



**CONSTRUCTION ET EVALUATION EXPERIMENTALE D'UNE TAXE AMBIANTE
DIFFERENCIEE ADAPTEE AUX PRELEVEMENTS DIFFUS D'EAU AGRICOLE**

Vincent Lenouvel^{1,2,+}, Marielle Montginoul¹, Sophie Thoyer²

¹ **CEMAGREF – UMR G-EAU, Montpellier, France**

² **UMR LAMETA, Montpellier, France**

⁺ **Coordonnées : 361 rue JF Breton BP 5095 – 34196 Montpellier Cedex 05**

e-mail: vincent.lenouvel@cemagref.fr

Résumé :

La gestion des prélèvements agricoles d'eau souterraine peut être confrontée à un problème informationnel du fait de la méconnaissance du comportement individuel des irrigants. Par analogie avec les pollutions diffuses, nous parlons de prélèvements diffus. Le recours à un instrument économique tel qu'une taxe ambiante (Segerson, 1988), visant à atteindre un objectif environnemental défini et basé sur l'observation du comportement agrégé des agriculteurs, peut être envisagé. Les instruments basés sur la taxe ambiante souffrent cependant de nombreuses imperfections limitant leur portée pratique. L'introduction d'une dimension individuelle à la taxe ambiante, rendue possible par le fait que les prélèvements agricoles sont mesurables, peut permettre de gommer en partie ces imperfections. Dans cet article nous développons et testons expérimentalement un instrument de gestion des prélèvements agricoles diffus basé sur un contrat optionnel passé entre agriculteurs et pouvoirs publics. Ce contrat impose aux agriculteurs de révéler de l'information sur leurs prélèvements et les expose à une taxe ambiante différenciée et des contrôles aléatoires de leurs prélèvements.

Mots clés :

Information imparfaite, Taxe ambiante différenciée, Prélèvements diffus, Irrigation, Eau souterraine, Economie expérimentale.



4èmes journées de recherches en sciences sociales

INRA SFER CIRAD

09, 10 décembre 2010 –Rennes, France

1. INTRODUCTION

Croissance démographique, intensification de l'agriculture irriguée et changement climatique sont autant de facteurs exacerbant les conflits autour de la ressource en eau. En France, sur les masses d'eau présentant des déficits structurels, la LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques), dans son article 21, prévoit de confier la répartition des volumes d'eau d'irrigation à un Organisme Unique (OU). L'OU est, entre autres, chargé d'arrêter chaque année un plan de répartition, entre les irrigants, du volume d'eau global dont le prélèvement est autorisé par les pouvoirs publics : le *volume prélevable*.

La répartition par l'OU du *volume prélevable* s'apparente à une gestion « quantité » (par opposition à une gestion « prix »), au niveau d'une masse d'eau, s'appuyant sur des quotas annuels ou pluriannuels. Bien que la répartition de ce volume entre les irrigants puisse s'avérer conflictuelle, l'un des principaux enjeux sera certainement de faire respecter cette répartition une fois celle-ci arrêtée.

Ceci est d'autant plus problématique que l'information sur les prélèvements des irrigants dans les nappes n'est pas toujours disponible et vérifiable à tout moment : le manque de volonté affiché par une partie de la profession et la nature extensive de l'activité agricole limitent la possibilité pour les pouvoirs publics d'obtenir de l'information sur les prélèvements des irrigants à un coût raisonnable. Comment alors faire respecter à la fois le *volume prélevable* par le secteur agricole et sa répartition entre irrigants dans un contexte d'information imparfaite ?

Les prélèvements d'eau souterraine peuvent présenter un contexte informationnel proche de celui des pollutions diffuses. Les irrigants sont identifiables, mais leurs prélèvements ne peuvent être mesurés du fait de l'absence de déclaration des forages et de compteurs d'eau. Le comportement agrégé des agriculteurs, c'est à dire leurs prélèvements totaux, peut cependant être estimé indirectement par l'observation de l'évolution du niveau piézométrique de la nappe. Par analogie, nous parlons donc de prélèvements diffus. Le recours à des instruments adaptés aux pollutions diffuses peut être envisagé.

Une alternative est de persuader les agriculteurs de révéler de l'information sur leurs prélèvements et de donner les moyens aux pouvoirs publics de contrôler leurs prélèvements en nappe : il faut donc qu'ils acceptent de déclarer sincèrement l'intégralité de leurs forages et qu'ils les équipent de compteurs d'eau dont l'information peut-être relevée par un contrôleur. Le problème de gestion des prélèvements diffus n'est donc pas assimilable à un pur problème de pollution diffuse. Néanmoins, il pose aussi des problèmes différents de ceux des pollutions sources dans lesquelles les agents et leur responsabilité individuelle vis-à-vis de ces pollutions est clairement identifiable.

C'est pourquoi, dans cet article, nous proposons un dispositif original de gestion des prélèvements en nappe qui s'appuie sur les instruments développés pour gérer les pollutions diffuses tout en prenant en compte les particularités des prélèvements diffus : il repose sur l'adhésion volontaire à un contrat de réduction de ses prélèvements, qui engage l'agriculteur à fournir l'information nécessaire à leur contrôle. En cas de dépassement du *volume prélevable*, les agriculteurs sont soumis à un système de taxe ambiante et de contrôle aléatoire, différencié en fonction de la signature du contrat.

Après avoir exposé dans la section 2 les limites des mécanismes théoriques proposés dans la littérature pour gérer les pollutions diffuses, la section 3 décrit l'instrument élaboré pour gérer les prélèvements agricoles en nappe. Les sections 4 et 5 exposent le modèle et le protocole expérimental permettant de tester cet instrument et la partie 6 présente les principaux résultats de ces expériences. Enfin, la partie 7 conclut ce travail.

2. LES LIMITES DES MECANISMES THEORIQUES EXISTANTS

Les mécanismes classiques de taxe ambiante.

Les caractéristiques informationnelles des problèmes de pollution diffuse ont servi d'ancrage au développement d'outils économiques nouveaux, s'appuyant sur l'observation du comportement collectif et non pas sur les actions individuelles. Lorsqu'il est impossible (ou trop coûteux) d'observer les comportements individuels des agents, mais possible d'observer leur comportement agrégé, des pénalités collectives peuvent permettre d'atteindre, sous certaines conditions, un objectif environnemental de manière efficiente. Segerson (1988) propose la première un instrument simple visant à gérer les pollutions diffuses en se basant sur la performance collective des agents : la taxe ambiante (Segerson, 1988).

Si la pollution totale mesurée dans le milieu W excède un objectif environnemental W^* , tous les agents j potentiellement pollueurs sont tenus de payer une taxe de taux κ_j proportionnelle au dépassement de cet objectif environnemental, quelle que soit leur contribution individuelle à cette pollution. Le contrôle se focalise donc sur le niveau total de polluants dans une zone géographique donnée (ou niveau ambiant). Il s'agit de définir un objectif environnemental mesurable (pollution d'une masse d'eau), reflétant le comportement agrégé des agents (pollution totale émise). Dans le cas des prélèvements diffus, un objectif environnemental comme le *volume prélevable* peut se traduire en un seuil piézométrique de référence.

La taxe ambiante n'est effective que sous un ensemble de conditions très restrictives, rarement rencontrées dans la réalité, ce qui explique en partie son faible succès¹ : outre le fait que les résultats optimaux ne sont obtenus que pour des conditions restrictives concernant le comportement des agents (maximisateurs, neutres au risque, suivant une stratégie de type Nash-Cournot), nous identifions quatre autres écueils :

- 1) Il faut pouvoir faire un lien direct entre observation du niveau de pollution dans le milieu et comportement agrégé des agents. Or ce lien est souvent affecté par des événements stochastiques indépendants des choix des pollueurs. De même le niveau piézométrique d'une nappe peut être affecté par les conditions climatiques. Il y a donc une marge d'incertitude sur le lien entre cette observation et les prélèvements agricoles.
- 2) La taxe ambiante est inapplicable juridiquement en France : il n'est pas en effet possible de sanctionner quelqu'un dont la responsabilité individuelle n'est pas engagée.
- 3) Elle est souvent difficile à faire accepter politiquement car jugée très inéquitable : un agent peut potentiellement payer une pénalité alors qu'il n'est pas individuellement responsable et qu'il a déjà supporté le coût de réduction de son impact sur l'environnement.
- 4) Elle peut être perçue comme une charge fixe par les agents si ceux-ci sont trop nombreux, auquel cas l'incitation à réduire leurs émissions est nulle.

Pour pouvoir contourner en partie ces écueils, des ajustements à ce mécanisme doivent être proposés, notamment en introduisant une dimension individuelle à la taxe ambiante. Certains auteurs ont déjà fait un pas en ce sens.

¹ Peu de politiques environnementales reposent sur des mécanismes de taxe ambiante. L'*Everglades Forest Act* impose une taxe uniforme basée sur le foncier en cas de non respect des objectifs de réduction de teneur en phosphore dans le milieu (Ribaud et Caswell, 1999). Segerson (1999) liste 4 autres cas d'instruments mis en place dans différents Etats américains et dont la structure se rapproche de la taxe ambiante (Segerson, 1999).

Des pénalités collectives introduisant une dimension individuelle.

Le cas des prélèvements diffus permet d'envisager l'acquisition, à un coût raisonnable, d'information sur les comportements individuels grâce à la mise en place de systèmes de mesure. Se situant à mi-chemin entre les problèmes de pollution diffuse et de pollution source, les prélèvements diffus sont un parfait exemple de situation où des pénalités collectives introduisant une dimension individuelle pourraient être mises en place.

Millock et Salanié (2005) étudient l'impact d'une potentielle coopération entre agents sur l'efficacité des taxes ambiantes (Millock et Salanié, 2005). La méconnaissance par les pouvoirs publics du degré de coopération entre les agents est une source d'inefficacité. Les auteurs en concluent que l'introduction d'un système de mesure des émissions individuelles doit être envisagée. Ils étudient alors **un contrat optionnel** proposant à chaque groupe, si le coût de mesure des émissions individuelles n'est pas prohibitif, le choix entre :

- Une taxe pigouvienne ou
- Une taxe ambiante décroissante avec le niveau de coopération au sein des groupes².

Les groupes les plus coopératifs choisiront une taxe ambiante tandis que les groupes les moins coopératifs choisiront la taxe pigouvienne. L'aspect optionnel de ce mécanisme permet de réduire les pertes de bien être associées à l'aversion au risque des agents. Les groupes les moins coopératifs ne sont pas affectés puisqu'ils optent pour une taxe pigouvienne. Les groupes les plus coopératifs optent pour une taxe ambiante plus faible que dans le mécanisme de Segerson (1988). Ce mécanisme implique cependant que les pouvoirs publics soient capables de connaître le degré de coopération au sein des groupes.

Karp (2005) reprend l'idée de Millock and Salanié (2005), dans un cadre de taxation dynamique³, en étendant la notion de coopération à la formation de *clubs* par des agents investissant dans des équipements de mesure (Karp, 2005). Les membres d'un *club* ne sont alors soumis qu'à une taxe ambiante sur les émissions du *club*. Il conclut que l'intérêt des agents à investir dans le *club* dépend de l'objectif environnemental, de la vitesse d'ajustement de la taxe ambiante, de la patience et de la fonction de profit des agents. En fonction de ces paramètres, il déduit que les agents choisiront soit d'investir chacun dans un instrument de mesure en formant un *club* par agent, soit de ne rien investir, c'est-à-dire de ne former qu'un unique *club*. Le premier cas correspond alors à une pollution source et le second à une pollution diffuse. Il n'y aurait alors aucune situation intermédiaire.

Kritikos (2004) propose un mécanisme mixte combinant (Kritikos, 2004) :

- Une auto-déclaration des émissions par les agents,
- Des taxes individuelles et
- Une taxe ambiante.

Si le niveau de pollution W excède la somme des émissions déclarées W^* , les pouvoirs publics appliquent une taxe ambiante de taux κ_j basée sur le dépassement des déclarations. En parallèle, il contrôle une partie des agents en les choisissant de manière aléatoire⁴.

² Ceci est dû au fait que les agents coopératifs prennent en compte l'impact de leurs émissions sur leur revenu, mais également sur celui des autres membres de leur groupe. Pour parvenir à une même réduction de leurs émissions, les agents coopératifs ont donc besoin d'une moins forte incitation.

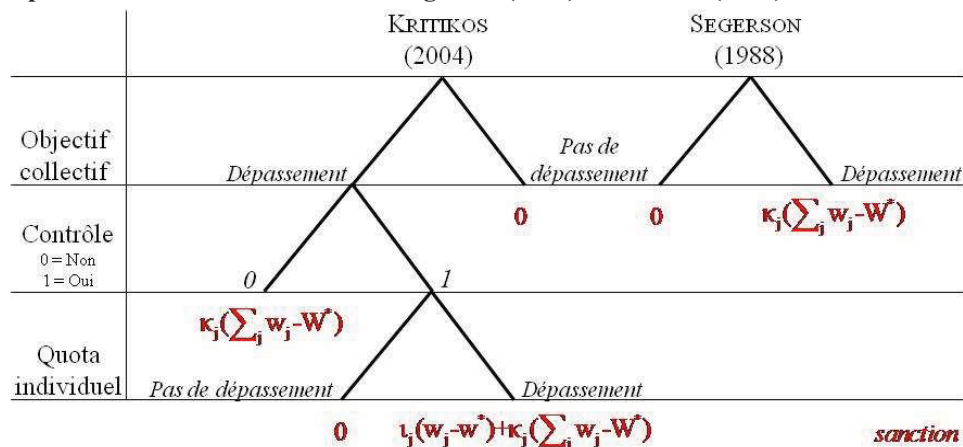
³ Le niveau de la taxe peut changer en fonction du niveau de pollution.

⁴ Le concept d'inspection aléatoire motivée par le dépassement d'un niveau de pollution donné a été étudié par ailleurs (Franckx, 2002).

- Si cette inspection révèle que les émissions w_j de l'agent contrôlé ont dépassé les émissions préalablement déclarées w_j^* , il est soumis, en plus de la taxe ambiante $\kappa_j(W-W^*)$, à une taxe individuelle $\iota_j(w_j-w_j^*)$ proportionnelle à la différence entre ce qu'il a déclaré et ce qu'il a émis.
- Si cette inspection prouve que l'agent n'a pas émis plus que sa déclaration, il est exempté de la taxe ambiante et individuelle.

Il est important de retenir que ce mécanisme repose sur l'hypothèse que le contrôle permet de caractériser et de mesurer le dépassement des émissions déclarées. La Figure 1 représente schématiquement les mécanismes de Segerson (1988) et de Kritikos (2004).

Figure 1 : Représentation des mécanismes de Segerson (1988) et Kritikos (2004)



En conclusion, le mécanisme mixte proposé par Kritikos (2004) constitue une amélioration par rapport à la taxe ambiante de Segerson (1988) en termes d'acceptabilité : il offre une possibilité pour les agents vertueux d'échapper à la taxe ambiante s'ils respectent un niveau d'émission individuel prédéfini (dans notre cas un quota d'eau individuel). Cependant, les agents vertueux non contrôlés sont toujours soumis à la taxe ambiante et la responsabilité individuelle n'est toujours pas engagée.

3. PRESENTATION MECANISME ORIGINAL DE GESTION DES PRELEVEMENTS DIFFUS

L'instrument de gestion proposé reprend en partie certains des mécanismes décrits ci-dessus :

- Le mécanisme de taxe ambiante de Segerson (1988) ;
- Le contrat optionnel de Millock et Sallanié (2005) ;
- Le système d'auto-déclaration et d'inspection aléatoire de Kritikos (2004).

Nous décrivons ce mécanisme en précisant ses principales caractéristiques et en indiquant en quoi il permet de répondre en partie aux limites des outils présentés précédemment.

Un contrat optionnel débouchant sur une taxe ambiante différenciée

L'instrument, noté $\theta_{j,k}$, développé afin de gérer les prélèvements diffus repose sur un contrat k permettant à M agents j de mieux valoriser leur eau grâce à un changement de pratique⁵. En cas de dépassement d'un objectif environnemental Ω^* prédéfini par les pouvoirs publics⁶, ceux-ci mettent en place :

⁵ Le contrat proposé aux agents doit leur permettre de mieux valoriser l'eau souterraine et de réduire leurs prélèvements grâce à un changement de pratiques agricoles ou d'irrigation.

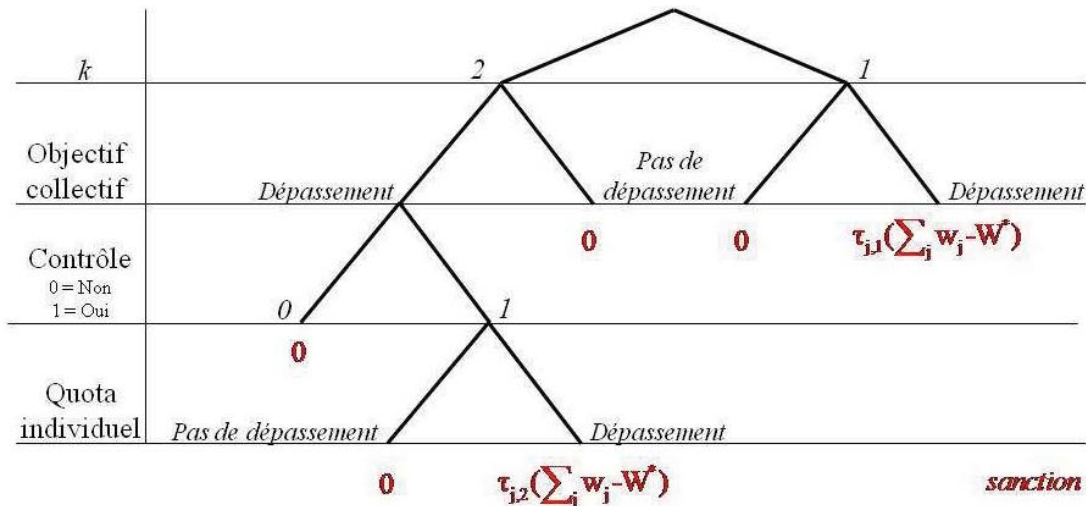
⁶ Cet objectif peut être une estimation du *volume prélevable* ou un niveau piézométrique de référence.

- Une taxe ambiante différenciée de taux $\tau_{j,k}$ proportionnelle au dépassement du *volume prélevable* W^* et
- Un contrôle des prélèvements individuels de certains agents.

Le contrat k débouche sur un mécanisme optionnel laissant le choix entre :

- Une taxe ambiante classique, en l'absence de signature ($k = 1$) ou
- Un mécanisme proche de celui de KRITIKOS (2004), en cas de signature ($k = 2$).

Figure 2 : Représentation la structure de l'instrument développé



La Figure 2 présente la structure du mécanisme $\theta_{j,k}$: la partie droite ($k=1$) est équivalente à la taxe ambiante de Segerson (1988) tandis que la partie gauche ($k=2$) est proche du mécanisme de Kritikos (2004). Il est alors intéressant de comparer la structure de notre instrument avec ceux présentés dans la Figure 1.

Contrat basé sur la présomption d'innocence et permettant de révéler de l'information

En signant le contrat ($k = 2$), un agent ne devra s'acquitter d'une taxe ambiante que si un contrôle révèle qu'il a dépassé son quota w_j^* : là où Kritikos (2004) s'appuie sur la présomption de culpabilité, nous nous basons sur la présomption d'innocence. La responsabilité individuelle des contractants est alors engagée.

Le contrat impose à l'agent j de révéler de l'information aux pouvoirs publics grâce à la déclaration des forages et à la mise en place de compteurs d'eau et à respecter son quota d'eau. On peut ainsi envisager de passer d'un système de prélèvements diffus à un système de prélèvements source.

L'inspection chez un agriculteur doit permettre de déterminer si celui-ci a dépassé son quota. Contrairement à Kritikos (2004), nous ne supposons pas que ce dépassement est mesurable : il peut être dû à l'absence de déclaration d'un ou plusieurs forages (donc sans dispositifs de mesure) ou la non-conformité des compteurs d'eau.

Une possible asymétrie informationnelle entre pouvoirs publics et agents

Le lien entre niveau de la nappe et *volume prélevable* est incertain. Aussi le seuil de déclenchement du mécanisme Ω^* peut différer du *volume prélevable* W^* afin de garantir à chaque agent la consommation de son quota w_j^* sans que le mécanisme ne se déclenche.

Aussi, nous supposons $\Omega^* = W^* + \varepsilon$ avec $\varepsilon \geq 0$ proportionnel à la précision du lien entre niveau de déclenchement et *volume prélevable*. Il est intéressant de noter que si $\varepsilon \neq 0$, la taxe

devient non-linéaire et peut être comparée au mécanisme combinant une taxe ambiante et une amende de groupe (*group fine*) de montant fixe.

De plus, le seuil de déclenchement doit être défini à l'avance par les pouvoirs publics tandis que les agents peuvent suivre son évolution à tout moment. En cas d'incertitude sur la mesure du *volume prélevable*, il existe une asymétrie d'information entre les pouvoirs publics et les M agents quant au déclenchement du mécanisme $\theta_{j,k}$. D'un point de vue formel, il s'écrit :

$$\theta_{j,k} \begin{cases} \theta_{j,1} = \tau_{j,1} \cdot (W - W^*) & \text{si } \sum_{j=1}^M w_j = W > W^* + \varepsilon \\ \theta_{j,2} = \tau_{j,2} \cdot (W - W^*) & \text{si } \sum_{j=1}^M w_j = W > W^* + \varepsilon, j \text{ est contrôlé et } w_j > w_j^* \\ \theta_{j,k} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le paiement par un agent d'une éventuelle taxe et le montant de cette taxe est la résultante de 4 paramètres, (i) la signature du contrat par l'agent, (ii) le volume prélevé par l'agent, (iii) le volume prélevé par les ($M-1$) autres agents et (iv) le contrôle par les pouvoirs publics. Les 2 premiers paramètres sont maîtrisés par l'agent, le troisième est exogène tandis que le dernier est un paramètre exogène et aléatoire.

Une réponse à certaines limites de la taxe ambiante

Parmi les écueils identifiés limitant l'application de la taxe ambiante, nous avons cité sa faible acceptabilité et le fait qu'elle puisse être considérée comme une charge fixe lorsque le nombre d'agents M est important.

L'efficacité de l'instrument développé ne devrait être que faiblement impactée par le nombre d'agents soumis à la taxe ambiante. En effet, les agents peuvent, de manière certaine, échapper au mécanisme de sanction grâce au respect de leur quota d'eau : les agents ne considèrent donc plus la taxe ambiante comme un coût fixe.

Le mécanisme mixte proposé par Kritikos (2004) constitue une amélioration du mécanisme de Segerson (1988) en termes d'acceptabilité. Nous faisons un pas de plus en ce sens en présumant innocents les contractants. Afin d'augmenter cette acceptabilité, le niveau des taxes $\tau_{j,k}$ permettant d'atteindre de l'objectif environnemental doit être minimal pour limiter les transferts entre agents et pouvoirs publics.

Calcul de la taxe ambiante différenciée

Une résolution détaillée d'un modèle analytique du mécanisme est fournie en annexe.

Lorsque $\varepsilon = 0$, en supposant les agents rationnels, identiques et neutres au risque, le montant optimal et minimal de la taxe différenciée $\tau_k(\varphi)$ est le suivant :

$$\tau_{k(\varphi)}^* = \left\{ \tau_1^* = \frac{\partial R_1(w^I)}{\partial w} = \frac{R_1(w^I) - R_2(w^*)}{w^I - w^*}, \tau_{2(\varphi)}^* = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial R_2(w^*)}{\partial w} \right\} \quad (1)$$

Où $R_k(w)$ est la fonction de revenu des agents selon leur signature ($k = 2$) ou non ($k = 1$) du contrat. Elle est concave, bornée en \bar{w}_k avec $\bar{w}_1 > \bar{w}_2$ et $\frac{\partial R_2}{\partial w} \geq \frac{\partial R_1}{\partial w}$ (puisque le contrat permet de mieux valoriser l'eau), où φ est la probabilité de contrôle d'un contractant en cas de dépassement et où w^I est le volume maximisant le revenu espéré après taxe d'un agent non contractant.

L'équation (1) nous indique que pour inciter les contractants à respecter leur quota w^* , la taxe $\tau_{j,2}$ payée le contractant j est égale, en espérance, au revenu généré par le prélèvement d'une unité d'eau au-delà de son quota.

De plus, plus la probabilité de contrôle est faible, plus la taxe appliquée aux contractants contrôlés ayant dépassés leur quota doit être élevée. Comme $w^l \geq w^*$, la concavité de $R_k(w)$ et la différence de valorisation selon la signature du contrat nous donne $\tau_{j,1} \leq \tau_{j,2}$.

En regardant le taux de taxe τ_1^* payée par les non contractants, on s'aperçoit que le gain individuel généré par la non signature du contrat et le dépassement du quota est contrebalancé par le paiement de la taxe : $R_1(w^l) - R_2(w^*) = \tau_1^* \cdot (w^l - w^*)$.

Le mécanisme imaginé incite donc les agents à signer le contrat, à respecter leur quota w^* et à prélever collectivement le volume prélevable W^* .

Lorsque $\varepsilon > 0$, le mécanisme incite les agents à contracter, mais ne permet plus de faire respecter les quotas ni le *volume prélevable*. Les agents se partagent alors ε , le volume qu'il est possible de consommer au-delà du *volume prélevable* sans déclencher mécanisme.

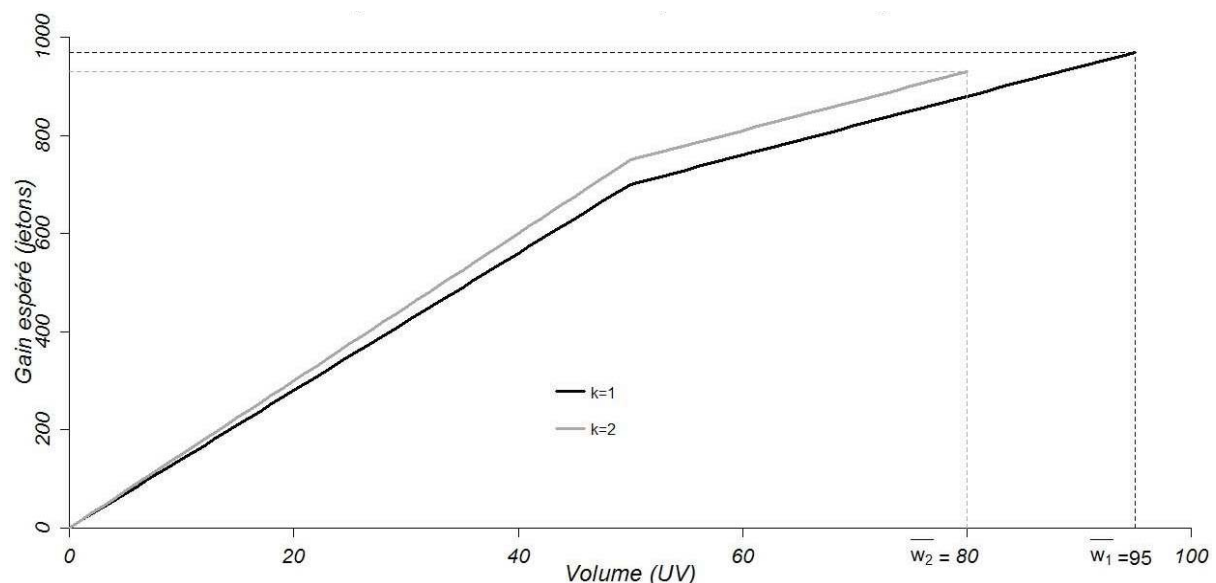
Afin de tester le mécanisme développé pour gérer les prélèvements agricoles diffus, nous avons développé un protocole expérimental reproduisant le mécanisme ci-dessus afin de mettre en situation des étudiants en laboratoire. Le modèle servant de base aux expériences ainsi que les prédictions théoriques des jeux sont décrits dans la partie suivante.

4. LE MODELE EXPERIMENTAL

Un modèle simplifié

Dans les expériences, 3 joueurs identiques (indités par $j = \{1, 2, 3\}$) choisissent de manière individuelle, simultanée et anonyme s'ils signent le contrat proposé ($k = 2$) ou non ($k = 1$) ainsi qu'un volume d'eau prélevé dans la nappe. Les gains des joueurs sont exprimés en unité de revenu (UR) par la fonction $R_{j,k}$, linéaire par parties et bornée, décrite dans l'équation (2) et représentée dans la Figure 3.

Figure 3 : Gain en fonction du volume d'eau prélevé et de la technologie choisie.



$$R_{j,k} = (13 + k) \cdot \min(w_j, 50) + 6 \cdot \max(w_j - 50, 0) \quad (2)$$

Avec $w_j \leq \bar{w}_k$ et $\bar{w}_k = \{95, 80\}$. Notons que cette fonction est croissante en w_j (exprimé en unité de volume UV) et maximale pour $k = 1$ et $w_j = 95$, donnant un revenu de 970 UR. Une table listant les valeurs de $R_{j,k}$ pour chaque valeur entière de w_j a été fournie aux joueurs.

Chaque joueur se voit attribué un quota w^* est égal à 50 UV. Le *volume prélevable* W^* est de 150 UV. Afin de faire respecter le *volume prélevable* et les quotas, la taxe ambiante différenciée $\tau_{k(\varphi)}^*$ est introduite dans l'expérience. En considérant une probabilité de contrôle $\varphi = 0.25$, l'équation (3) donne la valeur optimale de la taxe différenciée.

$$\tau_{k(0.25)}^* = \{6, 24\} \quad (3)$$

Nous considérons cependant qu'une incertitude existe entre les prélèvements totaux des joueurs et l'estimation de ces prélèvements. Aussi le mécanisme $\theta_{j,k}$ ne se déclenche que lorsque le groupe prélève plus de 180 UV dans la nappe. Celui-ci s'écrit alors :

$$\theta_{j,k} \begin{cases} \theta_{j,1} = 6.(W-150) & \text{si } W > 180 \text{ UV} \\ \theta_{j,2} = 24.(W-150) & \text{si } W > 180 \text{ UV, } j \text{ est contrôlé et } w_j > 50 \text{ UV} \\ \theta_{j,k} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Il est important de noter que si le mécanisme se déclenche au-delà de 180 UV prélevé par le groupe, la taxe ambiante différenciée est proportionnelle au dépassement du *volume prélevable*, i.e. 150 UV. La taxe est donc non-linéaire avec un coût fixe de $\varepsilon.\tau_k^* = \{180, 720\}$ en cas de dépassement.

Tableau 1 : Valeur des différents paramètres expérimentaux

	k = 1	k = 2
M	3	
W* (UV)	150	
ε (UV)	30	
w* (UV)	50	
\bar{w}_k (UV)	95	80
τ_k (UR)	6	24
φ	-	0.25

Tableau 2 : Prédictions théoriques pour M = 3 joueurs

	Sans instrument	Avec instrument
k	1	2
W (UV)	95	50 ^D , 60 ^{C*} , 80 ^H
w (UV)	285	150 ^D , 180 ^{C*} , 240 ^H

Les prédictions théoriques

Le Tableau 1 résume les valeurs expérimentales des différentes variables et paramètres tandis que le Tableau 2 résume les prédictions théoriques des expériences. Les expériences donneront lieu à un jeu sans l'instrument et à un autre jeu avec l'instrument. **Sans instrument**, aucun joueur cherchant à maximiser son gain ne signe de contrat. Chacun prélève 95 UV et le prélèvement du group est de 285 UV.

Avec instrument, les niveaux optimaux de taxe incitent chacun à contracter. L'existence d'une asymétrie d'information sur le déclenchement du mécanisme permet aux joueurs de se partager une rente $\varepsilon = 30$ UV sans avoir à payer de sanction. En jouant coopératif (^C), les joueurs se partagent cette rente afin d'obtenir 10 UV en plus de leur quota $w^* = 50$ UV, soit un prélèvement de 60 UV. Cet équilibre est optimal (^{*}) en ce sens qu'il permet de dégager, en espérance, le revenu le plus important pour le groupe⁷.

⁷ Tout prélèvement $W = W^* + \varepsilon$, avec $w_j \geq w^*$, est optimal. L'équilibre coopératif est l'équilibre symétrique.

En tentant de capter cette rente au détriment des autres joueurs, les joueurs peuvent prélever jusqu'à 80 UV. Si tous se comportent de la sorte, le mécanisme est déclenché et leur revenu baisse en espérance. Par analogie avec le *Hawk-Dove Game*⁸, nous appelons cette stratégie la stratégie *faucon* (^H). Cette stratégie peut être motivée par l'envie d'engager un bras de fer avec les autres joueurs afin de capter les 30 UV, mais également par un comportement preneur de risque ou par anticipation d'un prélèvement inférieur à 60 UV par les autres joueurs. Dans ce dernier cas, le joueur prélevant 80 UV pourrait être qualifié de *passager clandestin*, la structure de ce jeu étant proche de celle d'un jeu de contribution volontaire à un bien public.

Enfin, les individus averses au risque ou anticipant un dépassement des membres de leur groupe peuvent choisir de signer le contrat et de ne prélever que 50 UV, leur garantissant un revenu sûr. Nous les qualifierons de *colombe* par analogie avec le *Hawk-Dove Game*.

Au final, nous anticipons que le niveau des taxes permet de coordonner les prélèvements des agents autour du seuil de déclenchement du mécanisme $W^* + \varepsilon = 180$ UV. La répartition de la rente issue du prélèvement de ε dépend du comportement de chaque joueur. Du fait de l'instabilité issue de l'incitation qu'à chaque joueur à prélever plus, ou moins de 60 UV, nous prévoyons que cette coordination ne s'effectuera qu'en moyenne. La partie suivante présente le déroulement des sessions expérimentales

5. PRESENTATION DES EXPERIENCES

Les expériences ont réuni 51 étudiants montpelliérains (dont 55% de femmes), provenant de différents cursus scientifiques et économiques⁹. Nous avons conduit 3 sessions expérimentales dans les locaux du LEEM (Laboratoire d'Economie Expérimentale de Montpellier) durant le mois de juin 2010. Ces sessions, d'une durée de 2 heures, ont réuni entre 15 et 18 participants jouant sur ordinateur grâce à une interface développée sous [Z-Tree](#) (Fischbacher, 2007). En plus d'un défraiement compris entre 5 et 10 €, les participants ont été payés en moyenne 20.25 € en fonction de leur performance durant l'expérience (écart type = 2.51), avec des paiements s'étalant de 12.35 € à 23.86 €.

Durant chaque session, les participants jouent à 3 jeux différents dont les instructions sont distribuées au fur et à mesure de l'avancement de la session. Au début de chaque jeu, les participants font une lecture individuelle des instructions avant que l'expérimentateur ne procède à une lecture collective à voix haute, garantissant aux participants qu'ils ont bien tous les mêmes instructions.

Les instructions

Les instructions informent les participants que dans chaque jeu¹⁰ :

- Ils sont des agriculteurs irrigant leurs cultures avec de l'eau souterraine.
- Ils jouent par groupe de 3 et ne peuvent identifier les participants de leur groupe.
- La nappe baisse si le groupe dépasse $W^* = 150$ UV (unité de volume).
- Ils se voient allouer un quota de 50 UV.
- Ils doivent choisir individuellement et de façon anonyme :
 - s'ils signent le contrat proposé ou non.
 - un volume d'eau prélevé dans la nappe compris entre :

⁸ Le *Hawk-Dove Game* (ou *Chicken Game*) est un jeu de structure non-coopérative où le coût du conflit pour une ressource est supérieur aux gains tiré de l'exploitation de cette ressource.

⁹ Nous avons volontairement sélectionné ces cursus car nous désirions que les participants soient un minimum habitués à effectuer des tâches calculatoires.

¹⁰ Les instructions sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

- 0 et 95 UV si $k=1$.
- 0 et 80 UV si $k=2$.
- La signature du contrat précède le choix du volume. Le nombre de contractants dans le groupe est révélé aux participants avant qu'ils ne choisissent leur volume.
- Les décisions des participants sont simultanées.
- Aucune communication n'est autorisée.

Les instructions sont donc contextualisées et des images ont été intégrées afin de les rendre plus parlantes et d'aider les participants à se retrouver dans le texte¹¹.

Les jeux

Jeu 1t : il correspond au jeu décrit dans les instructions. Il dure 5 périodes au cours desquelles les groupes restent inchangés.

Jeu T (comme Taxe) : il introduit le mécanisme de sanction $\theta_{j,k}$ décrit dans la partie 2. Celui-ci est répété 15 périodes subdivisées en 3 parties de 5 périodes. Entre chaque partie, les joueurs changent de groupe.

Jeu D (comme Définitif) : il diffère du Jeu T uniquement car la signature du contrat est définitive jusqu'à ce qu'une partie se termine, et non temporaire. D'un point de vue théorique, cette différence n'a aucun impact car dans les 2 cas, il est optimal de signer le contrat à chaque période. Dans la pratique, la durée d'un engagement peut influencer la propension des joueurs à signer un contrat.

Les questionnaires

Avant de démarrer les jeux, un questionnaire de compréhension permet de s'assurer que les participants en ont compris les règles. A la fin de chaque jeu, nous avons interrogé les joueurs sur leurs stratégies durant le jeu et sur leur avis sur l'instrument. Enfin, à la fin de l'expérience, nous leur avons demandé de nous indiquer certaines de leurs caractéristiques (âge, cursus,...). La partie suivante résume les principaux résultats de ces expériences.

6. PRINCIPAUX RESULTATS

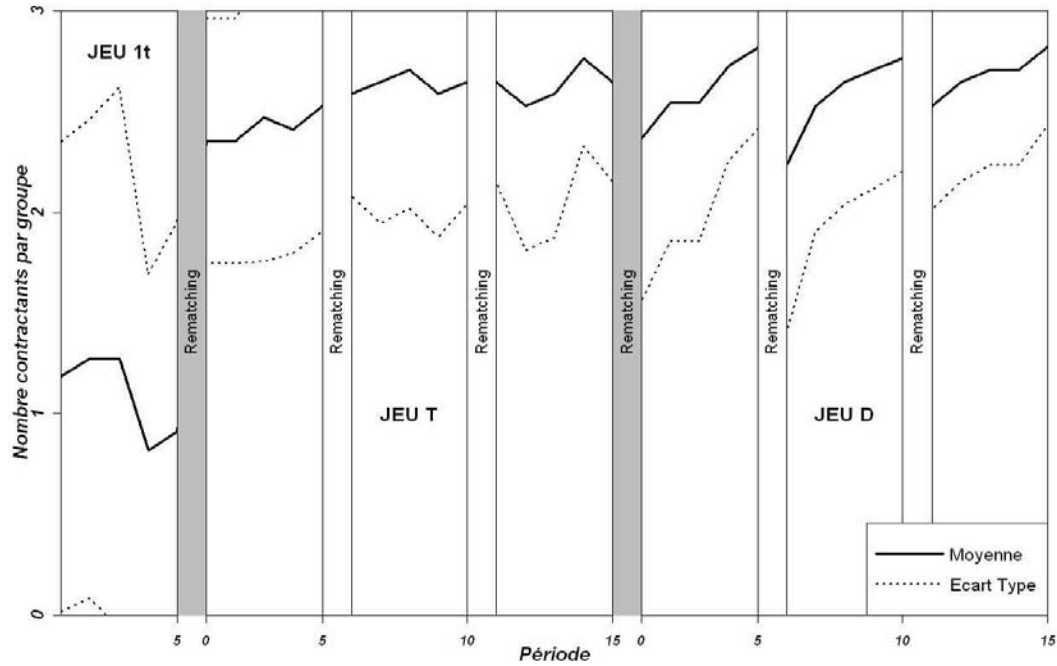
Résultat 1 : Si une majorité des participants signe le contrat, le mécanisme ne parvient pas à inciter la totalité des participants à le signer.

Le mécanisme de sanction différencié doit théoriquement conduire à ce que l'ensemble des participants signe le contrat proposé par les pouvoirs publics. Or nous constatons que dans le jeu T (jeu D), seuls 86% (87%) des contrats proposés sont signés par les participants et seulement 63% (65%) des groupes ont un nombre de cocontractants égal à 3.

Le nombre de contractants tend à se rapprocher des prédictions théoriques au fur et à mesure de l'avancée des jeux (Figure 4) : il diminue dans le jeu sans instrument (1t) et augmente dans les jeux avec instrument (T et D). Ainsi, le nombre de cocontractants est égal à 3 dans plus de 68% des cas dans la dernière partie des jeux T et D.

¹¹ Sur les 3 sessions menées, 1 session regroupant 15 joueurs nous a servi à vérifier que l'introduction d'image n'avait pas d'impact sur le comportement des participants.

Figure 4 : Evolution du nombre de contractants par groupe au cours des jeux.

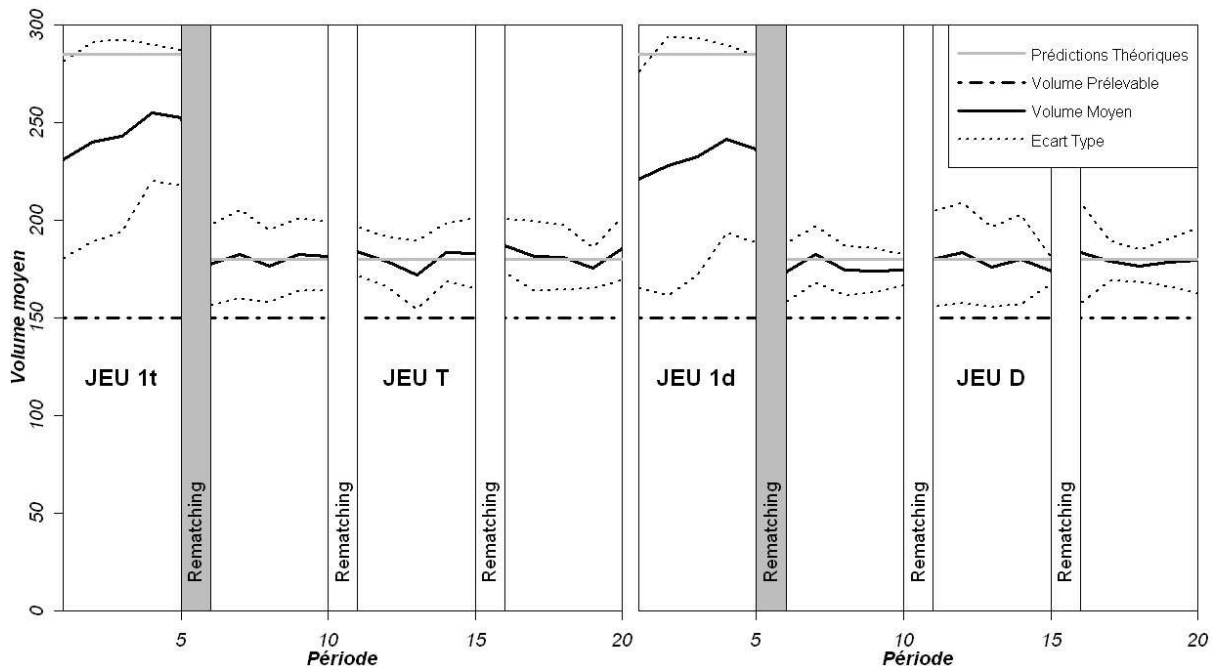


Résultat 2 : L'introduction du mécanisme de sanction diminue significativement les volumes prélevés par les groupes et augmente le nombre de contrats signés.

L'introduction du mécanisme de taxe T diminue de manière significative le volume moyen prélevé par les groupes et augmente significativement le nombre de contrats signés par rapport au jeu sans instrument 1t ($p < 0.001$ dans les 2 cas, test de Wilcoxon Mann Whitney sur données indépendantes).

Lorsque le jeu D est joué après le jeu 1d, son impact sur la réduction des prélèvements et la signature du contrat semble plus limité ($p=0.036$ et $p=0.079$), notamment car plus de contrats sont mécaniquement signés dans le jeu 1d que dans le 1t du fait du caractère définitif du contrat. La Figure 5 présente l'évolution des volumes prélevés par les groupes et l'impact du passage du jeu 1t au jeu T.

Figure 5 : Impact de l'introduction du mécanisme de sanction sur le volume prélevé par les groupes.



Résultat 3 : Si le mécanisme ne permet pas de faire respecter le volume prélevable, il fait converger les prélèvements vers le seuil de déclenchement du mécanisme.

La Figure 5 montre que si le volume moyen prélevé par groupe est statistiquement supérieur au *volume prélevable*, ce volume est proche de $W^* + \varepsilon = 180 \text{ UV}$ dans les jeux T ($W=180.6 \text{ UV}$) et D ($W=182.2 \text{ UV}$). Le test de WMW conforte cette impression ($p=0.919$ et $p=0.368$). Le mécanisme permet d’anticiper que le volume prélevé par les groupes se situe en moyenne autour du seuil de déclenchement du mécanisme. Nous soulignons le fait que le volume prélevé n’égale 180 UV que dans 20% (28%) des cas dans le jeu T (D).

L’observation du coefficient de variation¹² des volumes prélevés par les groupes (Tableau 3) nous indique que la variabilité des prélèvements des groupes diminue au fil des périodes. Cette diminution est particulièrement visible pour le jeu au contrat définitif D dont le coefficient passe de 10.9% à 7.8% (10.3% à 8.3% pour le jeu T).

Tableau 3 : Coefficient de variation en fonction des périodes et des parties (en %).

	Périodes	Partie 1		Partie 2		Partie 3		Total
Jeu T	1	10.2		9.2		10.9		10.3
	2	10.6		7.2		8.5		8.8
	3	8.6	9.2	8.7	9.0	9.2	8.5	8.9
	4	8.4		9.8		5.5		8.2
	5	8.6		9.3		7.2		8.3
Jeu D	1	8.2		12.2		11.3		10.9
	2	8.2		13.1		7.0		9.7
	3	10.4	9.1	8.7	10.3	6.8	8.0	8.9
	4	9.2		9.0		6.7		8.2
	5	9.1		7.5		7.1		7.8

L’évolution du coefficient de variation au cours des parties est moins tranchée, bien qu’une diminution soit visible pour le jeu T (9.2% à 8.5%). Au final, la moyenne du coefficient de variation sur les 2 dernières périodes de la partie 3 chute à 6.4% (6.9%) pour le Jeu T (Jeu D).

Cette diminution traduit le fait que le volume prélevé par les groupes s’écarte de moins en moins du prélèvement théorique. Les prélèvements des groupes tendent donc à converger vers 180 UV au fil des périodes et des parties. Le fait que cette diminution soit toujours aussi importante au cours des périodes, quelque soit la partie, reflète certainement la mise en place d’une coordination forte au sein des groupes.

Résultat 4 : Le mécanisme n’est pas robuste au phénomène du « passager clandestin ».

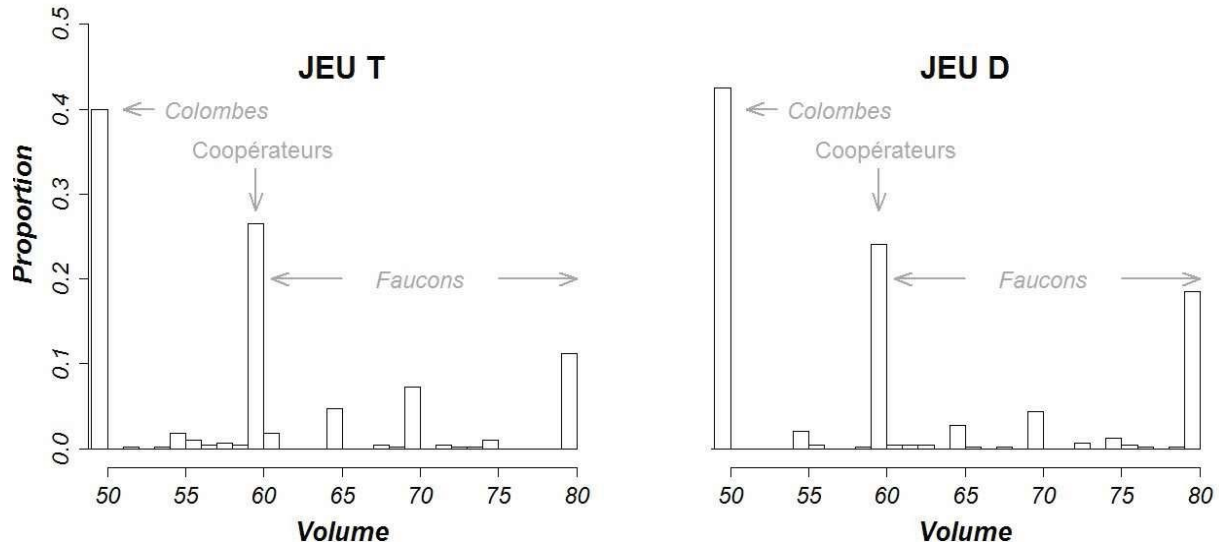
L’éclairage fourni par les données individuelles témoigne à première vue d’une diversité de comportements importante et marquée. Si le résultat 3 nous apprend que les participants parviennent **en moyenne** à se coordonner afin de prélever le volume $W^* + \varepsilon = 180 \text{ UV}$, cette coordination se fait alors que 40% des participants respectent leurs quotas.

La Figure 6 présente les volumes prélevés par les contractants lorsque tous les participants d’un groupe ont signé le contrat¹³. Dans ce cas de figure, la situation où chaque joueur prélève 60 UV constitue l’équilibre coopératif. Or seuls 25% des participants (respectivement 27% pour le jeu T et 24% pour le jeu D) choisissent la stratégie coopérative.

¹² Le coefficient de variation rend compte de la dispersion relative. Il est égal au rapport entre l’écart type et la moyenne. Un coefficient de 10% signifie que l’écart-type représente 10% de la moyenne.

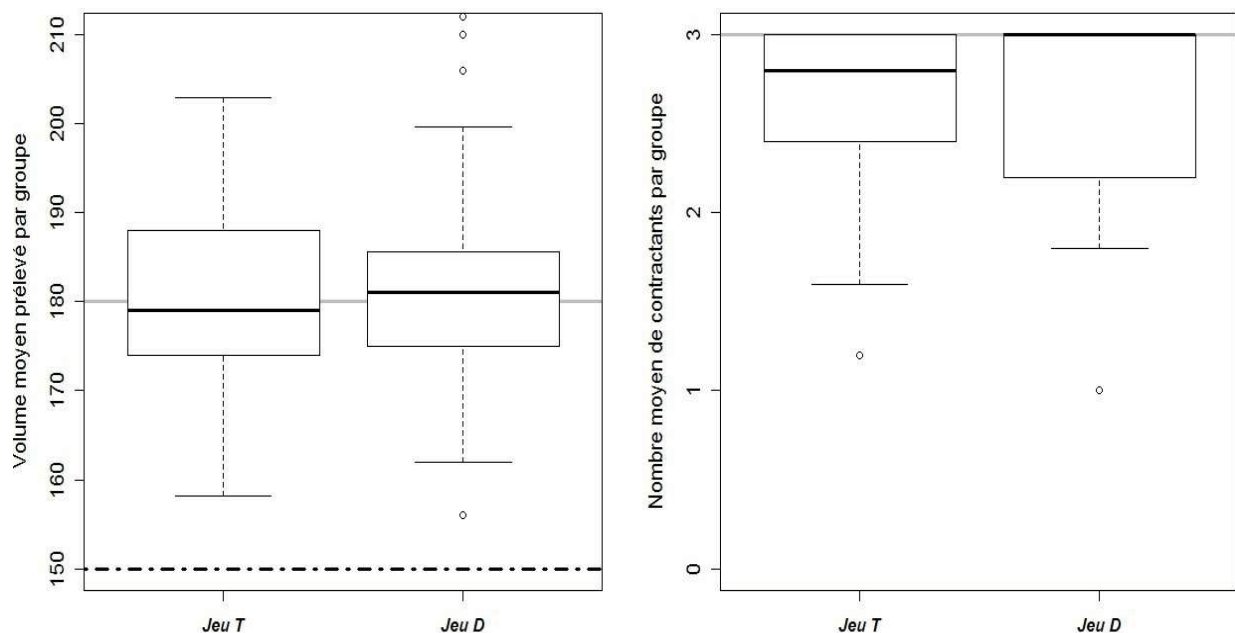
¹³ Nous ne conservons que ce cas car les prédictions théoriques sur les volumes prélevés sont faites sous l’hypothèse que l’ensemble des participants contracte.

Figure 6 : Distribution des prélèvements individuels lorsque les 3 participants ont contracté.



On constate que 41% des participants se comportent comme des *colombes*, prélevant 50 UV (*respectivement 40% et 43%*). Il y a aussi 29% des participants qui peuvent être qualifiés de *faucons*, avec des volumes prélevés strictement supérieurs à 60 UV (*respectivement 28% et 30%*) : on remarque en particulier que 15% des participants prélevent le maximum possible, soit 80 UV (*respectivement 11% et 19%*). Il en résulte que les 10 UV en surplus laissées par les 40% de *doves* ne prélevant que 50 UV (ainsi que les UV laissées par ceux prélevant entre 51 et 59 UV) sont captées par les 29% de *faucons*.

Figure 7 : Impact du caractère définitif du contrat.



Résultat 5 : La durée du contrat n'a pas d'impact significatif sur les prélèvements ni sur la contractualisation.

Nous avons testé la présence de différences dues au caractère définitif du contrat par le biais d'un test WMW sur des données appariées (*Signed Rank Test*). Nous n'avons pu isoler d'effet sur le prélèvement des groupes ($p=0.991$), ni sur le nombre moyen de contractants ($p=0.517$). La Figure 7 synthétise les résultats obtenus pour le prélèvement moyen des groupes et le nombre moyen de contractants par groupe.

L'absence d'effet mesurable ne signifie pas forcément que la durée du contrat est neutre sur le comportement des participants. On peut imaginer que cette absence soit le fruit d'effets s'annulant : le nombre de contrats est une variable cumulative dans le jeu D ce qui tire sa valeur vers le haut, masquant que certains participants hésitent à signer le contrat du fait de sa nature définitive.

Tableau 4 : Prélèvement moyen des groupes par jeu (en UV), en fonction du nombre de contractants

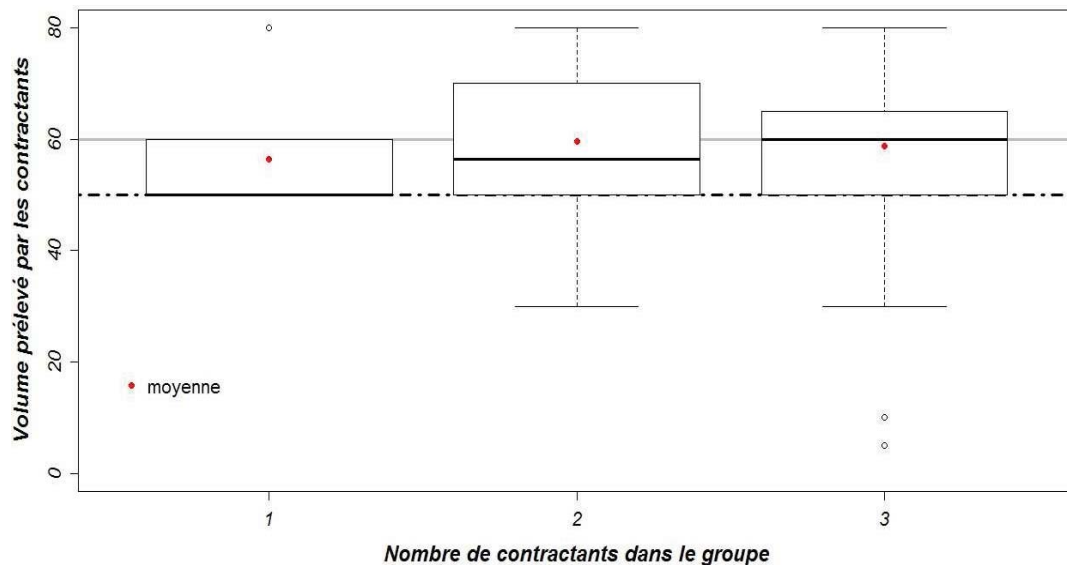
Nombre de contractants	0	1	2	3	Total
Jeu T	–	190.9	187.0	176.4	180.6
Jeu D	–	191.3	184.4	180.6	182.2

Résultat 6 : Le nombre de contractants n'a pas d'impact significatif sur les prélèvements des contractants.

Le Tableau 4 présente les volumes prélevés par le groupe en fonction du nombre de cocontractants. Ce volume diminue avec l'augmentation du nombre de contractants et ce potentiellement pour 2 raisons :

- Raison 1 : les non-contractants prélèvent davantage que les contractants du simple fait que $\bar{w}_1 > \bar{w}_2$. Cette raison est évidente et est statistiquement confirmée par le test de WMW pour les jeux T et D ($p << 0.001$).
- Raison 2 : les contractants réduisent leurs prélèvements si un plus grand nombre de membres de leur groupe contracte.

Figure 8 : Impact du nombre de contractants sur les volumes prélevés (Jeu T)



La Figure 8 présente la distribution du volume prélevé par les contractants en fonction du nombre de cocontractants. En observant médiane et moyenne, une légère tendance à la hausse des volumes avec le nombre de cocontractants semble apparaître, infirmant la Raison 2. Cette hausse pourrait être motivée par le fait que les participants anticipent que le risque de déclenchement du mécanisme est moindre lorsque le nombre de contractants augmente (Raison 1). Néanmoins, les tests sur les données appariées (test de Friedman) et non appariées (Kruskal-Wallis) ne confirment pas statistiquement cette observation ($p = 0.056$ et $p = 0.433$).

Résultat 7 : Le mécanisme semble équitable à près d'une moitié des participants.

Le Tableau 5 présente la proportion des participants trouvant l'instrument testé équitable¹⁴. Si les avis semblent partagés, le fait que près d'une moitié des participants juge ce mécanisme équitable constitue un point positif. A titre de comparaison, dans une enquête menée auprès de 76 irrigants, Montginoul et Rinaudo (2009) trouvent un taux d'acceptation de la taxe ambiante de 0% (Montginoul et Rinaudo, 2009).

Tableau 5 : « Le système de contrôle et de sanction du jeu T vous semble-t-il équitable ? ».

Oui	Non	NSPP
47%	49%	4%

7. CONCLUSION

Les particularités du problème des prélèvements agricoles diffus en nappe permettent d'envisager l'introduction d'une dimension individuelle dans les mécanismes basés sur une taxe ambiante. Nous avons développé et testé expérimentalement un instrument de gestion des prélèvements d'eau agricole en nappe adapté à ce problème. Cet instrument combine :

- Un contrat optionnel,
- Un système de déclaration et de mesure des prélèvements par les contractants,
- Un contrôle aléatoire des contractants en cas de dépassement d'un objectif environnemental,
- Des taxes ambiantes différenciées en fonction de la signature du contrat.

L'instrument permet aux agents vertueux signant le contrat de ne jamais payer la taxe ambiante. Ceci a pour effet d'engager la responsabilité individuelle des contractants, de limiter l'impact du nombre de joueurs sur l'efficacité du mécanisme et de réduire le caractère injuste des taxes ambiantes : près de la moitié des joueurs ont d'ailleurs jugé l'instrument équitable.

En présence d'incertitude sur le lien entre effort collectif et niveau de la nappe et d'asymétrie d'information entre les pouvoirs publics et les agents sur le déclenchement du mécanisme, une rente est laissée aux agents. Le partage de cette rente dépend des stratégies choisies par les agents. Les quotas individuels ne sont alors pas respectés et des inégalités surviennent.

L'instrument développé permet cependant de faire converger les prélèvements en nappe au niveau du seuil de déclenchement du mécanisme grâce à une coordination entre les agents au sein des groupes. Si le seuil de déclenchement était égal au *volume prélevable*, celui-ci pourrait être respecté.

En comparaison de la taxe ambiante, l'instrument développé possède des atouts permettant d'envisager sa mise en place dans un cas concret. Une étape vers cette mise en place passe par le test de l'instrument avec des parties prenantes. Nous avons ainsi prévu de réaliser les expériences décrites ici avec des irrigants de la plaine du Roussillon où la gestion des prélèvements agricoles en nappe est caractérisée par un contexte informationnel imparfait.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier la région Languedoc-Roussillon, Montpellier Supagro et l'ONEMA pour leur soutien financier.

¹⁴ Ces réponses ont été obtenues grâce aux questionnaires distribués à la fin des jeux.

BIBLIOGRAPHIE

- Fischbacher U. *z-Tree: Zurich toolbox for ready-made economic experiments*. In *Experimental Economics*, 2007, 10(2), p. 171-178
- Franckx L. *The Use of Ambient Inspections in Environmental Monitoring and Enforcement When the Inspection Agency Cannot Commit Itself to Announced Inspection Probabilities*. In *Journal of Environmental Economics and Management*, 2002, 43(1), p. 71-92
- Karp L. *Nonpoint source pollution taxes and excessive tax burden*. In *Environmental and Resource Economics*, 2005, 31(2), p. 229-251
- Kritikos A. S. *A penalty system to enforce policy measures under incomplete information*. In *International Review of Law and Economics*, 2004, 24(3), p. 385-403
- Millock K. et Salanié F. *Nonpoint Source Pollution When Polluters Might Cooperate*. In *Topics in Economic Analysis & Policy*, 2005, 5(1), p. 1233
- Montginoul M. et Rinaudo J. D. *Quels instruments pour gérer les prélèvements individuels en eau souterraine?. Le cas du Roussillon*. In *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, 2009, 310, p. 40-56
- Ribaudo M. et Caswell M. F. *Environmental regulation in agriculture and the adoption of environmental technology*. In *Flexible incentives for the adoption of environmental technologies in agriculture*, 1999, p. 7-26
- Segerson K. *Uncertainty and incentives for nonpoint pollution control*. In *Journal of Environmental Economics and Management*, 1988, 15(1), p. 87-98
- Segerson K. *Flexible incentives: A unifying framework for policy analysis*. In *Flexible Incentives for the Adoption of Environmental Technologies in Agriculture*. Kluwer Academic, Norwell, MA, 1999, p. 79-96

ANNEXE

Modèle de base

Soit un groupe de M agriculteurs indicés par $j, j=1, \dots, M$. Chaque agriculteur a une fonction de revenu agricole net $R_{1,j}(w)$ qui dépend uniquement du volume d'eau d'irrigation apporté annuellement par hectare w . Nous faisons l'hypothèse que cette fonction est dérivable deux fois et quasi concave : $R'_{1,j} > 0$ et $R''_{1,j} \leq 0$

Chaque agriculteur j choisit la quantité d'eau qui maximise son revenu agricole net.

$$\underset{w}{\text{Max}} R_{1,j}(w) \quad [1]$$

En prenant la condition de premier ordre de [1], on trouve le volume d'eau optimal $\bar{w}_{1,j}$ tel que :

$$\frac{dR_{1,j}}{dw}(\bar{w}_{1,j}) = 0 \quad [2]$$

L'eau d'irrigation est exclusivement pompée dans une nappe souterraine, menacée de surexploitation. Nous faisons l'hypothèse que les décideurs publics identifient le *volume prélevable* W^* , volume qui

peut être alloué au secteur agricole sans compromettre la nappe.

La somme des prélèvements individuels en laissez-faire est supérieure à ce *volume prélevable* : $\sum_{j=1}^M \bar{w}_{1,j} \geq W^*$

Le décideur public choisit donc de mettre en place une politique afin de ramener la somme des prélèvements agricoles à W^* . Il définit un *quota individuel* $w_j^* < \bar{w}_{1,j}$ pour chaque agriculteur j de façon à ce que la somme de ces volumes autorisés soit égale au *volume prélevable* : $\sum_{j=1}^M w_j^* = W^*$.

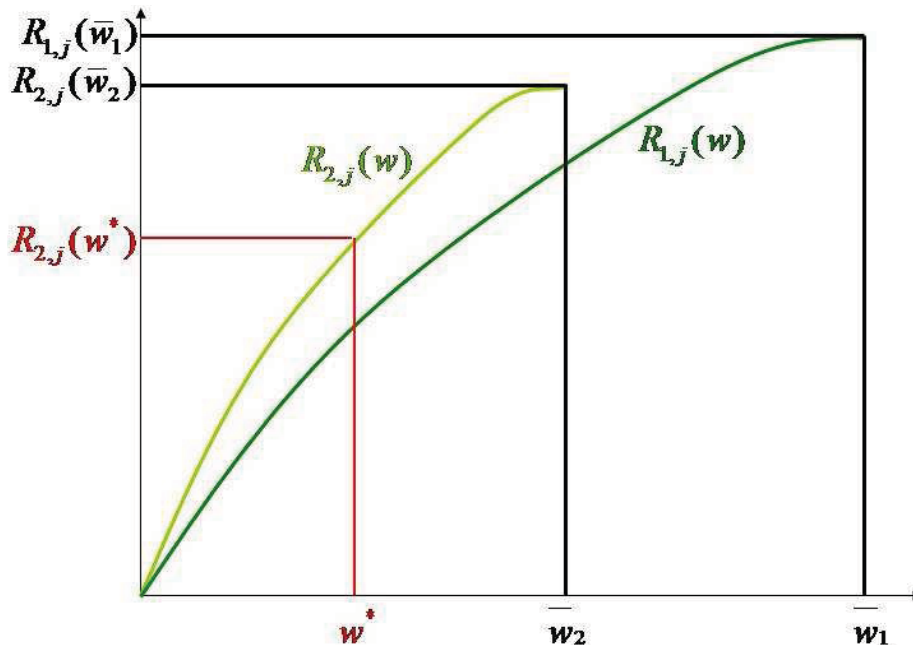
Contrat de réduction de l'eau d'irrigation

Le décideur public propose aux agriculteurs de souscrire, sur une base volontaire, un contrat de réduction de l'eau d'irrigation. En signant ce contrat, les agriculteurs s'engagent :

- (1) A adopter une autre technologie de production¹⁵ qui leur permet de gagner un revenu agricole net $R_{2,j}(w)$,
- (2) A limiter leur prélèvement à w_j^* et
- (3) A donner au décideur les moyens de contrôler leurs prélèvements. On peut imaginer que l'agriculteur s'engage à déclarer ses forages, accepte d'en reboucher certains, et équipe ceux qui restent d'un compteur d'eau que les autorités pourront venir contrôler.

La fonction de revenu agricole net $R_{2,j}(w)$ est aussi deux fois dérivable et concave : $R'_{2,j} > 0$ et $R''_{2,j} \leq 0$ et admet un maximum pour $\bar{w}_{2,j}$ avec $w_j^* < \bar{w}_{2,j} < \bar{w}_{1,j}$. Nous faisons l'hypothèse que, pour tous les volumes, $w_j < \bar{w}_{2,j}$ et $R_{2,j}(w_j) > R_{1,j}(w_j)$.

Figure 9 : Fonctions de revenu agricole net à disposition de l'agriculteur j .



¹⁵ Cette technologie de production peut consister à changer de méthode d'irrigation, à faire évoluer l'itinéraire technique, à changer les cultures et les rotations ou à prélever l'eau de l'eau depuis une ressource de substitution. Il n'est pas exclu que cette technique impose des investissements initiaux qui soient pris en charge par la collectivité.

Cependant, le décideur ne peut pas investir les moyens nécessaires pour contrôler systématiquement tous les prélèvements individuels des agriculteurs sous contrat. Par ailleurs, il n'a pas la capacité technique de contrôler les prélèvements de ceux qui ont choisi de ne pas contractualiser (pas de recensement fiable des forages, pas de compteurs d'eau obligatoires etc.). Afin de faire respecter le *volume prélevable*, le décideur introduit donc une pénalité financière $\theta_{k,j}$, déclenchée si la somme des prélèvements des M agriculteurs $W = \sum_{j=1}^M w_j$ dépasse le *volume prélevable* W^* .

Pour les agriculteurs qui ne sont pas sous contrat, la pénalité financière $\theta_{1,j}$ dépend uniquement de la différence entre la somme des prélèvements des agriculteurs et le volume maximal prélevable :

$$\theta_{1,j} = \tau_{1,j} \times (W - W^*)$$

Pour les agriculteurs qui sont sous contrat, la pénalité financière $\theta_{2,j}$ ne s'appliquera que pour les agriculteurs contrôlés (avec une probabilité ϕ) et dont les prélèvements ont effectivement dépassé le *quota individuel* w_j^* . Bien que la procédure de contrôle permette de savoir si le *quota individuel* a été dépassé, elle ne permet pas de mesurer avec précision ce dépassement¹⁶. L'agriculteur sous contrat contrevenant est donc pénalisé, comme les agriculteurs qui ne sont pas sous contrat, sur la différence entre la somme des prélèvements de tous les agriculteurs et le *volume prélevable*.

$$\theta_{2,j} = \tau_{2,j} \times (W - W^*)$$

Posons $Z_{k,j}$ le revenu net total de l'agriculteur j , égal à son revenu agricole net moins l'éventuelle sanction. $Z_{k,j}$ est indicé par k car le revenu net dépend du choix de signer un contrat ou pas : $k=1$ pour les agriculteurs qui choisissent de ne pas contractualiser et restent donc sur la fonction de production 1, et $k=2$ pour les agriculteurs qui choisissent de contractualiser et passent sur la fonction de production 2.

$$Z_{k,j}(w_j, W) = R_{k,j}(w_j) - \theta_{k,j}(w_j, W)$$

$$\text{Avec } \theta_{k,j} = \begin{cases} \theta_{1,j} = \tau_{1,j} \times (W - W^*) & \text{si } W > W^* \\ \theta_{2,j} = \tau_{2,j} \times (W - W^*) & \text{si } W > W^*, j \text{ est contrôlé et } w_j > w_j^* \\ \theta_{k,j} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

L'objectif du décideur est de définir l'ensemble des combinaisons $\tau_{k,j}^* = \{\tau_{1,j}^*, \tau_{2,j}^*, \phi\}$, avec ϕ probabilité de contrôle¹⁷ des agriculteurs ayant signé le contrat lorsque le volume total prélevé est supérieur à W^* , de façon à ce que les $M-1$ agriculteurs j :

- (1) signent le contrat
- (2) et respectent leur *volume individuel autorisé*.

Calcul des paramètres du contrat optimal pour des agents identiques

¹⁶ On peut ainsi imaginer un forage illégal, un compteur faussé ou cassé.

¹⁷ Le nombre d'agriculteurs à contrôler est fonction du nombre de contractants. Le coût du contrôle pour les pouvoirs publics est donc fonction du nombre de contractants.

Le problème est résolu par récurrence arrière *sous l'hypothèse que tous les agriculteurs sont identiques et ont donc la même fonction de revenu agricole net* sans contrat $R_1(w)$ et sous contrat $R_2(w)$. Les agriculteurs ont donc tous la même stratégie d'optimisation $\bar{w}_{k,j} = \bar{w}_k$, et le décideur n'a pas de raison de discriminer entre eux. Le décideur calcule donc le *quota individuel* $w_j^* = w^* = W^*/M$. Il lui faut ensuite calculer les taux optimaux de taxe τ_1^* et τ_2^* , appliqués respectivement aux agriculteurs sans contrat et aux agriculteurs fraudeurs sous contrat, qui lui permettent d'atteindre son objectif : tous les agriculteurs signent le contrat et le respectent.

On définit w_i^{II} le volume d'eau maximisant le revenu total net de l'agriculteur i , $Z_2(w_i)$ s'il choisit la stratégie 2 (signature d'un contrat et adoption de la fonction de revenu agricole net $R_2(w)$).

$$\max_{w_i} [Z_2(w_i)] = \max_{w_i} [R_2(w_i) - E(\theta_2(w_i, W))]$$

La condition de premier ordre de cette équation permet de calculer w_i^{II} , $\forall w_{j \neq i}$ donnés.

- Si $w_i^{\text{II}} \leq w^*$, alors $W \leq W^*$ et $Z_2(w_i^{\text{II}}) = R_2(w_i^{\text{II}})$. La fonction de revenu agricole étant croissante en w_i , $w_i^{\text{II}} = w^*$.

- Si $w_i^{\text{II}} \geq w^*$, alors par symétrie, tous les $w_j \geq w^*$ et $W \geq W^*$.

$$\frac{\partial Z_2(w^{\text{II}})}{\partial w} = \frac{\partial R_2(w^{\text{II}})}{\partial w} - \varphi \tau_2 \frac{\partial (w^{\text{II}} + \sum_{j=1}^{M-1} w_j - W^*)}{\partial w} = 0$$

$$\text{On obtient donc } \tau_2(\varphi) = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial R_2(w^{\text{II}})}{\partial w}.$$

La fonction $R_2^1(w)$ étant monotone et décroissante, il existe un unique $\tau_2^*(\varphi)$ tel que $\forall \tau_2(\varphi) \geq \tau_2^*(\varphi)$, $w^{\text{II}}(\tau_2) \leq w^*$:

$$\boxed{\tau_2^*(\varphi) = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial R_2(w^*)}{\partial w}} \quad [3]$$

Proposition 1 : Pour une probabilité de contrôle φ donnée et non nulle, il existe une infinité de sanction $\tau_2 \geq \tau_2^*$ donné par [3], garantissant qu'un agriculteur ayant signé le contrat ne dépasse pas son volume individuel autorisé.

Supposons que le décideur impose $\tau_2 \geq \tau_2^*$. Pour que les agriculteurs choisissent toujours de signer le contrat, il faut que la stratégie 1 soit dominée par la stratégie 2, et ceux, même dans le cas le plus favorable : lorsque tous les autres agriculteurs choisissent de respecter leur volume individuel autorisé w^* ¹⁸.

On définit w^{I} le volume maximisant le revenu agricole net Z_1 de i s'il choisit la stratégie 1.

¹⁸ Cette condition est une condition limite. Si un ou plusieurs des $M-1$ autres agriculteurs prélèvent $w_j > w^*$, la sanction θ_1 payée par i sera d'autant plus importante, faisant diminuer $Z_1(w^{\text{I}}, W)$.

Sachant τ_2^* , et pour un prélèvement individuel de chacun des autres agriculteurs w^* , l'agriculteur i signera le contrat si :

$$Z_1(w^I, w^I + (M-1)w^*) \leq R_2(w^*) \quad [4]$$

Autrement dit, si le revenu obtenu par i en signant le contrat et en le respectant, lorsque les $M-1$ autres font de même, est supérieur à ce qu'il peut espérer obtenir en ne signant pas le contrat.

- Si $w^I \leq w^*$, alors $Z_1(w^I, w^I + (M-1)w^*) = R_1(w^I)$ car le *volume prélevable* n'est pas dépassé. Et comme $R_1(w^I) < R_2(w^*)$, [4] est vérifiée et l'agriculteur i signera donc le contrat et respectera le *volume individuel autorisé*.

- Si $w^I > w^*$, alors $\theta_1(w^I) = \tau_1 \cdot (w^I + (M-1) \cdot w^* - W^*) = \tau_1 \cdot (w^I - w^*)$.

Le revenu de l'agriculteur i est donc :

$$Z_1(w^I) = R_1(w^I) - \tau_1(w^I - w^*)$$

En dérivant cette expression, on obtient que $\frac{\partial R_1(w^I)}{\partial w} = \tau_1$. Il existe donc un taux de sanction minimum τ_1^{\min} unique tel que :

$$R_1(w^I) - \tau_1^{\min}(w^I - w^*) = R_2(w^*) \quad [5]$$

L'unicité est assurée par la monotonie de $Z_1(w)_{/\tau_1}$. On trouve donc τ_1^{\min} vérifiant simultanément les deux conditions [6.7] :

$$\tau_1^{\min} = \frac{\partial R_1(w^I)}{\partial w} \quad [6]$$

$$\tau_1^{\min} = \frac{R_1(w^I) - R_2(w^*)}{w^I - w^*} \quad [7]$$

Proposition 2 : sachant $\tau_2 \geq \tau_2^*$, l'ensemble de contraintes [6.7.8] définit l'ensemble τ_1 des sanctions garantissant la signature du contrat par chaque agriculteur.

$$\tau_1 \geq \tau_1^{\min}, \quad [8]$$

L'objectif du décideur est de minimiser les sanctions potentielles tout en assurant l'efficacité du mécanisme.

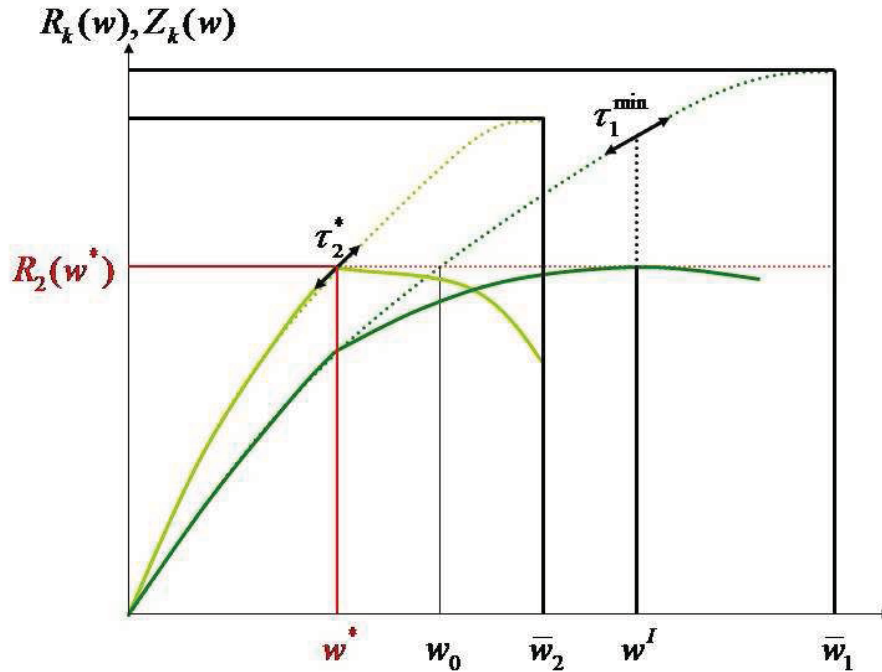
Proposition 3 : Pour une probabilité de contrôle φ donnée et non nulle, il existe un unique ensemble de sanctions minimales $\tau_k^*(\varphi)$ donné par [3.9.10] garantissant la signature du contrat proposé par le décideur et le respect de son *quota individuel* par chaque agriculteur.

$$\tau_k^*(\varphi) = \{\tau_1^*, \tau_2^*(\varphi)\} \quad [9]$$

$$\tau_1^* = \tau_1^{\min} \quad [10]$$

Il est intéressant de noter que $\tau_2^*(\varphi) > \tau_1^*$: la sanction imposée aux contractants dont le contrôle a révélé le non respect du contrat est supérieure à celle imposée aux agriculteurs ne contactant pas. Une illustration graphique est fournie dans la Figure 10.

Figure 10 : Fonctions de revenu agricole après sanctions (cas où $\varphi = 1$).



Introduction d'une marge d'erreur

En pratique, le décideur peut traduire *ex-ante* le *volume prélevable* W^* en un niveau piézométrique de référence Ω^* , avec $\Omega^* \equiv N(W^*, \sigma)$. Afin de s'assurer de laisser aux agriculteurs la possibilité de consommer leur *quota individuel* w^* dans 95% des cas sans dépasser le niveau piézométrique déclenchant le mécanisme, il définit le niveau piézométrique $\Omega^{\text{ref}} = \Omega^* - 1.65\sigma$ en deçà duquel le mécanisme se déclenche.

Les agriculteurs observant directement ce niveau piézométrique par l'observation en temps réel du niveau de la nappe, le niveau piézométrique de déclenchement Ω^{ref} se traduit pour eux en un volume connu de déclenchement $W^{\text{ref}} = W^* + \varepsilon$ ¹⁹. Il y a donc une asymétrie d'information entre décideur et agents sur le comportement agrégé des agents.

La sanction étant calculée sur le dépassement de W^* , mais déclenchée à partir de W^{ref} , le mécanisme est équivalent à une sanction calculée sur le dépassement de W^{ref} doublée d'une sanction fixe (*group fine*) $\Theta = \tau_1^* [W^{\text{ref}} - W^*]$.

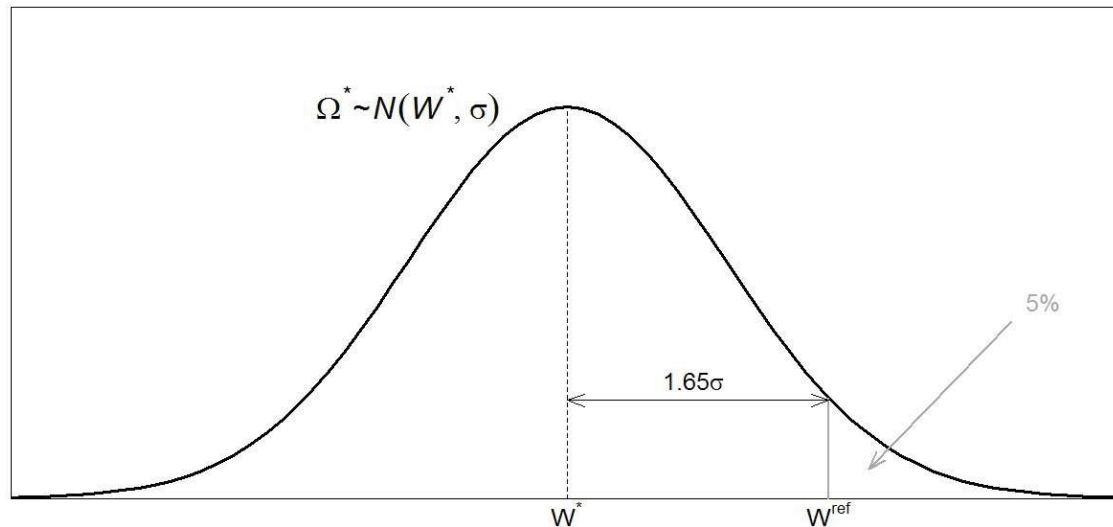
Faisons l'hypothèse que les agriculteurs ont une information parfaite sur le déclenchement du mécanisme, la marge d'erreur introduite par les pouvoirs publics permet aux agriculteurs de consommer collectivement un surplus d'eau $W^{\text{ref}} - W^*$ sans être sanctionnés²⁰. Si les

¹⁹ Il est important de souligner que si ε varie en fonction de facteurs exogènes et potentiellement stochastiques, nous faisons l'hypothèse que les agriculteurs sont capables de l'estimer.

²⁰ L'asymétrie d'information existant entre agriculteurs et décideur provient du fait que le *volume prélevable* est traduit *ex-ante* par le décideur en un niveau piézométrique, tandis que les agriculteurs observent ce niveau piézométrique en temps réel.

agriculteurs se coordonnent afin de se partager ce volume, leur consommation individuelle devient alors égale à $w^{\text{ref}} = W^{\text{ref}} / M$.

Figure 11 : Estimation du volume prélevable par le décideur public



On peut ainsi calculer une prime à la coordination laissée par le décideur aux agriculteurs.

$$P^C = M[R(w^{\text{ref}}) - R(w^*)] \quad [11]$$

En cas de défaut de coordination, un agriculteur peut anticiper le fait que les autres vont respecter leur *quota individuel* w^* , ou du moins, consommer $w < w^{\text{ref}}$. Ces derniers laissent ainsi la possibilité au premier de prélever $w^{\text{FR}} > w^{\text{ref}}$ sans que le mécanisme ne se déclenche. Un parallèle peut être fait entre ce comportement et la notion de *passager clandestin*. Si l'eau « laissée » par les uns est prélevée par les autres, ces derniers peuvent être considérés comme des *passagers clandestins* par analogie avec les jeux de contribution volontaire à un bien public. Le volume que peut alors consommer un *passager clandestin* i sans que le mécanisme soit déclenché est :

$$w_i^{\text{FR}} = w^{\text{ref}} + \sum_{j=1}^{M-1} (w^{\text{ref}} - w_j)$$

En faisant l'hypothèse que ceux qui prélèvent $w_j < w^{\text{ref}}$ consomment w^* , on peut calculer la rente laissée par le décideur à n agriculteurs *free rider*.

$$P^{\text{FR}} = n[R(w^{\text{ref}} + (M - n)(w^{\text{ref}} - w^*)) - R(w^*)] \quad [12]$$

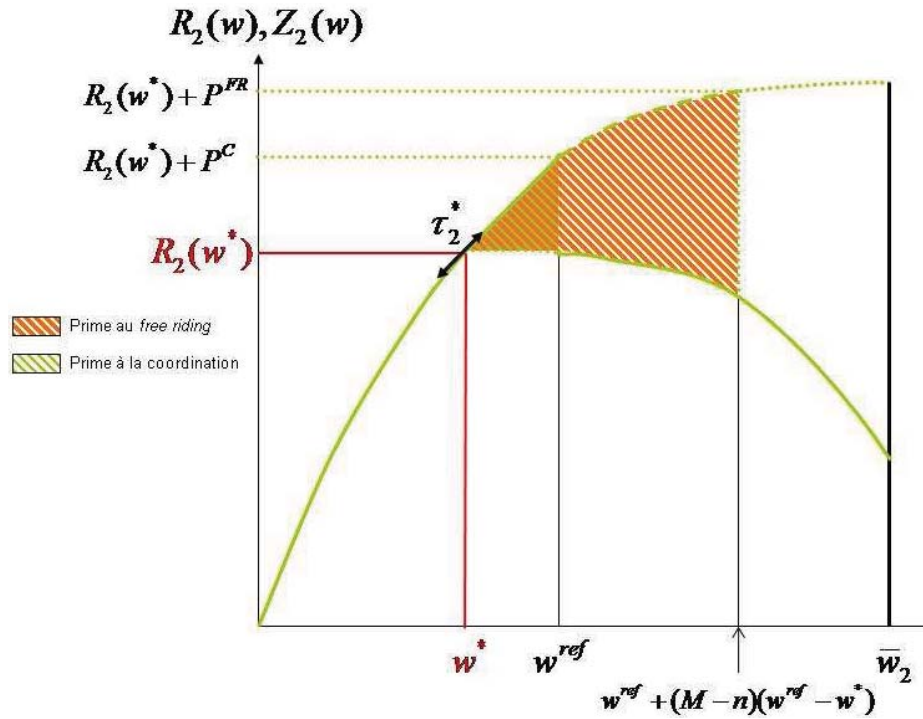
Et si $n = M$, l'équation [12] est équivalente à l'équation [11].

La concavité de la fonction nous assure que l'inégalité suivante est toujours vraie.

$$P^{\text{FR}} \leq P^C \quad [13]$$

S'il met en place ce mécanisme, le décideur a tout intérêt à assurer la coordination entre les agriculteurs afin de maximiser le bien être collectif. Graphiquement, cela donne :

Figure 12 : Revenu agricole sous contrat et avec marge d'erreur.



L'équilibre coopératif n'est cependant pas un *second best* puisqu'il ne permet pas de faire respecter le *volume prélevable*.