituts (construction de réservoirs superficiels, d'aqueducs, réutilisation d'eaux usées ou dessalement d'eau de mer) ou en effectuant des transferts d'eau. Ce n'est que lorsque la mobilisation de nouvelles ressources n'est pas possible ou trop coûteuse que l'on cherche à agir sur la demande en eau souterraine (Giordana et Montginoul, 2006). Si la première mesure généralement adoptée vise à mieux connaître l'état et le fonctionnement de l'aquifère, peu d'actions sont entreprises pour recenser les forages et connaître les quantités prélevées. Ce n'est qu'en dernier recours que des mesures cherchant à agir réellement sur la

demande sont adoptées (programme d'information à l'économie d'eau, procédures d'autorisation de prélèvement, quotas éventuellement transférables, tarification...).

La zone d'étude

Nous nous intéressons dans cet article à un cas particulier : celui de l'aquifère multi-couches du Roussillon, triangle d'environ 800 km² délimité par les Pyrénées au sud-ouest, le massif karstique des Corbières au nord-ouest, et la mer Méditerranée à l'est. Les eaux souterraines sont contenues dans les aquifères superficiels (alluvions quaternaires) et profonds (aquifère pliocène). L'aquifère pliocène, de très bonne qualité, représente une ressource d'importance stratégique : principalement exploité pour l'alimentation en eau potable (AEP) (31 Mm³ en 2005 sur 41 Mm³ prélevés ; Aunay, 2007), il l'est aussi par l'agriculture. Les volumes d'eau prélevés ont considérablement augmenté du fait de la croissance démographique (ils étaient en 1975 de 8 Mm³) mais aussi des évolutions de l'agriculture irriguée : alors que l'irrigation était traditionnellement réalisée à partir de systèmes de canaux gravitaires alimentés par l'Agly, la Têt ou le Tech (Ruf, 2001), le développement du goutte à goutte a conduit les arboriculteurs à se détourner de ces systèmes et à construire leur propre forage pour disposer d'une eau sous pression et de bonne qualité (l'eau de surface encrasse plus rapidement les goutteurs). Le recours à l'eau souterraine pour

Les contacts

a. Université Montpellier I, UMR Lameta, Faculté des Sciences économiques, Espace Richter, avenue de la mer, BP 960, 34054 Montpellier Cedex
b. Cemagref, UMR G-Eau, 361 rue J.-F. Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

le maraîchage s'est progressivement imposé en réponse aux exigences des cahiers des charges de la grande distribution. Ces exigences ont même conduit certains maraîchers à exploiter la nappe profonde, dont la qualité est compatible avec les normes de potabilité. Enfin, le succès du forage individuel s'explique aussi par la souplesse d'accès à la ressource et le coût souvent moins élevé que celui des systèmes collectifs délivrant de l'eau sous pression.

Globalement, la croissance des prélèvements en eau souterraine a induit une baisse des niveaux piézométriques estimée à 5 cm par an en moyenne, mais parfois beaucoup plus forte localement. S'agissant d'un aquifère côtier, il existe un risque non négligeable de contamination des eaux souterraines par intrusion d'eau de mer (Aunay, 2007), ce qui a amené les services de l'État et des collectivités locales à ouvrir une réflexion sur les mécanismes de régulation des prélèvements de l'eau souterraine.

1. Région Languedoc-Roussillon. Syscolag : systèmes lagunaires et côtiers.

Dans le cadre du programme régional Syscolag¹ et du Programme national pour l'environnement côtier (PNEC), nous avons apporté à cette réflexion une recherche en trois étapes :

- des enquêtes de terrain pour mieux modéliser le comportement des préleveurs, comprendre les problèmes de gestion et choisir les instruments à tester ;
- l'élaboration d'un modèle conceptuel de la situation, pour estimer l'impact théorique de différents instruments envisageables sur le comportement des préleveurs ;
- le test de ces prédictions théoriques en laboratoire, pour déterminer comment des sujets se comportent en réalité, face à une situation stylisée.

Des enquêtes de terrain pour mieux modéliser le cas d'étude et choisir les instruments à tester

Notre démarche d'enquête a tout d'abord consisté à conduire, en 2005, trente entretiens auprès de représentants des services de l'État, des collectivités territoriales, des usagers, des professionnels du forage et des experts reconnus comme tels pour leur connaissance sur l'eau souterraine et les enjeux afférents (Aunay *et al.*, 2007). Ils abordaient des questions relatives à leur perception du problème et à leur réaction par rapport à des instruments innovants.

Nous avons ensuite complété ces entretiens par une enquête en face à face auprès de 76 agriculteurs irrigants sélectionnés selon une procédure d'échantillonnage aléatoire, stratifiée et garante de l'interrogation de différents types d'agriculteurs jugés représentatifs par rapport à la question étudiée (Montginoul, 2005). L'échantillon était très majoritairement constitué de maraîchers et d'arboriculteurs (ces deux cultures représentant, selon le recensement agricole de 2000, 90 % de la superficie irriguée), ayant accès soit uniquement à des ressources en eau souterraine, soit également à des ressources superficielles.

Ces enquêtes avaient deux objectifs. Tout d'abord, elles cherchaient à faire émerger les principales caractéristiques qu'il est nécessaire de modéliser pour représenter, de manière la plus simplifiée mais aussi la plus fidèle possible, la réalité complexe. Elles avaient également pour vocation de recueillir les réactions de différents acteurs concernés par la ressource en eau souterraine (acteurs institutionnels et usagers) face à différents outils de gestion de la demande.

Vers une représentation simplifiée de la réalité complexe

Les entretiens ont tout d'abord permis de simplifier la réalité en se limitant à trois choix.

Le premier choix concerne la ressource étudiée. Nous avons axé notre analyse sur la gestion de la nappe profonde, les usagers devant alors choisir la quantité d'eau de cette nappe qu'ils extraient à chaque période.

Le deuxième choix concerne le type d'usage de la ressource. Nous avons choisi de nous intéresser à l'usage agricole car c'est ici un usage important de la nappe profonde (le deuxième en terme quantitatif) et c'est aussi le premier usage mal contrôlé (contrairement à l'AEP) : les forages sont peu déclarés et les quantités d'eau extraites inconnues (absence de compteurs).

Illustrons ce fait à partir de l'enquête : l'échantillon d'agriculteurs enquêtés est à 87 % constitué d'exploitants disposant d'un ou plusieurs forages individuels, dont plus de la moitié affirment avoir déclaré leurs forages. Une confrontation de ces affirmations avec les registres de la DDAF² en charge de la police de l'eau montre que seulement 27 % des exploitations enquêtées ont effectivement déclaré leurs forages. Au total, les forages effectivement déclarés ne représentent

2. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.

que 40 % des forages identifiés par l'enquête alors que les agriculteurs affirment en avoir déclaré 63 %. Cette différence pourrait s'expliquer par l'oubli de certains forages par les déclarants et par les délais d'instruction des dossiers qui transitent par la chambre d'agriculture. Le taux de déclaration est relativement hétérogène d'une zone géographique à l'autre, avoisinant les 78 % (données administratives ; 91 % selon les agriculteurs) en Salanque où les cultures maraîchères dominent, mais de 20 % (données administratives ; 27 % selon les agriculteurs) dans le bassin de la Têt amont et de 4 % dans les Aspres, deux zones à dominante arboricole. Ce taux semble expliqué par l'organisation professionnelle de commercialisation à laquelle les agriculteurs adhèrent, plus que par le type de production : certaines structures exigent en effet de leurs adhérents d'être conformes à la réglementation en vigueur, alors que d'autres ne posent aucune contrainte. Ainsi, sur les 51 forages appartenant à des exploitations adhérant à l'Union départementale des coopératives, 80 % sont déjà enregistrés dans le fichier de la DDAF. À l'inverse, sur les 45 forages appartenant à 43 exploitations adhérant à Rouss'Med, seuls 16 % sont enregistrés.

Parmi les usagers agricoles, l'enquête montre que ce sont les maraîchers (cultures annuelles) qui ont plus tendance que les arboriculteurs (cultures pérennes) à prélever de l'eau dans la nappe profonde. De plus, les forages des maraîchers sont les mieux connus. Compte tenu de la nature des données disponibles et de notre objectif d'expérimentation, nous avons simplifié le problème en ne considérant qu'un seul type d'individus et en testant uniquement des instruments qui nécessitent la connaissance des points de prélèvement. **Nous avons donc choisi de modéliser le comportement des maraîchers.**

Enfin, le troisième choix porte sur le type d'instrument de gestion de la nappe profonde. Deux types d'actions sur la demande sont envisageables : une action structurelle, en essayant de contrôler le nombre de points de prélèvement, ou une action sur les quantités d'eau prélevées, lorsque les forages existent. Les agriculteurs enquêtés déclarent ne pas projeter la réalisation de nouveaux forages, les forages existants couvrant l'ensemble des terres concernées. Nous nous intéresserons donc uniquement aux instruments agissant sur la quantité d'eau prélevée, ce que nous détaillons dans la partie suivante.

LE CHOIX DES INSTRUMENTS DE GESTION

À TESTER PAR LA SUITE

Les moyens d'action sur la demande diffèrent selon le niveau de connaissance. Lorsqu'il est possible d'identifier les préleveurs et de connaître les quantités prélevées, différents outils sont mobilisables, en particulier :

- une taxation modulée en fonction de la ressource en eau, du lieu et du temps d'extraction, et éventuellement du type de culture. Elle peut être forfaitaire (à la superficie ou selon le type de cultures) ou en fonction du volume ;

- des quotas. L'allocation d'une ressource en quantité limitée par un système de quotas consiste à plafonner la consommation des usagers, c'est-à-dire à leur allouer (individuellement ou collectivement) une quantité maximale de cette ressource qu'ils ne peuvent pas dépasser. Le quota est un mécanisme autoritaire (par opposition à incitatif) dans le sens où il contraint directement les décisions des agents au lieu de modifier indirectement leur comportement par l'émission de signaux sur le marché. S'il est critiqué par la littérature économique pour sa rigidité, il est fréquemment utilisé (en particulier pour allouer l'eau d'irrigation) du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son aspect équitable et de son acceptation par la société ;

- la mise en marché. Pour répondre à la critique de rigidité des quotas, il est possible d'instaurer un marché de l'eau, lieu d'échange de droits d'eau entre des individus ou des collectivités. Il est mis en place pour garantir une allocation de l'eau optimale entre les usagers étant données les ressources, la technologie, les préférences des consommateurs et la distribution du pouvoir d'achat, mais aussi pour répondre à une modification des conditions de production ou de consommation lorsque l'allocation première s'avère inefficace.

La non-observabilité des quantités prélevées réduit la panoplie d'instruments, en exigeant la mise en place de contrats incitatifs ou de pénalités financières. Un autre instrument que nous pouvons qualifier de taxe ambiante, consiste à instaurer une pénalité collective. Proposé dans la littérature économique de la pollution diffuse (Segerson, 1988 ; Xepapadeas, 1992), il peut être adapté à la gestion des quantités prélevées dans un aquifère en cas de non-observabilité des volumes individuels. Cette taxe est calculée sur la base d'une variable observée par le régulateur (comme

3. Du nom de l'économiste britannique Cecil Pigou (1877-1959). Taxe dont le principe pénalise le pollueur ou le bénéficiaire avantagé et dédommage le pollué ou le bénéficiaire lésé.

4. Il s'agit d'un constat local, peut-être lié au nombre de captages individuels. Dans d'autres régions, le principe du compteur peut être mieux admis, y compris en grandes cultures.

le niveau de la nappe) affectée par la somme des décisions individuelles (ici les prélèvements), ces dernières n'étant pas observables. Elle est facturée ensuite à tous les usagers de la zone considérée si la variable observée atteint un seuil qu'il était convenu de ne pas dépasser.

Les entretiens ont permis de caractériser la perception par les agriculteurs des instruments de gestion envisageables pour réguler les prélèvements en eau souterraine. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 1.

L'application d'une pénalité collective si le niveau piézométrique descend sous un seuil d'alerte (de type taxe ambiante) est unanimement rejetée par les agriculteurs rencontrés. Cet instrument est considéré comme inefficace : elle serait appliquée avec un an de retard (dans notre scénario, elle serait intégrée à la taxe foncière), ne permettant pas aux acteurs de réduire les prélèvements au moment de la crise. Les agriculteurs interrogés estiment également que cette taxe ne réduira pas les prélèvements, l'effort consenti par chacun n'étant pas mesurable. Ils considèrent cet instrument comme injuste car s'appliquant uniformément à tous, indépendamment du niveau d'effort consenti. Enfin, ils estiment techniquement très difficile la définition de seuils piézométriques à partir desquels elle s'applique.

Le principe d'une taxe environnementale (« taxe pigouviennne³ ») est également rejeté par les agriculteurs dont une grande partie n'est pas actuellement soumis à la redevance prélèvement (exonérés ou volumes non déclarés) : seuls 8 % en acceptent l'idée si c'est pour gérer la ressource. Une telle taxe est en effet jugée sans rapport avec la problématique de gestion, les agriculteurs ne percevant pas sa fonction incitative. Une augmentation éventuelle de son taux est jugée

incompatible avec le maintien de la compétitivité des producteurs. Enfin, son principe est contesté vu qu'il ne s'appliquerait pas aux particuliers disposant d'un forage.

Ce rejet est corroboré par le refus d'installer un compteur⁴ considéré comme un premier pas vers la taxation des prélèvements : aucun des agriculteurs enquêtés en 2005 dans le Roussillon ne disposait d'un compteur. Et les seuls agriculteurs actuellement redevables préfèrent payer un montant forfaitaire à une taxe proportionnelle à la quantité d'eau réellement prélevée même si d'un niveau plus élevé.

Le système de quotas individuels définissant un volume maximal prélevable par an et par agriculteur est perçu de façon plus mitigée. La moitié des agriculteurs se déclarent prêts à accepter cette procédure, mais uniquement pour une pénurie conjoncturelle avérée. Les modalités d'allocation initiale des quotas font l'objet de nombreuses et diverses visions, des critères d'allocation différents étant suggérés (fonction des besoins, des cultures, de la surface ou de l'activité économique). Les agriculteurs opposés évoquent surtout l'incompressibilité des besoins en eau et refusent l'idée de perdre une récolte ou leur verger pour gérer une pénurie conjoncturelle ; ils jugent aussi l'instrument dur à instaurer, l'absence de compteurs rendant difficile la mesure des volumes prélevés. Ils estiment également nécessaire de l'accompagner par la mobilisation de ressources alternatives (apport d'eau de surface sous pression) ou de compenser financièrement les agriculteurs ayant choisi de réduire leur consommation. Enfin, 53 % des agriculteurs suggèrent que les autres usages (ménages utilisant des forages individuels, arrosage des espaces verts) soient les premiers concernés par les restrictions.

► Tableau 1 – Perception des différents instruments par les agriculteurs enquêtés.

Outils de gestion	Taux d'acceptation
Déclaration des forages	63 %
Mise en place et relevé des compteurs	29 %
Taxation environnementale au volume	8 %
Quotas volumétriques individuels	49 %
Marché de droits d'eau entre agriculteurs	21 % (si échanges entre agriculteurs) 17 % (si échanges entre agriculture et eau potable)
Pénalité collective (taxe ambiante)	0 %

Le principe des marchés de droits d'eau, consistant à rendre négociables ces quotas, n'est également accepté que par un agriculteur sur 5. Cette attitude est justifiée par la crainte de spéculation : « *c'est la porte ouverte aux personnes qui feront de la spéculation sur les terres incultes afin de revendre l'eau et de se faire de l'argent sur le dos des agriculteurs* », « *ce n'est plus de la gestion, c'est du business* », « *c'est la fin de l'agriculture* », « *c'est comme les droits à polluer, l'eau est un bien extraordinaire, ce n'est pas une bourse* »... Le commerce des droits d'eau leur semble de plus une autre manière de leur faire payer l'eau. Ils notent également la lourdeur pour créer un tel marché ou son infaisabilité technique (« *comment je fais moi pour pomper chez un autre irrigant ?* »). Enfin, plusieurs estiment que l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation et qu'elle ne peut pas, à ce titre, faire l'objet d'appropriation ou de transaction.

Pour analyser plus précisément l'intérêt éventuel d'instruments fortement rejetés par les agriculteurs – et donc difficilement testables sur le terrain – dans la partie suivante, nous décrivons une modélisation qui nous permet de simuler trois instruments basés sur la taxe pigouvienne et/ou la taxe ambiante.

Modélisation et prédictions théoriques de trois instruments économiques

Les instruments que nous avons mis en place sont testés tout d'abord de manière théorique à partir d'une modélisation de la ressource (la nappe profonde) et des comportements (des agriculteurs maraîchers). Cette modélisation simplifiée permet de définir les réactions théoriques des agriculteurs, en l'absence d'instruments et face à différents instruments.

Nous nous plaçons dans le cadre d'un jeu dynamique à temps fini et discret. Une nappe est exploitée pendant un horizon temporel fini et connu décomposé en T périodes ($t = 1, \dots, T$), par N ($i = 1, \dots, N$) préleveurs identiques. Les prélèvements du préleveur i , génèrent à la période t un revenu égal à :

$$u(y_i^t) = a \cdot y_i^t - b \cdot (y_i^t)^2 \quad (1)$$

où a et $b > 0$.

La nappe (renouvelable) est modélisée comme une piscine à fond plat et aux côtés perpendiculaires et sa dynamique est la plus simple possible (Brozovic *et al.*, 2006) : le stock disponible au début de la période $t + 1$ est égal au stock disponible au début de la période précédente (S^t), augmenté de la recharge naturelle par période (r connue sans incertitude et constante), et diminué du prélèvement total dans la nappe à la

$$Y^t = \sum_{\forall i} y_i^t$$

$$S^{t+1} = S^t - Y^t + r \quad (2)$$

Le coût moyen (et marginal) de prélèvement dans la nappe dépend linéairement des stocks disponibles et du prélèvement total de la période :

$$CM(S^t, Y^t) = p + z \cdot Y^t - f \cdot S^t \quad (3)$$

avec $z, f \geq 0, \forall i, \forall j \neq i$.

Le paramètre p mesure le coût de prélèvement, indépendamment des volumes prélevés à la période courante et par le passé. Le coefficient z mesure l'externalité statique (externalité intra-période) : elle représente le supplément de coût subi par des usagers de la nappe du fait du prélèvement d'un usager qui conduit à une baisse instantanée et locale de la nappe comme conséquence du cône de dépression qui se génère autour du captage. Un coefficient z identique pour l'ensemble des préleveurs suppose de captages équidistants les uns des autres. Le coefficient f mesure quant à lui l'externalité dynamique (externalité inter-période) engendrée par la baisse du niveau de l'aquifère se traduisant également en terme de coût. Les externalités statiques sont supposées indépendantes des externalités dynamiques (il n'y a donc pas d'effet multiplicatif) et identiques quelle que soit la localisation de l'individu sur la nappe. Le cas sans externalité statique semble représenter le mieux la réalité du terrain (Aunay, 2007) ; il est donc pris comme référence par la suite : il est donc supposé que $z = 0$.

Le modèle est alors résolu en prenant comme valeurs des différents paramètres celles présentées dans le tableau 2 et en cherchant à maximiser le bien-être d'une économie composée uniquement des préleveurs, ces derniers ayant des comportements parfaitement rationnels et supposés homogènes. Trois types de comportement sont envisagés :

– le comportement myope. Le préleveur décide de la quantité d'eau extraite par période en

Taille du groupe	$N = 5$
Horizon	10 périodes
Fonction de profit	$A = 5,3 \quad b = 0,09$
Fonction de coût	$P = 7,55 \quad f = 0,01 \quad z = 0$
Évolution du stock d'eau	$S^1 = 500 \quad r = 30$
Intervalle de prélèvement	$[0 ; 50]$

▲ Tableau 2 – Valeurs des paramètres communs à tous les traitements.

maximisant individuellement son profit courant, les conséquences de ses décisions actuelles sur le stock de la ressource dans les périodes futures n'étant pas prises en compte ;

– le comportement rationnel. Le préleveur décide de la quantité d'eau extraite par période en maximisant uniquement son profit (comme pour le myope), mais en prenant en compte les conséquences de ses prélèvements sur ses propres profits futurs ;

– le comportement optimum. Le préleveur agit alors en maximisant le bien-être collectif et donc en prenant en compte non seulement les conséquences de ses prélèvements sur ses propres profits (présents et futurs) mais également sur ceux des autres.

Les trois comportements type correspondent à différentes hypothèses sur la valeur du facteur d'actualisation (nulle pour le myope, positive pour les deux autres) ou aux effets pris en considération dans la décision (leurs propres décisions dans les deux premiers, l'ensemble des décisions dans le comportement optimum).

Nous analysons par la suite les résultats du modèle (puis des expériences) en faisant appel à deux critères :

– un critère d'efficacité, qui évalue la distance d'une situation observée ou simulée à la trajectoire optimale. Pour plus de compréhension, l'efficacité sera définie en pourcentage du bien-être optimal, le niveau de bien-être étant défini comme la somme des profits de tous les préleveurs pour l'ensemble de l'horizon temporel ;

– un critère d'efficience, qui cherche à analyser l'importance de la richesse accumulée (diminuée des paiements de la redevance et des éventuelles pénalités pour fraude avérée) par rapport à l'optimum. Elle permet d'évaluer le coût social des instruments donnant ainsi une indication sur leur acceptabilité potentielle.

En situation de laissez-faire (LF) (donc sans intervention extérieure), les prédictions du modèle simplifié pour les trois comportements de prélèvement au cours des 10 périodes du jeu sont les suivantes : tandis que le comportement rationnel atteint 74 % d'efficience et d'efficacité, le comportement myope n'arrive qu'à 52 % (en laissez-faire, les indicateurs d'efficacité et d'efficience sont égaux). Une intervention publique pourrait donc s'avérer très profitable pour la communauté de préleveurs.

Pour lutter contre les dérives dues aux ressources en accès libre, trois types d'instrument sont envisagés et testés avec deux versions (fixe et flexible) (tableau 3).

- **Une taxe pigouvienne avec contrôle aléatoire des déclarations (Tax)**

Cette taxe s'apparente à la redevance prélèvement de l'Agence de l'eau. Elle est proportionnelle à la quantité d'eau prélevée et son montant est calculé de manière à inciter les préleveurs à adopter le comportement optimum. Dans sa version temporellement cohérente (TaxFlex), son taux (alors flexible) dépend du stock disponible de ressource, des prélèvements et du temps restant.

Dans sa version temporellement incohérente (TaxFix), son taux est fixe quelle que soit la période considérée, et un seuil de paiement est instauré (à partir duquel cette taxe est due) : ce seuil, variable d'une période à une autre, est calculé de façon à éviter le paiement de la taxe à ceux qui prélèvent une quantité égale ou inférieure à l'optimale.

Pour prendre en compte les difficultés pratiques liées au relevé des compteurs, les agriculteurs auto-déclarent leur consommation et peuvent être contrôlés (avec une probabilité constante de 20 %). Le niveau de pénalité, forfaitaire, est calculé de manière à décourager les individus neutres au risque.

- **Une taxe ambiante (Amb)**

Nous supposons alors l'absence de compteur et donc la non-connaissance de la quantité individuelle consommée. Ce n'est qu'en cas de dépassement d'un seuil préalablement fixé que cette taxe est payée. Son niveau peut varier au cours des 10 périodes (AmbFlex) ou être fixe (AmbFix).

• **Un instrument mixte (Mix), combinaison des deux instruments précédents (Kritikos, 2004)**

Il est conçu pour ramener les prélèvements à l'optimum social en minimisant les handicaps de chaque instrument pris séparément. Il est envisageable quand le niveau total des prélèvements est connu et quand les préleveurs déclarent les quantités prélevées. Il consiste à demander aux préleveurs d'auto-déclarer leur consommation, qui sera taxée en conséquence (avec le même principe de seuil de paiement que pour la taxe pigouvienne). En cas de fraude constatée (décalage entre la quantité déclarée totale et la quantité prélevée), le gestionnaire impose, à chaque usager, une pénalité égale à :

$$\text{niveau de la fraude totale} \times \text{taux de la taxe} = \text{pénalité}$$

Il contrôle ensuite certains usagers (ici 20 %). Si lors du contrôle, la fraude est avérée, à cette première somme s'ajoute le paiement de la dette. En l'absence de fraude, le sujet est remboursé. Les préleveurs n'ont donc, *a priori*, pas d'intérêt

à fausser les déclarations de prélèvement : les fraudeurs devront s'acquitter avec certitude au minimum du montant de leurs dettes (s'il n'y a pas d'autres fraudeurs), soit le montant qu'ils devraient payer s'ils déclarent correctement.

Les niveaux de ces instruments sont instaurés pour atteindre l'optimum de premier rang : ils sont donc établis à un niveau suffisamment élevé pour que la prédiction coïncide avec la trajectoire optimale (dans le tableau 4, leur efficacité est alors de 100 %). C'est également le cas pour un scénario de taxe fixe (nommé par la suite TaxFix1) dont le niveau est élevé. Ce n'est par contre pas le cas pour les autres instruments fixes dont les niveaux sont faibles (TaxFix2, AmbFix et MixFix), la trajectoire étant alors moins efficace que l'optimale.

Les prédictions théoriques sont alors calculées pour les différentes situations (laissez-faire ou avec l'un des trois instruments). Le tableau 4 en présente les résultats en évaluant le niveau d'efficacité des comportements rationnel et myope

	Optimaux	Non optimaux
Instruments flexibles (temporellement cohérents)	Taxe pigouvienne avec contrôle aléatoire (TaxFlex) sans seuil de paiement. Taxe ambiante (AmbFlex). Instrument mixte (MixFlex) sans seuil de paiement.	
Instruments fixes (temporellement incohérents)	Taxe pigouvienne avec contrôle aléatoire (TaxFix1) et seuil de paiement. Taxe ambiante (non testé). Instrument mixte (non testé).	Taxe pigouvienne avec contrôle aléatoire (TaxFix2) et seuil de paiement. Taxe ambiante (AmbFix). Instrument mixte (MixFix) et seuil de paiement.

◀ Tableau 3 – Instruments testés.

Traitements		Rationnel		Myope		Classement selon l'efficacité
		Efficacité	Efficience	Efficacité	Efficience	
Laissez-faire	LF	74 %		52 %		
Instruments fixes	TaxFix2	92 %	83 %	79 %	63 %	2
	MixFix	92 %	54 %	82 %	- 20 %	3
	AmbFix	92 %	54 %	82 %	- 20 %	3
	Taxfix1	100 %	100 %	100 %	100 %	1
Instruments flexibles	TaxFlex	100 %	53 %	100 %	49 %	2
	MixFlex	100 %	53 %	100 %	49 %	2
	AmFlex	100 %	100 %	100 %	100 %	1

◀ Tableau 4 – Prédictions théoriques des niveaux d'efficacité et d'efficience des taxes par rapport au comportement optimum.

par rapport au comportement optimum. Les instruments sont ensuite comparés entre eux en fonction de leur efficacité.

Les instruments à taux flexible sont tous de premier rang (efficacité égale à 100 %) : les quantités prélevées sont donc à leur optimum d'un point de vue collectif. Toutefois, si l'efficacité est bien atteinte, il y a des grandes différences en terme d'efficacité (tableau 4) : la taxe ambiante flexible est alors la plus efficace (avec 100 %), aucune taxe n'étant payée à l'équilibre ; étant donné le paiement effectué à l'équilibre dans le cas des instruments flexibles, l'efficacité est, *a contrario*, réduite par deux pour la taxe pigouvienne et l'instrument mixte.

Les instruments à taux fixes sont moins performants, sauf pour la taxe fixe de premier rang qui, du fait de son niveau, permet d'atteindre la trajectoire optimale de prélèvement.

Au total, si les différents instruments présentés permettent de diminuer les prélèvements (efficacité toujours supérieure à 52 % et 74 %, respectivement pour les comportements myope et rationnel), certains (AmbFix, TaxFlex et MixFlex) paraissent moins efficaces : le coût induit par leur existence est donc plus élevé que le gain qu'ils procurent à la collectivité. Pour améliorer l'efficacité des instruments basés sur des déclarations individuelles de prélèvement et également rendre plus équitable la distribution, il serait possible d'instaurer, en plus de la taxe, une subvention ou d'appliquer des seuils de paiement.

Le test des outils de gestion via des expériences en laboratoire

Dans la partie précédente, nous estimions les degrés d'efficacité et d'efficacité de différents instruments à partir de modèles. Comme dans toute démarche de modélisation, il est important de confronter le résultat des modèles à des observations réelles, mais tester des politiques de gestion de la ressource en eau est difficilement réalisable : problème d'acceptabilité et absence de chroniques suffisantes pour établir des modèles statistiquement validés à partir des préférences révélées.

Pour palier cette difficulté, nous avons choisi d'entreprendre une démarche d'économie expérimentale (Krause *et al.*, 2002 ; Samuelson, 2005) qui permet de reconstituer une situation économique stylisée en laboratoire. Cette

démarche permet (1) de tester des prédictions de modèles théoriques formels, (2) d'étudier les effets de certaines variables dont on mesure mal théoriquement et empiriquement l'impact et/ou (3) de formuler des recommandations à l'usage des décideurs.

Ce test reste virtuel : il n'est pas réalisé en grandeur nature mais il est effectué dans le cadre d'un univers contrôlé, en laboratoire et en suivant un protocole expérimental strict. Pour contrôler les paramètres extérieurs à l'expérience, il est courant de réaliser ces expériences avec des sujets candides (des étudiants) auxquels on ne présente pas l'objet réel de l'étude (décontextualisation). Cette démarche est sensée bien représenter le comportement que les acteurs auraient dans la réalité, la participation aux séances étant rémunérée en fonction des résultats obtenus (Eber et Willinger, 2005). Dans cette partie, nous exposons les expériences que nous avons réalisées puis en confrontons les résultats avec les conclusions de la modélisation.

Résumé des expériences de tests réalisées

Dans le cadre des expériences conduites à l'université de Montpellier 1 sur la situation présentée auparavant, le protocole expérimental avait comme caractéristiques principales :

- une décontextualisation. « L'expérience à laquelle vous allez participer est destinée à l'étude de la prise de décision. [...] Elle comporte 4 séries de 10 périodes chacune. Au début de l'expérience, vous disposerez d'une dotation de 300 points. À chaque période, vous pourrez accumuler des points supplémentaires ou en perdre. Le nombre de points que vous gagnerez dépendra à la fois de vos propres décisions et des décisions prises par les 4 autres membres de votre groupe. [...] Vos gains au cours d'une période dépendent du nombre d'unités que vous retirez dans cette période, et du nombre d'unités disponibles dans le compte au début de cette période... » ;

- une réduction de la complexité de l'environnement de décision pour faciliter le déroulement pratique des séances : par exemple, les revenus et les coûts de prélèvement ne sont pas distingués, tout ayant été présentés en termes de profits et, dans les traitements avec instruments, la pénalité individuelle et le taux des taxes ont été simplifiés ;

– des sujets candides : des étudiants choisis au hasard parmi un pool de 500 (niveaux licence 1 et master 1) n'ayant pas vécu d'expériences similaires auparavant. Le recrutement a été effectué principalement par courriel. Les participants étaient invités à participer dans un jeu expérimental d'une durée d'une heure et demie à deux heures, et recevraient un paiement dont le niveau dépendait de leurs décisions et de celles prises par l'ensemble du groupe pendant le déroulement du jeu (en plus d'un forfait de présence et d'un dédommagement éventuel pour le transport) ;

– des instructions papier, une lecture des instructions à voix haute pour s'assurer de la compréhension et montrer que tous les participants ont les mêmes instructions, et un questionnaire préliminaire pour s'assurer de la bonne compréhension des règles. Les sujets jouent ensuite directement ;

– des groupes de 5 membres. Pour garantir l'anonymat, au moins deux groupes ont participé à chaque séance, et les sujets étaient distribués aléatoirement dans des box séparés (il était interdit de communiquer avec les autres participants et avec l'extérieur) ;

– 4 répétitions du jeu. À chaque séance, les participants ont répété quatre fois un jeu dynamique

à 10 périodes. La composition des groupes et le cadre de décision (traitement) restait la même pendant les 4 séries.

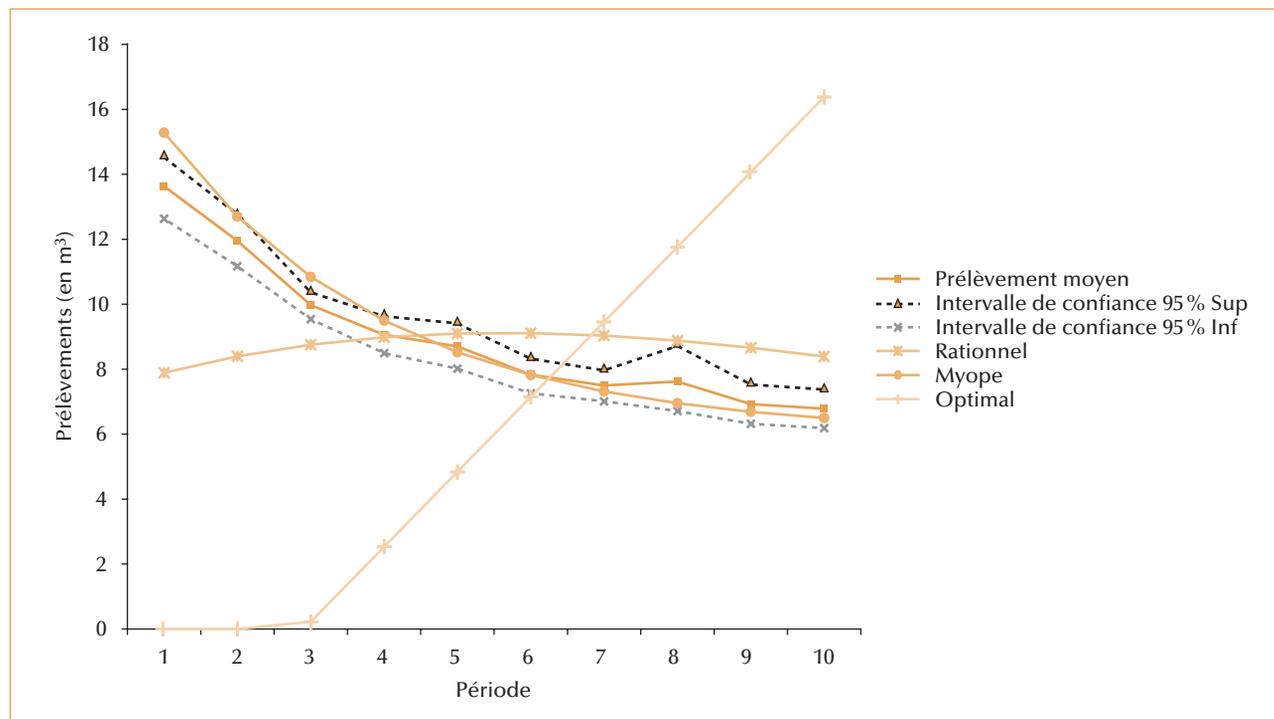
Au total, deux séances avec 15 sujets ont été organisées pour chaque traitement (sauf pour une des séances du traitement MixFix où il n'y a eu que 10 participants). Ce sont ainsi des données sur 54 groupes qui ont été collectées, soit un total de 213 séries.

L'analyse des expériences a été réalisée en deux étapes. Tout d'abord, le traitement « laissez faire » permet d'identifier le comportement théorique (rationnel, myope et optimum) qui s'ajuste le mieux aux observations lorsque la puissance publique n'intervient pas. La confrontation avec les résultats (figure 1) révèle que les sujets, au cours des 10 périodes du jeu, ont plutôt un comportement myope : les intervalles de confiance « bootstrap » (Efron et al., 2001) se superposent à la prédiction myope dans presque toutes les périodes. Puis la performance de chaque instrument a été étudiée.

Confrontation des résultats des expériences à ceux de la modélisation

Les résultats des expériences sont exposés dans la figure 2 « réalisations » et confrontés aux pré-

▼ Figure 1 – Prédictions théoriques vs prélèvements observés de la stratégie de laissez-faire.



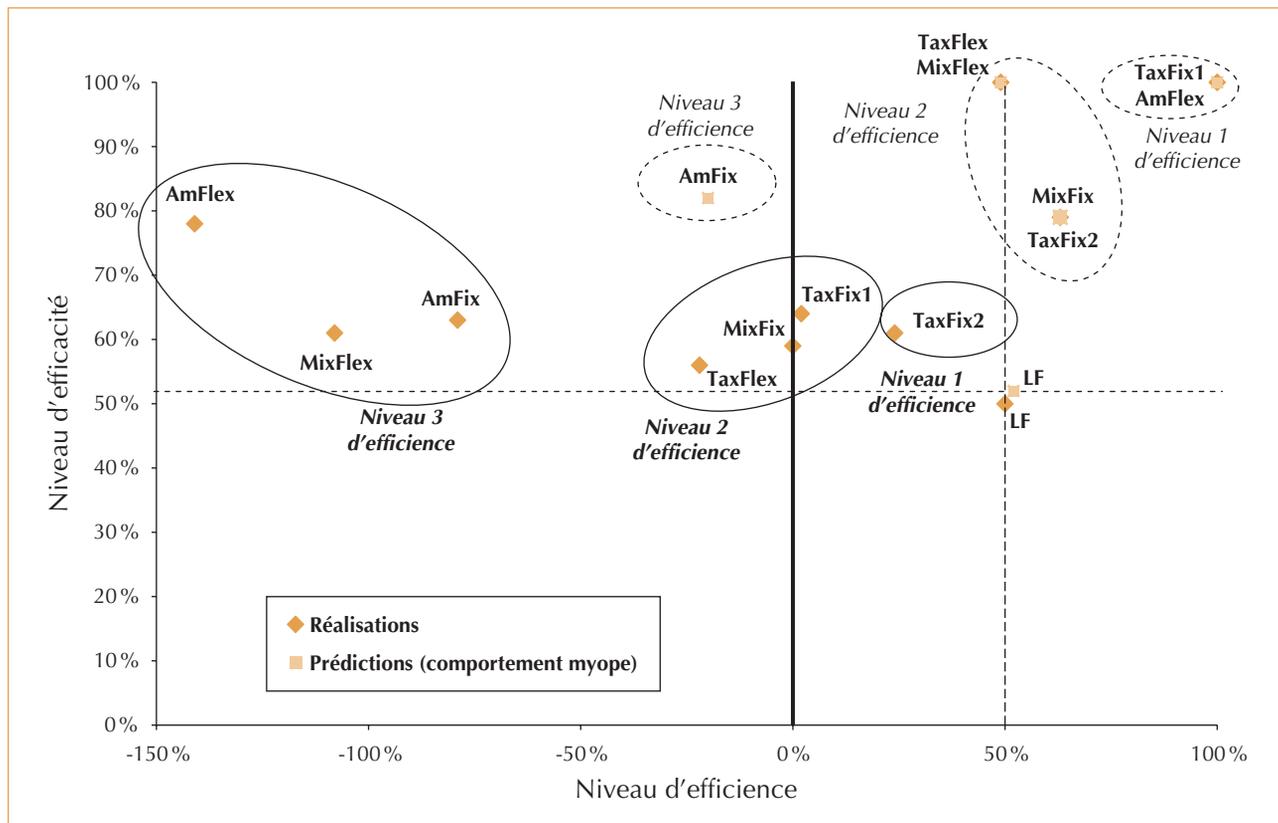
dictions dans le cas du comportement myope : on observe dans cette figure un fort décalage entre les niveaux d'efficacité et d'efficacité prédits par le modèle et ceux constatés dans les expériences, les expériences ayant pour conséquence de déclasser un certain nombre d'instruments jugés théoriquement optimaux. Dans les expériences réalisées, c'est encore (même si à une moindre mesure que dans la théorie) la taxe ambiante flexible (AmbFlex) qui paraît l'instrument le plus efficace mais à un coût très élevé : les prélèvements constatés restent tout au long de l'horizon temporel significativement plus importants que les prélèvements prédits, ce qui conduit à des pertes généralisées, et donc classe au final cet instrument parmi les plus mauvais. La taxe pigouvienne à taux fixe de second rang (donc avec un taux moyen) est la plus efficace, suivie de celle de premier rang (donc avec un taux élevé). De manière générale, ce sont les instruments fixes qui sont alors plus performants (la taxe ambiante exceptée), et plutôt les taxes pigouviennes. Néanmoins, l'efficacité atteinte par ces derniers ne dépasse pas celle de la situation sans intervention : l'instauration d'instruments modifie donc

le comportement des préleveurs, mais pas dans la direction souhaitée.

Ces expériences nous permettent de dégager quatre grands types d'enseignements principaux.

Tout d'abord, ce sont les instruments les plus simples (comme la taxe pigouvienne et ceux à taux fixe) qui sont les mieux compris. Ceci est corroboré par l'observation d'un phénomène d'apprentissage, surtout lors de la première répétition du jeu : rien de mieux pour apprendre que d'être confronté à un instrument pour mieux y réagir la fois suivante. Notons aussi la référence inconsciente à des mécanismes similaires connus (comme les déclarations d'impôt) : ainsi, la grande majorité des sujets choisissant de frauder déclare un montant strictement positif alors qu'ils ne devraient déclarer, rationnellement, aucun prélèvement. De la même manière, les sujets n'arrivent pas à prendre en compte les conséquences d'un environnement complexe. Ainsi, le sujet n'intègre pas dans son raisonnement les externalités, même si elles ont un coût immédiat sur lui.

▼ Figure 2 – Prédictions théoriques vs prélèvements observés de la stratégie de laissez-faire.



Ensuite, les instruments sur lesquels les individus ont une prise directe s'avèrent plus acceptables selon les niveaux d'efficacité atteints : la taxe ambiante, générant même des pertes financières, serait totalement rejetée.

De plus, le niveau des instruments est important. S'il est trop faible, les individus l'ignorent ; s'il est trop contraignant (donc avec un coût jugé trop élevé), ils le rejettent (par exemple en fraudant massivement).

Enfin, ces expériences ont montré l'importance du contrôle des déclarations : la fraude est en effet le mécanisme à la base de l'inefficacité des instruments dans laquelle elle intervient. Pour être efficace, tout instrument basé sur l'auto-déclaration doit être accompagné d'une probabilité importante d'être contrôlé. Cette probabilité apparaît ainsi être un facteur plus déterminant (pour être incité à ne pas frauder) que le niveau de l'amende en cas de fraude constatée.

Conclusion

Pour rechercher les instruments économiques les mieux adaptés à la gestion des prélèvements agricoles diffus, une démarche en trois étapes a été conduite. Tout d'abord, des enquêtes de terrain ont permis de mieux représenter les comportements des préleveurs et de tester les réactions face à différents instruments. Ensuite, un modèle conceptuel de la situation a été élaboré, permettant de déterminer l'impact théorique de différents instruments. Enfin, ces prédictions théoriques ont été testées en laboratoire. Le principal avantage de cette méthodologie pour les décideurs publics réside dans la possibilité d'évaluer empiriquement, dans un environnement contrôlé, la performance théorique des prototypes de politiques publiques (ainsi que sa robustesse aux situations extrêmes) avant la mise en place d'une expérience pilote sur le terrain. Notons toutefois que pour les besoins de l'expérimentation, un certain nombre

de restrictions ont été faites : nous n'avons ainsi considéré qu'un seul type d'agriculteur irrigant (des maraîchers). Si un certain nombre des conclusions présentées dépendent donc de ces restrictions et nécessiteraient d'être nuancées pour être étendues à d'autres situations, d'autres (que nous allons maintenant présenter) peuvent être *a priori* généralisées, les comportements observés semblant assez génériques.

La pénalité collective est l'instrument le plus rejeté, que ce soit par les agriculteurs sur le terrain, ou par les sujets en laboratoire. L'instrument mixte, dans la forme testée, semble peu acceptable : son mécanisme a été mal compris, il est rejeté par les individus non fraudeurs (même s'il peut permettre de faciliter les dénonciations) et il est difficile à instaurer si le niveau total prélevé n'est pas aisément mesurable. La taxe individuelle au volume semble l'instrument le plus efficace, à condition que son niveau soit suffisamment élevé.

De manière générale, cette recherche permet de proposer les recommandations suivantes : l'instrument doit être conçu pour être facilement compréhensible. Il pourrait même être envisagé d'y associer une information ou une formation pour éviter la phase d'apprentissage et en faciliter sa compréhension (expliquer la manière « optimale » d'y réagir). De plus, l'instrument doit être basé sur des incitations individuelles et non collectives. Ensuite, la possibilité de fraude doit être minimisée par une probabilité de contrôle élevée (probabilité qu'il n'est d'ailleurs pas indispensable d'afficher) ou par la mise en place d'outils comme les compteurs télémétriques⁵, y compris sur les captages individuels, qui rendent caduque l'auto-déclaration. Enfin, il est important que l'instrument soit accepté et donc qu'il soit d'un coût minimum voire nul pour les personnes qui se comportent de manière optimale : la mise en place de seuils d'exonération, ou de subventions, est donc très importante. □

5. Compteurs permettant les relevés à distance.

6. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.

Remerciements

Le travail conduit depuis 2004 sur la plaine du Roussillon a pu être réalisé grâce au soutien financier de la région Languedoc-Roussillon (programme Syscolag), des ministères en charge de l'agriculture, de l'environnement (Direction de l'eau) et de l'IFREMER⁶ (PNEC).

Résumé

Pour rechercher les instruments économiques les mieux adaptés à la gestion des prélèvements agricoles diffus d'eau, une démarche en trois étapes est présentée : tout d'abord, des enquêtes de terrain (dans la plaine du Roussillon) ont permis de mieux représenter les comportements des préleveurs et de tester les réactions face à différents instruments. Ensuite, un modèle conceptuel de la situation a été élaboré, permettant de déterminer l'impact théorique de différents instruments de taxation individuelle ou collective. Enfin, ces prédictions théoriques ont été testées en laboratoire pour chercher à évaluer empiriquement, dans un environnement contrôlé, la performance théorique des prototypes de politiques publiques.

Abstract

In order to determine the best adapted economic tools to manage diffuse agricultural water withdrawals, a research in three steps is presented in this article : firstly, surveys (in Roussillon plain located in South of France) allow to improve the representation of withdrawers' behaviour and to test their reactions against some economic instruments. Secondly, a conceptual model is built, allowing determining theoretical impact of different instruments. Thirdly, these theoretical predictions are tested in laboratory with naïve subjects to evaluate empirically, in a controlled environment, the performance of these instruments.

Bibliographie

AUNAY, B., 2007, *Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers, thèse en hydrogéologie*, École doctorale « Biologie des systèmes intégrés, agronomie, géosciences, hydrologie, environnement (ED 167 – SIBAGHE) », université Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, 263 p.

AUNAY, B., DORFLIGER, N., DUVAIL, C., GRELOT, F., LE STRAT, P., MONTGINOUL, M., RINAUDO, J.-D., 2007, Chapter 34 : A multidisciplinary approach for assessing the risk of seawater intrusion in coastal aquifers : The case of the Roussillon Basin (France), in *Aquifer Systems Management : Darcy's legacy in a world of impending water shortage*, (eds LAURENCE, C., de MARSILY, G.), Taylor & Francis, p. 457-468.

BROZOVIC, N., SUNDING, D.-L., ZILBERMAN, D., 2006, On the spatial nature of the groundwater pumping externality, in *American Agricultural Economics Association Annual Meeting, Long Beach, California*.

EBER, N., WILLINGER, M., 2005, *L'économie expérimentale*, Paris, 128 p.

EFRON, B., HORDAN, R., JOLIVET, E., YAHY, N., SAPORTA, G. (eds), 2001, *Le bootstrap et ses applications*, CISIA-CERESTA Éditions.

GIORDANA, G.-A., MONTGINOUL, M., 2006, Policy instruments to fight against seawater intrusion in coastal aquifers : an overview, *Vie et Milieu – Life and Environment*, vol. 56, n° 4, p. 287-294.

HARDIN, G., 1968, The tragedy of the commons, *Science*, vol. 162, p. 1243-1248.

KRITIKOS, A.-S., 2004, A penalty system to enforce policy measures under incomplete information, *International Review of Law and Economics*, vol. 24, n° 3, p. 385-403.

MONTGINOUL, M., 2005, *La gestion collective des prélèvements individuels : état d'avancement de l'action 7 de la convention DGFAR 2005 Eau, Agriculture et Hydraulique de l'Espace Rural*, Cemagref-UMR G-Eau, Montpellier, 66 p.

RUF, T., 2001, Droits d'eau et institutions communautaires dans les Pyrénées Orientales : les tenanciers des canaux de Prades (XIV^e-XX^e siècle), *Histoire et Sociétés Rurales*, vol. 16, p. 11-44.

SEGERSON, K., 1988, Uncertainty and incentives for nonpoint pollution control, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 15, n° 1, p. 87-98.

XEPAPADEAS, A.-P., 1992, Environmental policy design and dynamic nonpoint-source pollution, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 23, p. 22-39.