Mécanismes d'allocation de l'eau d'irrigation et gestion du risque sécheresse en agriculture

Marianne Lefebvre

▶ **To cite this version:**

Marianne Lefebvre. Mécanismes d'allocation de l'eau d'irrigation et gestion du risque sécheresse en agriculture. Sciences de l'Homme et Société. Université Montpellier 1, 2011. Français. NNT : . tel-02811130

HAL Id: tel-02811130
https://hal.inrae.fr/tel-02811130

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Montpellier I

Faculté des Sciences Economiques - Ecole Doctorale Economie et Gestion

Mécanismes d'allocation de l'eau d'irrigation et gestion du risque sécheresse en agriculture

Irrigation water allocation mechanisms and drought risk management in agriculture

Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Montpellier I

Groupe des disciplines Sciences Economiques du CNU Section 05

Soutenue publiquement le 27 septembre 2011 par

Marianne Lefebvre

JURY

Examinateur Mr Stefan Ambec, Directeur de Recherche INRA au LERNA à Toulouse

Rapporteur Mr Alberto Garrido, Professeur à l'Universidad Politecnica de Madrid

Examinateur Mr Charles Noussair, Professeur à Tilburg University

Rapporteur Mme Anne Rozan, Professeur à l'ENGEES Strasbourg

Co-directeur de thèse Mme Sophie Thoyer, Professeur à Montpellier Supagro

Co-Directeur de thèse Mr Marc Willinger, Professeur à l'Université Montpellier I

La faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

Mécanismes d'allocation de l'eau d'irrigation et gestion du risque sécheresse en agriculture

UMR LAMETA 5474 - Montpellier Supagro, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier

Résumé (long) : Alors que l'agriculture va devoir s'adapter à des sécheresses de plus en plus fréquentes et sévères avec le changement climatique, les dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation existants (prix, marché, dispositifs de rationnement...) négligent souvent la forte variabilité de la disponibilité de la ressource. Afin de réduire le coût pour les agriculteurs et la société du risque sécheresse, il convient d'intégrer des mécanismes de gestion du risque dans les dispositifs d'allocation de l'eau. Cette réflexion a été menée dans deux contextes très différents : la France, où le rationnement de l'eau est administré par les représentants de l'État en cas de sécheresse ; l'Australie où des systèmes de marchés de l'eau ont été mis en place pour permettre les échanges d'eau entre agriculteurs. La thèse est composée de 3 articles (chapitres 2,3 et 5 en anglais), d'éléments de cadrage sur la gestion de l'eau agricole en France (chapitre 1 en français) et sur le fonctionnement des marchés de l'eau et le système de gestion des sécheresses en Australie en Australie (chapitre 4 en français). Les chapitres 2 et 3 étudient les interactions entre les règles utilisées pour le rationnement de l'eau d'irrigation en cas de sécheresse en France et les stratégies d'auto-assurance des agriculteurs. Nous étudions notamment le cas du stockage d'eau au niveau de l'exploitation. Le chapitre 2 modélise une situation où des agents ont la possibilité de substituer l'usage d'une ressource coûteuse mais sécurisée à l'usage de la ressource commune risquée. Nous déterminons la règle de partage optimale sous deux hypothèses distinctes : i) le planificateur définit simultanément la règle de partage et les choix de diversifications de façon à maximiser le bien être social ; ii) le décideur utilise la règle de partage comme un instrument incitant les usagers à faire des choix de diversification optimaux d'un point de vue social. Le chapitre 3 décrit une expérience de laboratoire visant à comparer différentes règles de partage d'une ressource commune de taille incertaine quand les sujets peuvent choisir entre l'utilisation de cette ressource commune ou l'investissement dans une ressource sécurisée. Les règles sont évaluées sur leur aptitude à faciliter la coordination des agents autour du niveau optimal d'investissement dans la ressource sécurisée. La discussion des résultats de ces deux articles permet de proposer des recommandations aux administrations en charge de la mise en place des règles de partage de la ressource en cas de sécheresse, notamment dans le cadre de la réforme en cours en France (création des Organismes Uniques). Le chapitre 5 étudie les gains de la mise en place de droits d'eau avec différents niveaux de sécurité, à l'aide d'une expérience de laboratoire capturant l'essence des marchés de l'eau australiens. Nous trouvons qu'un système avec deux niveaux de sécurité améliore le partage du risque de manque d'eau entre agriculteurs. En revanche, lorsque les coûts de transactions sont plus élevés sur le marché des droits que sur celui des allocations, la mise en place de droits différenciés peut conduire à une diminution de la coût-efficacité du mécanisme de marché. En effet, l'augmentation des échanges sur le marché des droits d'eau induit une augmentation des coûts de transaction payés par les agriculteurs.

Mots clés : Sécheresse, Irrigation, Allocation, Eau, Rationnement, Agriculture, Partage de risque, Expérience

Irrigation water allocation mechanisms and drought risk management in agriculture

UMR LAMETA 5474 - Montpellier Supagro, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier

Abstract (long): Despite the fact that agriculture will have to adapt to face increasingly frequent and more severe droughts with climate change, existing water allocation mechanisms (pricing, water markets, rationing scheme) often fail to take into account the high variability of the resource. Water allocation schemes can contribute to reduce the cost of drought risk for farmers and society by integrating risk management mechanisms. We address this question in two different contexts: France, where water is managed by public authorities that are responsible for the rationing scheme and defining the allocation of water between farmers in case of scarcity; Australia, where water markets have been implemented in order to allow water transfers between farmers. This Ph.D. dissertation is composed of 3 articles (chapter 2, 3 and 5 in English) and background information on the organization of irrigation water allocation in France (chapter 1 in French) and the allocation of irrigation water in case of drought in Australia (chapter 4 in French). Chapters 2 and 3 analyze the interactions between the restrictions rules used in France to share the resource in crisis times and the self-insurance strategies of farmers. We investigate the particular example of on-farm storage. Chapter 2 models the decisions of agents heterogeneous in their risk tolerance, who can substitute the use of a a secure private alternative to the use of a common pool resource of uncertain size. We find the optimal sharing rule under two assumptions concerning the regulator: i) the social planner defines simultaneously the sharing rule and the diversification choices in order to maximize social welfare; ii) the policy maker uses the sharing rule as an instrument to induce each agent to make the optimal diversification decision. Chapter 3 uses laboratory experiment to analyze how the sharing rule impacts the individual trade-off between relying on a free but uncertain resource and investing in a secure alternative resource. Rules are compared on the basis of their ability to facilitate coordination on the optimal investment in the secure resource. Chapter 5 studies with a laboratory experiment, designed to capture the main characteristics of Australian water markets, whether offering different levels of security for water rights could potentially allow water users to manage the risks of supply uncertainty better. We find that a two security levels system improves risk sharing between users. However, a system with different levels of security for water rights can be detrimental to cost-effectiveness by increasing the number of costly trades on the water rights market, when transactions costs are higher in this market than in the market for allocation.

Keywords: Drought, Irrigation, Allocation, Water, Rationing, Agriculture, Risk sharing, Experiment

Table des matières

Introduction générale **12**

0.1 Sécheresse et irrigation : Quels enjeux ? 15

0.1.1 Usage de l'irrigation par le secteur agricole 15

0.1.2 Vers des sécheresses de plus en plus fréquentes 18

0.1.3 Impacts des épisodes de sécheresse sur l'agriculture 22

0.1.4 Aversion au risque et préférences des agriculteurs vis à vis de la sécurité de l'approvisionnement en eau 23

0.2 La gestion du risque sécheresse 26

0.2.1 Gestion a posteriori : indemniser les dommages 26

0.2.2 Gestion a priori : limiter le risque et la vulnérabilité 30

0.3 Apports de la thèse 35

0.3.1 Problématique 35

0.3.2 Deux cas d'études : la France et l'Australie 41

0.3.3 La méthodologie expérimentale 42

0.3.4 Plan 46

Première partie : Gestion administrative des autorisations de prélèvement en eau en France **49**

1 La gestion de l'eau agricole en France **50**

1.1 Gestion quantitative a priori 58

1.1.1 Une gestion par les droits de prélèvements 58
1.1.2 La quasi-absence d'instruments tarifaires 60
1.1.3 Rétablir l'équilibre par la création de nouvelles ressources 62
1.2 Gestion de crise 64
1.2.1 Les restrictions par arrêté préfectoral 64
1.2.2 Limites et réforme de la gestion de crise 69

2 Sharing rules for a Common-Pool Resource when self-insurance is available 73

2.1 Introduction 75
2.2 The model 79
2.2.1 Assumptions 79
2.2.2 Bankruptcy sharing rules 82
2.3 Risk neutral agents with heterogeneous values 84
2.3.1 Social optimum: optimal sharing rule and diversification 84
2.3.2 Optimal sharing rule when diversification is a private decision . 87
2.4 Mean-Variance agents with equal values 90
2.4.1 Social optimum: optimal sharing rule and diversification 92
2.4.2 Optimal sharing rule when diversification is a private decision . 94
2.5 Conclusion and policy recommendations 96
Appendix 2.A : Proofs 99

3 A Common Pool Resource experiment with sharing rules and self-insurance 107

3.1 Introduction 109
3.2 Experimental design 113
3.2.1 Description of the game 113
3.2.2 Experimental procedure 115

3.3 Theoretical predictions 120
3.4 Results 127
3.4.1 Coordination on optimal total claim 127
3.4.2 Efficiency and Reliability 130
3.4.3 What explains coordination ? 132
3.5 Conclusion 139
Appendix 3.A : Nash equilibrium under risk aversion 146
Appendix 3.B : Experimental instructions 148

Seconde partie : Allocation de l'eau par le marché en Australie 157

4 La gestion de l'eau agricole en Australie 158
4.1 Principes de l'allocation de l'eau par le marché 163
4.1.1 Bref historique de la création des droits et marchés de l'eau . . . 163
4.1.2 Droit d'eau et allocation 165
4.1.3 Marchés de l'eau 167
4.1.4 La nécessaire régulation des marchés de l'eau 172
4.2 Les enjeux autour des marchés de l'eau australien 175
4.2.1 Sécuriser l'eau pour l'environnement 175
4.2.2 Gérer le risque de manque d'eau pour les agriculteurs 176

5 Do security-differentiated water rights improve efficiency ? 181
5.1 Introduction 184
5.2 Rationale for differentiated water rights 187
5.3 Experimental design 189
5.3.1 Treatments 190
5.3.2 Game structure 191

5.3.3 Subject types 194
5.3.4 Experimental procedure 195
5.4 Theoretical predictions 196
5.4.1 Equilibrium in the coupon market 197
5.4.2 Equilibrium in the share market 198
5.4.3 Impact of risk aversion 199
5.4.4 Profits 200
5.4.5 Hypotheses 201
5.5 Results 201
5.5.1 Hypothesis 1: Profits 202
5.5.2 Hypothesis 2: Risk management 205
5.6 Conclusion 206
Appendix 5.A : Experimental instructions 213

Conclusion Générale **220**

Bibliographie **243**

Liste des figures **245**

Liste des tableaux **246**

Liste des encadrés **247**

A mon grand-père⋆*,*

⋆Au milieu des années soixante-dix, dans le département de l'Oise, un agriculteur producteur de cresson voit sa récolte anéantie à cause de la pollution des eaux par la sucrerie locale. Mon grand-père, alors adjoint au maire, aidera le cressiculteur à obtenir réparation en justice. Le principe du "pollueur-payeur" à ses débuts ! Peut-être mon grand-père m'aura-t-il mise sur la voie de l'économie de l'environnement en me contant cette histoire autour d'une soupe au cresson...

Remerciements

Beaucoup de gens ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants, Marc Willinger et Sophie Thoyer, qui ont formé un duo aux compétences complémentaires.

Sophie : pour les séances de travail où l'on a réfléchi à haute et double voix, pour ton dynamisme et ta réactivité pour commenter mon travail, pour ton enthousiasme communicatif vis à vis de l'enseignement, pour m'avoir ouvert ton carnet d'adresse, notamment australien, plus généralement pour ta confiance, tes mots réconfortants et encourageants.

Marc : pour ton enthousiasme communicatif vis à vis de la recherche, pour tout ce que tu m'as appris concernant l'expérimentation en économie, pour tes efforts dans l'animation de la vie collective, notamment du LEEM, qui bénéficie grandement aux doctorants, plus généralement pour tes bons conseils tout au long de ma recherche.

Je tiens aussi à remercier tous les autres chercheurs qui ont contribué à mon travail.

Mabel : pour avoir réussi à me faire faire des mathématiques dans la bonne humeur, pour m'avoir fait prendre conscience de l'importance et du plaisir des collaborations quand on est chercheur.

Lata : pour ton accueil à l'université de Monash à Melbourne, pour ta confiance et réactivité dans le travail commun même à très grande distance, pour ce que tu m'as transmis de ton expérience minutieuse dans la mise en place et l'écriture d'articles d'économie expérimentale.

Les économistes du ministère des industries primaires (DPI) de l'État de Victoria en Australie et les personnes croisées dans le département économie de l'université de Monash : pour leur accueil à Melbourne, les discussions informelles et séminaires m'ayant permis de faire progresser ma recherche, pour leur initiation aux marchés de l'eau, bêtes étranges pour une française !

Dimitri : pour ton aide avec R et ton tutorat sur l'organisation d'expériences, pour avoir transformé mes sessions d'expérience en des moments sympathiques et détendus.

Katrin : pour la coordination du projet ANR Riseco, soutien financier et intellectuel stimulant pendant ma thèse.

Toute l'équipe du LAMETA : pour la stimulation intellectuelle apportée dans une ambiance exceptionnelle. On dit qu'ailleurs les doctorants n'osent pas prendre la parole en séminaire, ne sont pas invités à frapper à n'importe quelle porte pour poser une question, ne sont pas financés pour participer à des conférences ... Et dire que je me suis posée la question de savoir si le Lameta était un bon laboratoire pour faire une thèse. Ces quelques lignes montrent que je n'ai maintenant plus aucun doute !

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ce que ces trois ans de thèse soient un très bon moment de ma vie.

Pierre : pour ton soutien et ta patience tout au long de ce travail, pour avoir écouté patiemment mes ébauches de réflexions, pour avoir fait le cobaye pour tester mes expériences, pour m'avoir changé les idées en me parlant de vin et de la « vraie vie » et pour tout le reste dont je n'ai pas besoin de parler ici ...

Les parents : pour votre soutien inconditionnel vers une voie pourtant bien différente de la vôtre, pour avoir posé les premiers jalons de mon raisonnement scientifique, pour votre ouverture d'esprit, notamment vis à vis du monde de la recherche, pour tous les bons moments passés ensemble.

Les sœurs et Mamie : pour les chouettes week-end et vacances qui aident à reprendre le boulot avec plein d'énergie. Olivia et Manon pour vos histoires du bout du monde, celles qui aident à relativiser et celles qui font rêver.

Tous les amis côtoyés pendant ces trois ans et particulièrement : Élodie et Élise pour votre amitié de longue date, pour m'avoir transmis votre sensibilité écologique, ainsi que pour votre introduction dans le monde des agros, Hélène pour m'avoir remonté le moral sur mes traitements économétrique en me disant "vous économistes si vous faites des erreurs statistiques ce n'est pas très grave car vous ne risquez pas de tuer des gens, contrairement à nous statisticiens épidémiologistes !" ; Aurélie et Myriam pour les séances de Pilate salvatrices ; Estelle pour être celle avec qui on peut parler de tout, même de risk-dominance et de transferts potentiels ! ; Agathe, Aurélie, Brinda, Cédric, Daly, Estelle, Laure, Laurent, Mathieu, Myriam, Solenn et tous les autres habitants du bâtiment 26 croisés ici ou là, pour les sympathiques déjeuners et les pauses cafés.

Enfin, merci à Sophie, Marc, Pierre, Agathe, Estelle, Laure, Brinda, Olivia, Bernard et Alain pour la relecture attentive du manuscript.

Introduction générale

Les sécheresses récentes, en France en 2003, 2005 et 2011 et en Australie en 2002, 2007 et 2009, ont mis en évidence l'exacerbation des conflits sociétaux autour de l'eau. En effet, quand la population et les besoins de consommation croissent, ce sont tous les usages de l'eau qui augmentent : eau potable, irrigation, eau pour l'industrie et la production d'énergie, besoins des écosystèmes aquatiques et des milieux humides et activités récréatives liées à l'eau. Or, les prévisions sur les effets du changement climatique indiquent une augmentation de la fréquence et de la sévérité des sécheresses à l'échelle de la planète, d'où un risque de multiplication des conflits sur le partage de l'eau (IPCC (2008)).

Le secteur agricole constitue une cible majeure pour les mesures visant une meilleure gestion de l'eau car il utilise 70 % des prélèvements d'eau douce dans le monde (OECD (2010)). L'agriculture irriguée est dépendante de l'eau mais elle n'est pas considérée comme un usage prioritaire dans de nombreux pays : c'est souvent le premier secteur soumis aux restrictions d'usage en cas de sécheresse. L'agriculture est souvent accusée dans le débat public d'utiliser l'eau de façon inefficace et d'être cause de multiples atteintes à l'environnement (pollution et épuisement de la ressource). Son rôle est donc ambigu : elle est à la fois victime et tenue pour responsable lors des épisodes de sécheresse (Iglesias et al. (2003)). Dans ce contexte marqué par des tensions entre usages concurrents de l'eau et le changement climatique, les prélèvements d'eau de l'agriculture sont amenés à diminuer et la variabilité de l'eau disponible pour l'agriculture à augmenter. Le défi est de taille pour l'agriculture : elle doit nourrir une population toujours plus nombreuse, tout en limitant sa consommation d'eau afin que l'eau demeure accessible de façon durable à l'ensemble de la société. Le secteur agricole doit donc s'adapter afin de faire face à la baisse des volumes d'eau disponibles pour l'irrigation et l'augmentation de leur variabilité.

Comment accompagner les agriculteurs pour mieux gérer les risques associés à ces restrictions d'eau plus fortes et plus fréquentes ? Les politiques de création de nouvelles ressources en eau par le stockage étant désormais trop coûteuses, la limitation de la fréquence et sévérité des épisodes de manque d'eau passe désormais davantage par la gestion de la demande et la réduction des besoins en eau. Les politiques de gestion de la sécheresse incluent des incitations à la mise en place, au niveau des exploitations, de stratégies d'adaptation à une disponibilité de l'eau réduite et plus variable, ainsi que des mécanismes d'indemnisation et d'assurance récolte pour limiter les conséquences financières de la sécheresse (Amigues et al. (2006)). Cette thèse s'intéresse à un ins-

trument complémentaire de gestion du risque sécheresse en agriculture : les dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation, et plus particulièrement les modalités du rationnement de l'eau mis en place lors des épisodes de sécheresse. La thèse aborde deux questions principales : 1) Quel est l'impact des dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation existants sur le risque sécheresse subi par les agriculteurs et sur leurs stratégies de gestion de ce risque ? 2) Comment améliorer ces dispositifs en vue d'un meilleur partage de la ressource en eau et des risques ? . Nous avons étudié plus particulièrement les dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation utilisés en France et en Australie. Le travail réalisé permet de faire des recommandations aux institutions responsables de l'allocation de l'eau dans ces deux pays.

Cette introduction nous permet de définir dans un premier temps les enjeux soulevés par le recours à l'irrigation en agriculture dans un contexte d'augmentation des épisodes de sécheresse et ainsi de motiver le sujet de la thèse. Nous présentons dans un deuxième temps les mécanismes et instruments "traditionnels" de la gestion du risque sécheresse (compensation financière a posteriori et mesures au niveau des exploitations), avant de nous intéresser aux dispositifs d'allocation de l'eau, instruments complémentaires de gestion du risque sécheresse que nous mobilisons de façon originale dans la thèse. Nous concluons cette introduction par la présentation de la problématique de la thèse, des méthodologies utilisées et du plan.

0.1 Sécheresse et irrigation : Quels enjeux ?

Nous commençons ici par présenter quelques éléments sur l'usage de l'irrigation par le secteur agricole. Nous montrons ensuite comment le changement climatique et les arbitrages sociétaux conduisent à une augmentation du risque sécheresse pour les agriculteurs. Nous décrivons dans un troisième temps comment les épisodes de sécheresse impactent l'agriculture, afin de justifier la nécessité de la gestion renforcée du risque sécheresse. Enfin, nous montrons comment l'aversion au risque des agriculteurs influence leurs stratégies face au risque sécheresse et leurs préférences vis à vis de la sécurité de l'approvisionnement en eau. Tous ces éléments sont des préalables nécessaires à la compréhension des enjeux et composants de la gestion du risque sécheresse présentés par la suite.

0.1.1 Usage de l'irrigation par le secteur agricole

Les prélèvements en eau pour l'agriculture sont évalués à 70% des prélèvements totaux au niveau du globe. La quasi totalité des volumes prélevés est consommée et peu d'eau est restituée au milieu local en raison de l'évapo-transpiration des plantes (voir *Encadré 1*). L'agriculture irriguée représente environ 40% de la production mondiale agricole alors qu'elle n'occupe que 19.7% des surfaces agricoles (FAO Aquastat (2010)).

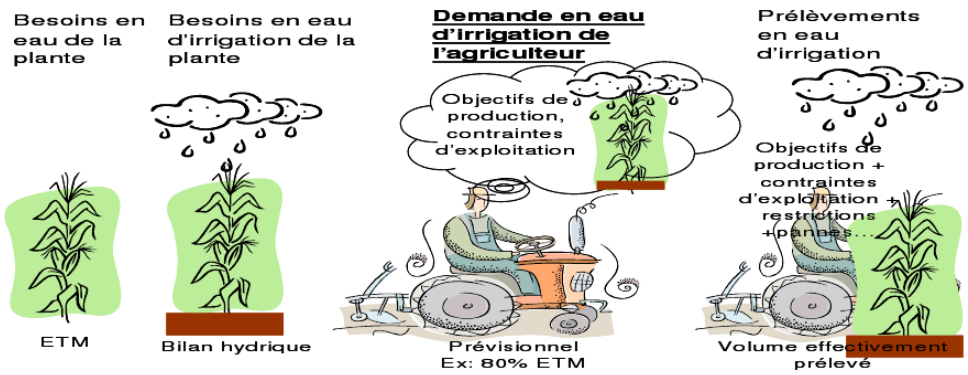
Le recours à l'irrigation s'est développé par la volonté des agriculteurs d'augmenter et surtout de stabiliser les rendements agricoles. L'irrigation, en limitant les risques liés au déficit de pluviométrie, permet d'augmenter les rendements moyens et de diminuer la variabilité des rendements (Vandeveer et al. (1989), Foudi and Erdlenbruch (2011)). La répétition des sécheresses accroît l'intérêt des agriculteurs pour l'irrigation. Pour les cultures en zones déficitaires en précipitation, les apports en eau d'irrigation sont un intrant indispensable au même titre que les fertilisants. Pour les cultures en zones au climat aléatoire, l'irrigation a pour objectif à la fois la sécurisation des rendements en cas de sécheresse et l'augmentation des rendements moyens. Les conditions économiques ont aussi un rôle déterminant dans l'adoption de l'irrigation car c'est une pratique qui est coûteuse en raison de l'investissement initial dans le matériel et des coûts de l'énergie pour le pompage de l'eau (Amigues et al. (2006)). L'irrigation est parfois utilisée seulement en complément afin de lisser les fluctuations de rendement en fonction des prix sur les marchés agricoles. L'irrigation peut aussi être motivée par des enjeux de

qualité. Elle fait notamment partie des obligations contractuelles dans certains contrats liant les exploitants aux filières de valorisation aval (légumes, semences).

Encadré 1 : Prélèvements en eau pour l'irrigation

Pour bien comprendre la question de l'irrigation, il est important de bien définir ce qu'on appelle les prélèvements en eau d'irrigation par les agriculteurs (*Figure 1*).
Les besoins en eau d'irrigation sont la différence entre l'évapotranspiration maximale (ETM) - définie comme la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes par les feuilles - et les apports des précipitations et du sol.
L'agriculteur choisit d'irriguer à un certain pourcentage de l'ETM en fonction de ses anticipations sur les précipitations et réserves du sol, mais aussi des contraintes économiques, du temps de travail, des équipements...
Les prélèvements en eau d'irrigation correspondent à la quantité d'eau réellement appliquée sur les cultures, qui peut être réduite par rapport à la quantité que l'agriculteur avait prévu d'utiliser du fait de différentes pannes ou restrictions.

Figure 1: Les différentes demandes en eau : de la plante à l'agriculteur

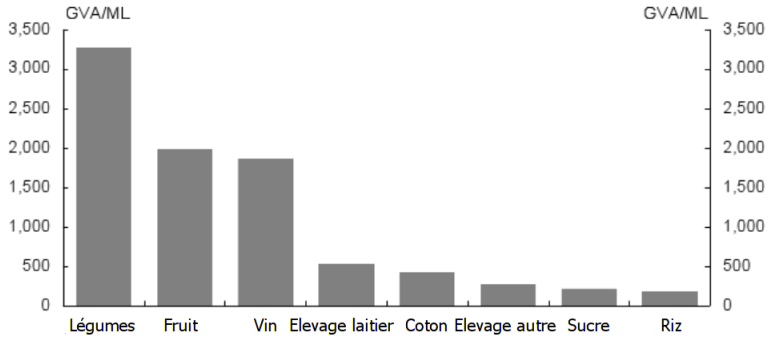


Source: Bergez and Lacroix (2008)

L'irrigation est génératrice de valeur mais le concept de valeur de l'eau d'irrigation est multiforme, ce qui rend son estimation délicate. Tardieu (1999) distingue notamment valeur stratégique et valeur tactique de l'eau. La valeur stratégique est égale au supplément de valeur ajoutée amené par les cultures irriguées, ramené au volume d'eau alloué à l'irrigation. Cette valeur est représentative des choix stratégiques fait par l'agriculteur à une date où il peut encore modifier son assolement et sa conduite de l'irrigation. Elle est influencée par le prix des produits, les rendements, l'efficacité des techniques d'irrigation... L'irrigation n'est normalement utilisée que si la valeur stratégique est supérieure au prix de l'irrigation. La valeur tactique de l'eau est définie comme la valeur à court terme quand les possibilités d'adaptation à une éventuelle pénurie d'eau sont limitées. Elle dépend notamment du stade végétatif (valeur élevée après semis et faible en fin de période végétative) et des conditions climatiques (valeur élevée en cas de stress hydrique et faible voire nulle en cas de pluie abondante). La valeur tactique est souvent supérieure à la valeur stratégique car les pertes liées à un déficit d'eau d'irrigation sont plus élevées quand il n'est pas possible de mettre en place des stratégies compensatrices.

Il existe diverses méthodes de calcul de la valeur stratégique de l'eau d'irrigation, qui mènent à des estimations variées. Celle-ci peut être déduite à partir de modèles de programmation mathématique : c'est le prix implicite associé à la consommation de l'input eau (Gomez-Limon and Berbel (2000), Berbel and Gomez-Limon (2000), Ashfaq et al. (2005)). Elle peut être estimée économétriquement à partir de données sur les revenus, les coûts et la consommation d'eau (Schoengold et al. (2006)). Il est aussi possible d'évaluer la valeur de l'eau à partir d'enquête de consentement à payer. A titre d'exemple, dans leur étude auprès de producteurs de fruits tropicaux dans le Sud-Est de l'Espagne, Calatrava Leyva and Sayadi (2005) estiment le consentement à payer moyen est de 0,27 Euros/m3 d'eau alors que leurs estimations de la valeur marginale de l'eau à partir de données sur les caractéristiques de la production et les revenus générés donnent une valeur de 1,52 Euros/m3. Rigby et al. (2010) utilisent la méthode des choix multi-attributs (*choice experiment*) pour identifier la valeur marginale de l'eau d'irrigation dans le Sud de l'Espagne. Ils trouvent que le consentement à payer moyen est 0,45 Euros/m3.

Figure 2: Valeur ajoutée créée par 1000m3 d'eau (Agriculture-Australie)



$GVA/Ml : Valeur ajoutée en dollars australiens pour 1000 m3 d'eau
Source : Australian Bureau of Statistics, Water account 2004-05

Remarque : Cette figure présente une mesure de la valeur créée par l'irrigation égale à la quantité produite par l'agriculture irriguée multipliée par le prix de ces productions. Cette mesure purement comptable ne tient pas compte du fait que les terres utilisées par l'agriculture irriguée auraient aussi créé des revenus en l'absence d'irrigation (agriculture sèche par exemple), elle n'est donc pas directement comparable aux estimations précédentes. Cette figure met en évidence les différences selon le type de culture.

0.1.2 Vers des sécheresses de plus en plus fréquentes

Le terme général de "sécheresse" renvoie à un déficit de la pluviométrie. Hors des zones désertiques ou arides où ce déficit est systématique, la sécheresse entre dans la catégorie des évènements extrêmes et exceptionnels. On peut définir trois types de sécheresse. La **sécheresse atmosphérique** se définit par l'intensité de la déviation par rapport aux valeurs moyennes ou normales de pluviométrie, ainsi que par sa durée, sa période d'occurrence et son extension géographique. Par exemple, le bureau de météorologie australien définit la sécheresse comme un évènement pendant lequel une région a, pendant une période d'au moins trois mois, une pluviométrie inférieure à la pluviométrie moyenne des 10% des années les plus sèches connues. La pluviométrie est cependant un indicateur insuffisant si l'on s'intéresse à l'agriculture (Hounam et al. (1975)). Il faut aussi prendre en compte l'impact du déficit pluviométrique sur le sol et les réserves en eau. La **sécheresse édaphique** est causée par une insuffisance de l'eau dans le réservoir superficiel du sol pendant la saison de culture. C'est la sécheresse classique en agriculture, causée par l'insuffisance des pluies de printemps et d'été. Cette sécheresse a

un impact direct sur les rendements et la qualité de la production agricole de l'année en cours. La **sécheresse hydrologique** est causée par une reconstitution déficiente des réserves hydrographiques (barrages, nappes ...), résultant plutôt de l'insuffisance des pluies et neiges d'automne-hiver. Ce second effet joue indirectement sur l'agriculture par la disponibilité de l'eau pour l'irrigation de la saison agricole à venir.

D'après les prévisions sur les effets du changement climatique, la pluviométrie augmenterait en moyenne mais on pourrait observer des diminutions estivales dans les zones actuellement tempérées de moyenne latitude (IPCC (2008)).[1] Un accroissement de la variabilité des précipitations et des valeurs extrêmes est également prévisible, d'où des risques de sécheresse atmosphérique accentués. Les évolutions envisagées des deux facteurs climatiques pluviométrie et température auront des effets quantitatifs sur la demande instantanée en eau des plantes (accroissement de l'évaporation) et des impacts sur le cycle de développement des cultures (réduction et déplacement des périodes de demande en eau). Si le raccourcissement du cycle végétatif devrait induire une diminution des besoins en eau des plantes, l'élévation des températures et l'accroissement du rayonnement solaire devraient entraîner une augmentation nette des besoins en eau et donc le recours plus fréquent à l'irrigation.

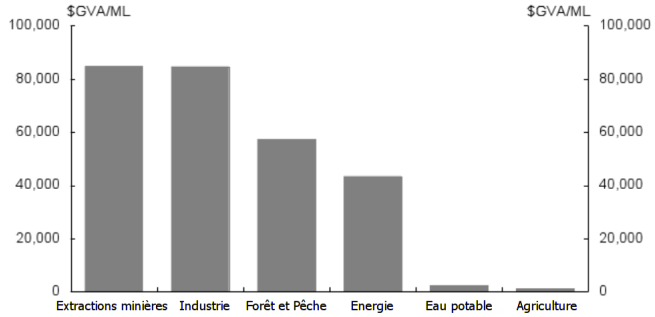
Cependant, la disponibilité de l'eau pour l'irrigation n'est pas assurée en raison d'une part de l'effet du changement climatique sur la reconstitution des réserves hydrographiques, mais aussi des choix sociétaux de partage de l'eau entre usages concurrents (eau potable et usages urbains, industrie, agriculture, usages récréatifs, environnement).[2] De nombreux facteurs peuvent justifier la baisse de la part de l'eau réservée à l'agriculture : l'augmentation des usages concurrents avec l'évolution des modes de vie (industrie, eau potable), la reconnaissance des besoins en eau des écosystèmes, la baisse de l'agriculture dans le PIB, la faible valorisation de l'eau utilisée pour l'irrigation (en raison notamment de l'usage encore répandu de techniques d'irrigation peu efficientes et de la faible valeur de la production agricole par rapport à la production industrielle par exemple) (*Figure 3*). La *Figure 4* représente les projections correspondant au scénario de référence des perspectives de l'environnement de l'OCDE 2010 illustrant la baisse de la part de l'agriculture dans les prélèvements d'eau dans le monde.

1. Si l'effet du changement climatique sur l'augmentation des températures est peu controversé, les prévisions sur l'évolution de la pluviométrie sont moins fiables en raison de la complexité du cycle de l'eau.

2. Selon Aguilera et al. (2000), la sécheresse peut être analysée comme "un construit social, résultant des rapports de représentations, de pouvoir, d'intérêts contrastés qu'entretiennent entre eux les différents acteurs impliqués face à la ressource en eau"

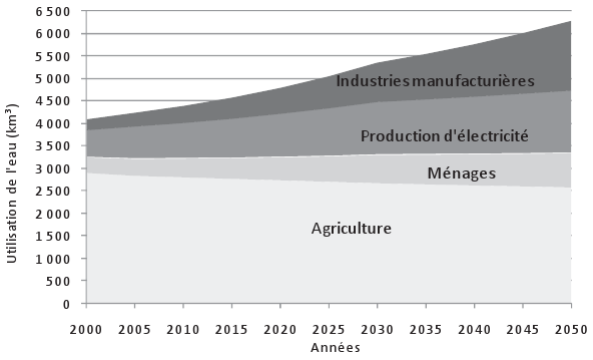
L'augmentation de la fréquence des épisodes de manque d'eau (que ce soit en raison des variations de la pluviométrie ou de la baisse des volumes alloués à l'irrigation) renforce l'importance de l'étude de la gestion du risque sécheresse en agriculture, et ce d'autant plus que ces épisodes ont un impact négatif important sur le secteur agricole.

Figure 3: Valeur ajoutée créée par 1000m3 d'eau (tous secteurs-Australie)



$GVA/Ml : Growth Value Added - Valeur ajoutée en dollars australiens pour 1000 m3 d'eau
Source : Australian Bureau of Statistics, Water account 2004-05

Figure 4: Prélèvements d'eau mondiaux prévus par secteur



Source : OECD (2010)

Remarque : Ces chiffres ne prennent pas en compte l'impact du changement climatique et des potentielles nouvelles politiques de gestion de l'eau sur les prélèvements.

Encadré 2 : Définition du risque sécheresse retenue dans la thèse

Le risque sécheresse est défini dans la thèse comme le ***risque de ne pas recevoir le volume d'eau d'irrigation réservé et prévu dans le plan de production.***

On se situe donc dans un contexte spécifique où les agriculteurs font des demandes d'eau ex-ante et apprennent ensuite leur allocation d'eau. Ces demandes ex-ante peuvent être organisées de diverses manières : octroi de droits de propriété sur l'eau en Australie et de licences volumétriques d'usage en France, systèmes décrits tous deux dans la suite de la thèse.

Cette définition est à relier au concept de fiabilité d'approvisionnement, défini comme la probabilité que le volume d'eau alloué corresponde à ce qui a été convenu à l'avance. La fiabilité peut se définir en termes d'occurrence (ratio du nombre d'épisodes où le volume demandé est alloué sur le nombre total d'épisodes), de temps (ratio de la durée pendant laquelle le système fonctionne sur la durée totale) et volumétriques (ratio du volume d'eau alloué par rapport au volume total demandé) (Ximing et al. (2001)). En Australie, la fiabilité d'un droit d'eau est définie comme le nombre d'années (sur 100 années) où l'allocation d'eau correspond au moins au droit d'eau volumétrique (Productivity Commision (2003)).

Remarque : Contrairement à la distinction proposée par Knight (1921), nous utilisons par la suite indistinctement les termes "risque" et "incertitude". Nous utilisons plutôt le terme "incertitude" pour décrire de façon générale l'environnement et "risque" pour préciser les caractéristiques de l'incertitude en terme de probabilités et conséquences (Robinson and Barry (1987)).

0.1.3 Impacts des épisodes de sécheresse sur l'agriculture

Le risque sécheresse fait partie des risques agricoles, généralement classés en cinq familles : risque de prix et de marché, risque de production, risque financier, risque institutionnel, risque humain. C'est un risque de production car la sécheresse a en général un impact négatif sur les rendements mais elle peut aussi avoir des conséquences sur les prix et les marchés si elle affecte simultanément plusieurs régions du globe (comme en 2009-2010 en Russie, Ukraine, Australie...). Par exemple en Australie, les sécheresses des dernières décennies ont été associées à une réduction importante de la production agricole (-19% entre 2005-06 et 2006-07 par exemple) (Productivity Commision (2009)). La sécheresse de 2002-03 a entraîné une baisse du PIB agricole de 1% et une baisse du PIB total de 1.6% en affectant d'autres secteurs (Horridge et al. (2005)).

Tous les épisodes de faible pluviométrie ne conduisent pas nécessairement à une perte de rendement pour l'agriculture, si la sécheresse atmosphérique n'entraîne pas de sécheresse édaphique et hydrologique. De même, toute perte de rendement due à la sécheresse ne se traduit pas nécessairement par une perte de revenus pour les agriculteurs. En effet, l'impact économique des sécheresses sur le secteur agricole dépend beaucoup de l'environnement formé par les politiques agricoles et la situation sur les marchés des produits. L'expertise INRA sécheresse (Amigues et al. (2006)) fournit un exemple illustratif en comparant les conséquences des sécheresses de 2003 et 2005 en France. La sécheresse de 2005 est intervenue dans un contexte déjà très tendu (hausse du prix du pétrole et donc des engrais chimiques et des carburants). La hausse des prix des produits agricoles ayant été plus faible que la diminution des volumes de production, le revenu par actif non salarié (RNEA) a baissé de 22% par rapport à 2004 (-6% par rapport à 2003). En 2003 au contraire, malgré une baisse de la production comparable à celle de 2005, la forte hausse des prix agricoles (+16%) avait compensé la baisse des volumes récoltés, aboutissant ainsi à une variation faible du RNEA (-2% pour les céréales, oléagineux et protéagineux), excepté pour le vin.

Les stratégies mises en place par les agriculteurs pour faire face à la sécheresse peuvent aussi réduire ses conséquences sur les revenus agricoles. Par exemple, les éleveurs australiens ont pu limiter les conséquences de la sécheresse de 2002-03 sur les volumes produits par l'achat de fourrage pour pallier à une production insuffisante des prairies. Cette stratégie tend à augmenter les coûts de production mais l'augmentation du prix du lait observé sur la période a compensé en partie l'augmentation du coût de revient :

la perte de revenu a ainsi pu être limitée (Productivity Commision (2009)). De même, les agriculteurs français ayant accès à une réserve en eau de substitution (qui est remplie en hiver) ne sont pas soumis aux restrictions d'usage de l'eau imposées par arrêté préfectoral en cas de sécheresse. Ils peuvent donc mieux lutter contre la sécheresse édaphique par des apports d'eau sécurisés (Erdlenbruch and Montginoul (2009)). La thèse s'intéresse particulièrement à cette dimension en tenant compte de l'impact des dispositifs d'allocation de l'eau sur les stratégies mises en place par les agriculteurs, et donc sur le risque sécheresse qu'ils subissent in fine. La mise en place de ces stratégies dépend du risque prévu (nous avons vu dans la section 0.1.2 que la fréquence des épisodes de manque d'eau allait augmenter pour l'agriculture) mais aussi de l'aversion au risque des agriculteurs. C'est ce que nous décrivons dans la section suivante.

0.1.4 Aversion au risque et préférences des agriculteurs vis à vis de la sécurité de l'approvisionnement en eau

Si toute sécheresse n'entraîne pas nécessairement des pertes financières réelles pour les agriculteurs, l'augmentation de la variabilité de la disponibilité de l'eau ne peut être que préjudiciable à l'agriculture. En effet, les agriculteurs devant prendre un certain nombre de décisions de production avant de connaître la disponibilité de l'eau, l'écart de profit moyen entre stratégie choisie ex-ante et stratégie optimale (c'est à dire utilisant efficacement la ressource en eau disponible) sera d'autant plus grand que la disponibilité de la ressource est variable. En effet, les agriculteurs averses au risque, en raison de la concavité de leur fonction d'utilité, préfèrent des stratégies de production conservatrices - investissements non risqués qui génèrent des revenus stables -, plutôt que de maximiser leur production et sa rentabilité. L'écart entre les revenus liés à une stratégie optimale en l'absence d'aversion au risque et les revenus générés par la stratégie de couverture contre le risque est appelé "prime de risque" (Babcock and Shogren (1995)). Plus précisément, la prime de risque est le montant monétaire maximum que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour supprimer le risque dans l'exercice de son activité agricole. Cette prime de risque augmente avec l'aversion au risque et le niveau de risque.

L'aversion au risque des agriculteurs peut expliquer la préférence pour un approvisionnement en eau sécurisé. Certains agriculteurs indiquent en effet qu'ils sont certes sensibles à la baisse des quantités d'eau disponibles en moyenne, mais aussi à l'augmentation de la variabilité de la disponibilité de la ressource (Reynaud (2009), Hoeberichts

(1995)).[3] Les agriculteurs apparaissent en moyenne averses au risque de manque d'eau mais il existe toutefois une grande hétérogénéité (voir *Encadré 3*). Pour Hadjigeorgalis (2000) et Bjornlund (2006), les différences s'expliquent par le type de culture : les producteurs de cultures pérennes sont plus averses au risque de manque d'eau que les producteurs de cultures annuelles. On peut observer une hétérogénéité au sein même des producteurs de cultures annuelles. Groom et al. (2006) trouvent une estimation du coefficient d'Arrow-Pratt d'aversion absolue au risque de 0.68 pour des maraîchers et 4.81 pour des céréaliers chypriotes. Cette hétérogénéité dans l'aversion au risque peut permettre des transferts de risque mutuellement avantageux entre agriculteurs.

On peut faire l'hypothèse que la demande des agriculteurs pour un approvisionnement en eau plus ou moins sécurisé est corrélée à leurs préférences vis à vis du risque mais il est nécessaire de mener une étude spécifique de leurs préférences pour la sécurité. La plupart des estimations sur la demande de fiabilité de l'approvisionnement en eau a été réalisée pour l'eau potable (Howe and Smith (1993, 1994), Lund (1995), Hensher et al. (2006)). Ces études contribuent à définir les investissements souhaitables dans les capacités de distribution d'eau dans les villes, face à l'arbitrage entre coûts des infrastructures permettant de répondre à la demande en toutes circonstances et coûts pour les usagers du risque de restriction des usages de l'eau. Les mêmes études sont nécessaires pour l'eau d'irrigation afin de déterminer dans quelle mesure des politiques de sécurisation de l'eau d'irrigation sont nécessaires. Rigby et al. (2010) estiment par la méthode des choix multi-attributs (*choice experiment*) le consentement à payer d'un échantillon d'horticulteurs irrigants du Sud de l'Espagne pour une augmentation de la probabilité de recevoir 1000 m3/ha/an d'eau supplémentaire. Le consentement à payer moyen pour augmenter la probabilité de recevoir cette eau supplémentaire de 25% à 50% est de 330€ par agriculteur mais avec une grande variabilité (246€ pour le premier décile et 428€ pour le dernier décile). Azahara Mesa-Jurado et al. (2011) étudient la même question pour des producteurs d'olive dans le Sud de l'Espagne. Les oléiculteurs reçoivent en théorie une allocation d'eau de 15000 l/olivier/an (équivalent à 1500m3/ha/an) mais en pratique l'allocation est souvent réduite. Ils montrent que le consentement à payer de ces producteurs pour recevoir une quantité d'eau sécurisée de 10000 l/olivier 5 années sur 10 est de 0.39 €/olivier/an alors que le consentement à payer est 0.74 €/olivier/an pour que cette quantité soit obtenue 9 années sur 10.

3. L'aversion au risque peut être interprétée comme le paramètre d'arbitrage entre rendement moyen et risque (selon l'approximation de Taylor).

Encadré 3 : Mesure de l'aversion au risque des agriculteurs

Deux types de méthode ont été utilisés dans la littérature pour éliciter l'aversion au risque des agriculteurs (voir Reynaud et al. (2011) pour une excellente revue de cette littérature).

- Elle peut être révélée économétriquement à partir des différences entre les choix de production observés et les choix optimaux sous l'hypothèse de neutralité au risque (Antle (1987), Saha et al. (1994), Chavas and Holt (1996)).
- Elle peut aussi être élicitée par les méthodes de l'économie expérimentale à partir de questions sur des choix de loterie, ce qui permet de séparer préférences vis à vis du risque et perception des risques (voir Binswanger (1980), Tanaka et al. (2010), Harrison et al. (2010) pour des expériences sur des ménages ruraux dans des pays en voie de développement, Couture and Reynaud (2010) pour des agriculteurs français, Bond and Wonder (1980), Quiggin (1981) pour des agriculteurs australiens).

Reynaud et al. (2011) fournissent une comparaison intéressante entre préférence vis à vis du risque des agriculteurs révélée par leurs choix de production et préférence déclarée dans un jeu de loterie de type expérimental.

Koundouri et al. (2009) montrent que l'aversion au risque des agriculteurs n'est pas une caractéristique intrinsèque mais qu'elle est très dépendante du contexte, par exemple des politiques agricoles. Ils trouvent que les agriculteurs finlandais, qui étaient auparavant en moyenne averses au risque - d'après leurs choix de production -, sont devenus riscophiles après l'entrée de la Finlande dans l'Union Européenne. L'explication donnée par les auteurs est que la part non variable du revenu des agriculteurs a fortement augmenté avec le versement des paiements uniques de la Politique Agricole Commune et donc l'aversion au risque a diminué, selon le principe de l'aversion au risque décroissante avec la richesse (DARA). Les politiques de gestion de l'eau sont aussi susceptibles d'influencer l'aversion au risque des agriculteurs et leurs stratégies de gestion du risque sécheresse.

L'aversion des agriculteurs face au risque de manque d'eau et à la variabilité de leurs revenus entraîne la mise en place de stratégies de gestion du risque sécheresse à différents niveaux. Ces stratégies sont décrites brièvement dans la partie suivante.

0.2 La gestion du risque sécheresse

La gestion du risque sécheresse passe par un ensemble d'actions qui peuvent par exemple être classées en fonction de leurs conséquences escomptées : réduction de la fréquence des sécheresses ou réduction des dommages. La classification proposée par OECD (2011) s'intéresse elle aux acteurs : l'agriculteur sur son exploitation fait des choix limitant l'impact des évènements de sécheresse, le secteur privé offre des assurances récolte et des solutions techniques (variétés, matériel d'irrigation...) et les autorités publiques mettent en place des politiques de gestion de l'eau pour limiter les épisodes de manque d'eau ainsi que des mesures pour indemniser les agriculteurs en cas de pertes importantes. La classification que nous retenons distingue les mesures a priori - dispositifs mis en place à l'avance pour réduire l'occurrence des évènements où l'offre en eau est insuffisante -, des mesures a posteriori - qui visent à compenser les pertes subies par les agriculteurs et réduire les conséquences négatives d'une sécheresse à long terme -.

Alors que la gestion des risques au niveau de l'exploitation et la compensation financière a posteriori sont les leviers de la gestion du risque sécheresse les plus couramment cités, la thèse s'intéresse aux dispositifs d'allocation de l'eau comme instruments complémentaires.

0.2.1 Gestion a posteriori : indemniser les dommages

Plusieurs pays disposent de fonds nationaux de compensation des pertes d'exploitation dues à la sécheresse. En France, le Fonds National de Garantie des Calamités Agricoles (FNGCA), créé en 1964, a pour but d'indemniser les dommages matériels causés aux exploitations agricoles par des évènements exceptionnels (tempêtes, grêle, sécheresse, nuées d'insectes) que les assurances privées ne souhaitent en général pas assurer. Il est alimenté à la fois par des subventions d'État et par des prélèvements obligatoires sur les assurances agricoles. En Australie, la politique nationale de gestion de la sécheresse (*National Drought Policy* - NDP), créée en 1992, permet d'indemniser les agriculteurs situés dans les espaces déclarés comme se trouvant dans des circonstances exceptionnelles. Ce système prévoit la subvention par l'État des intérêts des prêts permettant de redémarrer l'activité suite à une sécheresse et une bourse de sortie d'activité pour les exploitations non viables. Les États prennent le rôle d'assureur ou d'intermédiaire en collectant des fonds publics par l'impôt (ou en prélevant une part des primes d'assu-

rance) qui sont ensuite redistribués aux agriculteurs en cas de sécheresse.

Hors des évènements de crise majeure (voir *Encadré 4* pour le plan de gestion crise annoncé au printemps 2011 en France), la tendance générale est à un désengagement des États dans la gestion a posteriori du risque sécheresse. Les critiques de l'intervention étatique dans l'indemnisation de la sécheresse portent sur trois points (Malcolm and Larson (2010)) : le coût d'opportunité des ressources publiques engagées, les coûts liés à la mauvaise allocation des ressources et aux mauvais signaux envoyés aux agriculteurs (qui sont peu incités à mettre en œuvre des stratégies de protection contre le risque sur leur exploitation) et la remise en cause de l'existence de défaillances de marché qui justifiaient l'intervention de l'État. En effet, les risques climatiques comme la sécheresse ont été longtemps considérés comme non-assurables par le marché pour trois raisons principales : i) il existe peu de statistiques fiables sur l'occurrence des évènements de sécheresse, l'étendue des dommages et le consentement à payer des agriculteurs pour déterminer la prime d'assurance ; ii) il est difficile d'imputer à la seule sécheresse des pertes qui peuvent aussi résulter d'une conduite de cultures ou d'un choix de spéculations inappropriés, traditionnel problème de l'aléa moral en assurance ; iii) les risques individuels sont corrélés car l'évènement concerne en général simultanément une grand nombre d'assurés. Or, il est possible de rendre ce risque assurable en diversifiant les risques sur une zone géographique plus grande (à l'échelle internationale), ou par l'association de plusieurs risques non corrélés dans une même police d'assurance (assurance multirisque climatique : sécheresse et grêle par exemple). Certains assureurs privés se sont d'ailleurs lancés sur ce marché à condition que l'État s'engage à intervenir comme réassureur (Espagne et États-Unis) et/ou que les primes d'assurance soient subventionnées afin de réconcilier rentabilité pour les assureurs et accessibilité pour les agriculteurs (France).

En France, la Loi d'Orientation Agricole de 2005, suite au rapport Ménard (2004), a posé les bases d'une généralisation du système d'assurance récolte et instauré le Comité National de l'Assurance en Agriculture. Deux assureurs privés proposent à ce jour la majorité des contrats multirisques climatiques (Groupama pour 90%, Pacifico-Crédit Agricole pour 9%). L'État subventionne certains contrats d'assurance à hauteur de 35% (et 45% pour les jeunes agriculteurs), avec un niveau de franchise dépendant de la nature du contrat (à l'exploitation ou à la culture). Sont éligibles à ces aides de l'État, les contrats avec panier minimum de 4 risques (gel, sécheresse, grêle et inondations-excès d'eau) à la culture et à l'exploitation. A ce jour, plus de 60 000 contrats ont été

signés (principalement à la culture) ce qui représente 20% des exploitations agricoles.

En Australie, il n'existe pas de contrat multirisque couvrant la sécheresse. Le taux de subvention nécessaire pour rendre ces contrats viables semble prohibitif (Kimura and Antón (2011)). L'audit du *National Drought Policy* conduit en 2008-2009 a néanmoins conclu que les États australiens devaient progressivement se désengager de l'indemnisation des exploitations victimes de risques climatiques en raison des effets d'éviction sur les stratégies individuelles des agriculteurs de protection contre les risques (Productivity Commision (2009)).

Remarque : la thèse ne traite pas la question de la compensation financière des agriculteurs en cas de sécheresse. Il nous a semblé néanmoins indispensable d'évoquer dans l'introduction ces mécanismes car seule la combinaison de différents instruments peut permettre de gérer le risque de façon efficace et adaptée aux réalités de terrain. Selon la récurrence des évènements de sécheresse, la combinaison idéale varie (Amigues et al. (2006)). Par exemple, les systèmes de compensation a posteriori, assortis de mesures de gestion de pénurie en situation de crise, peuvent être suffisants pour faire face au risque si les évènements de sécheresse sont rares. Par contre, si les sécheresses surviennent plus souvent, ces mesures seront insuffisantes et des mesures a priori plus importantes doivent être mises en place au niveau de l'exploitation (changement de stratégies de production) et par les autorités publiques (politiques de création de ressources, de gestion des demandes en eau et de mise en adéquation des disponibilités aux besoins). De plus, la prise en compte des interactions entre les différents instruments de gestion du risque sécheresse est nécessaire. Par exemple, l'existence de mécanismes de compensation a posteriori est susceptible d'avoir une influence sur l'efficacité des politiques de gestion de la sécheresse a priori si les agriculteurs les anticipent.

Face aux difficultés soulevées par l'indemnisation a posteriori du risque sécheresse, il convient de limiter le besoin d'y recourir et donc d'améliorer la gestion a priori pour limiter la fréquence des évènements de manque d'eau (Innes (2003)).

Encadré 4 : Plan Sécheresse 2011 en France

Le déficit de pluviométrie de 50% en moyenne au printemps 2011 en France (et jusqu'à -80% dans certaines régions comme le Poitou-Charente) a fait craindre en France une sécheresse au moins aussi grave que celle de 1976. Des mesures d'indemnisation des éleveurs (catégorie la plus touchée) ont été annoncées par le président de la République le 9 juin 2011 et doivent prendre effet dans les mois qui viennent.

- Les échéances des prêts contractés par les éleveurs dans le cadre du plan de soutien exceptionnel à l'agriculture de 2009 seront reportées d'un an et les intérêts de ces prêts seront pris en charge par l'État
- Les éleveurs en difficulté seront exemptés de la taxe sur le foncier non bâti
- Le fonds national de garantie contre les risques en agriculture sera doté dès cette année d'une enveloppe de l'ordre de 200 millions d'euros pour permettre le versement d'une avance aux agriculteurs sur l'indemnisation des pertes dues à la sécheresse

Le Chef de l'État a également annoncé des mesures de soutien au développement de la ressource en eau, afin de limiter l'impact des sécheresses futures :

- Un plan à 5 ans pour la création de retenues d'eau va être déployé afin de mieux assurer l'équilibre entre les besoins de l'irrigation et les ressources disponibles
- Les compétences des chambres d'agriculture vont être étendues par voie législative afin de leur permettre d'assurer la maîtrise d'ouvrage des retenues d'eau

De plus, un plan à 5 ans sur la réduction des volumes d'eau prélevés va être mis en œuvre en implantant des cultures plus économes en eau (sorgho à la place du maïs par exemple).

Source : Site web du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire

0.2.2 Gestion a priori : limiter le risque et la vulnérabilité

Les agriculteurs et les autorités publiques ont leur rôle à jouer dans la gestion a priori du risque sécheresse. Nous décrivons dans un premier temps les stratégies qui peuvent être mises en place au niveau des exploitations pour réduire la fréquence des épisodes de manque d'eau et les dommages qui en résultent. Ensuite, nous abordons les opportunités offertes par la gestion du risque au niveau des dispositifs d'allocation de l'eau. Il est important de présenter ici ces deux dimensions de la gestion a priori car la thèse traite des interactions entre dispositifs d'allocation de l'eau et stratégies de gestion du risque sécheresse par les agriculteurs.

Au niveau de l'exploitation

Si l'irrigation permet de limiter les risques liés au déficit de pluviométrie, son caractère assurantiel est toutefois soumis aux contraintes liées à la disponibilité de l'eau. La réduction du risque sécheresse passe donc aussi par des mesures visant à diminuer le recours aux prélèvements en eau dans les réseaux d'irrigation (Amigues et al. (2006)). Les agriculteurs peuvent réduire les pertes d'eau par le recours à des techniques d'irrigation plus efficaces (goutte à goutte) et par la diminution des pertes liées à l'évaporation par des techniques culturales (paillage, labour minimal, désherbage...). Ils peuvent utiliser l'eau plus efficacement par le choix de variétés plus résistantes au manque d'eau ou adaptées au cycle de la disponibilité de l'eau. Enfin, ils peuvent augmenter l'offre d'eau par la diversification des sources d'accès à l'eau (pompage d'eau souterraine, recyclage des eaux usées, construction de réservoirs). Plusieurs études empiriques montrent que la probabilité d'adopter une technologies d'irrigation efficace augmente lors des années de sécheresse (Schuck et al. (2005), Koundouri et al. (2006)).

Certaines stratégies techniques comme la diversification des cultures (passage en culture sèche d'une partie de l'exploitation par exemple), la diversification de la nourriture pour l'élevage (achat de fourrage) ou la gestion des stocks, permettent de limiter les dommages liés à la sécheresse. La gestion de l'épargne/désépargne, la diversification des sources de revenus (quand un des membres du ménage travaille hors de l'exploitation) et la baisse des coûts par la diminution des intrants et des investissements permettent de mieux supporter les pertes économiques liées à la sécheresse (Kimura and Antón (2011)).

Remarque : Les stratégies individuelles de protection contre le risque sont souvent classées en deux catégories : l'auto-assurance réduit les dommages alors que l'auto-protection réduit la probabilité d'occurrence du risque (Ehrlich and Becker (1972)). Néanmoins, il est souvent artificiel de distinguer les deux car un certain nombre d'actions ont les deux effets et la caractérisation d'auto-assurance ou auto-protection dépend du risque considéré. Par exemple, si le risque sécheresse est défini comme le risque d'avoir une faible pluviométrie, l'auto-protection est sans effet car la pluie est un évènement climatique exogène dont on ne pourra pas réduire la probabilité. Toutes les stratégies peuvent être qualifiées d'auto-assurance car elles ont pour effet de limiter les dommages liés à la faible pluviométrie. Par contre, dans le cadre de la définition du risque sécheresse retenue dans l'*Encadré 2*, toutes les stratégies visant à réduire les besoins en eau (techniques plus efficaces, cultures moins dépendantes de l'eau) et donc les volumes pré-réservés peuvent être caractérisées comme de l'auto-protection car elles limitent l'occurrence des épisodes où les volumes disponibles sont inférieurs aux volumes pré-réservés.

Ces stratégies réduisent la probabilité et les conséquences du risque de manque d'eau mais entraînent des coûts directs (coût de construction d'un réservoir par exemple) et indirects car elles induisent une déviation par rapport aux stratégies de production optimales en cas d'aversion au risque (voir section 0.1.4 et Murgai (1998), Thoyer et al. (2008)). Par exemple, Reynaud (2009) étudie par un couplage de modèles biophysiques et économiques les décisions d'un agriculteur face au risque sécheresse dans le court terme (choix tactique d'irrigation : fréquence et quantités d'eau apportée) et le long terme (choix de culture). Il montre que dans un univers climatique incertain, un agriculteur averse au risque est prêt à opter pour des systèmes de culture qui ne fournissent pas le profit le plus élevé en année climatique normale pour ne pas voir son gain trop diminuer si le risque climatique se réalise. Ici, le système intermédiaire blé dur sorgho, moyennement consommateur en eau, est retenu en cas de risque de sécheresse très élevé. Il présente des coûts de production faibles, ce qui limite le risque financier, mais aussi des rendements relativement faibles. L'aversion au risque conduit l'agriculteur à dévier des stratégies les plus productives : il est prêt à sacrifier des rendements pour diminuer le risque.

L'action publique est utile pour inciter et faciliter les stratégies individuelles de protection contre le risque sécheresse. Par exemple, un service météorologique fiable et précis permet aux agriculteurs une meilleure anticipation et donc le choix d'une stratégie adaptée au climat. Le coût élevé de la mise en place de ces services rend nécessaire la connaissance de la valeur de cette information pour les agriculteurs. [4] Mushtaq et al. (2009) mesurent cette valeur pour le Murray Darling Bassin en Australie, où les allocation d'eau de chaque agriculteur sont annoncées au fur et à mesure de la saison en fonction des conditions climatiques, et où une amélioration des prévisions météorologiques permettrait d'informer les agriculteurs sur ce que sera leur allocation en eau totale en fin de saison. Des décisions tactiques telles que les choix d'assolement, l'abandon de l'irrigation sur une partie des surfaces, l'achat temporaire ou la vente d'allocations d'eau ... permettent de limiter les coûts d'un manque d'eau mais uniquement quand celui-ci peut être anticipé. En l'absence de cette information, un agriculteur pessimiste averse au risque fera des choix de production conservateurs, basés sur l'allocation d'eau annoncée initialement, et subira des coûts d'opportunité s'il y a finalement plus d'eau disponible. A l'inverse, un agriculteur optimiste qui fait des choix de production basés sur une disponibilité de l'eau relativement élevée devra employer des stratégies tactiques coûteuses et non optimales si les volumes d'eau disponibles sont finalement réduits par rapport à ses prévisions. La valeur économique des prévisions météorologiques est calculée en comparant les revenus générés par les choix de production d'un agriculteur pessimiste avec les revenus générés si les stratégies de production sont optimisées grâce à la connaissance de l'allocation d'eau finale (idem pour un producteur optimiste).

L'absence de gestion collective des risques peut entraîner une sur-protection contre le risque au niveau des exploitations. La prise en charge d'une partie de la gestion du risque sécheresse par les autorités publiques peut permettre de mieux gérer le risque et ainsi limiter la prime de risque supportée par la société dans son ensemble. Le principe général du partage des risques est que l'agent le plus apte à gérer le risque doit le supporter. On peut considérer que les agriculteurs sont mieux placés que les autorités publiques pour gérer le risque au niveau technologique : ils savent quoi faire pour limiter les dommages sur leurs cultures. Ils disposent de toute l'information sur leur capacité technique et

4. L'intuition suggère que les agriculteurs les plus averses au risque sont prêt à payer plus pour des informations météorologiques. Mais en théorie, la valeur de l'information n'augmente pas nécessairement avec l'aversion au risque (Willinger (1989), Eeckhoudt and Godfroid (2000)). C'est notamment le cas si la connaissance de l'information conduit à choisir une option risquée alors que l'option sûre aurait été choisie en l'absence d'information.

financière à supporter un risque. Néanmoins, la gestion des risques passe aussi par des aspects financiers que les agriculteurs ne sont pas toujours à même de gérer en raison de leur accès limité aux marchés financiers, et que les autorités publiques peuvent parfois prendre en charge (voir l'exemple du financement des réserves de substitution -section 1.1.3- ou de la subvention des primes d'assurance récolte -section 0.2.1-) (Quiggin and Chambers (2004)). De plus, la gestion du risque sécheresse peut passer par l'allocation de l'eau, domaine le plus souvent sous la responsabilité et la gestion des autorités publiques. Nous décrivons par la suite les actions publiques visant à optimiser la gestion de l'eau et ainsi minimiser les risques de sécheresse.

Action collective : la gestion de l'eau et du risque sécheresse

Les décisions collectives de gestion et partage de l'eau contribuent à la gestion a priori du risque sécheresse. La planification de l'utilisation de l'eau par les différents usages permet en effet de diminuer la fréquence des sécheresses et les outils de rationnement de limiter les coûts sociaux du déficit en eau en allouant efficacement la ressource.

Les politiques de gestion de l'eau ont longtemps été basée exclusivement sur l'augmentation quantitative de l'offre par la construction de grandes infrastructures de stockage et d'approvisionnement. Le manque d'eau étant essentiellement un problème d'inadéquation temporelle entre le moment où l'eau est disponible et celui où elle est nécessaire, le stockage est une solution évidente pour limiter les épisodes de manque d'eau. Néanmoins, en raison du coût marginal fortement croissant et des perspectives d'extension limitées, les gestionnaires de l'eau limitent aujourd'hui le recours à ces "politiques de l'offre" et cherchent davantage à gérer la demande. [5]

Depuis le début des années 90, des solutions économiques de gestion de la demande en eau ont vu le jour. La pression croissante sur la ressource en eau a conduit les économistes à s'intéresser aux instruments permettant l'application du principe paretien d'allocation efficace d'une ressource rare : la valeur marginale de la dernière unité de ressource utilisée doit être égale pour tous les usagers. Gérer l'eau comme un bien économique a été reconnu comme un excellent moyen pour "garantir une utilisation

5. Si l'époque d'investissement dans des grands barrages-réservoirs est révolue, les retenues collectives ou individuelles destinées uniquement à l'irrigation ont néanmoins connu un essor certain ces dix dernières années notamment en France. Le chapitre 1 (section 1.1.3) détaille l'usage de cette solution dans le cas français.

efficiente et équitable des ressources et encourager leur conservation et leur protection" lors de la conférence internationale sur l'eau organisée à Dublin en 1992.

En l'absence de connaissance parfaite de la valeur marginale de l'eau pour chaque usager, la littérature prescrit l'usage d'instruments économiques comme la tarification ou les marchés d'échange de quotas (Ward and Michelsen (2002)). En théorie, ces mécanismes permettent de limiter la demande en eau dans les moments où la ressource disponible est rare et de minimiser le coût social de la rareté en allouant l'eau à ceux dont la valeur marginale est la plus élevée. En pratique, l'efficacité de ces instrument est souvent limitée par : la méconnaissance de la valeur marginale de l'eau et des coûts d'abattement alors que ces données sont nécessaires pour fixer un niveau de taxe ou de quota optimal ; le caractère dynamique et stochastique de la ressource qui imposerait de faire varier le niveau de taxe ou de quota en permanence ; les difficultés de contrôle des prélèvements individuels agricoles. Face à ces difficultés, les mécanismes mis en place pour rationaliser l'allocation de la ressource sont divers et fortement influencés par le contexte institutionnel et juridique pré-existant, le degré de pression sur la ressource, les rapports de force entre secteurs usagers ... Les deux pays étudiés (France et Australie) ont mis en place une gestion de l'eau agricole par quotas : les agriculteurs peuvent détenir des droits d'eau en Australie et doivent demander des autorisations de prélèvement en France. Des détails sur ces dispositifs sont donnés dans les chapitres 1 et 4.

Ces outils de planification a priori des usages doivent être complétés par des outils de gestion de crise quand, malgré tous les efforts pour augmenter l'offre et réduire les besoins en eau, la ressource disponible est insuffisante pour couvrir les demandes. En France, le rationnement est organisé par l'administration, qui tente de satisfaire au mieux les demandes conflictuelles des différents usagers. En Australie, l'eau disponible est allouée proportionnellement aux droits d'eau détenus par chaque usager sous forme d'allocation. L'échange des allocation d'eau sur un marché permet de réallouer l'eau aux usagers la valorisant davantage.

Dans un contexte de changement climatique où la variabilité de la ressource devient une caractéristique majeure, il convient de s'interroger sur l'amélioration des mécanismes d'allocation de l'eau en vue d'une meilleure gestion du risque sécheresse. L'allocation efficace de la ressource à chaque instant ne doit pas être l'unique objectif de ces dispositifs.

0.3 Apports de la thèse

0.3.1 Problématique

La littérature sur l'allocation efficace de l'eau a majoritairement négligé les risques associés à la forte variabilité de la ressource. Or, la façon dont est partagée l'eau à chaque instant définit la distribution de l'allocation d'eau reçue par chaque individu et donc le risque sécheresse qu'il subit (tel que défini dans l'*Encadré 2*). Si les usagers de l'eau sont averses au risque, il ne suffit pas de partager la ressource en fonction des bénéfices liés à l'usage de l'eau, il faut aussi gérer les risques.

Le premier principe de gestion collective des risques est la mutualisation : l'agrégation de multiples risques individuels indépendants permet de "diluer" le risque individuel par la loi des grands nombres. Cependant, quand les risques sont corrélés comme dans le cas de la sécheresse, la mutualisation ne permet pas de diminuer le risque (Eeckhoudt et al. (2005) chapitre 10).[6] Il faut recourir au second principe pour partager le risque non diversifiable : le partage du risque est optimal si chaque agent supporte une part du risque proportionnelle à sa tolérance au risque (voir *Encadré 5* sur le théorème de Borch). L'application de ce principe au partage de l'eau d'irrigation en univers risqué nous enseigne que les agriculteurs les plus tolérants au risque doivent, à l'optimum, supporter une plus grande part de la variabilité des ressource en eau disponibles pour l'agriculture (voir Faysse (2001) chapitre 3 pour la seule application répertoriée de ce principe au cas de l'eau). Or, nous savons, d'après le second théorème de l'économie du bien être, qu'il est possible de décentraliser tout optimum par un système de transferts sur un marché en concurrence pure et parfaite. Il serait donc possible en théorie d'atteindre le partage optimal de la ressource en eau dans chaque état du monde quels que soient les volumes disponibles, et par conséquent le partage de risque optimal, par un système de marchés contingents parfaits et complets.

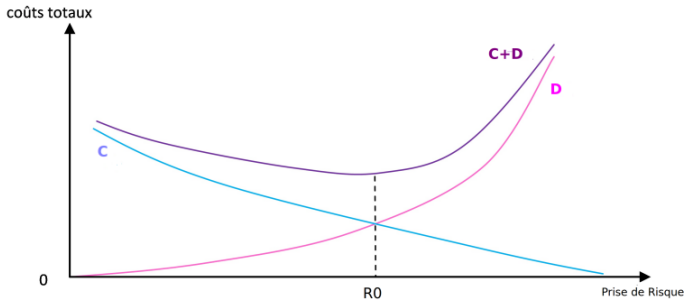
6. La littérature empirique sur le partage de risque entre agriculteurs étudie généralement uniquement le principe de mutualisation : les transferts, souvent informels, entre ménages permettent aux agents de lisser leurs profils de consommation. Les exemples de telles pratiques sont principalement trouvés dans les communauté rurales dans les pays en développement ((Udry, 1994, Fafchamps and Lund, 2003)). Cette littérature est peu pertinente pour notre cas d'étude car les risques subits par les agriculteurs sont très souvent corrélés en cas de sécheresse, ce qui limite les possibilités de transferts assurantiels entre agriculteurs. Nous ne nous referons pas non plus à la branche de la littérature en économie agricole qui s'intéresse aux contrats entre exploitants et propriétaires de terre qui peuvent contenir des clauses explicites ou implicites de partage de risque (fermage versus métayage) ((Stiglitz, 1974, Aggarwal, 2007)).

En réalité, ces marchés parfaits et complets n'existent pas pour l'allocation de l'eau. Si des marchés de l'eau existent en Australie, les échanges sont coûteux et soumis à des restrictions. En France, les autorisations de prélèvement en eau ne sont pas échangeables. L'allocation de l'eau telle que mise en place en France et en Australie ne permet donc pas un partage optimal du risque. Il convient donc d'étudier dans quelle mesure les dispositifs d'allocation de l'eau existants permettent de partager les risques et s'ils peuvent être amélioré à la marge pour une meilleure gestion a priori du risque sécheresse.

De plus, la théorie du partage optimal de risque existante ne considère que le cas d'un risque exogène. Or, le risque sécheresse est comme beaucoup de risques environnementaux un risque partiellement endogène (Shogren and Crocker (1992, 1999)). La probabilité et la sévérité du manque d'eau sont influencées non seulement par les évènements climatiques exogènes, mais aussi par les décisions et actions des usagers. Un individu peut influencer son niveau de risque par de multiples stratégies (voir section 0.2.2). L'analyse doit donc intégrer le caractère endogène du risque. Il existe une prise de risque optimale au niveau de la société, dont le niveau dépend de l'arbitrage entre coût de la prise de risque et coût de la protection contre le risque (*Figure 5*).

Les politiques de gestion de la sécheresse doivent tenir compte du caractère partiellement endogène du risque. Une action publique qui viserait à intégrer un meilleur partage du risque sécheresse dans les dispositifs d'allocation d'eau ne doit ni par sa présence évincer les actions de gestion du risque au niveau des exploitations, ni par son absence conduire à un sur-coût des actions de protection mises en place par les agriculteurs eux-mêmes. Les politiques publiques doivent envoyer les bons signaux aux agriculteurs pour que leurs stratégies individuelles de couverture contre le risque conduisent au niveau optimal de prise de risque.

FIGURE 5 – Prise de risque optimale



Le coût total du risque (D) représente les dommages liés à la prise de risque. Le coût marginal augmente car il devient de plus en plus coûteux de prendre des risques quand le risque supporté est déjà élevé. Le coût de la réduction du risque (C) représente les coûts directs et indirects liés à la mise en place d'actions individuelles et collectives de réduction du risque. Les stratégies de réduction du risque sont de plus en plus coûteuses au fur et à mesure que des stratégies ont déjà été engagées, d'où un coût marginal décroissant avec le niveau de risque. La minimisation de la somme de ces deux coûts totaux (représentée par la courbe obtenue par sommation verticale des niveaux de C et D pour chaque niveau de risque) intervient au niveau de risque optimal R0.
Rq : En pratique, il n'est pas possible d'évaluer précisément les dommages et coûts et d'agréger des différents risques. Cette représentation est donc avant tout pédagogique.

Le programme de recherche engagé dans cette thèse peut se résumer en deux questions :

1) Quel est l'impact des dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation existants sur le risque sécheresse subi par les agriculteurs et sur leurs stratégies de gestion du risque ?

2) Comment améliorer les dispositifs d'allocation de l'eau en vue d'un meilleur partage des risques ?

Chacun des trois articles (chapitres 2, 3 et 5) de la thèse répond à une de ces questions dans un contexte particulier. La section suivante décrit brièvement les deux cas d'étude.

Encadré 5 : Théorème de Borch (1/3)

Nous cherchons quelle règle un planificateur bienveillant et tout-puissant, capable de réaliser des transferts de richesse entre agents sans coût, doit utiliser afin d'aboutir à un partage ou allocation efficace des risques. [a] Une règle de partage est Pareto optimale dans le cadre Espérance d'Utilité s'il n'existe aucune autre règle de partage qui permettrait d'augmenter au moins l'utilité espérée d'un agent sans diminuer celle d'au moins un autre. Une allocation efficace maximise la somme pondérée des utilités espérées de la richesse de tous les agents.
Afin de se rapprocher de l'exemple de l'eau, on fait ici l'hypothèse que le risque est systémique : la richesse totale disponible dans un état du monde $\omega_0(\tilde{s})$ est aléatoire. Elle correspond à l'allocation totale d'eau. Chaque état du monde $s = 1...S$ est caractérisé par une probabilité p_s, connue de tous.
Les individus ne reçoivent pas de dotations initiales individuelles. Ils reçoivent des dotations finales en eau qui leur sont allouées par le régulateur. Soit $\omega_i(s)$ la richesse finale d'un agent i dans l'état du monde s. Une règle de partage (définie par la fonction W_i) est utilisée pour allouer à chaque individu i une part de la richesse totale dans un état du monde $(\omega_0(s))$ [b] :

$$\omega_i(s) = W_i[\omega_0(s)] \tag{1}$$

Quelle est la règle de partage de la richesse totale entre n agents hétérogènes qui maximise la somme pondérée des espérances d'utilité ? Toute allocation efficace est la solution du problème suivant avec des poids λ_i fixés de manière *ad-hoc*.

$$\underset{\{\omega_i(s)\}}{Max} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i EU_i(\omega_i(\tilde{s})) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \left[\sum_{s=1}^{S} p_s U_i(\omega_i(s)) \right] \tag{2}$$

$$s/c \qquad \omega_0(s) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i(s) \tag{3}$$

a. Les premiers résultats sur le partage de risque d'un risque non diversifiable sont dus à Borch (1962) pour l'étude des marchés de réassurance et à Wilson (1968) pour l'étude des décisions d'un "syndicat" qui prend des décisions collectivement et partage les profits générés dans un contexte risqué.

b. Le principe de mutualité, qui prescrit que les richesses des individus après transfert ne dépendent pas de leurs dotations initiales mais uniquement de la richesse agrégée dans cet état, n'est donc pas utile ici.

Encadré 5 : Théorème de Borch (2/3)

Pour chaque état du monde s et chaque pair d'agent i, j, on obtient une condition de première ordre : [a]

$$\lambda_i \, p_s U_i'(\omega_i(s)) = \lambda_j \, p_s U_j'(\omega_j(s)) \; \forall s, i, j \tag{4}$$

Si l'on veut faire disparaître les poids λ, il suffit de diviser (4) par la condition équivalente dans un autre état du monde t. On obtient alors :

$$\frac{p_s U_i'(\omega_i(s))}{p_t U_i'(\omega_i(t))} = \frac{p_s U_j'(\omega_j(s))}{p_t U_j'(\omega_j(t))} \; \forall s, t, i, j \tag{5}$$

L'équation 5 correspond à la condition classique de Pareto efficacité, adaptée à des biens contingents. Pour qu'une allocation des risques soit Pareto-efficace il est nécessaire que les taux marginaux de substitution entre consommation dans l'état du monde s et consommation dans l'état du monde t soient les mêmes pour tous les individus dans la population.
Considérons une économie simplifiée avec deux agents i et j et deux états de la nature 1 et 2. Tant que $TMS_i^{1,2} < TMS_j^{1,2}$, la compensation demandée par j pour donner à i une unité dans l'état du monde 1 et recevoir de i une unité dans l'état du monde 2 est inférieure au gain lié à cet échange. Il n'y a plus de gains à l'échange quand $TMS_i^{1,2} = TMS_j^{1,2}$.

Quand l'allocation de la richesse est optimale dans chaque état du monde, comment partager un supplément de richesse ?
Sachant que $\omega_i(s) = W_i[\omega_0(s)]$, par différentiation de (4) par rapport à ω_0, on obtient :

$$\lambda_i U_i''(W_i) W_i'(\omega_0(s)) = \lambda_j U_j'(W_j) W_j'(\omega_0(s)) \; \forall s, i, j \tag{6}$$

En divisant (4) par (6), on obtient :

$$\frac{U_i''(W_i)}{U_i'(W_i)} W_i'(\omega_0(s)) = \frac{U_j''(W_j)}{U_j'(W_j)} W_j'(\omega_0(s)) \; \forall s, i, j \tag{7}$$

a. On peut montrer que les conditions de second ordre sont vérifiées car la matrice hessienne est une matrice diagonale dont les éléments diagonaux sont du type $\lambda_i \, p_s U_i''(\omega_i(s)) < 0$. Cette matrice est donc bien définie négative.

Encadré 5 : Théorème de Borch (3/3)

Soit $T_i = -\frac{U_i'(W_i)}{U_i''(W_i)}$, la tolérance au risque, inverse de l'aversion absolue au risque au sens d'Arrow-Pratt.

$$W_i'(\omega_0(s)) = \frac{T_i}{T_j} W_j'(\omega_0(s)) \ \forall s, i, j \tag{8}$$

D'après la contrainte (3), on a $\sum_{i=1}^{n} W_i(\omega_0(s)) = \omega_0(s)$ et donc $\sum_{i=1}^{n} W_i'(\omega_0(s)) = 1$

$$\sum_{i=1}^{n} W_i'(\omega_0(s)) = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{T_j} W_j'(\omega_0(s)) = 1 \tag{9}$$

On obtient finalement

$$W_i'(\omega_0(s)) \quad = \quad \frac{T_i}{\sum_{i=1}^{n} T_i} \tag{10}$$

D'après le théorème de Borch, quand la richesse d'un groupe varie, la richesse finale de chaque agent doit varier proportionnellement à sa tolérance au risque relative à la tolérance au risque du groupe. En d'autres termes, les variations de la richesse totale doivent être partagées entre les agents en proportion de la tolérance au risque de chacun de ces agents.
L'intuition derrière ce résultat est la suivante. A l'optimum, l'utilité espérée marginale de chaque agent est identique. Donner une unité à un agent ou l'autre a donc le même effet sur l'utilité sociale. Par contre, donner une seconde unité à celui dont l'utilité marginale est le moins décroissante augmentera plus l'utilité sociale que si cette unité est donné à un autre agent. Or, l'agent le plus tolérant au risque est par définition celui dont l'utilité est moins concave, donc moins décroissante avec la richesse.

Rq : La condition (10) est indépendant des poids λ_i déterminant une allocation Pareto-efficace particulière. cela ne signifie pas pour autant qu'il existe une seule solution au problème. En effet, la condition (10) est une système de n équations différentielles dont les n conditions initiales peuvent être fixées arbitrairement. Il existe donc une infinité d'allocations réalisables satisfaisant (10).

Source : Eeckhoudt et al. (2005)

0.3.2 Deux cas d'études : la France et l'Australie

L'amélioration de la gestion de l'eau dans le secteur agricole appelle des solutions sur mesure. Les bassins hydrologiques sont très hétérogènes en termes de sources d'approvisionnement (eaux de surface, eaux souterraines...), de liens entre les problèmes de ressources (quantité) et de pollution (qualité), de répartition de l'eau entre usages, ou de dispositifs institutionnels et régimes de propriété régissant l'eau (Dinar et al. (1997), OECD (2010)). La thèse ne propose pas une réforme profonde des institutions de partage de l'eau en vue d'une gestion optimale du risque sécheresse. Au contraire, la thèse prend le parti de prendre les institutions comme données et s'intéresse à la modification à la marge de ces institutions. La prise en compte des mécanismes de partage de la ressource eau pré-existant permet de proposer des outils de partage de risque qui peuvent être implémentés à plus court terme et avec des coûts de mise en œuvre réduits.

Nous étudions deux contextes distincts : la gestion administrative de la ressource par autorisation de prélèvement en France et les marchés de l'eau australiens. La France n'est pas menacée d'aridité mais la répétition des évènements temporaires de sécheresse justifie que l'on se préoccupe de la capacité de l'agriculture française à s'adapter à une situation dont l'occurrence peut augmenter. L'Australie n'est pas non plus un pays aride. L'eau y est abondante mais avec de grandes disparités géographiques et temporelles. L'intérêt de l'exemple australien est que l'ampleur des sécheresses a conduit le pays à une réflexion précoce et de grande ampleur, notamment sur les instruments économiques d'allocation de l'eau en cas de pénurie. Des informations générales sur l'organisation de la gestion de l'eau dans ces deux pays sont données dans les chapitres 1 et 4.

Le travail réalisé dans cette thèse s'inscrit très directement dans les réflexions en cours en France et en Australie sur la réforme de la gestion de l'eau agricole. En France, la réforme des Organismes Uniques, initiée par la loi sur l'eau de 2006, prévoit notamment la redéfinition des règles de partage de l'eau entre irrigants en temps de pénurie et le transfert de la responsabilité de la définition de ces règles à des collectifs d'irrigants réunis en "Organisme Unique". En Australie, les réformes actuelles portent principalement sur l'eau réservée pour l'environnement mais elles ont un impact fort sur le degré de sécurité de l'approvisionnement en eau pour l'agriculture. Les États réfléchissent à la mise en place d'instruments de sophistication des marchés offrant aux agriculteurs qui le souhaitent des outils de gestion des risques. Les très sévères sécheresses récentes en 2009

en Australie et 2011 en France renforcent l'attention portée par les pouvoirs publics à la question de la gestion de l'eau agricole. La thèse permet de répondre à quelques uns des enjeux soulevés. Les réformes en cours et les enjeux actuels sont précisés dans les chapitres 1 pour la France et 4 pour l'Australie.

Remarque : Nous n'avons pas cherché à comparer l'efficacité des systèmes français et australien. Chaque territoire a ses propres contraintes et il n'est pas toujours possible ni souhaitable d'exporter des modèles de gestion d'un endroit à l'autre. Néanmoins, la connaissance fine des contraintes et enjeux sur un autre territoire apporte un recul intéressant. Une réflexion plus approfondie sur la comparabilité et les possibles apprentissages croisés entre la France et l'Australie est nécessaire mais dépasse largement le cadre de cette thèse.

0.3.3 La méthodologie expérimentale

Les deux méthodologies utilisées dans cette thèse sont la modélisation par la théorie des jeux et l'économie expérimentale. L'expérimentation en laboratoire est une méthodologie fondée sur la reconstitution in vitro d'une situation économique simplifiée dont les variables sont contrôlées par l'expérimentateur (Etchart-Vincent (2007)). L'objet d'une expérience de laboratoire est d'étudier le comportement économique des individus face à un stimulus particulier, nommé "traitement". Dans cette thèse, nous étudions à la fois des décisions individuelles (en situation de risque et d'incertitude notamment) et inter individuelles (en situation d'interaction par le marché ou par le partage d'une ressource commune) face à différents traitements capturant certains aspects des politiques de gestion de l'eau et du risque sécheresse en France et en Australie.

Cette thèse s'inscrit dans la lignée des quelques expériences réalisées comme outils d'aide à la conception de politiques de gestion de l'eau. L'expérience la plus connue est certainement celle menée en 2001 dans l'État de Virginie (USA) pour établir des procédures d'enchères pour le rachat par l'État de droits à irriguer (Cummings et al. (2004)). La conception de différents traitements a permis d'étudier comment les caractéristiques de l'enchère impactent le prix moyen payé au régulateur, le nombre de droits d'eau récupérés et l'efficacité de l'enchère. Cette expérience a été initialement conduite en laboratoire puis avec les irrigants de la zone concernée. Elle a contribué à prouver que l'économie expérimentale pouvait constituer un outil d'aide à la décision efficace. On peut citer quelques autres exemples (non exhaustifs). L'expérience de Murphy et al. (2000) com-

parent différentes institutions d'échange pour la mise en place de marchés "smart" pour allouer à la fois les allocations d'eau et l'accès aux infrastructures de transport d'eau. Ils montrent que le format de double enchère sous pli scellé et à prix uniforme est le plus efficace. Garrido (2007a,b) teste expérimentalement l'impact des restrictions aux échanges qui limitent la portée de la réforme de 1999 instaurant des marchés de l'eau en Espagne. Il montre que les restrictions aux échanges entre détenteurs de droits *juniors* et *seniors* et l'inexistence de droits sur les capacités de stockage (qui permettraient de transférer les allocation de l'eau dans le temps) réduisent l'efficacité de l'allocation de l'eau et augmentent la vulnérabilité des usagers en cas de sécheresse. Hansen et al. (2007) analysent l'effet de l'introduction d'options sur les marchés de l'eau. Duke and Gangadharan (2008) comparent différentes taxes pour la gestion de la salinité. Tous ces exemples montrent l'intérêt de l'économie expérimentale pour étudier les politiques et instruments économiques de gestion de l'eau.

Encadré 6 : Portée et Limites de l'expérimentation en économie (1/2)

Le grand avantage de la méthode expérimentale est qu'elle permet de collecter un grand nombre de données dûment contrôlées, rapidement et à relativement faible coût. Au contraire, la mise en place de nouvelles politiques ou institutions dans le monde réel prend du temps et peut avoir des effets irréversibles. Les expériences permettent de tester et comparer les institutions avant leur mise en place.

Par rapport aux enquêtes, l'intérêt de la méthodologie expérimentale est qu'elle permet d'observer les préférences des sujets ou leurs préférences révélées par leurs décisions (par opposition aux décisions hypothétiques ou préférences déclarées dans les enquêtes) car elle donne des incitations monétaires au sujet.

Le triptyque contrôle, traitement et réplicabilité définit bien les atouts des données expérimentales. Ces dernières ont l'avantage d'être adaptées à une question précise (mesure d'un effet de traitement) et de limiter les éléments jugés comme non directement importants pour analyser cette question (contrôle). L'utilisation d'un cadre neutre permet de répliquer les expériences dans des contextes variées (différents pays, types de sujets ...) et d'observer ainsi les éventuelles différences liées à l'environnement toutes choses égales par ailleurs.

Encadré 6 : Portée et Limites de l'expérimentation en économie (2/2)

L'économie expérimentale a de nombreux atouts mais n'est néanmoins pas exempte de problèmes méthodologiques concernant les données recueillies et leur validité (Bardsley et al. (2010), Denant-Boèmont (2008), Etchart-Vincent (2007)). Cette thèse s'intéressant à des questions empiriques, nous nous concentrons ici sur les limites portant sur la validité externe des résultats expérimentaux.

Parmi les critiques fréquentes, on trouve celle relative au caractère artificiel des protocoles expérimentaux : la singularité des sujets habituellement choisis (des étudiants) et le degré de stylisation des situations mises en scène limitent la validité externe des résultats.

La représentativité de l'échantillon des sujets qui participent aux expérience pose problème pour l'étude de questions ayant trait à un environnement spécifique. Le recours au expériences avec des sujets concernés en complément des expériences de laboratoire est une pratique à généraliser (et qui fait partie de mon futur agenda de recherche). La classification de Harrison and List (2004) fournit une grille d'analyse intéressante pour savoir quel type d'expérience utiliser en fonction des objectifs de la recherche.

La décontextualisation des instructions, qui permet d'éviter une interprétation subjective des termes par les sujets, est un point méthodologique débattu. La thèse de doctorat de Désolé (2011) montre par exemple que le contexte décrit dans les instructions a un impact sur les décisions.

Les incitations financières, souvent faibles mais théoriquement alignées avec les coûts d'opportunité du temps des sujets, sont bien en deçà des stimuli présents dans la vie économique.

Les possibilités d'apprentissage en laboratoire sont réduites : la répétition des décisions sur une période courte (20 périodes sur 2 heures par exemple) n'est en rien semblable avec les décisions répétées qui peuvent être observées dans la vie réelle (faire un choix tous les deux ans pendant toute sa vie par exemple).

L'utilisation de la méthodologie expérimentale dans cette thèse peut être motivée à l'aide du triptyque énoncé par Roth (1988). La thèse utilise principalement l'économie expérimentale comme outil d'aide à la décision (*Whispering in the Ears of Princes*). Les situations étudiées en économie de l'environnement sont la plupart du temps caractérisées par des défaillances de marché ou l'absence de marché. Dans ces conditions, la conception d'institutions est une tâche complexe pour laquelle la possibilité de réaliser des tests en laboratoire avant implémentation revêt une dimension importante (Plott (1979), Ehmke and Shogren (2008)). Les expériences permettent d'évaluer l'effet d'un changement d'institution ou de politique publique dans le cadre d'un environnement contrôlé. Par ailleurs, l'économie expérimentale est un outil important de réfutation des modèles théoriques existants (*Speaking to Theorists*). C'est aussi une dimension présente dans cette thèse. La théorie des jeux est utilisée pour modéliser des situations dans lesquelles les agents doivent se partager une ressource rare et interagissent dans le cadre de l'exploitation d'une ressource en bien commun ou sur un marché. Les observations expérimentales permettent de tester les prédictions théoriques et de mettre en évidence des régularités comportementales non prédites par les modèles dans de tels environnements.[7] Enfin, l'économie expérimentale permet également d'explorer des situations peu ou mal théorisées (*Searching for Facts*). Dans ce cas, les expériences ont pour objectif d'isoler les causes des régularités non prédites par les modèles et d'en proposer une formalisation nouvelle. Cette dimension est aussi présente dans la thèse (dans une moindre mesure) par le biais des réflexions sur l'aversion au risque. Nous ne disposons pas toujours de prédictions non ambigües sur l'effet de l'aversion au risque sur les décisions des sujets. Les expériences nous permettent de nous faire une idée grâce à l'élicitation de l'aversion au risque et la prise en compte de cette donnée pour expliquer les comportements.

Les situations de gestion de l'eau étudiées étant beaucoup plus complexes en réalité que leur reproduction en laboratoire, quelle est la pertinence des données d'expériences ? Quels sont les apports de l'économie expérimentale pour répondre à des questions de terrain ? Si les critiques énoncées dans l'*Encadré 6* doivent être entendues, elles ne remettent néanmoins pas en cause la pertinence du recours aux expériences de laboratoire

7. Les déviations par rapport aux prédictions théoriques sont normales étant donné que la théorie ne prend en compte qu'une partie des éléments. La théorie peut donc très facilement échouer en présence d'autres éléments ou mécanismes (Rubinstein (2001)). Les expériences peuvent simplement contribuer à déterminer si ces déviations sont suffisamment larges et fréquentes pour remettre en cause l'utilité d'une théorie (Bardsley et al. (2010)).

en complément des autres outils à la disposition de l'économiste. Toute méthodologie a ses imperfections et c'est le recours à des méthodologies diverses et complémentaires qui permet d'améliorer le pouvoir descriptif et prédictif de la science économique. [8] Une autre justification du recours aux données expérimentales est l'absence de données empiriques permettant de répondre aux questions posées. Par exemple, il est difficile de trouver en France des périmètres irrigués comparables mais qui auraient des règles de partage de l'eau différentes. L'étude économétrique de l'impact des règles de partage nécessiterait donc le recours à des variables de contrôle pas toujours disponibles en raison de la lourdeur des enquêtes de terrain nécessaires à la collecte de ces données. De même, les marchés de l'eau australiens ne sont pas suffisamment matures pour avoir un nombre de données suffisant (notamment sur le marché des droits à basse sécurité). De plus, une partie de la thèse repose sur l'analyse de l'impact de l'aversion au risque. Or, cette donnée n'est pas directement observable alors qu'elle peut être élicitée par des méthodes expérimentales. Des expériences de laboratoire sont utilisées dans les chapitres 3 et 5 de la thèse. L'ensemble des contributions est présenté dans le plan ci-après.

0.3.4 Plan

La thèse est structurée en deux parties. La première partie est inspirée par le contexte français et la seconde par le contexte australien. Elle est composée de 3 articles (chapitres 2,3 et 5 en anglais) et d'éléments de cadrage (chapitres 1 et 4 en français).

8. Une réponse possible est celle donnée par Noussair et al. (1995) dans un article qui étudie les gains à l'échange internationaux à l'aide de l'économie expérimentale. En introduction, ils précisent : "l'objectif des expériences en laboratoire n'est pas de simuler une situation réelle. Les expériences s'intéressent aux modèles théoriques et principes qui sont supposés s'appliquer à tous types d'économies. Les économies créées en laboratoire sont très simples et ne représentent que des cas spéciaux parmi l'ensemble des économies possibles, pour lesquelles les théories économiques sont censées être pertinentes. Si une théorie, censée être générale, n'explique pas les comportements dans le cadre simple du laboratoire, alors elle n'est pas générale et ne s'appliquera peut être pas non plus sur le terrain. Le laboratoire fournit donc un espace où peuvent être testées différents notions et théories sur les comportements humains individuels ou collectifs à travers les marchés. Toute expérience en laboratoire ne doit être considérée que comme une des nombreuses étapes pour comprendre et analyser le problème étudié".

Le chapitre 1 donne des éléments de cadrage sur la gestion de l'eau agricole en France. Les chapitres 2 et 3 étudient les interactions entre les règles utilisées pour le rationnement de l'eau d'irrigation en cas de sécheresse en France et les stratégies d'auto-assurance des agriculteurs. Nous étudions notamment le cas du stockage d'eau au niveau de l'exploitation, outil de gestion du risque de plus en plus mobilisé par les agriculteurs français. Le chapitre 2 modélise une situation où des agents ont la possibilité de substituer l'usage d'une ressource coûteuse mais sécurisée à l'usage de la ressource commune risquée. Nous déterminons la règle de partage optimale sous deux hypothèses distinctes concernant le régulateur : i) le planificateur définit simultanément la règle de partage et les choix de diversifications de façon à maximiser le bien être social ; ii) le décideur utilise la règle de partage comme un instrument incitant les usagers à faire des choix de diversification optimaux d'un point de vue social. Le chapitre 3 est une expérience de laboratoire visant à comparer différentes règles de partage d'une ressource commune de taille incertaine quand les sujets peuvent choisir entre l'utilisation de cette ressource commune ou l'investissement dans une ressource sécurisée. Les règles sont évaluées sur leur aptitude à faciliter la coordination des agents autour du niveau optimal d'investissement dans la ressource sécurisée. La discussion des résultats de ces deux articles permet de proposer des recommandations aux futurs Organismes Uniques (nouvelles institutions issues de la réforme de 2008 et en cours de création en France) qui seront en charge de la mise en place des règles de partage de la ressource en cas de sécheresse.

La seconde partie propose une analyse des marchés de l'eau et de leurs impacts sur le risque subi par les agriculteurs participants à ces marchés. Le chapitre 4 présente le fonctionnement des marchés de l'eau et le système de gestion des sécheresses en Australie. Le chapitre 5 étudie les gains de la mise en place de droits d'eau avec différents niveaux de sécurité, à l'aide d'une expérience de laboratoire capturant l'essence des marchés de l'eau australiens. La comparaison de traitements avec un unique niveau de sécurité pour les droits d'eau et de traitements avec deux niveaux de sécurité nous permet d'éclairer le débat sur les gains attendus d'une sophistication des marchés, notamment en terme de gestion du risque de manque d'eau par les agriculteurs.

Cette seconde partie est le fruit d'un séjour de 5 mois en Australie en 2010, pendant lequel j'ai été accueillie à mi-temps dans le département *Policy and Research* du *Department of Primary Industries* de l'État de Victoria, dirigé par Deborah Peterson, et à mi-temps par Lata Gangadharan dans la faculté *Business and Economics* de l'université de Monash à Melbourne.

Encadré 7 : Apports et Limites de la thèse

Ce que cette thèse propose

- Quelques pistes pour l'amélioration des dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation en vue d'une meilleure gestion du risque sécheresse en agriculture, notamment dans le contexte français et australien.
- Une analyse de l'impact des dispositifs d'allocation de l'eau sur le risque de sécheresse subit par les agriculteurs irrigants et sur leurs stratégies face à ce risque. Nous étudions deux stratégies de gestion du risque à l'échelle de l'exploitation : l'investissement dans une ressource en eau sécurisée dans le cadre français (chapitres 2 et 3) et la constitution d'un porte-feuille de droits d'eau avec différents niveaux de sécurité dans le contexte australien (chapitre 5).
- Une analyse théorique complétée par une vérification expérimentale en laboratoire.
- Des informations sur les enjeux actuels liés à la gestion de l'eau agricole en France (avec la réforme des Organismes Uniques) et en Australie (Murray Darling Basin Plan)

Ce que vous ne trouverez pas dans cette thèse

- Une proposition de réforme profonde des institutions de partage de l'eau pour une allocation optimale du risque sécheresse. Au contraire, la thèse prend le parti de prendre les institutions comme données (allocation administrative en France et marché en Australie) et s'intéresse à la modification à la marge de ces institutions.
- La prise en compte des usages non-agricoles de l'eau
- Le problème du partage de l'eau dans les endroits où le manque d'eau est permanent et ne constitue donc pas un risque stricto-sensu.
- Une revue exhaustive des instruments de gestion du risque sécheresse. Les stratégies au niveau de l'exploitation et la gestion posteriori (assurance sécheresse, fonds étatiques d'indemnisation) ne sont que brièvement décrites dans l'introduction.
- Un test des instruments sur un échantillon d'agriculteurs (*field experiment*)
- ...

Première Partie : Gestion administrative des autorisations de prélèvement en eau en France

Chapitre 1

La gestion de l'eau agricole en France

La sécheresse de cette année 2011 révèle l'existence de conflits d'usages de l'eau de plus en plus fréquents et répandus sur le territoire français. Avec des précipitations annuelles moyennes de 867 mm, la ressource en eau est pourtant en moyenne abondante en France métropolitaine. Il existe néanmoins des fortes disparités spatiales et temporelles (500 mm dans les Bouches-du-Rhône et plus de 1300 mm dans les Pyrénées Atlantiques par exemple). Dans certains endroits, il y a un déséquilibre fort entre les besoins des usagers et les ressources en eau disponibles. Chaque année, des arrêtés de limitation ou de restriction des usages de l'eau sont pris par les préfets. L'agriculture est à la fois victime et en partie responsable des épisodes de sécheresse. Comme l'attestent ces titres d'articles de presse, l'irrigation fait aujourd'hui en France l'objet d'une controverse sociétale majeure.

> "*Sécheresse : l'irrigation intensive mise en cause*", Le Monde (9 août 2005),
> "*La sécheresse alimente le débat sur l'irrigation*", Le Journal de l'Environnement (4 août 2006)
> "*Pendant la sécheresse l'irrigation continue* ?", Blog de Delphine Batho député des Deux-Sèvres (11 mai 2011).
> "*Irrigation et sécheresse : le loup dans la bergerie ?*", La Nouvelle République (25 mai 2011)

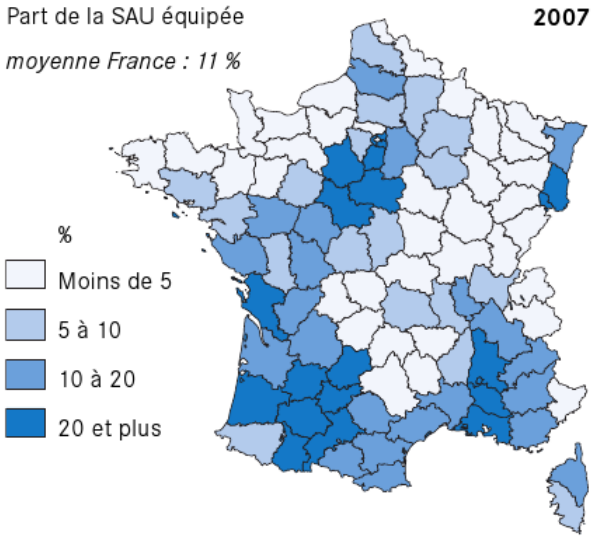
Le développement rapide et peu contrôlé de l'irrigation a entraîné un déséquilibre croissant et récurrent entre ressources et besoins. L'accès à l'eau a été historiquement favorisé en France pour des raisons de compétitivité agricole et de développement rural. La politique agricole commune a contribué au développement de l'irrigation des grandes cultures en subventionnant les équipements, en maintenant jusqu'en 1992 une politique de prix garantis élevés des céréales, puis en mettant en place, lors de la réforme de 1992, une aide différenciée et majorée pour les cultures irriguées qui a ainsi maintenu l'avantage des cultures irriguées par rapport aux cultures en sec.[1]La conjonction d'épisodes climatiques particulièrement secs de 1989 à 1991 a aussi renforcé le recours à l'irrigation dans les années 90.

1. Lors de la réforme de la PAC en 1992, les prix garantis ont été progressivement réduits et les producteurs de céréales, oléoagineux et protéganieux ont été compensés par des primes directes indexées non pas sur leur rendement individuel mais sur le rendement départemental moyen. Les irrigants ont négocié une surprime irrigation de 150 € par ha par an par rapport aux cultures sèches car leurs rendements (et coûts) étaient supérieurs aux moyennes départementales. La réforme à mi-parcours de 2003 a intégré les primes à l'irrigation dans le calcul du montant des paiements découplés de type droit à paiement unique. Le découplage des subventions directes agricoles en France favorise ainsi les exploitants agricoles irrigant « historiquement » (ceux irrigant durant la période de référence 2000-2002) (Boulanger (2007)).

Les prélèvements pour l'irrigation sont évalués en France à 4,8 milliards de m^3 par an, soit 14% des prélèvements totaux mais l'agriculture est l'usage le plus consommateur d'eau (la consommation nette est estimée à 48% des prélèvements) (estimation IFEN 2004 à partir des relevés de compteur et des taux d'équipement en compteur). De plus, les besoins pour l'irrigation étant concentrés en été, la part agricole des prélèvements peut atteindre 80-90% en période d'étiage (IFEN 2003).

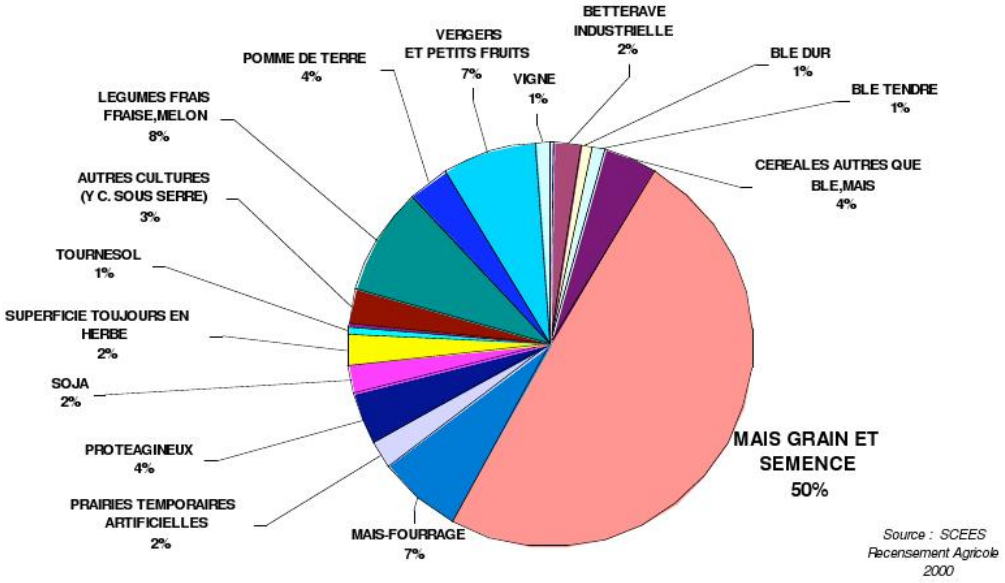
Les surfaces équipées avec des systèmes d'irrigation, en progression jusqu'en 2005, ont commencé à baisser dans les cinq dernières années. Les surfaces irriguées atteignent 1414 milliers d'hectares en 2007 (11 % de la surface agricole utilisée), en baisse de 11 % depuis 2005. En 2007, près d'un quart des exploitations professionnelles était équipé pour l'irrigation, soit une baisse de 6 % depuis 2005. Historiquement présente dans le Sud-Est de la France et dans une moindre mesure dans le Sud-Ouest, l'irrigation s'est aussi substantiellement étendue vers le Nord et l'Ouest du pays (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charente, Pays de la Loire et Centre) qui regroupe plus de la moitié de la sole irriguée (*Figure 1.1*). L'irrigation est pour moitié celle des maïs grain et semence (*Figure 1.2*). Il faut aussi noter que ces dernières années l'irrigation s'étend de plus en plus à des cultures qui ne nécessitent pas d'être irriguées chaque année. Il peut s'agir dans le grand bassin Parisien de cultures industrielles (betterave industrielle, pomme de terre de conservation) ou de légumes pour lesquels l'exigence de régularité dans le rendement et la qualité amène les agriculteurs à s'équiper.

FIGURE 1.1 – Surface équipées pour l'irrigation en 2007 en France



Source : Agreste, Enquête Structure 2007

FIGURE 1.2 – Répartition des cultures irriguées en surface en 2000



Source : SCEES Recensement Agricole 2000, publié dans Amigues et al. (2006)

La gestion durable de l'irrigation présente plusieurs enjeux majeurs. C'est d'abord un enjeu environnemental : la récurrence des évènements de sécheresse est susceptible d'entraîner des atteintes graves au milieu naturel. La non atteinte du "bon état écologique des eaux" d'ici 2015 (Directive Cadre européenne sur l'Eau 2000, transposée en droit français en 2004) expose à moyen terme la France à de coûteux contentieux. Des étiages trop bas menacent la qualité physico-chimique et biologique des eaux. C'est aussi un enjeu social : les tensions entre usagers et citoyens sont fortes, notamment entre agriculteurs et associations de protection de la nature. L'agriculture entre aussi en concurrence pour l'eau avec la production d'électricité (hydroélectricité et refroidissement des centrales) et les usages de l'eau potable, quand les ménages ont l'interdiction de remplir leur piscine ou de laver leur voiture. Enfin, les enjeux économiques sont élevés : les pertes de récoltes sont préjudiciables au secteur agricole mais aussi à la société dans son ensemble quand les prix des produits agricoles augmentent et si l'indemnisation des agriculteurs suite à une sécheresse est financée par l'impôt (comme ce fût le cas en 1976 en France avec la levée de "l'impôt sécheresse" et comme cela fut évoqué au début de l'été 2011).

Nous décrivons dans la suite la gestion de l'eau agricole en France en analysant plus spécifiquement la planification de l'utilisation de la ressource a priori de façon à diminuer la fréquence des évènements de manque d'eau (1.1) et les modalités de résolution des crises quand la ressource est insuffisante pour couvrir les demandes en eau (1.2). Améliorer la gestion du risque sécheresse nécessite la prise en compte des interactions entre ces deux niveaux d'intervention.

Encadré 8 : La gouvernance de l'eau en France (1/3)

La politique française de l'eau et l'organisation des acteurs au niveau national découlent en grande partie de la Directive Cadre sur l'Eau et la protection des milieux aquatiques de 2000 qui définit un cadre général européen pour la gestion équilibrée, planifiée et concertée de la ressource en eau. L'enchevêtrement des compétences de multiples acteurs est aussi le produit d'une évolution historique et d'objectifs des politiques publiques changeants au cours du temps (Amigues et al. (2006)).

La gestion par bassins

Depuis la loi sur l'eau de 1964, les « instances de bassin » (agences de l'eau et les comités de bassin) sont en charge de la gestion de la ressource en eau à l'échelle des bassins hydrographiques métropolitains. La France se compose de 7 bassins hydrographiques en métropole et 5 en Outre-mer. Les bassins Corse et Rhône-Méditerranée sont gérés par la même agence de l'eau.

Les **comités de bassin** sont des instances de concertation et de décision qui regroupent différents acteurs : un tiers de représentants des collectivités, un tiers de représentants de l'État, et un tiers de représentants des usagers (chambres consulaires, associations etc.), ainsi que le préfet coordonnateur de bassin (préfets des régions dans lesquelles les comités de bassin ont leur siège). Ils ont pour mission principale d'élaborer le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (défini page suivante), de donner un avis sur les grands aménagements et les politiques d'intervention de l'agence de l'eau.

Les **agences de l'eau** sont des établissements publics administratifs dotés d'autonomie financière sous la tutelle du Ministère de l'Ecologie. Elles ont pour mission de mettre en œuvre la gestion intégrée de la ressource au niveau d'un bassin hydrographique. Pour cela, elles perçoivent des redevances pour prélèvements et pollutions auprès des utilisateurs de l'eau, et financent des actions incitatives pour une meilleure protection de l'eau dans le bassin : aides financières, conseils aux collectivités locales et agents économiques pour lutter contre la pollution, améliorer la ressource (ouvrages de stockage, économie d'eau), restaurer et mettre en valeur les milieux aquatiques...

Encadré 8 : La gouvernance de l'eau en France (2/3)

La gestion par la planification

Le **Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE)**, mis en place par la loi sur l'eau de 1992, est un outil de programmation pluriannuelle qui définit les objectifs et les priorités d'action à l'échelle des bassins hydrographiques. Chaque SDAGE doit définir les orientations permettant de satisfaire les grands principes d'une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau. [a] Il doit aussi fixer les objectifs de qualité et de quantité à atteindre pour chaque masse d'eau du bassin. Enfin, il détermine les aménagements et les dispositions nécessaires pour prévenir la détérioration et assurer la protection et l'amélioration de l'état des eaux et des milieux aquatiques, afin de réaliser les objectifs fixés. Le SDAGE est complété par un programme de mesure qui prévoit les actions à réaliser pour atteindre les objectifs fixés. Le préfet coordonnateur de bassin doit veiller à la conformité des objectifs et de la démarche du SDAGE avec la DCE.

Le SDAGE est complété, sur initiative locale, par les SAGE et contrats de milieu.

Le **Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE)** est la déclinaison à l'échelle locale des SDAGE. Ayant un cadre plus restreint, il s'articule autour de thématiques spécifiques, répondant aux problématiques rencontrées sur le secteur considéré. Ce document est élaboré par les acteurs locaux (élus, usagers, associations, représentants de l'État...) réunis au sein de la commission locale de l'eau (CLE). Ces acteurs locaux établissent un projet qui fixe des objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur, de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau au niveau d'un bassin versant. Il doit être compatible avec le SDAGE du bassin hydrographique auquel appartient le bassin versant.

Un **contrat de milieu** (généralement contrat de rivière, mais également de lac, de baie ou de nappe) est un accord technique et financier entre partenaires concernés pour une gestion globale, concertée et durable à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente. Avec le SAGE, le contrat de milieu est un outil pertinent pour la mise en œuvre des SDAGE pour prendre en compte les objectifs et dispositions de la DCE. Il peut être une déclinaison opérationnelle d'un SAGE. C'est un programme d'actions volontaire et concerté sur 5 ans avec engagement financier contractuel (désignation des maîtres d'ouvrage, du mode de financement, des échéances des travaux, etc).

a. Les SDAGE correspondent aujourd'hui aux "Plan de Gestion" inscrits dans la DCE, qui fixent les orientations qui permettent d'atteindre les objectifs en matière de "bon état des eaux".

Encadré 8 : La gouvernance de l'eau en France (3/3)

Le rôle des services déconcentrés de l'État

Au niveau national, la direction de l'eau et de la biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (**MEDDTL**) définit et organise les interventions dans le domaine de l'eau en liaison avec d'autres ministères compétents (agriculture, santé, industrie ...). Le MEDDTL s'appuie sur l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (**ONEMA**), organisme national responsable de la connaissance et de la surveillance de l'état des eaux et milieux aquatiques.

Les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (**DREAL**) sont le pilote au niveau régional des politiques de développement durable du MEDDTL. Elles s'occupent plus particulièrement du suivi des SAGE, des suivis qualités des masses d'eau (en lien avec l'ONEMA) et président en général les MISE.

Les directions départementales du territoire (**DDT**) qui regroupent les anciennes Directions départementales de l'équipement (DDE) et de l'agriculture (DDA) assurent en général la police de l'eau. Dans le cas de l'irrigation, cela consiste à instruire les déclarations et les demandes d'autorisation des prélèvements et de contrôler le respect de ces autorisations.

Le **Préfet** anime et coordonne la politique de l'eau au niveau départemental. C'est à lui qu'il revient d'accorder des autorisations de prélèvement au titre de la police de l'eau et il peut prendre des mesures de restriction pour limiter les usages de l'eau en cas de sécheresse.

La **mission inter-services de l'eau (MISE)** assure une mission d'information sur la règlementation et la politique de l'eau. Elle coordonne les différents services de l'État dans leur relation à l'usage de l'eau et coordonne les polices de l'eau.

Les particularités de la gestion de l'eau au niveau des périmètres irrigués

Les **Sociétés d'Aménagement Régional (SAR)** sont des établissements d'économie mixte qui gèrent des équipements régionaux comme des barrages, des stations de pompage, des réseaux de distribution collective dans les périmètres d'irrigation... Les principales SAR sont la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG), la Compagnie Bas-Rhône Languedoc (BRL) et la société des canaux de Provence (SCP). Les SAR, en faisant signer aux préleveurs-irrigants des contrats d'approvisionnement, sont au premier plan pour la gestion volumétrique de la ressource dans le Sud de la France.

Les **associations syndicales autorisées (ASA**) regroupent les agriculteurs d'un même périmètre pour le développement et la gestion collective de l'irrigation de leurs terres, ainsi que pour des opérations de drainage. Ces structures reposent sur la participation de tous les membres, tant pour le choix des investissements collectifs que la gestion courante du service d'irrigation. Les ASA ont une personnalité juridique qui leur permet de représenter les irrigants dans les instances de consultation et de décision locales ou régionales. Les ASA peuvent gérer elles-mêmes leurs réseaux d'irrigation ou déléguer ce service à un opérateur.

Source : http ://www.eaufrance.fr et Office International de l'Eau (2009)

1.1 Gestion quantitative a priori

En France, l'eau est reconnu comme "un patrimoine commun de la Nation" géré par l'État (loi sur l'eau 1992) : cela signifie qu'elle doit être gérée de manière à respecter les générations futures, à concilier les usages et en respectant son unicité (en évitant donc de gérer de façon séparée et compartimentée l'eau souterraine et l'eau de surface par exemple). A l'heure actuelle, la gestion de l'eau d'irrigation passe essentiellement par la gestion de la demande. L'allocation de la ressource pour l'agriculture se fait par l'attribution d'autorisations de prélèvement assimilables à des quotas. Des outils tarifaires sont aussi marginalement utilisés. Cependant, dans les régions où les tensions sont les plus grandes, la gestion de la ressource passe encore aussi par l'augmentation de l'offre. Si l'époque des investissements dans les grands ouvrages hydrauliques est révolue en raison des impacts environnementaux et de l'épuisement des possibilités d'équipement, le recours à des ouvrages de plus petite taille au niveau des exploitations (retenues collinaires, etc.) continue.

1.1.1 Une gestion par les droits de prélèvements

Un prélèvement d'eau peut être soumis à déclaration ou autorisation en fonction de ses caractéristiques et de sa situation par rapport à la Zone de Répartition des Eaux (ZRE, zone sensible où est constatée une insuffisance, autre qu'exceptionnelle des ressources par rapport aux besoins) (Lafitte and Nicolazo (2006)).[2] Les autorisations de prélèvement sont distribuées annuellement par la MISE pour un débit et un usage donné. Cette gestion volumétrique est issue d'accords qui ont été négociés dans les années 90 entre l'administration et la profession agricole afin de garantir des conditions d'accès à la ressource (volumes, périodes, tours d'eau) pour les irrigants, qui ont accepté en retour que leurs prélèvements puissent être contrôlés par la pose de compteurs.

Les agriculteurs recourant à l'irrigation individuelle (forages et pompages en rivière, retenues collinaires) doivent faire leur demande d'autorisation de prélèvement en octobre de chaque année auprès de la MISE. Alternativement, les agriculteurs peuvent être raccordés à une réseau collectif par le biais d'une Association Syndicale Autorisée (22% des surfaces RGA(2000)) ou d'une Société d'Aménagement Régional (18%

2. Le champ des prélèvements d'eau soumis à autorisation ou à déclaration est défini par le décret du 11 septembre 2003. En ZRE, tout prélèvement excédant 8 m^3/h est soumis à autorisation.

des surfaces). L'adhésion à une association syndicale d'irrigants ou la souscription d'un contrat auprès d'un réseau d'irrigation collectif donne le droit d'utiliser le réseau pour un certain "quota". C'est la structure collective qui se charge de demander les autorisations de prélèvement correspondant aux quotas alloués. Divers types de quotas existent et peuvent être combinés. Un quota volume définit le volume alloué par unité de surface ou par préleveur autorisé pour une période donnée. Le quota débit définit pour chaque usager soit un débit nominal, soit une fraction du débit global disponible. En l'absence de compteur volumétrique, la définition de tours d'eau correspond à un quota-temps. Les deux combinaisons les plus usitées sont les quotas débit-volume qui garantissent un bon ajustement de la somme des allocations individuelles globales et instantanées de la ressource, et les quotas débit-temps qui exemptent totalement de comptage volumétrique. Le contrat précise également l'époque de l'année où le réseau est utilisable et si les prélèvements sont possibles de façon continue ou intermittente.

Les MISE sont en charge d'ajuster le volume des autorisations de prélèvement de façon à ne pas mettre en péril le bon état quantitatif de la ressource. L'article R 212-12 du code de l'environnement précise que "l'état quantitatif d'une eau souterraine est considéré comme bon lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible, compte tenu de la nécessaire alimentation en eau des écosystèmes aquatiques de surface et des zones humides directement dépendantes en application du principe de gestion équilibrée énoncé à l'article L 211-11 du code de l'environnement". Pour les eaux de surface, la gestion quantitative est dite équilibrée lorsque, statistiquement, huit années sur dix en moyenne, les volumes et débits maximums autorisés ou déclarés dans cette ressource peuvent en totalité lui être prélevés tout en garantissant le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants. Les SDAGE et SAGE définissent les volumes et débits minima permettant le bon fonctionnement des milieux (voir *Encadré 8*).

Ce mode de gestion par les quotas est un mécanisme autoritaire qui contrôle directement la consommation des irrigants. En reconnaissant un droit à l'eau aux agriculteurs, ce système jouit d'une forte acceptabilité sociale. Néanmoins, ce système n'offre pas de solution satisfaisante au problème de la file d'attente pour l'attribution de droits à ceux qui souhaiteraient créer de nouvelles surfaces irriguées. De plus, en règle générale, les quotas ne permettent pas de répondre à l'objectif d'efficience : un agriculteur peut utiliser la totalité de son quota pour une production à faible valeur ajoutée tandis qu'un autre agriculteur peut être contraint à ne pas dépasser son quota alors qu'il créerait plus

de valeur que le premier. Cette gestion centralisée des allocations requiert de la part du gestionnaire une bonne information concernant les usagers et les infrastructures de prélèvement, de transport et de distribution. De plus, la gestion par les autorisations de prélèvement ne permet pas de gérer les solutions de crise quand les volumes disponibles ne sont pas suffisants pour satisfaire les demandes. En principe, les autorisations ne sont octroyées et renouvelées que dans la mesure où les ressources sont suffisantes pour satisfaire l'ensemble des besoins, y compris ceux du milieu naturel. Dans la pratique, les autorisations de prélèvement qui ont été accordées au fil des ans dépassent les volumes et débits maximums autorisés.

1.1.2 La quasi-absence d'instruments tarifaires

L'application de l'analyse économique pour la gestion efficace de la ressource en eau plaide pour le recours aux outils tarifaires. La Directive Cadre sur l'Eau (2000) requiert la prise en compte d'exigences économiques et financières, notamment dans son article 9, où il est spécifié que d'ici 2012, les États membres doivent veiller à ce que : i) la politique de tarification incite les usagers à une utilisation plus efficace de la ressource ; ii) les différents secteurs économiques participent à la récupération appropriée des coûts des services liés à l'utilisation de l'eau, y compris les coûts pour l'environnement et la ressource. Néanmoins, la gestion française ne repose que marginalement sur des instruments économiques.

L'eau peut être considérée comme "gratuite" car la ressource n'est pas facturée par l'État, à l'exception de la redevance. Les irrigants sont soumis, comme tous les autres usagers de l'eau, à la "redevance prélèvement sur la ressource en eau" des Agences de l'Eau, en proportion de leurs prélèvements. Le montant de la redevance est modulé en fonction des zones (zones sensibles dites ZRE ou non) et de la technique d'irrigation (l'irrigation gravitaire retournant 80% des prélèvements dans le milieu, la taxe est minorée) (*Tableau 1.1*). Les sommes collectées servent à financer la restauration des milieux naturels et l'amélioration de la qualité de l'eau. La redevance n'est pas une tarification incitative et est généralement considérée comme insuffisante pour modifier de façon significative les quantités d'eau utilisées par les agriculteurs (Levy et al. (2005)). A titre d'illustration, le montant de la redevance par m^3 est deux à trois fois plus faible pour les irrigants que pour l'alimentation en eau potable.

TABLE 1.1 – Taxes sur l'eau d'irrigation perçues par les Agences de l'eau

	ZRE		hors ZRE	
(centimes d'Euros/m3)	non gravitaire	gravitaire	non gravitaire	gravitaire
Taux plafonds LEMA (2006)	3	0.15	2	0.1
Taux observés (2010)				
Adour-Garonne	0.8	0.15	0.6	0.1
Artois Picardie	2.9	0.145	1.076	0.054
Loire Bretagne	1.44	0.072	0.96	0.048
Rhin Meuse	3		0.214	
Rhône Méditérannée Corse	0.56	0.075	0.3	0.04
Seine Normandie	1.817	0.091	1.58	0.079

Source : sites web des Agences de l'eau

Le vrai coût de l'eau est lié aux frais de pompage, forage, stockage, et acheminement pour avoir accès à l'eau. Les irrigants individuels payent ces coûts directement sur leur facture d'électricité ou de fuel et par leurs achats de matériel d'irrigation (pompes etc.). Les irrigants appartenant à un périmètre collectif (SAR ou ASA) sont soumis à une tarification pour couvrir les dépenses d'investissement, maintenance et fonctionnement du réseau collectif. Deux principaux systèmes de tarification co-existent : tarification forfaitaire (pour la surface ou le débit souscrit) et tarification binôme fonction du débit ou de la surface souscrite et du volume effectivement consommé. Dans ce cas, les agriculteurs ont le droit à un certain quota mais peuvent payer un prix majoré au litre pour avoir accès à une quantité supérieure au quota.

La mise en place d'outils tarifaires efficaces est contrainte par la difficile mesure exacte des consommations. Les compteurs sont obligatoires depuis la loi sur l'eau de 1992 et font partie de la conditionnalité des aides PAC depuis 2003. Le taux d'équipement en compteur a fortement progressé mais toutes les exploitations ne sont pas encore équipées : 71% des exploitations correspondant à 85% des surfaces irriguées étaient équipées en 2003. Néanmoins, il faut modérer ce chiffre optimiste car il existe de nombreux forages non déclarés et donc non équipés en compteur qui n'apparaissent pas dans les statistiques.

Selon la théorie économique, un tarif efficace devrait refléter la rareté de la ressource et donc évoluer dans le temps et être différencié dans l'espace, ce qui est difficilement réalisable en pratique. Si les tarifs sont modifiés périodiquement (en fonction du remplissage

des nappes par exemple en fin d'hiver), les règles tarifaires doivent être établies suffisamment tôt avant la campagne pour que les irrigants puissent les prendre en compte dans leurs choix d'assolement. L'adaptation des instruments tarifaires à l'échelle locale se heurte aux questions d'équité entre les agriculteurs et de distorsions de compétitivité entre les exploitants de différentes régions.

La gestion par quota et par tarification vise à réduire la demande en eau. Une autre façon de rééquilibrer l'équation offre et demande est d'augmenter les ressources disponibles. Si la pertinence de cette approche est largement remise en cause, elle a néanmoins resurgi en France face à l'augmentation de la fréquence des sécheresses et au réchauffement climatique, qui rendent nécessaire l'irrigation et donc le recours à de nouvelles sources d'approvisionnement en eau.

1.1.3 Rétablir l'équilibre par la création de nouvelles ressources

Stocker l'eau dans les périodes où elle est abondante pour pouvoir l'utiliser pendant les étiages constitue une réponse apparemment simple aux problèmes de pénurie. Ces stockages peuvent prendre la forme de barrages réservoirs (opérations collectives à objectifs généralement multiples) ou d'opérations plus modestes, collectives ou individuelles, à but essentiellement agricole (retenues). Si l'époque des investissements dans des grands barrages-réservoirs est révolue, les retenues collectives ou individuelles destinées uniquement à l'irrigation ont connu un essor certain ces dix dernières années. Dans le Plan de Gestion de la Ressource en Eau du 26 octobre 2005, "il est demandé aux agences de l'eau de mener une politique volontariste sur la création de retenues de substitution. Il s'agit d'une orientation nationale qui doit être déclinée par toutes les agences, à un niveau correspondant à leur situation. Celles-ci devront augmenter significativement leur effort dans ce sens". Cette tendance a été confirmée dans le Plan Sécheresse 2011 (*Encadré 4*).

En Adour Garonne par exemple, on compte 300 millions de m^3 cumulés dans environ 15 000 retenues collinaires ou retenues de substitution (Agence de l'Eau Adour-Garonne (2009)). Les retenues collinaires sont des réservoirs, le plus souvent individuels, creusés directement à proximité du lit des cours d'eau, alimentés naturellement et en permanence. Les réserves de substitution sont des réservoirs étanches, partagés par un petit collectif d'irrigants, alimentés par pompage dans les cours d'eau ou dans les nappes en dehors des périodes d'étiage, avec suppression des mêmes prélèvements durant l'étiage.

Le volume des réserves de substitution est en moyenne supérieur à celui des retenues collinaires. Ces réserves sont appelées "bassines" en Charente.

La construction d'ouvrages de retenue dans les zones déficitaires permet de réduire les pressions exercées sur la ressource, sous la condition que ces réserves soient déconnectées du milieu naturel en période d'étiage. Les réserves permettent aussi de sécuriser l'accès à l'eau pour les agriculteurs. Le volume d'eau est connu par avance car la réserve est généralement remplie avant la période d'irrigation. De plus, ces ressources de substitution ne sont pas concernées par les restrictions d'eau qui peuvent être imposées par arrêté préfectoral en cas de sécheresse. L'approvisionnement par une réserve de substitution constitue donc une auto-assurance (ou auto-protection) pour les agriculteurs, qui voient ainsi réduite la probabilité de manquer d'eau pour leurs cultures.

Le financement de ces ouvrages est assuré à hauteur maximale de 70% par des financements publics (ministère chargé de l'agriculture, des collectivités territoriales, agences de l'eau, autres financeurs locaux). Depuis 2005, les agences de l'eau ne financent plus de retenues collinaires en raison de leurs conséquences environnementales négatives (Cheminaud et al. (2007)). De plus, le financement des réserves de substitution n'est octroyé que sous condition. Les irrigants doivent restituer un volume d'eau équivalent à celui de la réserve, en renonçant à des autorisations antérieures délivrées sur le territoire concerné. Les agriculteurs échangent donc une ressource potentiellement abondante et non payante mais pas toujours accessible (comme celle d'un cours d'eau) contre une ressource plus restreinte, payante, mais toujours accessible (Erdlenbruch et al. (2008)). De plus, les porteurs de projets (souvent des collectifs d'irrigants de type ASA) doivent fournir la preuve que l'investissement est économiquement rationnel et environnementalement compatible. Le coût de construction doit être limité à 3 $Euros/m^3$ (Conseil des minstres du 26 octobre 2005 (2005)).

La constitution de réserves artificielles de substitution se heurte de plus en plus aux réticences des pouvoirs publics en raison des problèmes de rentabilité dus à l'augmentation des coûts des travaux, à l'écart existant entre moyens financiers nécessaires et disponibles, et aux oppositions locales générant de nombreuses procédures contentieuses coûteuses. Au niveau environnemental, ces réserves posent problème car on ne peut pas considérer que toute l'eau qui retourne à la mer peut être stockée : les périodes de crues font partie du fonctionnement normal du réseau hydrographique. De plus, le stockage peut nuire à la recharge des nappes souterraines. Cette possibilité de stockage d'eau pendant les périodes excédentaires doit donc être traitée avec la plus grande prudence

en fonction du contexte hydrographique local. Les réserves de substitution ne sont pas une solution universelle à la pénurie d'eau (Erdlenbruch and Montginoul (2009)).

La France dispose en année moyenne de ressources en eau suffisantes pour l'ensemble des usages, notamment si les quotas alloués respectent le principe de gestion quantitative équilibrée. Le recours au stockage de l'eau hivernale contribue à rééquilibrer offre et demande. Néanmoins, des évènements climatiques exceptionnels et une pression accrue sur la ressource, liée à l'augmentation des usages et des besoins des plantes avec le réchauffement climatique, peuvent conduire temporairement à des situations de crise qui doivent être gérées à l'aide d'outils spécifiques.

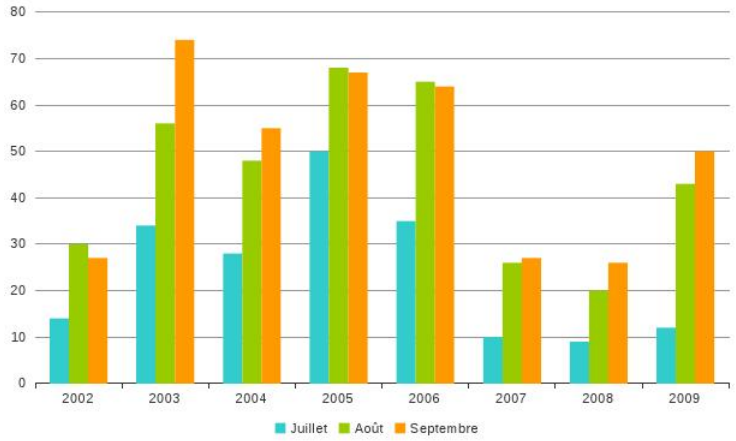
1.2 Gestion de crise

En cas d'insuffisance constatée de la ressource en eau, des restrictions d'usage sont organisées par le préfet. Les autorisations de prélèvement sont alors caduques et l'arrêté sécheresse redéfinit les volumes de prélèvement autorisés. Nous décrivons ici l'organisation de la gestion de crise et ses limites. Nous présentons ensuite les apports de la thèse concernant l'amélioration du dispositif de rationnement.

1.2.1 Les restrictions par arrêté préfectoral

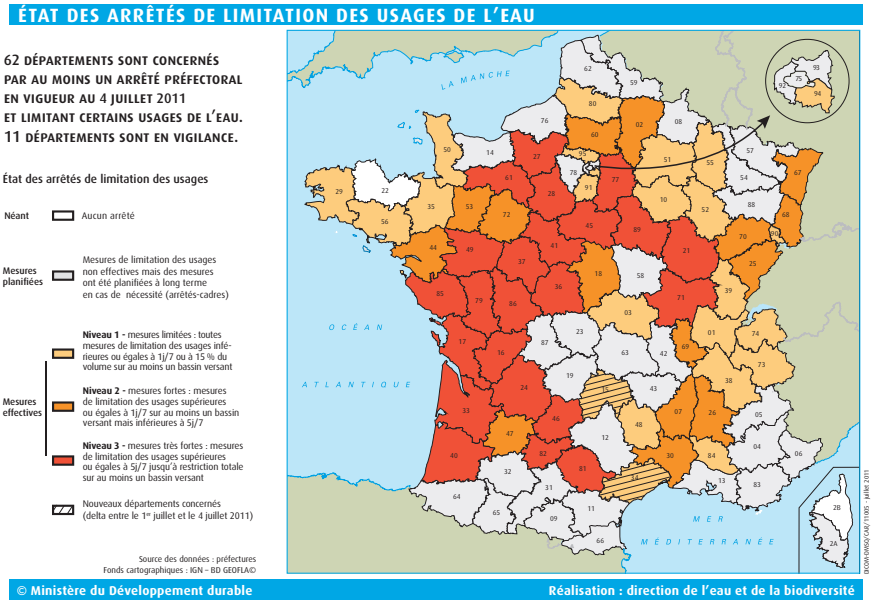
Chaque année en France, au moins une vingtaine de départements connaît, au cours de l'été, des pénuries conduisant les préfets à prendre des arrêtés de limitation des usages de l'eau (*Figures 1.3 et 1.4*). En vertu des dispositions prévues par le Code de l'environnement (article L.211-3 II-1°), dont la mise en œuvre est précisée par le décret n°92-1041 du 24 septembre 1992 relatif à la limitation et à la suspension provisoire des usages de l'eau, les préfets peuvent prendre des mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau pour faire face à une insuffisance de la ressource en eau en période d'étiage. L'objectif général de ces mesures exceptionnelles est de gérer les situations de pénurie en assurant l'exercice des usages prioritaires que sont la santé, la sécurité civile, l'approvisionnement en eau potable et la préservation des écosystèmes aquatiques.

FIGURE 1.3 – Nombre de départements de France métropolitaine concernés par au moins un arrêté préfectoral de restriction des usages de l'eau en période estivale



Source : Meeddm (Direction de l'Eau et de la Biodiversité) - Site web Eaufrance, avril 2010.

FIGURE 1.4 – État des arrêtés de limitation des usages de l'eau au 4 juillet 2011



Source : Meeddm (Direction de l'Eau et de la Biodiversité) Site web

Chaque préfet de département signe en début d'année un arrêté cadre départemental fixant des seuils sur les nappes et les cours d'eau à partir desquels des restrictions d'usage progressives et proportionnées s'appliquent. L'arrêté cadre de bassin identifie différents seuils définis à partir des indicateurs de "bon fonctionnement des milieux aquatiques" des SDAGE. Le débit objectif d'étiage (DOE) est la valeur "au-dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement du système aquatique". Le débit de crise (DCR) correspond à la valeur "au-dessous de laquelle sont mises en péril l'alimentation en eau potable et la survie des espèces présentes dans le milieu".

La prise d'un arrêté dépend de l'observation des débits moyens sur 10 jours. Le suivi hydrologique en période d'étiage est assuré par les DREAL. Les différents seuils pour le déclenchement des mesures de limitation et la suspension provisoire des usages de l'eau sont :

- Vigilance : les débits observés sont inférieurs au DOE ; campagnes de sensibilisation et d'appel au comportement citoyen
- Alerte : les débits observés sont inférieurs à 80% du DOE ; restriction et interdiction des usages non productifs correspondant à une réduction d'au moins 30% des prélèvements
- Crise : les débits observés sont inférieurs au débit d'alerte renforcé égal à $DCR + \frac{1}{3}(DOE - DCR)$; restrictions renforcées correspondant à une réduction d'au moins 50% des prélèvements
- Crise renforcée : les débits observés sont inférieurs au DCR ; seuls l'alimentation en eau potable et le respect de la vie biologique sont assurés, tous les usages significatifs non prioritaires sont interdits.

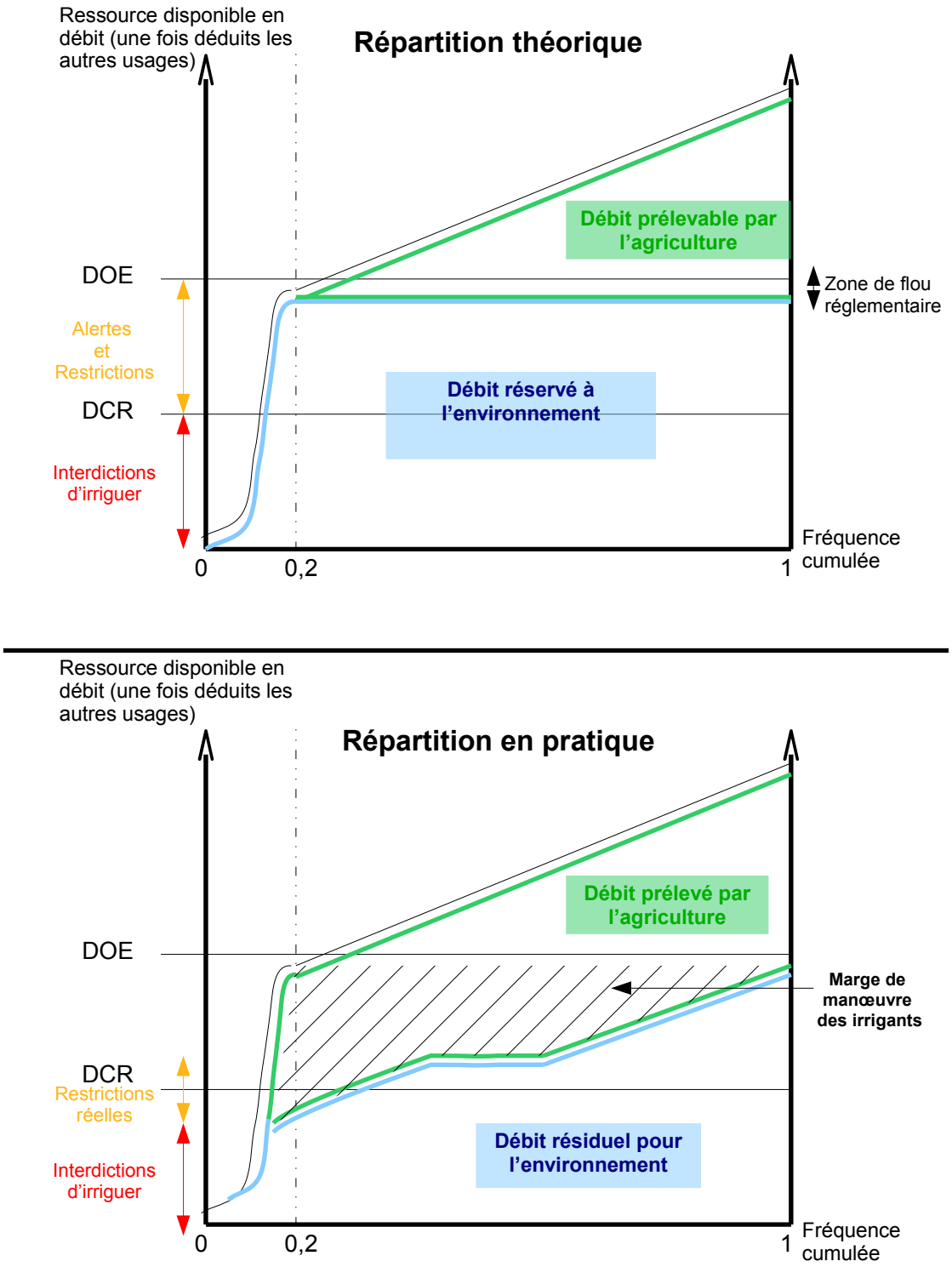
La détermination de débits-seuils est à la base de tout le processus de gestion de crise. La méthode purement statistique doit néanmoins être complétée par une démarche plus pragmatique afin de prendre en compte les besoins du milieu et les conflits d'usage (Henny (2010)). Les préfets sont invités à mettre en œuvre une concertation avec tous les usagers dans le cadre des comités départementaux sécheresse. Un comité sécheresse est réuni au niveau départemental dès que l'on atteint des débits critiques afin de se concerter sur la pertinence de la mise en place des restrictions (Barbier et al. (2007)). Il est composé de représentants des services de l'État (DREAL, DDT, MISE, Préfet), du conseil général, des usagers (profession agricole, associations de protection de la nature, industriels dépendant de l'eau, EDF, fédération de pêche), des services météorologiques et des gestionnaires de retenues. Le franchissement d'un seuil ne traduit pas inélucta-

blement le déclenchement de mesures de restrictions. Les mesures prises par le préfet en période de sécheresse doivent servir quelques principes : être progressives, appropriées au but recherché, suffisantes eu égard à la gravité de la situation, et ne peuvent être prescrites que pour une période limitée. L'application de ces principes laisse néanmoins une marge de manœuvre relativement importante, dont se saisissent les différents acteurs présents en comité sécheresse. Le déclenchement ou non de mesures de restriction fait l'objet de discussions et de négociations. A l'issue de ces réunions du comité sécheresse est décidée la suite à donner au vue de la situation. Le comité sécheresse est une instance fondamentale pour le partage des enjeux liés à la sécheresse et l'acceptabilité des mesures de restrictions.

La *Figure 1.5* représente les allocations théorique et observée de la ressource entre différents usages en fonction des débits-seuils : la puissance de la profession agricole et le flou autour de la définition des débits de crise (qui sont des débits négociés et non pas des débits reposant sur des bases objectives et scientifiques (Lafitte and Nicolazo (2006))) conduisent souvent à retarder l'application des restrictions. Les agriculteurs sont les gagnants de ce processus et l'eau disponible pour l'environnement en est fortement réduite, d'où de vives tensions entre associations de protection de la nature et profession agricole.

Aucun dédommagement n'est attribué si l'administration reconnaît nécessaire de prendre des mesures de limitation des prélèvements car les autorisations ne sont attribuées "qu'à titre précaire et révocable". Les restrictions sont souvent formulées comme l'interdiction d'irriguer certains jours de la semaine. Elle s'appliquent de façon uniforme à tous les agriculteurs, ce qui facilite leur mise en place et leur contrôle. L'organisation temporelle des restrictions conduit ipso facto à une prime pour les irrigants ayant investi dans du matériel d'irrigation, qui peuvent pomper davantage dans un laps de temps donné. Des pénalités financières sont prévues en cas de non respect des restrictions. Cependant, les exceptions aux restrictions sont fréquentes, notamment pour les cultures vulnérables comme la maraichage et les cultures sous-contrat.

FIGURE 1.5 – Répartition du débit en fonction de la disponibilité de la ressource



Source : adaptation par l'auteur de Faysse (2001), page 138-139

1.2.2 Limites et réforme de la gestion de crise

Les arrêtés préfectoraux restreignant ou interdisant l'irrigation peuvent avoir un effet pénalisant important pour les agriculteurs obligés d'interrompre l'arrosage à des périodes cruciales pour leurs cultures. Dans ce contexte de rareté, l'objectif est d'organiser les restrictions de façon à maximiser la valeur sociale de l'eau. Néanmoins, dans un contexte de crise, l'équité et l'acceptabilité des règles de partage de l'eau sont aussi des dimensions importantes. Pour faciliter l'acceptabilité et l'efficience du rationnement, les modalités de gestion de crise doivent être anticipables par les agriculteurs et leur application ne doit être envisagée que lors d'épisodes climatiques exceptionnels.

Anticiper et informer les irrigants

Les arrêtés sécheresse peuvent se traduire par des pertes importantes pour les agriculteurs quand ils ne sont pas à même de les anticiper. Reynaud (2009) évalue les coûts induits par les arrêtés préfectoraux qui imposent des restrictions quantitatives (apport total en eau au cours de la saison inférieur à un seuil) ou des interdictions de prélèvements en période d'étiage. Dans le modèle, les pertes sont mesurées en terme d'espérance d'utilité nette des coûts spécifiques à chaque système de culture. Adaptation de l'irrigation et réallocation des surfaces entre systèmes de culture sont deux stratégies d'auto-assurance que les agriculteurs peuvent mettre en place contre le risque de manque d'eau.

A court terme, le changement de stratégies d'irrigation (adaptation tactique des arrosages en cours de campagne d'irrigation à matériel donné) permet à l'agriculteur de limiter l'impact sur la fonction objectif des limitations du niveau maximal d'irrigation. A long terme, la réallocation des surfaces permet de limiter de manière très substantielle l'impact des restrictions d'irrigation. La perte de fonction objectif de l'agriculteur en cas de restriction de l'apport total en eau est de seulement 2.03% à long terme dans l'exemple pris par Reynaud (contre –5.84% à court terme). Les interdictions d'irriguer dans certaines périodes sont elles beaucoup plus coûteuses, avec une perte de fonction objectif pouvant aller jusque 54% si les interdictions ne sont pas anticipées. Cependant, l'effet négatif des interdictions d'irriguer est fortement réduit si elles sont annoncées suffisamment tôt. Les agriculteurs peuvent alors anticiper et ré-optimiser leurs stratégies d'irrigation de manière à maximiser leur fonction objectif sous la contrainte des interdictions d'irriguer à venir. Les simulations effectuées montrent que des interdictions

d'arrosage anticipées se traduisent par une perte de fonction objectif entre 10 et 18% selon le moment où les restrictions à venir sont annoncées. Le fait pour l'agriculteur d'apprendre même tardivement qu'il va y avoir une interdiction d'irriguer lui permet de limiter sa perte s'il a le temps d'irriguer avant la mise en place des interdictions. Il est donc important pour la puissance publique d'annoncer les interdictions d'irrigation, même tardivement. L'agriculteur peut aussi parfois modifier la surface allouée à chaque système de culture et substituer des cultures les plus consommatrices par des cultures plus économes en eau. Cette réallocation des surfaces entre les cultures n'est possible que si l'interdiction d'irriguer à venir est anticipée. Par exemple en 2005 en France, l'anticipation dès le mois de février de la réduction de la ressource en eau disponible a conduit à la mise en place d'assolements intégrant cette perspective et à la réduction des surfaces en maïs irrigué de 8% en moyenne nationale (Cheminaud et al. (2007)). Les estimations de Reynaud (2009) montrent que la perte de fonction objectif peut être limitée à 2% s'il n'y a pas de limites à la réallocation des surfaces.

Afin de faciliter l'adaptation des agriculteurs, les mesures de sensibilisation, de surveillance et de limitation des usages de l'eau sont prises de manière progressive à partir de chaque franchissement de seuil. De plus, certains organismes comme les Chambres d'Agriculture apportent leur soutien aux agriculteurs irrigants en publiant régulièrement un document intitulé "avertissement irrigation" qui donne des indications sur la demande en eau des plantes à partir de parcelles de référence et des conseils aux agriculteurs pour irriguer de façon optimale leurs cultures (Henny (2010)).

Diminuer la fréquence du recours à la gestion de crise

L'article 77 de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 et la circulaire du 30 juin 2008 prévoient que les SAGE se dotent de règlements qui précisent les volumes prélevables et la répartition entre usages sur leur territoire. L'objectif est de revenir à des prélèvements globaux compatibles avec les ressources disponibles et ainsi ne plus recourir systématiquement aux modalités de gestion de crise pour la gestion des prélèvements. Le volume prélevable est le volume que le milieu est capable de fournir dans des conditions écologiques satisfaisantes (compatible avec les principes de gestion équilibrée de la ressource décrits dans le SDAGE). Ce volume peut être décliné par saison et être variable en fonction d'indicateurs précis. La loi de 2006 prévoit que les volumes prélevables soient définis pour chaque ressource d'ici fin 2009, ainsi que la répartition de ces volumes entre usages. Les préfets coordonnateurs de bassins doivent

proposer un programme de révision des autorisations de prélèvement pour l'irrigation. Le volume total autorisé, qui sera la somme de toutes les autorisations des différents préleveurs, devra être au plus égal au volume prélevable au plus tard le 31 décembre 2014.

La loi sur l'eau de 2006 prévoit également le transfert des responsabilités en matière de gestion des usages agricoles de l'eau à un Organisme Unique, personne morale de droit public ou de droit privé, qui par sa désignation représente les irrigants sur un périmètre déterminé. Les Chambres d'Agriculture, les Associations d'Irrigants, les Associations Syndicales, les Etablissements Publics Territoriaux de Bassin, les Sociétés d'Aménagement Rural etc. peuvent postuler pour devenir Organisme Unique (Erdlenbruch et al. (2008)). Les avantages attendus de cette nouvelle institution de type "guichet unique" sont la plus grande performance d'une organisation de mutualisation entre professionnels pour connaître les besoins de chacun, la proximité du terrain pour l'observation des milieux, et la souplesse liée à la possibilité de transferts entre irrigants dans le cadre d'une autorisation globale. Tous les irrigants sur un périmètre en gestion collective doivent s'adresser à l'organisme unique pour l'attribution d'une autorisation annuelle pour l'irrigation. Le fait d'avoir fait converger le volume total autorisé vers le volume total prélevable devrait limiter les situations de déficit. Néanmoins, en cas de nécessité, le préfet pourra toujours recourir aux modalités de gestion de crise afin d'assurer le respect des débits d'objectifs. Le préfet déterminera le volume de restriction à atteindre et l'organisme unique proposera des règles pour la répartition des restrictions entre les irrigants. La répartition des restrictions entre irrigants devra être anticipée et déterminée dès le projet de répartition annuelle initiale, afin de permettre une application rapide et efficiente des restrictions.

Dans la pratique, la mise en œuvre d'actions de réduction des autorisations de prélèvement et la mise en place des organismes uniques se confrontent à plusieurs contraintes : les réactions des agriculteurs contre la baisse des volumes prélevables, le manque de données pour établir de façon peu contestable le niveau de la ressource disponible sans compromettre le bon état des milieux aquatiques, la mauvaise connaissance des prélèvements quand les services départementaux ne recueillent ou ne traitent pas systématiquement les déclarations des agriculteurs, et l'absence de candidature au titre d'Organisme Unique dans certaines régions. Le décret de 2008 prévoyait qu'il soit mis fin à la possibilité de recourir aux autorisations de prélèvement individuelles dans les ZRE au-delà du 31 décembre 2010 et rendait donc obligatoire l'organisation des au-

torisations de prélèvement par les Organismes Uniques. Mais en raison de toutes ces difficultés, un décret du 16 février 2011, visant à modifier le décret de 2008, a retardé d'un an la fin des autorisations individuelles : des autorisations temporaires de prélèvement pourront être délivrées en ZRE un an de plus, c'est à dire jusqu'au 31 décembre 2011 (et jusqu'au 31 décembre 2014 dans les zones de répartition des eaux délimitées après le 1er janvier 2009). Ce délai a pour objectif d'attendre la mise en place effective des organismes uniques de gestion collective. La forte sécheresse du printemps 2011 va peut être permettre de mobiliser les acteurs pour la mise en place de cette réforme.

Alors qu'un des objectifs initiaux de la thèse était l'étude des règles de répartition de l'eau entre irrigants mises en place par les nouveaux Organismes Uniques, le retard de calendrier de la réforme n'a pas permis l'observation de ces règles. Néanmoins, le travail théorique et expérimental réalisé peut permettre d'informer les futurs Organismes Uniques sur les règles les plus adéquates pour l'organisation du rationnement en cas de sécheresse.

Les chapitres 2 et 3 s'intéressent à l'interaction entre les règles de partage utilisées pour la gestion de crise et les stratégies d'auto-assurance des irrigants pour se protéger contre le risque de manque d'eau. Nous nous appuyons notamment sur l'exemple du recours aux réserves de substitution, outil de gestion du risque sécheresse de plus en plus mobilisé par les agriculteurs français. Cette situation est traduite dans les chapitres 2 et 3 comme un jeu dans lequel les agents ont accès à une ressource en bien commun de taille incertaine et à une ressource alternative individuelle et sécurisée. Ils font des demandes dans les deux ressources (la demande totale étant plafonnée) avant de savoir la taille de la ressource commune. Le régulateur définit la règle de partage de la ressource commune qui sera appliquée en cas de pénurie.

Chapitre 2

Sharing rules for a Common-Pool Resource when self-insurance is available

Abstract

There is a risk of resource shortage if the claims agents have over a common-pool resource are incompatible with the resource size. In case of shortage and in the absence of a price mechanism, a sharing rule or bankruptcy rule is required to organize the restrictions and allocate the available resource among CPR users. However, in many situations, agents can diversify their resources and substitute an alternative safe but costly resource to the free but risky CPR. Both the sharing rule of the CPR and the resource diversification choices of agents contribute to optimal resource management. We find the optimal sharing rule under two assumptions concerning the regulator: i) the social planner defines simultaneously the sharing rule and the diversification choices in order to maximize social welfare; ii) the policy maker uses the sharing rule as an instrument to induce each agent to make the optimal diversification decision. We interpret our results in the context of water management in France.

Keywords: Bankruptcy; Diversification; Irrigation; Self-insurance; Sharing rules; Water management

Résumé

Il existe un risque de pénurie sur une ressource en bien commun si la taille de la ressource est insuffisante pour couvrir les demandes de tous les usagers. En cas de pénurie, en l'absence de mécanisme de prix, une règle de partage est nécessaire pour organiser le rationnement et partager la ressource disponible entre les usagers. Cependant, les usagers peuvent souvent diversifier leurs sources d'approvisionnement et substituer une ressource alternative sécurisée à l'usage de la ressource commune gratuite mais risquée. La règle de partage de la ressource en bien commun et les choix de diversification des agents contribuent tous deux à la gestion optimale de la ressource. Ce chapitre permet de déterminer la règle de partage optimale sous deux hypothèses distinctes concernant le régulateur : i) le planificateur définit simultanément la règle de partage et les choix de diversifications de façon à maximiser le bien être social ; ii) le décideur utilise la règle de partage comme un instrument incitant les usagers à faire des choix de diversification optimaux d'un point de vue social. Nous interprétons nos résultats dans le contexte de la gestion de l'eau en France.

Mots clés: Faillite; Diversification; Irrigation; Auto-assurance; Règles de partage; Gestion de l'eau

JEL Classification: Q25, Q58

This paper is coauthored by Mabel Tidball (INRA), Sophie Thoyer (Montpellier Supagro) and Marc Willinger (Université Montpellier I). It has been submitted in May 2011 to Environmental and Resource Economics.

2.1 Introduction

Common pool resources (CPR) are often managed through the - formal or informal - allocation of access rights or use licences to users entitled to claim a share of the resource. When the total availability of the resource is known with certainty, optimal allocation imposes that the marginal value of the resource to each user be equal. However, in many cases, CPR are natural resources and quantities available can vary stochastically due for example to climatic conditions. When the sum of claims is larger than the amount of resource that is available, there is a need to establish a sharing rule, i.e. a rationing scheme defining the share of the total resource allocated to each user. An alternative is to use a spot market mechanism that balances demand and supply at any time. In theory, it would guarantee that available resource is allocated efficiently to the highest value users. However, claims do rarely constitute tradable property rights and not all resources can be traded on a spot market. Moreover, it may be costly to inform the users in real time about the price. It will also impose on users a considerable price risk. In the situations where spot markets are not easily implementable or desirable, balancing variable supply and demand calls for quantity rationing (Schroyen and Oyenuga (2011)).

Under quantity rationing, users face the risk of getting a lower quantity of the CPR than planned and claimed. When the possibility exists, they may want to diversify their resource use. For example they can reduce their dependence on the free but risky CPR by investing into a costly but safer substitute resource which thereby provides an opportunity to self-insure against resource shortage from the CPR (Ehrlich and Becker (1972)). Agents face a trade-off between supporting the risk of CPR shortage and paying the cost of a secure resource. Since the sharing rule determines the share of resource allocated to each agent in case of shortage, it is likely to affect agents' diversification decisions. At the society level, the optimal management of a CPR involves two dimensions when an alternative resource is available: (i) the rule according to which the resource should be shared in case of shortage, and (ii) the level of risk that should be taken at the society level, or equivalently, the level of investment in a secure substitute resource. Suboptimal investment in self-insurance inefficiently increases the cost of risk management (if investment is too high) or the risk of shortage (if investment is too low).

Such a situation of CPR shortage arises frequently in irrigated agriculture, when several farmers use the same water resource for irrigation (Ambec (2008), Ansink and Weikard (2009)). In France for instance, each farmer has to fill a form for a water use license in October in order to be authorized to withdraw the corresponding volume from the river and cover his irrigation needs for the coming year. The decision is made before knowing the amount of irrigation water that will be available for the coming season and the needs of the other farmers. In times of shortage, when water flows are too low to fulfill licences, irrigation water is shared through a system of temporary restriction roasters, managed and controlled by public authorities. Farmers can also partially secure their access to irrigation water by investing into farm storage, pumping equipment for groundwater, or by signing delivery contracts with water companies guaranteeing pressurized water from storage dams etc. Taking up those opportunities, they agree to forego part of their claims on the river water.[1] Clearly, by relying more on private resources, they relieve the collective pressure on the river and reduce the probability that total demand exceeds total availability, mitigating as well the severity of shortage when it occurs. From a social welfare perspective, there is a need to find the right balance between economic losses due to the risk of water shortage and investment costs in alternative safe resources. Water managers must take into account the impact of the sharing rule they implement in times of drought on the self-insurance investment decisions of farmers in more secure water resources.

Various sharing rules are observed in the context of water management. The first innovation of the paper is to draw the parallel between these empirical rules and the ones described in the bankruptcy literature, whereas the CPR and the bankruptcy literature are rarely referring to one-another. This literature provides well-behaved and acceptable sharing rules in bankruptcy situations in order to award the remaining resources of the firm (the estate) between its creditors (Aumann and Maschler (1985), Herrero and Villar (2001), Moulin (2001)). Water allocation and river sharing problems

1. French farmers show a growing interest in individual reservoirs in order to diversify their water resources. These reservoirs are called "*réserves de substitution*" or "*retenues collinaires*" in France. Some of these reservoirs are not individual but shared between a small number of neighbors. The reservoirs are filled during winter, when water is relatively abundant and when the reservoirs' filling activity does not compete with irrigation. This resource is perceived as safe by the farmers because the quantities are known in advance (farmers can observe the quantity stored at the end of winter) and administrative restrictions do not apply to this resource. Reservoir building is assumed to have no effect on the probability of water shortage occurrence. The investment in theses reservoirs are subsidized as part of drought management plans but farmers must hand back a share of their pumping licences corresponding to the safe volume obtained (Erdlenbruch and Montginoul (2009))

are akin to bankruptcy problems: while creditors face the risk of loosing their capital investment when the firm's profits are too low, agricultural water users bear the risk of not receiving water, whereas they have made production plans requiring water use, when existing water rights cannot be fulfilled because of low available flows (Ansink and Weikard (2009)).

The best-known rule is the proportional rule, which recommends that awards be proportional to initial claims. The proportional rule is widely used in Australia: water users hold water rights which give them access to a proportion of the overall amount of seasonal water available (see chapter 5). For the case of urban water, Schroyen and Oyenuga (2011) consider that ex ante demands are proportionally interrupted when supply is insufficient. The constrained equal-awards rule shares the estate equally amongst creditors, subject to the condition that no creditor receives more than his initial claim. A dual formulation of equality, focusing on the losses creditors incur as opposed to what they receive, underlies the constrained equal-losses rule. It proposes to share losses equally across creditors, subject to the condition that no creditor ends up with a negative award. In France, water is shared through an administrative procedure which is often implemented as a restriction of allowed irrigation times. For example left bank farmers are allowed to irrigate on the first two days of the week, and right bank farmers are allocated the last two days... This is akin to the constrained-equal awards rule. However, if we assume that farmers calibrate their pumping capacity on their volumetric license, the rationing procedure is closer to the proportional rule as the volume of water pumped during the restricted irrigation time is proportional to the pumping capacity. It is also often the case that priority is given to group of users, for example vegetable growers get the scarce water at the expenses of fodder producers, independently of their claim over the resource (their water licences).[2] It is akin to the constrained equal-awards rule but the equality condition is replaced by priority ranks.

In this paper we develop a model that allows us to study the interactions between the rule used to share the CPR in case of shortage and users' resource diversification strategies. Contrarily to most of the bankruptcy literature, the claims on the estate that will be shared are not exogenous. The investment in the secure resource and the claim to the CPR are dual decisions and constitute the "resource diversification strategy" of an agent. The paper aims at determining the optimal sharing rule of the CPR under two

2. In many countries, there also exist a system of priority ranking the different sectors. Urban water consumption has generally the highest priority, followed by the industry. Irrigation water is generally not a priority use.

different set of assumptions concerning the regulator: i) the regulator is a social planner, that defines simultaneously the optimal investment in a secure resource and the efficient allocation of the CPR in case of shortage; ii) the regulator is a policy-maker, that can use the sharing rule as an instrument to influence CPR users diversification strategies. We find that the optimal sharing rule depends on social value from resource use when the only source of heterogeneity among agents is their valuation of the resource use, and depends on relative risk tolerance when the only source of heterogeneity among agents is their risk tolerance. We also determine the optimal diversification between the CPR and the secure resource as a function of agents' valuation of the resource and their risk tolerances, the distribution of the CPR size and the cost of the safe resource. Finally, we find that agents choose optimal diversification strategies when they know the sharing rule and when this rule does not depend on individual claims. The paper contributes to the empirical literature about the specific issue of water rationing and provides some advice targeted towards policy makers in charge of designing those rules in France.

The paper is organized as follows. Section 2.2 outlines the main assumptions of the model. In section 2.3 we consider the case of risk neutral agents with heterogeneous resource values. In section 2.4 we consider agents heterogeneous in their risk preferences through a mean-variance model. Section 2.5 concludes and draws some general recommendations for resource management under variable resource size when a substitute resource is available. We illustrate and interpret our results in the specific context of water management in France. All the proofs are presented in the appendix.

2.2 The model

The model is intended to provide answers to two questions:

(Q1) What is the optimal diversification between the CPR and the secure resource and the optimal sharing of the resource when the total claim to the CPR exceeds the CPR size? This first question is related to the solution that would be chosen by a perfectly informed benevolent social planner, who can decide both on the sharing rule and on each individual's diversification strategies.

(Q2) How well different sharing rules perform in decentralizing the optimal diversification solution? This second question considers the more realistic issue where the regulator uses the sharing rule as an instrument to induce CPR users to make optimal diversification decisions.

2.2.1 Assumptions

For clarity, the assumptions are presented with the example of irrigation water management in France. It can easily be extended to any CPR of variable size with ex-ante claims over the resource, when a safe and costly alternative is also available for substitution.

We consider a population of $n = 2$ farmers indexed by $i = 1, 2$. The results can be extended to the case of n agents but are more easily understandable with only two agents. We use the masculine pronoun for the agent and the feminine for the regulator. Each farmer has access to a maximum quantity of water $\bar{H}_i$, that can interpreted as his historical water pumping right into the river, satisfying the historical needs of water input. Since pumping rights have been largely over allocated in the past, public authorities have decided that no additional quantities could be granted to individual farmers. Therefore, $\bar{H}_i$ is the maximum quantity that each farmer is allowed to draw from the river. It is also the quantity that each farmer wishes to obtain if we consider the marginal benefit from water use is null for any amount of water above $\bar{H}_i$. Each farmer is given the choice to diversify his water sources in order to obtain the restricted total amount of water $\bar{H}_i$. He has access to water from the river (CPR) and from a private reservoir (secure resource).

The river water is an insecure resource as the total volume available from the river (size x of the CPR) is a stochastic variable. Farmers make ex-ante claims on the river for the

next irrigation season. These demands will be met if ex-post supply is sufficient. Some farmers are willing to pay to be certain to receive the quantity $\bar{H}_i$. The reservoir offers a safe alternative but it entails a variable cost of $c > 0$ per unit of water (no fixed cost). We assume that the two resources are perfect substitutes, allowing for any combination of claims to the two resources. We also assume that the claims to both resources are realized simultaneously. [3]

Denote by R_i farmer i's ex-ante claim on the river water. His claim is constrained by $0 \leq R_i \leq \bar{H}_i$ because it cannot exceed the historical water licence $\bar{H}_i$. Once the resource size is known, in spring usually, the volume of water he can draw from the river is denoted Q_i. It may not be equal to the volume claimed if the resource size is lower than the sum of the claims over the CPR and restrictions are organized. Since the river and secure water resources are perfect substitutes, the investment in the safe resource is the dual decision of the claim to the CPR: $\bar{H}_i - R_i$ is the complementary quantity to the secure resource. In the remainder of this paper, we assume a total use of water equal for all farmers: $\bar{H}_i = \bar{H}\ \forall i$. This enables us to study the diversification choices of agents according to their individual characteristics everything else being equal.

Agent i's profit from water use is denoted Π_i. It is set equal to the value of the water units drawn from both resources ($H_i = (\bar{H} - R_i) + Q_i$ with $0 \leq H_i \leq \bar{H}$) minus the cost of the units obtained from the secure resource. For simplicity, we assume that the value of each unit of resource is constant and equal to υ_i. [4] We also assume that the marginal value from water is always strictly larger than the cost of the alternative resource ($\upsilon_i > c$).

$$\Pi_i = \upsilon_i \left[(\bar{H} - R_i) + Q_i(x, R_i, R_{-i})\right] - c(\bar{H} - R_i) \tag{2.1}$$

3. In France, farmers file a claim form for a water use licence in winter in order to be authorized to withdraw the corresponding volume from the river during spring and summer. The decision to fill a reservoir is also taken in winter, before knowing the volume of water that will be available from the river during the irrigation season.

4. Ambec (2008) solves the problem of efficient resource allocation for a concave benefit function. The introduction of an alternative resource in the problem makes it more complex. As a result, we rely on this simplifying assumption of constant marginal value for the resource for any total quantity $0 \leq H_i \leq \bar{H}$. In order to have a quasi-concave benefit function, we can consider that units of water above $\bar{H}$ have a null marginal value. However, this assumption has no impact on our results.

The volume of water Q_i that farmer i is allowed to draw from the river depends on the size of the resource x and on the demand for river water $(R_1; R_2)$. For simplicity, we assume that x follows a uniform distribution on the interval $[a; b]$ $(a \geq 0)$: $F(x) = \frac{x-a}{b-a}$ and $f(x) = \frac{1}{b-a}$. Nevertheless, the results of this section can easily be generalized (in implicit form) to any other distribution of x provided risk neutrality is assumed. If the size of the resource available is larger or equal to the total claim $R = R_1 + R_2$, farmer i gets his claim R_i from the river. In the opposite case, a sharing rule is implemented. The sharing rule determines the quantity θ_i that agent i gets in case of restriction. As a result,

$$\begin{cases} Q_i = R_i \; and \; H_i = \bar{H} & if \; R \leq x \\ Q_i = \theta_i \; and \; H_i < \bar{H} & if \; R > x \end{cases}$$

θ_i is only defined for x on the interval $[a; R]$ (when there is a shortage). There are many possible ways to define the relation between θ_i and x. The sharing rule can be function of claims: $\theta_i(x, R_i, R_{-i})$. The rule must satisfy "claims monotonicity" (an agent's share of the total amount of resource can never decrease if his claim increases and all others' claims stay constant) and "resource monotonicity" (if we have more resource to distribute, no one ends up with a smaller share) (Moulin (2000)). Moreover, two other constraints are necessary to fulfill : (C1) $\theta_1 + \theta_2 = x$ and (C2) $0 \leq \theta_i \leq R_i$ for $i = 1, 2$. According to constraint (C1) the sharing rule must exhaust the total quantity available x. It means that any rule should be defined such that the available resource x is always fully allocated when $R > x$. This is of course a condition for optimality as a share of the resource not allocated will not contribute to social welfare.[5] Constraint (C2) states that no agent can get a negative quantity nor get a share of the CPR that exceeds his claim $(0 \leq \theta_i \leq R_i)$. This constraint relies on the assumption that an agent cannot receive a water allocation $H_i > \bar{H}$. The sharing rules should be specified to ensure these two conditions. Section 2.2.2 presents the different sharing rules mentioned in the bankruptcy literature that we shall consider in this paper.

5. When water is not fully allocated to irrigators, the water remains into the river and contributes to "environmental flows". This is of course not a pure loss for society. In the model, we consider that x is the quantity of resource that has been allocated to agricultural users such that they can use all of it without compromising the needs of other users (including the environment).

2.2.2 Bankruptcy sharing rules

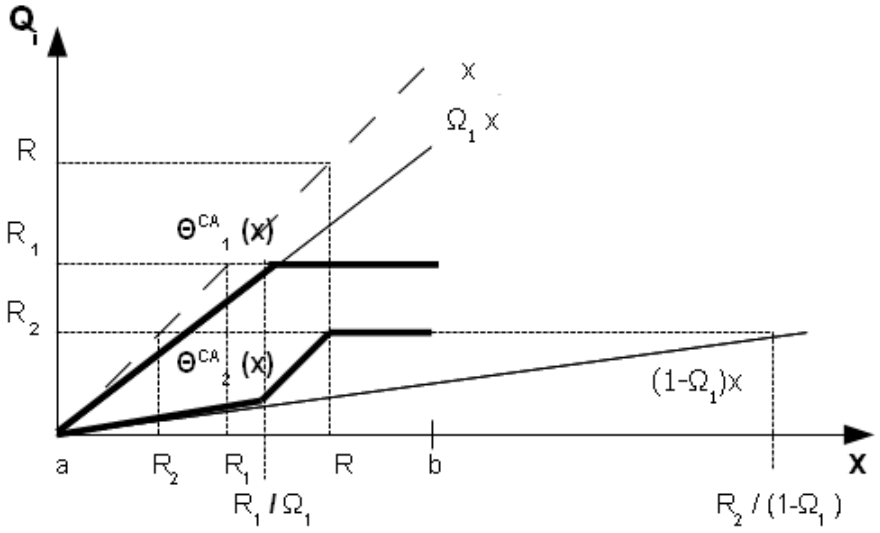
We follow the presentation of the bankruptcy rules of Thomson (2003) but slightly modify these rules in order to fulfill constraints (C1) and (C2) defined as the minimal requirements for an optimal rule in our problem. Moreover, we remove the constraint of equality and therefore modify the names: "constrained-equal awards rule" becomes "constrained awards rule" and "constrained-equal losses rule" is replaced by "constrained losses rule". We can therefore define three sharing rules based on bankruptcy rules:

(i) The proportional rule divides the amount of resource available proportionally to the agents' claims. In case of shortage an agent who claimed R_i receives $\theta_i^P = x\frac{R_i}{R}$. This rule automatically satisfies constraints (C1) and (C2).

(ii) The CA (constrained awards) rule divides the amount of resource available among the claimants independently from their claims. In the bankruptcy literature, the CA rule is defined such that an agent receives a share of the available resource $\theta_i = \Omega_i x$ with $\sum_{i=1}^{n}\Omega_i = 1$ and Ω_i the "priority" rank of each agent independent from the vector of claims (see Moulin (2000) for a characterization of priority rules). In our model, in the case of two agents, in order to satisfy constraints (C1) and (C2), we rewrite the CA rule as follows for $\frac{R_2}{\Omega_2} \geq \frac{R_1}{\Omega_1}$: $\theta_1^{CA} = min\left[\Omega_1 x; R_1\right]$ and $\theta_2^{CA} = min\left[x - \theta_1^{CA}; R_2\right]$. It guarantees that no agent receives more than his claim and the whole resource x is allocated when $x < R$ (*Figure 2.1*). For example, if agent 1's claim is lower than $\Omega_1 x$, he receives his claim R_1 and the other agent is allocated all the resource left $x - R_1$.

(iii) The CL (constrained losses) rule allocates the missing amount of resource. The claim of each agent is restricted by a share of the difference between the aggregate claim and the total amount available, provided no agent ends up with a negative transfer. In case of shortage an agent who claimed R_i receives $\theta_i = R_i - \beta_i\left(R - x\right)$ with $\sum_{i=1}^{n}\beta_i = 1$. For two agents, in order to satisfy constraints (C1) and (C2), we rewrite the CL rule as follows for $\frac{R_2}{\beta_2} \geq \frac{R_1}{\beta_1}$: $\theta_1^{CL} = max\left[R_1 - \beta_1\left(R - x\right); 0\right]$ and $\theta_2^{CL} = x - \theta_1^{CL}$. It guarantees that all the resource x is allocated when $x < R$ and the awards cannot be negative.

Figure 2.1: The CA rule does verify constraints C1 and C2 (case 2)



These three rules will be compared on the basis of their capacity to participate to the efficient management of the CPR. We first study whether one of these rules is an optimal sharing rule when the regulator both fixes the sharing rule and decide on the optimal investment in the secure resource (Q1). Secondly, we determine the rule which induces farmers to take the optimal decisions in terms of diversification choices (Q2). The answer to these questions will be given under different assumptions concerning agents' preferences. In section 2.3, we first solve the model assuming risk neutral agents in order to isolate the effect of heterogeneous values of the resource. In section 2.4, we introduce a mean-variance objective function to observe the effect of heterogeneity in risk tolerance when values of the resource are identical.

2.3 Risk neutral agents with heterogeneous values

In this section, we assume risk neutral agents with heterogeneous values of the resource. A risk neutral agent, with value υ_i of the resource, chooses his portfolio of resources in order to maximize his expected profit defined as follows. We assume perfect knowledge of υ_i, $\bar{H}$ and the distribution of x by the two agents and the regulator.

$$\underset{R_i}{Max}\ E\left[\Pi_i\right] = (\upsilon_i - c)(\bar{H} - R_i) + \frac{\upsilon_i}{b-a}\left[\int_R^b R_i\, dx + \int_a^R \theta_i(x)\, dx\right] \quad \forall i = 1,2 \qquad (2.2)$$

We first solve the full optimization program of the regulator to answer Q1. Then we compare the rules on the basis of their capacity to decentralize the optimal claims to the CPR (Q2).

2.3.1 Social optimum: optimal sharing rule and diversification

We assume that the social planner is a perfectly informed benevolent regulator. Formally, she chooses both the vector of claims to the CPR $\{R_i^*\}$ and the sharing rule $\{\theta_i^*\}$ in order to maximize the weighted sum of the expected profits of the two agents. λ_i is the weight of agent i in the social welfare function, and $\lambda_i \upsilon_i$ measures the "social value" (SV_i) of the resource used by agent i (the private value υ_i multiplied by the weight of agent i λ_i in the social welfare function).

We consider a vast array of rules $\theta_i(x, R_i, R_{-i})$ where the individual quantities allocated to agent i in case of shortage may depend on the amount of resource available x and the vector of claims (R_i, R_{-i}). The program of the regulator writes as follows:

$$\underset{\{\theta_i(x,R_i,R_{-i})\}}{max}\ \underset{\{R_i\}}{max} SW = \sum_{i=1,2}\lambda_i\left[(\upsilon_i - c)(\bar{H} - R_i) + \frac{\upsilon_i}{b-a}\left[\int_R^b R_i\, dx + \int_a^R \theta_i(x, R_i, R_{-i})\, dx\right]\right] \qquad (2.3)$$

$$/c \qquad (1) \qquad \theta_1 + \theta_2 = x$$

$$(2) \qquad 0 \leq \theta_i \leq R_i\ \forall i = 1,2$$

Proposition 1: If $SV_1 > SV_2 (\lambda_1 \upsilon_1 > \lambda_2 \upsilon_2)$, the optimal sharing rule is :

$$\begin{aligned} \theta_1^*(x) &= min\left[x\ ;\ R_1\right] \\ \theta_2^*(x) &= x - \theta_1^*(x) \end{aligned} \tag{2.4}$$

and the optimum claims to the CPR are given by :

$$for\ \lambda_1 > \bar{\lambda}\ and\ \upsilon_1 > \upsilon_2 \begin{cases} R^* = & min\left[a + \frac{c}{\upsilon_2}(b-a); 2\bar{H}\right] \\ R_1^* = & min\left[a + c(b-a)\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2}; \bar{H}\right] \\ R_2^* = & min\left[\frac{c}{\upsilon_2}(b-a)\frac{\lambda_1(\upsilon_1 - \upsilon_2)}{\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2}; \bar{H}\right] \end{cases} \tag{2.5}$$

$$for\ \lambda_1 \leq \bar{\lambda}\ and\ \upsilon_1 > \upsilon_2 \begin{cases} R^* = & R_2^* \\ R_1^* = & 0 \\ R_2^* = & min\left[a + \frac{c}{\upsilon_2}(b-a); \bar{H}\right] \end{cases} \tag{2.6}$$

$$for\ \lambda_1 > \bar{\lambda}\ and\ \upsilon_1 \leq \upsilon_2 \begin{cases} R^* = & R_1^* \\ R_1^* = & min\left[a + \frac{c}{\upsilon_1}(b-a); \bar{H}\right] \\ R_2^* = & 0 \end{cases} \tag{2.7}$$

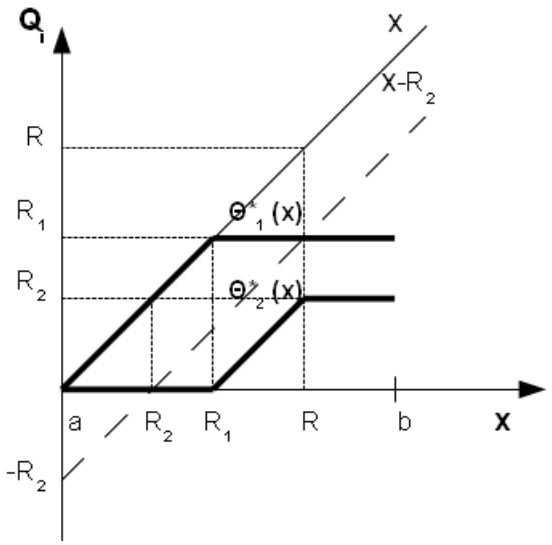
with

$$\bar{\lambda} = \frac{c(b-a) + a\upsilon_2}{2c(b-a) + a(\upsilon_1 + \upsilon_2)}$$

The optimal sharing rule is such that the agent with the higher social value of the resource gets all the resource, provided constraints (C1) and (C2) are satisfied (*Figure 2.2*). Intuitively, when agents are risk neutral, the variability of resource size has no impact and the resource should be allocated according to the social value of the resource. This is a corner solution driven by the assumptions on constant marginal value and cost. [6]

6. We can show that the optimal sharing rule remains the same with a convex cost function or for any other distribution of resource size. However, we would not obtain an explicit form for the optimal total claim to the CPR and therefore we rely on the simplifying assumptions presented in section 2.2.

Figure 2.2: Optimal sharing rule under risk neutrality



The more interesting result under these assumptions concerns the optimal total claim to the CPR, R^*: claiming more than $R^*$is sub-optimal because the probability of restriction becomes too high; claiming less than R^* is sub-optimal because of the cost of the alternative resource. This optimal total claim to the CPR is at least equal to the minimum quantity of CPR available (the lower bound of the distribution a). It is increasing with the cost of the alternative resource c adjusted to the value of the resource by the lower value user. The lower-value user is decisive as the alternative resource is relatively more costly to him. A increase in the average quantity available of the CPR (a decrease in a and/or b) leads to a higher optimal claim to the CPR. Note that the optimal claim is independent of the total demand $\bar{H}$, as long as $R_i^* < \bar{H}$ for $i = 1, 2$. The optimal total claim to the CPR is also independent of the weights λ_i. The weights only determine how this optimal total claim is shared between both agents. When the social planner gives a higher weight to the agent with the higher value $\left(\lambda_1 > \bar{\lambda}\right)$, whether the agent with the higher social value for the resource should withdraw more or less than the other from the CPR depends on their relative values. When the social planner gives a higher weight to the agent with the lower value $\left(\lambda_1 < \bar{\lambda}\right)$, there is no interior solution and the agent with the lower weight does not claim any unit to the CPR.

Lemma 1: If agents are perfectly identical (equal social value), any sharing rule is optimal. The optimal total claim to the CPR remains equal to (2.5). Identically, when there is only one agent and thus no question of optimal sharing, the optimal claim to the CPR is equal to (2.5).

2.3.2 Optimal sharing rule when diversification is a private decision

We assume now that the regulator cannot decide in lieu of the agents. Agents choose their resource claims and the regulator uses the sharing rule as an instrument. We identify sharing rules $\{\theta_i\}$ such that agents' diversification choices and claims to the CPR lead to the optimal solution $\{R_i^*\}$ found above. Formally, the agents and the regulator play a Stackelberg game where the regulator is the leader and the agents the followers. The timing of the game is as follows. Step 1: the regulator announces the sharing rule; step 2: each agent chooses his claim to the CPR so as to maximize his expected profit. Because the sharing rule introduces strategic interactions between agents, we calculate the best response of each agent and identify the unique Nash equilibrium. Knowing each agent's best response function, the regulator should choose the sharing rule announced in step 1 such that the Nash equilibrium found in step 2 coincides with the socially optimal claims determined in (2.5). This will ensure that the chosen rule maximizes social welfare. The game is solved by backward induction.

Proposition 2: The constrained-awards rule is the only rule that can achieve maximum social welfare, under specific parameters, when resource diversification is a private decision.

The CA rule is the only rule (among the three rules described in 1.2) for which the decentralized claims are equal to some optima. This is true only under specific parameters:

If $v_1 > v_2$,

- with the CA rule such that $(\Omega_1 = 1; \Omega_2 = 0)$, individual claims correspond to the optimum characterized by $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$: this is the optimum where the regulator only takes into account the profit of the agent with the higher value for the resource (agent 1) and therefore allocate all the resource to him in case of shortage.
- the CA rule can also decentralize any optimum where the regulator favors the agent with the lower value for the resource ($\lambda_1 < \bar{\lambda}$). In that case, the resource should be allocated to the agent that is favored by the regulator even if he has a lower value for the resource (agent 2): $(\Omega_1 = 0; \Omega_2 = 1)$. The other agent (agent 1) receives no allocation and claims no CPR at equilibrium.

If $v_1 \leq v_2$,

- with the CA rule such that $(\Omega_1 = 1; \Omega_2 = 0)$, individual claims correspond to any optimum such that the regulator gives a higher weight to agent 1 ($\lambda_1 > \bar{\lambda}$). In that case, the resource should be allocated to the agent that is favored by the regulator even if he has a lower value for the resource. The other agent (2) receives no allocation and claims no CPR at equilibrium.

The CA rule is the only rule that can decentralize the optimum as it reduces the strategic interactions compare to the other two rules. The rule necessarily creates strategic interactions as the available resource is shared between the two agents in case of shortage. However, the CA rule is not increasing with individual claim. It depends on individual claims only through constraint (C2). It therefore reduces the incentive to claim more units to the CPR. On the contrary, the proportional and CL rules depend directly on individual claims. These two rules create incentives to claim more from the CPR than what social optimality would require and lead to suboptimal pressure on the CPR. The social welfare is lower under the proportional and CL rule than under the CA rule defined in proposition 2.

In this second section, we have answered our two questions when the two agents are risk neutral and heterogeneous in their social value of the resource (with $\lambda_1 \upsilon_1 > \lambda_2 \upsilon_2$):

(Q1) The optimal claim to the CPR, equal to (2.5), is increasing in the cost of the secure resource and increasing in the average quantity available from the CPR. The optimal sharing rule is such that the agent with the higher social value for the resource gets all the available resource, up to his claim (the other agent is allocated what is left of the CPR). When the two agents have equal social value, any sharing rule and any repartition of the total claim to the CPR are optimal.

(Q2) The constrained-awards rule is the only rule (among the bankruptcy rules considered) that can maximize social welfare (under specific parameters) when the claim to the CPR is a private decision taken in response to the sharing rule fixed by the regulator.

The results of this section are rather intuitive and constitute a benchmark. For an irrigation basin in which farmers would mainly differ by the marginal value of water input, the administrative rule adopted by France which consists in announcing priority rules according to the economic weight of crops leads to less strategic interactions (and therefore a better global use of water) than rules based on the sharing of available water proportionally to ex-ante demands. Does such a result also hold when farmers have identical marginal value of water but display different levels of risk aversion ? In many water irrigation districts, farmers have similar cropping patterns, driven by the soil and climate characteristics, and therefore similar marginal value for water (driven by the market price of crops). However, their willingness to take risk can be different, for example due to their individual preferences and the financial structure of their exploitation. Under the assumption of risk aversion, the variability of resource size becomes challenging as the way the resource is shared impacts the risk born by agents and their incentive to self-insure. Despite the large evidence of risk aversion amongst farmers (Binswanger (1980), Couture and Reynaud (2010)...), risk preferences are rarely taken into account in the design of mechanisms for efficient allocation of water between heterogeneous agents (see for rare exceptions Tarlock (2000), Fapchamps (2003), Calatrava and Garrido (2006b)). The next section deals with heterogeneity in agents' risk tolerances.

2.4 Mean-Variance agents with equal values

The model is modified to account for risk tolerance and heterogeneous risk preferences, by relying on the two-moment decision model first introduced by Markowitz (1952). Our focus is on the consequences of risk-tolerance heterogeneity on the optimal sharing of the resource when resource size is stochastic. Therefore, we assume equal value of the resource ($\upsilon_1 = \upsilon_2 = 1$) in order to simplify the analysis. We showed that under risk neutrality the optimal sharing of the CPR in case of shortage is such that the agent with the higher social value for the resource receives the total available amount of resource. We can now study the impact of heterogeneity in risk tolerance on the optimal sharing rule and on optimal and individual diversification choices.

In the two-moment decision model, the risk is approximated by the variance and agents rank choices according to their mean and their variance. For instance, a risk-averse agent will accept an increase in the variance of his profit only if he receives a compensation in terms of a higher mean profit. The two-moment decision model is compatible with any Von-Neumann Morgenstern utility function as long as the class of available choice options is restricted to distributions that differ from each other only by location and scale (Sinn (1983), Meyer (1987)). For tractability and computation of explicit solutions, we adopt the standard linear specification $V(\mu, \sigma) = \gamma\mu - \alpha\sigma^2$, where μ and σ^2 correspond to the mean and the variance of profit respectively. The parameter α captures the agent's risk-attitude or sensitiveness with respect to σ^2 and γ measures his marginal utility for profit. A positive (negative) value for α corresponds to risk-aversion (risk-seeking) and the null value to risk-neutrality. Assuming α different of zero, under this linear specification, the marginal rate of substitution between profit and risk $\frac{\gamma}{\alpha}$ is a constant.

Agents are assumed to maximize their objective function $\Phi[\Pi_i]$ defined in (2.8). The first term is the expected profit and the second term captures the effect of the variance of profit on the objective function. Let $T_i = \frac{1}{\alpha_i}$ be the agent's risk tolerance and set $\gamma = 1$, such that T_i is also the constant marginal rate of substitution between profit and risk. We call "relative risk tolerance" the ratio $\frac{T_i}{T_i + T_{-i}}$. We assume the two agents have different risk tolerances.

$$\Phi\left[\Pi_i\right] = \mu\left[\Pi_i\right] - \frac{1}{2T_i}\sigma^2\left[\Pi_i\right] \tag{2.8}$$

$$\mu\left[\Pi_i\right] = (1-c)(\bar{H} - R_i) + \frac{1}{b-a}\left[\int_R^b R_i\, dx + \int_a^R \theta_i(x)\, dx\right]$$

$$\sigma^2\left[\Pi_i\right] = \frac{1}{b-a}\left[R_i^2(b-R) + \int_a^R \theta_i^2(x, R_i, R_{-i})\, dx\right]$$

$$- \frac{1}{(b-a)^2}\left[R_i^2(b-R)^2 + 2R_i(b-R)\int_a^R \theta_i(x, R_i, R_{-i})\, dx + \left[\int_a^R \theta_i(x, R_i, R_{-i})\, dx\right]^2\right]$$

Note that all the agents with $R_i > 0$ are subject to the risk on the CPR size. This risk is exogenously given. However, the individual risk born by an agent is endogenous: it depends on his own diversification choice. The more he chooses to rely on the CPR, the higher the risk he bears. The individual risk born by an agent is given by the distribution of his profit function defined in (2.1).

The above specification has several advantages. Firstly, risk preferences are captured by a single coefficient (T_i). Secondly it takes into account three components of the cost of risk: (i) the risk premium that agents incur due to the variability of the resource received from the CPR; (ii) the cost $c(\bar{H} - R_i)$ of relying on the secure resource; (iii) the opportunity cost of self insurance: under the substitution assumption, requiring a unit from the secure resource reduces the claim on the CPR and therefore decreases the quantity of free resource that one receive when there is no shortage. It's an opportunity cost in the sense that the opportunity to receive free units is reduced. Last but not least, we get some computable analytical results for this specification whereas a more general model is more difficult to solve. [7]

7. Samuelson (1970) writes: "Many writers have made valuable contributions the problem of optimal risk decisions by emphasizing to analyses of means and variances. These writers have realized that the results can be only approximate, but have also realized that approximate but computable results are better than none". Liu (2004) goes further: "the popularity of the mean-variance analysis is possibly not because of its precision of approximating the expected utility theory but because of its simplicity and the power of its implications".

2.4.1 Social optimum: optimal sharing rule and diversification

Under the assumption of a perfectly-informed benevolent social planner who can define both the vector of claims $\{R_i\}$ and the sharing rule $\{\theta_i\}$ in order to maximize social welfare, we identify the optimal $\{R_i^*\}$ and $\{\theta_i^*\}$. The social welfare function writes as (2.9) for two agents. The same constraints (C1) and (C2) hold under risk aversion. We solve the model for equal weights and therefore equal social value ($\lambda_1 \upsilon_1 = \lambda_2 \upsilon_2 = 1$).

$$\underset{\{R_i\},\{\theta_i(x,R_i,R_{-i})\}}{max\ SW} = \sum_{i=1,2} \left(\mu\left[\Pi_i\right] - \frac{1}{2T_i}\sigma^2\left[\Pi_i\right] \right) \tag{2.9}$$

Proposition 3: The optimal sharing rule depends on each agent's relative risk tolerance:

$$\theta_i^{**} = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}} x \quad \forall i = 1,2 \tag{2.10}$$

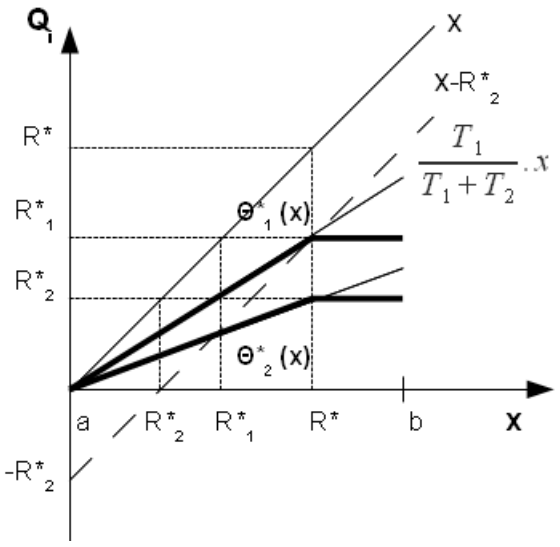
and the optimal individual claim is increasing in relative risk tolerance:

$$R_i^* \;=\; min\left[\frac{T_i}{T_i + T_{-i}} Z^* \;;\; \bar{H} \right] \quad \forall i = 1,2 \tag{2.11}$$

with Z^* unique solution of $g(Z) = 0$ in $[0; b]$ and
$g(Z) = Z^3 - Z^2\left(b + 2a\right) + Z\left(2(T_i + T_{-i})(a - b) + 2ba + a^2\right) - a^2 b + 2(T_i + T_{-i})(b - a)(a + c(b - a))$

Contrarily to the risk neutral case, the optimal solution cannot be identified without specifying a functional form for the sharing rule. We are thus in a second-best world. We consider the three functional forms presented in 2.2.2 and find an optimal rule for each class of rule by optimizing on the parameter: $\{\Omega_i\}$ for the CA rule and $\{\beta_i\}$ for the CL rule. We show that the optimal rule defined for each form are all equivalent for the vector of optimal claims $\{R_i^*\}$: $\Omega_i^* = \beta_i^* = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}}$ (*Figure 2.3*). The social welfare is therefore equal for the three functional forms considered here.

Figure 2.3: Optimal sharing rule under risk aversion



We find that the total claim to the CPR (Z^*) is increasing with the cost of the alternative resource c and increasing with the average quantity available from the CPR (a decrease in a and/or b). The more risk tolerant the agents, the higher the total claim to the CPR.

The optimal sharing rule is a function of relative risk tolerance: the more risk tolerant agent gets a greater share of the CPR in case of shortage. [8] This result can be surprising at first sight as one could think that a risk tolerant agent is better able to bear risk and thus should be allocated less resource when it is scarce. [9] However, it is optimal that less risk tolerant agents invest more in the safe resource: the optimal claim to the

8. The optimal sharing rule is equivalent to the optimal allocation of risks in the risk sharing literature: the share of the undiversifiable risk born by each agent equals the share of his own risk tolerance in the aggregate risk tolerance. This result is obtained under the assumption of expected utility maximization where risk tolerance is the inverse of risk aversion, defined as the rate of decline of marginal utility that would occur for a one euro increase in wealth. It is not clear how we obtain a similar result under the mean-variance assumption where the risk tolerance is the trade-off parameter between these two moments.

9. Considering the optimal sharing rule of the CL form, one find that at optimum, the agent relatively more risk tolerant sees his claim to the CPR restricted by a higher proportion: $\theta_i = R_i - \frac{T_i}{T_i+T_{-i}}(R-x)$. This result is intuitive as it suggests that the more risk tolerant agent should bear more of the resource shortage at optimum (which is equivalent to bearing more of the risk). However, as the more risk tolerant takes more risk at optimum, he ends up with a higher share of the available resource. The rule is indeed equivalent with the CL and CA form and equal to $\theta_i = \frac{T_i}{T_i+T_{-i}}x$.

CPR of less risk tolerant agent is effectively lower than the optimal claim of more risk tolerant agent in (2.11). As a result, they receive a lower share of the risky resource at optimum.

2.4.2 Optimal sharing rule when diversification is a private decision

As in the risk neutral case, the objective is to identify the best sharing rule when it is used by the regulator as an instrument to influence the diversification decisions of the agents. The best sharing rule is such that decentralized Nash equilibrium claims of agents to the CPR coincide with the optimum determined in (2.11), such that the social welfare is maximized. We verify if the optimal sharing rule defined in the previous section (function of individual relative risk tolerances) is to be chosen by a regulator when she can only choose the rule and diversification decisions are decentralized.

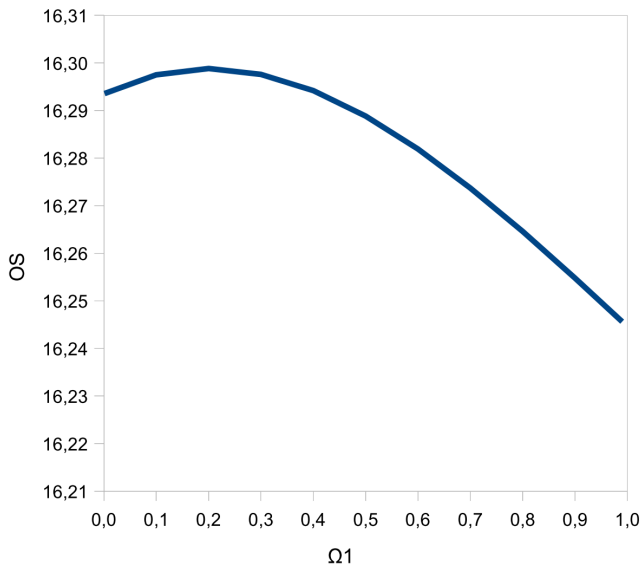
Proposition 4: The constrained-awards rule where resource is shared according to relative risk tolerance maximizes social welfare: $\theta_i^{**} = \frac{T_i}{T_i+T_{-i}}x \ \ \forall i = 1,2$ **when resource diversification is a private decision.**

The Nash equilibrium claims to the CPR corresponds to the optimal claims defined in proposition 3 only for the constrained-awards rule with $\Omega_i = \frac{T_i}{T_i+T_{-i}}$. This rule allocates smaller volumes in case of shortage to the less risk tolerant such that they have an incentive to self-insure more. Any CA rule with another allocation criterion is suboptimal. For example, favoring on the contrary the less risk tolerant agent would crowd out his incentive to self-insure and would therefore reduce social welfare. The constrained-losses and proportional rules are also suboptimal as they introduce strategic interactions between agents. We find that they do not lead to optimal claims to the CPR and reduce social welfare compared to the rule defined in proposition 4.

With a numerical example, one can show the reduction in social welfare when the sharing rule imposed by the regulator to the agents is not the rule defined in proposition 4. *Figure 2.4* shows the social welfare as a function of the sharing rule. We only consider a sharing rule of the CA form and vary Ω_i. It appears clearly that the social welfare maximizing sharing rule of the CA type is such that $\Omega_1 = \frac{T_1}{T_1+T_2}$.

Figure 2.4: Social welfare (labeled OS) according to the sharing rule (Mean-Variance agents with $T_1 < T_2$)

$$a = 0, b = 40, H = 20, c = 0.2, T_1 = 1, T_2 = 4$$



In this third section, we have answered our two questions assuming agents have mean-variance preferences and have the same social value for the resource ($\lambda_i \upsilon_i = 1 \; \forall i = 1, 2$):

(Q1) The optimal claim to the CPR, equal to (2.11), is increasing in the cost of the alternative resource, the risk tolerance of the agents, and the average quantity available from the CPR. The optimal sharing rule is such that each agent receives a share of the CPR proportional to his relative risk tolerance, with the more risk tolerant agent receiving a greater share of the resource.

(Q2) The best choice of a regulator, in charge of implementing the social welfare maximizing sharing rule when agents are free to decide their level of diversification, is the constrained-awards rule with $\Omega_i = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}}$. This sharing rule encourages the less risk tolerant agents to self-insure as they receive a lower share of the CPR in case of shortage.

2.5 Conclusion and policy recommendations

In this paper we analyze different sharing rules of a risky common-pool resource when resource-users have both ex-ante claims and the possibility to invest into a safe substitute resource.

The first innovation of the paper is to address simultaneously the issue of optimal risk sharing and optimal risk taking. Indeed, the sharing rule used to allocate the resource serves as a risk sharing mechanism (Eeckhoudt et al. (2005)) and the investment decision in the secure resource is equivalent to a risk taking decision as it influences the individual risk born by an agent. [10]

We demonstrate that the optimal investment in the safe resource for each agent depends on his marginal social value of the resource or his relative risk tolerance, as well as on the distribution of the CPR size and the cost of the safe resource. Relying too much on the CPR reduces self-insurance and therefore increases individual risk. It also increases the social risk as it increases the pressure on the CPR and therefore the frequency and severity of shortage. Alternatively, investing too much in the safe resource is suboptimal since it is costly. The social optimum is used as a benchmark to compare the performance of sharing rules when agents have the opportunity to diversify their resource use, reduce their reliance on the CPR and therefore decide the level of shortage risk they bear.

Our second contribution is to identify the sharing rule that a regulator should choose in order to induce CPR users to adopt the level of diversification leading to a social optimum. Our model confirms the well-known result that the rules decentralizing the optimum are rules which do not create strategic interactions between users. Any rule sharing the resource according to individual claims (as the proportional or the constrained-losses rules) introduces strategic interactions between agents and fails to encourage agents to diversify optimally their resource portfolio. The constrained-awards

10. Such a risk sharing/risk taking problem has been presented by Gollier (2008) in the context of pension funds and intergenerational risk-sharing. This is one of the only paper in this branch of literature where risks are endogenous. Gollier optimizes jointly on the retirement benefit policy (risk sharing) and on the fund's asset allocation strategy between a risk-free and a risky asset (risk taking). He finds that better inter-generational risk sharing increases the risk taken by the fund and therefore the risk born by each generation. This additional collective risk exposure is only partially offset by the better risk diversification. Our results are unfortunately not comparable with Gollier's as the models are very different (one of the main difference is that the agents face idiosyncratic risks in Gollier (2008)) but we find interesting the similarity on the simultaneous determination of optimal risk sharing and risk taking.

rule with priority parameters fixed exogenously performs better. For a population of risk-neutral agents with heterogeneous values for the resource, the priority parameter of the constrained-awards rule should be such that the agent with the higher social value for the resource gets all the resource available in case of shortage. When agents have heterogeneous risk preference but identical values of the resource, the priority is given to the agent with the higher individual relative risk tolerance.

Further work is to be done in order to design a contract such that CPR users reveal truthfully their risk tolerance to the regulator in order to be able to implement the optimal rule under risk aversion and asymmetric information. We also leave for further research numerical simulations to study the optimal sharing rule when agents are heterogeneous both in their risk tolerance and in their value for water. An other extension could include a three-moments model where agents have a mean-variance-skewness objective function. Recent findings in the finance literature showed that most people react to skewness. This is relevant for examining the sharing rules when agents are sensitive to left-skewed distributions (i.e. there is a higher probability of a drought than an excess water supply, which is more and more likely with climate change).

Our work can help a practical implementation of a scarcity sharing rule, for example in the context of the water law reform that France is presently implementing in order to adjust to the increased frequency of drought. A first recommendation to policy makers is to take into account the impact of the restrictions rule that they implement in scarcity times on farmers choices of water resource use and investments in secure resource. Water restriction rules which are defined as a proportion of existing pumping rights or licences are likely to induce sub-optimal investments in alternative safe resources (such as reservoirs). This is an important result since many countries do rely on such restriction rules. For example in Australia, water rights held by farmers determine their allocation as a proportion of total water available for agriculture. In some regions in Spain, volumes distributed in times of shortage are also calculated as proportions of the subscribed quotas. We recommend that restrictions rules be carefully revised in order to limit strategic interactions of farmers when claiming their annual water licences. Ideally, the rule should take into account the relative marginal social value of water use by each irrigator and his relative risk tolerance. A second message concerns the common practice in France of defining priority users in times of water restriction. Farmers growing high value crops such as vegetables or fruit trees and contracted growers are usually exempted from water restrictions. Our result suggests that this practice is not inefficient as long as

priority ranks are independent from volumetric licences. With the increased variability of water availability, the economic value generated by irrigation should not be the only determinant of water allocation and the risk tolerance of the farmers should also be taken into account. When water available for irrigation is stochastic, contracted growers and fruit producers bear high risk on their profits. These farmers are therefore supposed to be less risk tolerant. As a result, the current practice of exemptions warranting relatively more water to those less risk tolerant farmers in case of drought is inefficient as it reduces their incentives to self-insure whereas it would be optimal from a social point of view that they do so. The social cost of drought can be reduced by using an efficient and transparent restriction rule encouraging efficient risk management decisions at the farm level.

Appendix 2.A: Proofs

Proof Proposition 1

Under the constraint $\theta_2 = x - \theta_1$, the social welfare function simplifies in:

$$SW = \lambda_1(\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \lambda_2(\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2)$$
$$+ \frac{1}{b-a}\int_R^b \left[\lambda_2\upsilon_2 R_2 + \lambda_1\upsilon_1 R_1\right]\, dx + \frac{1}{b-a}\int_a^R \left[(\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2).\theta_1(x, R_1, R_2) + \lambda_2\upsilon_2 x\right]\, dx$$

For $\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2 > 0$, the social welfare is increasing in $\theta_1(x, R_1, R_2)$. As a result, the social welfare maximizing sharing rule is such that $\theta_1(x, R_1, R_2)$ is maximum: $\theta_1^*(x) = min\left[x; R_1\right]$. The optimal sharing rule writes as (2.4) in order to satisfy constraints (C1) and (C2) (as illustrated in *Figure 2.2)*.

$$\theta_1^*(x) = min\left[x\ ;\ R_1\right]$$
$$\theta_2^*(x) = x - \theta_1^*(x)$$

Remark: If we replace $\theta_1 = x - \theta_2$ instead of $\theta_2 = x - \theta_1$, we find that the social welfare is decreasing in $\theta_2(x, R_1, R_2)$. We verify that the optimal sharing rule is also equal to (2.4).

Plugging back the optimal rule defined in (2.4) into the social welfare function, the social welfare function writes as:

$$SW = \lambda_1\left[(\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_{R_1}^R R_1\, dx + \int_a^{R_1} x\, dx\right]\right]$$
$$+ \lambda_2\left[(\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_{R_1}^R (x - R_1)\, dx + \int_a^{R_1} 0\, dx\right]\right]$$

The first order conditions are:

$$\frac{\partial SW}{\partial R_1} = \frac{\lambda_1 c(b-a) + \lambda_1\upsilon_1(a - R_1) - \lambda_2\upsilon_2 R_2}{b-a} = 0$$
$$\frac{\partial SW}{\partial R_2} = \frac{\lambda_2 c(b-a) + \lambda_2\upsilon_2(a - R_1 - R_2)}{b-a} = 0$$

We find the interior solution optimal claims defined in (2.5) :

$$for\ \lambda_1 > \bar{\lambda}\ and\ \upsilon_1 > \upsilon_2 \begin{cases} R^* = & min\left[a + \frac{c}{\upsilon_2}(b-a); 2\bar{H}\right] \\ R_1^* = & min\left[a + c(b-a)\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2}; \bar{H}\right] \\ R_2^* = & min\left[\frac{c}{\upsilon_2}(b-a)\frac{\lambda_1(\upsilon_1 - \upsilon_2)}{\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2}; \bar{H}\right] \end{cases}$$

We also look for the corner solutions (when one of the claim is null)

$$for\ \lambda_1 \leq \bar{\lambda}\ and\ \upsilon_1 > \upsilon_2 \begin{cases} R^* = & R_2^* \\ R_1^* = & 0 \\ R_2^* = & min\left[a + \frac{c}{\upsilon_2}(b-a); \bar{H}\right] \end{cases}$$

$$for\ \lambda_1 > \bar{\lambda}\ and\ \upsilon_1 \leq \upsilon_2 \begin{cases} R^* = & R_1^* \\ R_1^* = & min\left[a + \frac{c}{\upsilon_1}(b-a); \bar{H}\right] \\ R_2^* = & 0 \end{cases}$$

$\bar{\lambda}$ is such that $R_1^* = min\left[a + c(b-a)\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2}; \bar{H}\right] > 0$ for $\lambda_1 > \bar{\lambda}$ (with $\lambda_1 = 1 - \lambda_2$)

$$\bar{\lambda} = \frac{c(b-a) + a\upsilon_2}{2c(b-a) + a(\upsilon_1 + \upsilon_2)}$$

We verify the interior solutions R_1^* and R_2^* are maxima.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 SW}{\partial R_1^2}(R_1^*, R_2^*) &= -\frac{\lambda_1\upsilon_1}{b-a} &< 0 \\ \frac{\partial^2 SW}{\partial R_2^2}(R_1^*, R_2^*) &= -\frac{\lambda_2\upsilon_2}{b-a} &< 0 \\ \left(\frac{\partial^2 SW}{\partial R_1^2}\frac{\partial^2 SW}{\partial R_2^2} - \left(\frac{\partial^2 SW}{\partial R_1 \partial R_2}\right)^2\right)(R_1^*, R_2^*) &= -\frac{\lambda_2\upsilon_2}{(b-a)^2}(\lambda_1\upsilon_1 - \lambda_2\upsilon_2) &> 0 \end{aligned}$$

■

Proof Lemma 1

For $\lambda_i \upsilon_i = \upsilon \; \forall i = 1, 2$, the social welfare function simplifies in:

$$SW \quad = \quad (v - c)(2\bar{H} - R) + \frac{\upsilon}{b - a} \left[\int_R^b R \, dx + \int_a^R x \, dx \right]$$

The social welfare function does not depend on $\{\theta_i\}$. Therefore, any sharing rule such that $\theta_1 + \theta_2 = x$, $0 \leq \theta_i \leq R_i \; \forall i = 1, 2$ is optimal. Moreover, the social welfare is only function of R. Any repartition of the total claim between the two agents is optimal. The optimal claim $R^*$is such that $\frac{\partial SW}{\partial R} = 0$ and equal to:

$$R^* = min \left[\frac{c}{\upsilon}(b - a) + a; 2\bar{H} \right].$$

We verify that R^* is a maximum $\frac{\partial^2 SW}{\partial R^2}(R^*) = -\frac{\upsilon}{b-a} < 0$

The same result holds for one single agent. In that case, the social welfare function is:

$$SW = (\upsilon_i - c)(\bar{H} - R_i) + \frac{\upsilon_i}{b - a} \left[\int_{R_i}^b R_i \, dx + \int_a^{R_i} x \, dx \right]$$

■

Proof Proposition 2

We plug the different sharing rules defined in section 1.2 into the objective function of the agents and compute the corresponding Nash equilibrium. We then compare Nash equilibrium solutions and optimal claims to the CPR defined in proposition 1. When no explicit solution is available for Nash equilibrium, we verify if the FOC conditions of expected profit maximization vanish for $R_i = R_i^* \; \forall i = 1, 2$. If this is not the case, the Nash equilibrium solution does not correspond to optimum and the sharing rule does not maximize social welfare when diversification decisions are decentralized.

CA rule: $\begin{cases} for\ \frac{R_1}{\Omega_1} > \frac{R_2}{\Omega_2}: & \theta_2 = min\left[\Omega_2 x; R_2\right]\ and\ \theta_1 = min\left[x - \theta_2; R_1\right] \\ for\ \frac{R_2}{\Omega_2} \geq \frac{R_1}{\Omega_1}: & \theta_1 = min\left[\Omega_1 x; R_1\right]\ and\ \theta_2 = min\left[x - \theta_1; R_2\right] \end{cases}$

Assuming constraints (C1) and (C2) need to be satisfied, three cases are possible. *Figure 2.1* represents one of them (case 2).

case 1: If $\frac{R_1}{\Omega_1} > R$ and $\frac{R_2}{\Omega_2} > R$:

$E\left[\Pi_1\right] = (\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_a^R \Omega_1 x\, dx\right]$

$E\left[\Pi_2\right] = (\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_a^R \Omega_2 x\, dx\right]$

case 2: If $\frac{R_1}{\Omega_1} < R$ and $\frac{R_2}{\Omega_2} > R$: $\frac{R_2}{\Omega_2} > \frac{R_1}{\Omega_1}$

$E\left[\Pi_1\right] = (\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_{R_1/\Omega_1}^R R_1\, dx + \int_a^{R_1/\Omega_1} \Omega_1 x\, dx\right]$

$E\left[\Pi_2\right] = (\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_{R_1/\Omega_1}^R (x - R_1)\, dx + \int_a^{R_1/\Omega_1} \Omega_2 x\, dx\right]$

case 3: If $\frac{R_2}{\Omega_2} < R$ and $\frac{R_1}{\Omega_1} > R$: $\frac{R_1}{\Omega_1} > \frac{R_2}{\Omega_2}$

$E\left[\Pi_1\right] = (\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_{R_2/\Omega_2}^R x - R_2\, dx + \int_a^{R_2/\Omega_2} \Omega_1 x\, dx\right]$

$E\left[\Pi_2\right] = (\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_{R_2/\Omega_2}^R R_2\, dx + \int_a^{R_2/\Omega_2} \Omega_2 x\, dx\right]$

Rq: the case $\frac{R_1}{\Omega_1} < R$ and $\frac{R_2}{\Omega_2} < R$ is not possible for $R = R_1 + R_2$ and $\Omega_1 + \Omega_2 = 1$.

We compute the Nash equilibrium solution for the three cases and verify ex-post which case is relevant.

If $\upsilon_1 > \upsilon_2$, the Nash equilibrium solution verifies the condition of case 2. The Nash equilibrium solution is:

$$R_1 = max\left[min\left[\Omega_1\left(a + \frac{c(b-a)}{\upsilon_1}\right); \bar{H}\right]; 0\right]$$
$$R_2 = max\left[min\left[\Omega_2 a + \frac{c(b-a)}{\upsilon_2} - \Omega_1\frac{c(b-a)}{\upsilon_1}; \bar{H}\right]; 0\right]$$

The total equilibrium claim is $R = max\left[min\left[a + \frac{c}{\upsilon_2}(b-a); 2\bar{H}\right]; 0\right]$, which is exactly the optimal total claim R^* for $\upsilon_1 > \upsilon_2$. In other words, any CA rule $(\forall \Omega_i)$ decentralizes any optimum $(\forall \lambda_i)$ at the group level.

However, the equilibrium individual claims are optimal only for specific parameters. There are two possibilities

- For $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0, \Omega_1 = 1, \Omega_2 = 0$, the equilibrium individual claims correspond to the interior optimum solution defined in (2.5)
- For $\lambda_1 \leq \bar{\lambda}, \Omega_1 = 0, \Omega_2 = 1$, the equilibrium individual claims correspond to the corner optimum solution defined in (2.6)

If $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$, the Nash equilibrium solution verifies the condition of case 3. The Nash equilibrium solution is:

$$R_1 = max\left[min\left[\Omega_1 a + \frac{c(b-a)}{\upsilon_1} + \Omega_2 \frac{c(b-a)}{\upsilon_2}; \bar{H}\right]; 0\right]$$
$$R_2 = max\left[min\left[\Omega_2\left(a + \frac{c(b-a)}{\upsilon_2}\right); \bar{H}\right]; 0\right]$$

- For $\lambda_1 > \bar{\lambda}, \Omega_1 = 1, \Omega_2 = 0$. the equilibrium claims correspond to the corner optimum solution defined in (2.7)

To summarize, welfare is maximized when the claims' decision is decentralized and the sharing rule is of the CA form only under those three sets of parameters:

$$\begin{cases} \upsilon_1 > \upsilon_2, & \lambda_1 = 1, \Omega_1 = 1 \\ \upsilon_1 > \upsilon_2, & \lambda_1 \leq \bar{\lambda}, \Omega_1 = 0 \\ \upsilon_1 \leq \upsilon_2, & \lambda_1 > \bar{\lambda}, \Omega_1 = 1 \end{cases}$$

Proportional rule: $\theta_i = \frac{R_i}{R} x \ \forall i = 1, 2$

The objective function of each agent $i = 1, 2$ is :

$E[\Pi_i] = (\upsilon_i - c)(\bar{H} - R_i) + \frac{\upsilon_i}{b-a}\left[\int_R^b R_i \, dx + \int_a^R \frac{R_i}{R} x \, dx\right]$

The FOC conditions do not vanish for $R_i = R_i^* \ \forall i = 1, 2$. As a result, the proportional rule does not decentralize the optimal claims. The social welfare is thus necessarily lower than under the optimal CA rule.

CL rule: $\begin{cases} for\ \frac{R_1}{\beta 1} > \frac{R_2}{\beta_2}: \quad \theta_2 = min\left[R_2 - \beta_2(R-x); 0\right]\ and\ \theta_1 = min\left[x - \theta_2; R_1\right] \\ for\ \frac{R_2}{\beta_2} \geq \frac{R_1}{\beta_1}: \quad \theta_1 = min\left[R_1 - \beta_1(R-x); 0\right]\ and\ \theta_2 = min\left[x - \theta_1; R_2\right] \end{cases}$

Assuming constraints (C1) and (C2) need to be satisfied, three cases are possible.

case 1: If $R_1 - \beta_1(R-x)$ and $R_2 - \beta_2(R-x)$ do not vanish for $x \in [a;b]$

$E\left[\Pi_1\right] = (\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_a^R R_1 - \beta_1(R-x)\, dx\right]$

$E\left[\Pi_2\right] = (\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_a^R R_2 - \beta_2(R-x)\, dx\right]$

case 2: If $R_1 - \beta_1(R-x) = 0$ for $x \in [a;b]$ and $R_2 - \beta_2(R-x)$ do not vanish for $x \in [a;b]$: $\frac{R_2}{\beta_2} > \frac{R_1}{\beta_1}$

$E\left[\Pi_1\right] = (\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_{R-R_1/\beta_1}^R R_1 - \beta_1(R-x)\, dx + \int_a^{R-R_1/\beta_1} 0\, dx\right]$

$E\left[\Pi_2\right] = (\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_{R-R_1/\beta_1}^R R_2 - \beta_2(R-x)\, dx + \int_a^{R-R_1/\beta_1} x\, dx\right]$

case 3: If $R_2 - \beta_2(R-x) = 0$ for $x \in [a;b]$ and $R_1 - \beta_1(R-x)$ do not vanish for $x \in [a;b]$: $\frac{R_1}{\beta 1} > \frac{R_2}{\beta_2}$

$E\left[\Pi_1\right] = (\upsilon_1 - c)(\bar{H} - R_1) + \frac{\upsilon_1}{b-a}\left[\int_R^b R_1\, dx + \int_{R-R_2/\beta_2}^R R_1 - \beta_1(R-x)\, dx + \int_a^{R-R_2/\beta_2} x\, dx\right]$

$E\left[\Pi_2\right] = (\upsilon_2 - c)(\bar{H} - R_2) + \frac{\upsilon_2}{b-a}\left[\int_R^b R_2\, dx + \int_{R-R_2/\beta_2}^R R_2 - \beta_2(R-x)\, dx + \int_a^{R-R_2/\beta_2} 0\, dx\right]$

The FOC conditions do not vanish for $R_i = R_i^*\ \forall i = 1,2$ in none of the three cases. As a result, the CL rule does not decentralize the optimal claims and the social welfare is reduced compare to the social welfare under the optimal CA rule.

For the special case where $\upsilon_1 = \upsilon_2$, we show that the FOC evaluated at R_1^* and R_2^* are equal to zero in case 3. We can verify that $R_1 = R_1^*$ and $R_2 = R_2^*$ effectively respect conditions for case 3. Therefore, the Constrained Loss rule, $\forall \beta_i$, can lead to the optimal claims to the CPR when values are equal.

■

Proof Proposition 3

In the case of mean-variance agents, the optimal solution cannot be identified without specifying a functional form for the sharing rule. We consider the three functional forms presented in 1.2. We find an optimal rule for each class of rules by optimizing on the parameter: $\{\Omega_i\}$ for the CA rule and $\{\beta_i\}$ for the CL rule. We do not take into account the full specification of the sharing rules as defined in 1.2 but verify ex-post that the optimal rules satisfies constraints (C1) and (C2) (*Figure 2.3*).

CA rule

We solve the problem under the constraint $\theta_i = \Omega_i x$ with $\sum_{i=1,2} \Omega_i = 1$. The FOC of the problem are $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$ and $\frac{\partial SW}{\partial \Omega_i} = 0$ for $i = 1, 2$.

To solve the FOC we proceed as follows: From $\frac{\partial SW}{\partial \Omega_1} = 0$, we obtain Ω_1^{int} as a function of R_1 and R_2. Replacing Ω_1^{int} in $\frac{\partial SW}{\partial R_1} - \frac{\partial SW}{\partial R_2} = 0$, we obtain three possible solutions: $R_1 + R_2 = a$, $R_1 + R_2 = b$, $R_1 = \frac{T_1}{T_2} R_2$. We can easily verify that $R_1 + R_2 = a$ does not verify the FOC $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$, for $i = 1, 2$. Replacing $R_1 = \frac{T_1}{T_2} R_2$ in $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$ for $i = 1, 2$, we obtain that the solution $\{R_i^*\}$ that maximizes social welfare is given by (2.11). The factor depends on relative risk tolerance defined as the ratio of individual risk tolerance over the sum of risk tolerances in the pair: $\frac{T_i}{T_i + T_{-i}}$. We can verify that the social welfare for this solution $SW\,|_{R_1 = \frac{T_1}{T_2} R_2}$ is higher than $SW\,|_{R_1 + R_2 = b}$. We then replace $\{R_i^*\}$ in Ω_i^{int} to find Ω_i^* defined in (2.10).

Proportional rule

We solve the same problem under the constraint $\theta_i = \frac{R_i}{R} x$. There is no parameter to optimize because there is a unique rule of the form $\theta_i = \frac{R_i}{R} x$ such that constraints (C1) and (C2) are verified.

The FOC of the problem are $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$ for $i = 1, 2$. Solving $\frac{\partial SW}{\partial R_1} - \frac{\partial SW}{\partial R_2} = 0$, we obtain three possible solutions: $R_1 + R_2 = a$, $R_1 + R_2 = \frac{4}{3} b - \frac{1}{3} a$, $R_1 = \frac{T_1}{T_2} R_2$. We can easily verify that $R_1 + R_2 = a$ and $R_1 + R_2 = \frac{4}{3} b - \frac{1}{3} a$ does not verify the FOC $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$ for $i = 1, 2$. Replacing $R_1 = \frac{T_{j1}}{T_2} R_2$ in $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$, we obtain that the solution $\{R_i^*\}$ that maximizes social welfare is given by (2.11). If we replace $\{R_i^*\}$ in $\theta_i = \frac{R_i}{R} x$, we find $\theta_i^{**} = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}} x$. The social welfare is equal to the social welfare with the optimal CA rule.

CL rule

We solve the problem under the constraint $\theta_i = R_i - \beta_i (R - x)$ with $\sum_{i=1,2} \beta_i = 1$.

The FOC of the problem are $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$ and $\frac{\partial SW}{\partial \beta_i} = 0$ for $i = 1, 2$. From $\frac{\partial SW}{\partial \beta_1} = 0$ and $\frac{\partial SW}{\partial \beta_2} = 0$, we obtain $\beta_i^* = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}}$ for $i = 1, 2$. Replacing β_i^* in $\frac{\partial SW}{\partial R_i} = 0$ we obtain $R^* = Z$. For this rule

individual claims are not determined. One can choose for example the repartition defined in (2.11). If we replace $\{R_i^*\}$ in $\theta_i^* = R_i - \beta_i^* (R - x)$, we find $\theta_i^{**} = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}} x$. The social welfare is equal to the social welfare with the optimal CA and proportional rules.

We verify that the total optimal claim to the CPR (2.11) tends to the risk neutrality optimal solution when risk tolerances tends to infinity. The total optimal claim is equal to Z^*, given by the solution of $g(Z)$. The roots of this polynomial in Z tend to the roots of the limit polynomial $g^{\infty}(Z)$ given by:

$$g^{\infty}(Z) = Z\left(2(T_1 + T_2)(a - b)\right) + 2(T_1 + T_2)(b - a)(a + c(b - a)).$$

The solution to $g^{\infty}(Z) = 0$ is $Z = a + c(b - a)$. Thus, $\lim\limits_{T_1, T_2 \to \infty} R^* = \lim\limits_{T_1, T_2 \to \infty} Z = a + c(b - a)$. This is the optimal total claim under risk neutrality with $\upsilon_1 = \upsilon_2 = 1$.

■

Proof Proposition 4

The proof is similar to proposition 2. We verify if the FOC conditions of objective function maximization vanish for $R_i = R_i^* \ \forall i = 1, 2$. If this is the case, the Nash equilibrium solution corresponds to optimum and the sharing rule maximizes social welfare when diversification decisions are decentralized. We consider the different possible cases for $(R_i, \Omega_i, \beta_i) \ \forall i = 1, 2$ and verify ex-post which case is relevant according to the equilibrium solution. We find that the FOC vanish for the optimal solutions $\{R_i^*\}$ only for the CA rule with $\Omega_i = \frac{T_i}{T_i + T_{-i}} x$.

■

Chapitre 3

A Common Pool Resource experiment with sharing rules and self-insurance

Abstract

This chapter uses laboratory experiment to study the impacts of the rules used to share a Common Pool Resource on the private decisions of resource diversification. Agents can self-insure against the risk of shortage by substituting an alternative safe but costly resource to the free but risky CPR. The sharing rule plays the role of a coordination device to reach the optimal level of investment in the secure resource. We compare the rules from the bankruptcy literature (contrained-equal awards, constrained-equal losses, proportional) and a rule that allocates no resource in case of shortage (traditionally used in CPR experiments). We find that the best coordination institution is the no allocation rule but efficiency and reliability are higher with the constrained-equal awards rule. Rules which are defined as a proportion of claims, such as the proportional and constrained-equal losses rule induce sub-optimal investments in alternative safe resources. We interpret our results in the context of water management in France.

Keywords: Bankruptcy; Common-pool resource; Coordination; Experiment; Irrigation; Risk aversion; Self-insurance; Sharing rules; Water management

Résumé

Cet article utilise l'économie expérimentale pour étudier l'effet de la règle de partage d'une ressource en bien commun sur les choix individuels de diversification, quand les usagers peuvent substituer une ressource alternative sécurisée à l'usage de la ressource commune gratuite mais risquée. La règle de partage peut faciliter la coordination pour atteindre le niveau optimal d'investissement dans la ressource sûre. Nous comparons les règles de la littérature sur les faillites (égalitaire, partage de pénurie et proportionnelle) avec une règle qui n'alloue aucune ressource en cas de pénurie (règle traditionnellement utilisée dans les expériences de ressource en bien commun). Nous trouvons que la règle qui n'alloue aucune ressource en cas de pénurie facilite la coordination mais l'efficacité et la fiabilité sont plus élevées avec la règle de partage égalitaire (CEA). Les règles qui tiennent compte des demandes dans la ressource commune, comme la règle proportionnelle ou la règle de partage de la pénurie (CEL), incitent au sous-investissement dans la ressource sécurisée. Nous interprétons nos résultats dans le contexte de la gestion de l'eau en France.

Mots clés : Faillite ; Ressource en bien commun ; Coordination ; Expérience ; Irrigation ; Aversion au Risque ; Auto-assurance ; Règles de partage ; Gestion de l'eau

JEL Codes: Q28, C92, Q25

Please note that there may be some repetitions with chapter 2. We did not try to avoid them in order to facilitate the reading article per article. Comments and suggestions are especially welcome as this article has not been submitted yet.

3.1 Introduction

Availability of natural resources managed as common-pool resources (CPR) is very often variable and uncertain since it is often dependent on climatic conditions. The stock of natural resources available to users or the replenishment rate of renewable resource is rarely known with certainty (Budescu et al. (1995)). For example, surface water available for irrigation is highly variable across seasons. When CPR users have ex-ante claims over the resource and resource size is not sufficient to cover all the individual claims, there is a need for a rationing scheme, i.e. a sharing rule defining the share of the total resource allocated to each user. [1]Users therefore face the risk of getting a lower quantity of the CPR than planned and claimed. When the possibility exists, they may want to diversify their resource use. For example they can reduce their dependence on the free but risky CPR by investing into a costly but safer substitute resource which thereby provides an opportunity to self-insure against resource shortage from the CPR (Ehrlich and Becker (1972)). Agents decide individually on the level of risk they want to bear and the cost they are willing to pay for self-insurance. However, from a social point of view, if investment in self-insurance is too high, it inefficiently increases the cost of risk management and if investment is too low, the risk of shortage is higher than optimal. Agents should coordinate in order to invest the optimal total level of self-insurance. Since the sharing rule determines the share of resource allocated to each agent in case of shortage, it is likely to affect agents' diversification decisions and coordination success. This paper compares the sharing rules as coordination institutions toward the optimal level of self-insurance.

Such a situation of CPR shortage arises frequently in irrigated agriculture, when several farmers use the same water resource for irrigation. In France for instance, each farmer has to fill a form for a water use licence in October in order to be authorized to withdraw the corresponding volume from the river and cover his irrigation needs for the coming year. The decision is made before knowing the amount of irrigation water that will be available for the coming season and the needs of the other farmers. In times of shortage, when water flows are too low to fulfill licences, irrigation water is shared through a system of temporary restriction roasters, managed and controlled by public authorities. Farmers can also partially secure their access to irrigation water by investing into farm

1. A market mechanism can be used to allocate the available resource efficiently to the highest value users. However, claims do rarely constitute tradable property rights and not all resources can be traded on a spot market.

storage, pumping equipment for groundwater, or by signing delivery contracts with water companies guaranteeing pressurized water from storage dams, etc. Taking up those opportunities, they agree to forego part of their claims on the river water. Clearly, by relying more on private resources, they relieve the collective pressure on the river and reduce the probability that total demand exceeds total availability, mitigating as well the severity of shortage when it occurs. From a social welfare perspective, there is a need to find the right balance between economic losses due to the risk of water shortage and investment costs in alternative safe resources. Water managers must take into account the impact of the sharing rule they implement in times of drought on the self-insurance investment decisions of farmers in more secure resources.

France is presently implementing a water law reform. One of the aspects of the reform is the redefinition of the restriction rules in drought time. The inherent inertia of a social system makes extremely difficult any prediction of water users' reactions to policy change in the water allocation scheme (Goetz et al. (2008)). Given the high cost and imprecise measurement that confronts collection of field data (with the implementation of pilot experiments, for example), alternative methods are required for assessing the performance of various sharing rules. Experimentation provides a mean to test the instruments at no social cost. This paper uses laboratory experiment to analyze how the sharing rule impacts the individual trade-off between relying on a free but uncertain CPR and investing in a secure alternative resource.

The experimental literature on CPR has mostly considered only the case where no resource is allocated if the resource size is not sufficient to cover all the claims (thereafter named "no allocation rule") (Budescu et al. (1995)). Alternatively, in some papers, the scarce resource is shared proportionally to claims (Walker and Gardner (1992)). However, in practice, various sharing rules are observed in the context of water management. These empirical rules are similar to the ones described in the bankruptcy literature, that is providing well-behaved and acceptable sharing rules in bankruptcy situations in order to award the remaining resources of the firm (the estate) between its creditors (Aumann and Maschler (1985), Herrero and Villar (2001), Moulin (2001)).[2] Water allocation and river sharing problems are akin to bankruptcy problems: while creditors face the risk of loosing their capital investment when the firm's profits are too low, agricultural water users bear the risk of not receiving water, whereas they

2. These rules have in common that they are the only three rules that simultaneously satisfy an intuitively reasonable set of axioms: equal treatment of equals, scale invariance, composition, path-independence and consistency

have made production plans requiring water use, when existing water rights cannot be fulfilled because of low available flows (Ansink and Weikard (2009)).

The best-known rule is the *proportional rule*, which recommends that awards be proportional to initial claims. The proportional rule is widely used in Australia: water users hold water rights which give them access to a proportion of the overall amount of seasonal water available. The *constrained equal-awards rule* shares the estate equally amongst creditors, subject to the condition that no creditor receives more than his initial claim. A dual formulation of equality, focusing on the losses creditors incur as opposed to what they receive, underlies the *constrained equal-losses rule*. It proposes to share losses equally across creditors, subject to the condition that no creditor ends up with a negative award. In France, water is shared through an administrative procedure which is often implemented as a restriction of allowed irrigation times. For example left bank farmers are allowed to irrigate on the first two days of the week, and right bank farmers are allocated the last two days... This is akin to the constrained-equal awards rule. However, if we assume that farmers calibrate their pumping capacity on their volumetric licence, the rationing procedure is closer to the proportional rule as the volume of water pumped during the restricted irrigation time is proportional to the pumping capacity.

The experimental literature on bankruptcy issues is fairly new. Two experimental papers have studied how subjects reach an agreement on bankruptcy problems in the lab (Gachter and Riedl (2006), Herrero et al. (2010)).[3]The focus of these papers is how to cope with bankruptcy after it has occured (ex-post). Claims are exogenously given in the experiment and there is no mention of the potential ex-ante impact of the rule on the claims. On the contrary, Di Cagno and Spallone (2010) test experimentally the effectiveness of a mechanism designed to be an optimal bankruptcy law both before (ex-ante) and after (ex-post) a financial distress. Ex-post efficiency implies that remaining assets are directed toward their highest valued use. Ex-ante efficiency implies that entrepreneurs realize an optimal amount of effort into the firms. Their experiment measures the level of effort induced by two mechanisms that can be compared

3. These papers consider a situation where the authority in charge of solving a bankruptcy problem resort to a non cooperative procedure to choose the sharing rule. Each subject is assigned to a player position, corresponding to a particular claim in the bankruptcy problem (given exogenously). In each round, the subjects choose simultaneously a rule among three possible rules. Individual choices are transformed into a collective one by a voting procedure. Round payoffs (losses) are determined by the difference between their claims and the share of the available resource assigned to them according to the rule chosen.

to bankruptcy rules. The experiment presented in this paper is a mix as it compares the different rules mentioned above on the basis of their impact on the ex-ante claims of the agents. Rules are exogenously given (treatment variables) and the claims to the CPR are endogenous and constitute the decision task of each agent.

We compare the rules on the basis of their efficiency (total gains) and reliability (variability of total gains). We also study the impact of the rules on the coordination level. We rank the instruments according to these different criteria. In light of the "collective action" nature of the problem (Coman (1911), Ostrom (2011)), it's useful to identify the most efficient coordination institution among the restriction systems or sharing rules. We find that coordination success is higher with the no allocation rule but efficiency and reliability are higher with the constrained-equal awards rule. Rules which are defined as a proportion of claims, such as the proportional and the constrained-equal losses rules, induce sub-optimal investments in alternative safe resources, therefore lower gains, and are less reliable. We interpret our results in the context of water management in France.

The paper is organized as follows. Section 3.2 describes the experimental design. Section 3.3 summarizes the theoretical predictions. Results are presented in section 3.4. Section 3.5 concludes.

3.2 Experimental design

3.2.1 Description of the game

The experiment is based on a symmetric 2-players CPR game. In a traditional CPR game, subjects receive an initial endowment and can decide to invest a share of this endowment in a CPR. The remaining share is kept by the subject. The game is presented differently in this experiment in order to represent the situation of irrigation water use presented above. Each subject has to claim a total of 20 units and can allocate this total demand between a CPR of uncertain size (denoted account B) and a safe alternative (denoted account A).

The units claimed are not received systematically. Each unit received yields a payoff of 1 Euro (payoffs are given directly in Euros; no experimental currency is used).[4] All the units claimed to account A are received with certainty but it is required to pay a per-unit cost of 0.2 Euros . Because of environmental and strategic uncertainty, the number of units received from account B can be lower than the number of units claimed to B. The total number of units available from account B is randomly drawn at the end of the experiment and can take two values: $l = 12$ or $h = 40$ units.[5] The number of units received from account B by a subject depends both on his claim to B, the aggregate claim to B and the random draw of the total number of units. If the resource size is compatible with the sum of claims, each subject receives his claim. When total claim is greater than the number of units available, rationing is organized according to the sharing rule that determines which share of the total number units available is received by each subject. Both low resource size and high claims can create a situation where rationing is necessary.

4. We have chosen to have a linear utility function in order to limit the complexity of the experiment. Some of the rules are complex enough not to add additional complexity with a concave utility function and decreasing marginal value of each unit of water received. The disadvantage of this choice is that it flattens the gain function. The design is therefore subject to the "flat maximum criticism" (Harrison (1989)), according to which deviations from the Nash equilibrium may be caused by low monetary incentives since the costs of such deviations are often rather small.

5. The assumption on the resource size is modified compared to the theoretical model of chapter 2 where the resource size is distributed uniformly between a and b. This assumption simplifies the experimental design and reduces the cognitive demand to the subjects. Moreover, the theoretical predictions under this assumption can more easily be tested. The theoretical predictions presented in section 3.3 show that all rules lead to the same total claim to the CPR at equilibrium. Any difference between the sharing rules observed with the experimental data will therefore challenge this theoretical prediction.

The subjects face the following trade-off: claiming units to account B yields a better payoff if one receives his claim from account B (because the units claimed to B are free); On the other hand, increasing the number of units claimed to B reduces the likelihood that these units are received (because it increases the probability and severity of shortage). In case of rationing, the opportunity cost of each unit claimed to B but not received is equal to 0.8 Euros. This corresponds to the gain that would have been obtained by claiming this unit to account A minus the cost (1-0.2 Euros per unit).

This design relaxes two features of the original design of CPR games. In early CPR games with uncertain resource size (Budescu et al. (1995)), a zero claim to the CPR yields a zero payoff. Moreover, if the total claim exceeds the resource size, subjects get nothing; otherwise they get their claim. The underlying reason is that it is assumed that the resource is destroyed when total claim is greater than resource size (therefore no resource can be allocated). The first difference we introduce is the existence of a substitute resource to the CPR. All the units that are not claimed to the CPR must be claimed to the alternative resource. As a result, one can receive a payoff without using the CPR. Resource diversification was previously introduced in CPR games by Walker and Gardner (1992) and Keser and Gardner (1999). In their settings, each appropriator has an endowment of resource which can be invested in the CPR or invested in a safe outside activity. The second difference concerns the outcome in case of resource shortage. Whereas early CPR experiments have considered the case where the resource is destroyed in case of over-lapping claims, in many real-world examples (as in the example of water management), access to the resource is not prohibited but only restricted according to a pre-defined sharing rule. The complete interdiction to use the resource available does not satisfy the acceptability criteria. In Walker and Gardner (1992), the resource is shared proportionally (more precisely, the payoff from the CPR depends on aggregate investment into the CPR and on the appropriator investment as a percentage of the aggregate). This experiment enables to explore this idea further and study the impact of different sharing rules on CPR use.

In a between subject design, we compare the traditional rule of no resource allocation (NA) with three sharing rules that have been studied in the bankruptcy literature: the proportional rule (PROP) , the constrained equal-awards rule (CEA) and the constrained equal-losses rule (CEL). These bankruptcy rules are expected to increase total gains compare to the no allocation rule as they make some resource available to users even when the resource size is insufficient to fully cover existing claims. On the other

hand, the no allocation rule increases the losses due to coordination failure and therefore creates stronger incentives to coordinate. As a result, a better coordination with the no allocation rule could lead to higher total gains.

3.2.2 Experimental procedure

The experiment was conducted at the University of Montpellier experimental lab (LEEM) with a total of 156 subjects drawn from the undergraduate student population. We have conducted 2 sessions for each treatment with 10 pairs in each session, resulting in 20 independent observations per treatment (there are less subjects in one session, see *Table 3.1* for details). Care was taken to ensure that no subject participate in more than one session. Common knowledge of the rules of the game was implemented by reading aloud the instructions (see Appendix 3.B).

Table 3.1: Experimental Design

	Rule	Stages Order	Number of subjects	Number of periods (CPR game)
1	NA	R-S-CPR	20	10
2	CEA	R-S-CPR	20	20
3	PROP	R-S-CPR	20	20
4	CEL	R-S-CPR	20	10
5	CEL	R-S-CPR	16	20
6	NA	S-R-CPR	20	20
7	CEA	S-R-CPR	20	20
8	PROP	S-R-CPR	20	20

R: risk aversion elicitation task
S: strategic uncertainty elicitation task
CPR: main task (CPR game)

Subjects were randomly divided into fixed pairs for the duration of the experiment. Interactions were restricted to simultaneous decisions via computer terminals. No communication between subjects was allowed. The game was repeated 20 periods by the same pair of 2 players (two sessions have only 10 periods). In order to avoid hedging behaviors and end-of-the game effect, we told the subjects that the game will be repeated but we did not tell them the number of periods. We simply informed them

when it was the end of the experiment. The players had complete information about the payoff function for each player and the values of all parameters. In the beginning of each period, the 2 players simultaneously and independently made their decisions.

We have elicited beliefs by asking subjects to declare the number of units they expect the other player to claim to B. At the end of each period, each player learned the difference between his prediction $\hat{b_{-i}}$ and the claim of the other player to the CPR b_{-i}, as well as his gain from this prediction. Beliefs elicitation allows to examine the source of deviations from equilibrium behavior and help distinguish between failure to best respond to beliefs and failure to form accurate beliefs. Belief elicitation was incentivized with a scoring rule defined such that the closer a subject's stated belief from the actual claim, the higher his payoff (Croson (2000), Gachter and Renner (2010)). [6]

$$\prod_{i}^{prediction} = \begin{cases} 20\ Euros & if\ \hat{b_{-i}} = b_{-i} \\ \frac{18}{|\hat{b_{-i}} - b_{-i}|}\ Euros & if\ \hat{b_{-i}} \neq b_{-i} \end{cases}$$

At any time during the game, subjects could use a simulator to compute their gains in each state of nature. They needed to enter their claim and their belief about the other's claim in the simulator. They could also look at the history of the game.

At the end of each period, each player was informed about the total claim to the CPR and about his gains in the two possible states of nature (12 or 40 units available from the CPR). We did not reveal the gains in each period in order to avoid wealth effects. [7] The draw of the state of nature (12 or 40) is realized only at the end of the experiment. Moreover, we used a random lottery choice payment procedure, where we randomly payed for a single situation (for one round): either for the accuracy of subjects' stated beliefs or the payoff associated with the decision task. [8]. The random-lottery incentive

6. Several studies indicate that subjects report their true beliefs when incentivized by the Quadratic Scoring Rule (Sonnemans and Offerman (2001), Nyarko and Schotter (2002)). This function is designed such that it is optimal for a risk neutral player to report his true belief. The scoring rule we used is not proper in the sense that it is not incentive compatible for stating the true belief. However, our primary interest in this paper is not whether beliefs are truthful. We have preferred to use a simple scoring rule rather than confusing subjects and shifting their attention from the main decision task to the belief elicitation task.

7. There is a potential wealth effect if subjects modify their decisions according to the gains already obtained (for example by taking more or less risk than in the previous periods).

8. We are aware that subjects asked to state beliefs may have different behaviors in the main decision task. There have been some experimental evidence of incentivized belied elicitation modifying the observed behaviors in public good and coordination games (Croson (2000), Gachter and Renner

system has become the almost exclusive incentive system for individual choice, and numerous studies have used and tested it (Starmer and Sugden (1991), Hey and Lee (2005), Lee (2008)). This gives us the highest possible impact of risk aversion on any decision as stakes in Euros are higher for each decision (Heinemann et al. (2004)).

Prior to the CPR game, we elicited two types of risk preferences: exogenous risk aversion and aversion to strategic uncertainty. Risk aversion has been shown to have significant impact on decisions in CPR game (Budescu et al. (1995), Chermak and Krause (2002)) as well as in coordination game (Heinemann et al. (2009)).[9]We elicit risk aversion in a lottery-choice task to capture the sensitivity of subjects to exogenous risk. The more risk averse a subject, the less willing he is to choose the option that requires coordination, as the other can be considered as a source of uncertainty. We have also elicited subjects' aversion to strategic uncertainty with a coordination game framed in a similar way as the risk aversion elicitation task (see Bohnet and Zeckhauser (2004) and Heinemann et al. (2009) for similar procedures). We controlled for order effects by having sessions where the risk task was run before the strategic task (RS) and vice versa (SR) (*Table 3.1*).

Our elicitation method is derived from the investment game (Gneezy and Potters (1997), Charness and Gneezy (2009)). In a investment game, subjects choose how to allocate their initial endowment between a sure asset and a risky asset. Clearly, the higher the investment in the risky asset, the less risk averse the subject. For coherence with respect to the decision task, we framed the elicitation tasks in the same terms as the CPR game: account A is the sure asset and account B the risky asset.[10] The subject always gets the units claimed to account A but have to pay 0.2 Euros per unit claimed to account A. On the contrary, it is free to claim units from option B but the number of units received from option B is uncertain. In the exogenous risk aversion elicitation task, the number

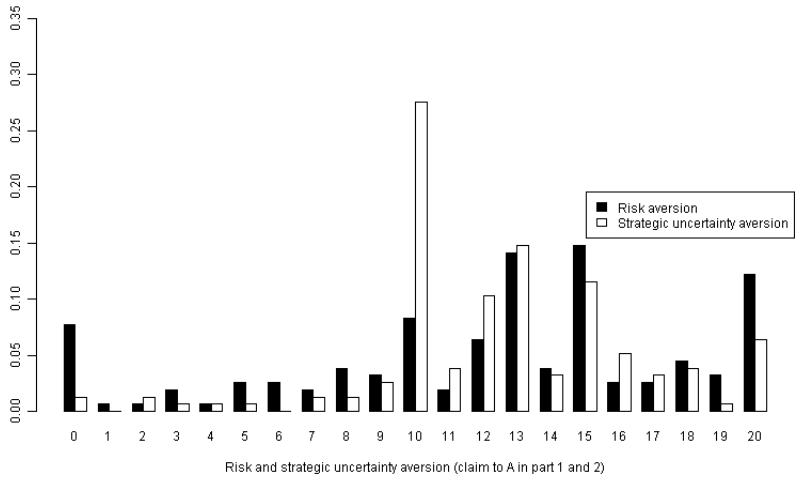
(2010), Blanco et al. (2010)). Nevertheless, we expect this effect of belief elicitation to be constant across treatment, thus not impacting the comparison of the different sharing rules. Moreover, paying randomly either for the accuracy of subjects' stated beliefs or pay the payoff associated with the game outcome makes hedging no longer possible (Blanco et al. (2010)). Indeed, high earnings in the tasks related to the game studied cannot compensate for low earnings in the belief elicitation task, or vice versa. We keep overall incentives per task the same in expected terms.

9. Devetag and Ortmann (2007) write that the effects of risk attitudes on the emergence of coordination successes have hardly been studied. Early attempts by Cooper et al. (1990, 1992) to control for risk preferences through the Roth and Malouf (1979) procedure in the stag hunt game were "laudable but problematic".

10. Wilcox (2009) shows that when elicitation task context and target task context differ, "there is no guarantee that risk attitudes measured in the two tasks will be consistent unless very specific estimation techniques are used".

of units received from account B depended on the flip of a coin: if head is drawn, one receives twice the units claimed to account B; if tail is drawn, one receives 0 unit from account B. We used the number of units claimed to the safe option (A) as a proxy measure of risk aversion (aversion against participating in a lottery against nature). In the strategic uncertainty aversion elicitation task, the number of units received from account B depends on the total claim to option B, hence on the other's decision: if the total claim to option B is lower or equal to 20 units, one receives two times the units claimed to account B; if the total claim is strictly more than 20 units, one receives 0 units from account B. Subjects therefore had to coordinate on a total claim of 20 units to account B in order to maximize their joint gains. We use the number of units claimed to the safe option (A) as a measure of strategic uncertainty aversion (aversion against participating in a coordination game). The decisions in the risk aversion and strategic uncertainty aversion elicitation tasks are two of the 22 decisions that can be selected for payment at the end of the experiment. *Table 3.4* (presented with other tables at the end of the chapter) and *Figure 3.1* present the results of the two preference elicitation tasks.

Figure 3.1: Distribution of Risk and Strategic Uncertainty Aversion



This histogram represents the distribution of the individual claims to the safe account (A) -in frequency-.Each bar represents the proportion of subjects that have claimed the corresponding number of units to A.
We find a significant order effect for the risk aversion task: subjects are significantly more risk averse if they play the risk task first (two sided Mann Whitney test p value=0.026). There is no significant order effect for the strategic task (two sided Mann Whitney test p value=0.857). We therefore present the results of preference elicitation separately for the two orders.
In average, claim to A is not significantly different in the two tasks, thus suggesting that subjects are neither more nor less willing to play against nature than to depend on another subject's behavior (Wilcoxon paired test p-value=0.45 for order RS, p-value=0.12 for SR - we have similar results with paired t test).
We find that the claims in the risk task and strategic task are significantly and positively correlated in the two sub-samples (Spearman= 0.22, pvalue=0.013 for the RS subsample and Spearman= 0.17, pvalue=0.08 for the SR subsample).
One observes more variation in the responses to the risk aversion elicitation task than in the strategic uncertainty task.

3.3 Theoretical predictions

Assume 2 agents, who both have to allocate a total demand of 20 units between two resources. The individual claim of agent i to the CPR resource (account B) is denoted b_i, with $0 \leq b_i \leq 20$. In the experiment, the claim decision is a discrete choice (integer between 0 and 20) but we solve the equilibrium and optimum assuming the choice is continuous. The claim to the safe resource (account A) is the complementary decision: $20 - b_i$. The cost of each unit claimed to the safe resource is c per unit.

Denote x the total number of units available from account B. x takes two values l and h with equal probability ($l < h$). The vector of claims on account B is denoted $b = (b_1, b_2)$ and the total claim $B = b_1 + b_2$. If $B \leq x$, each agent receives the number of units claimed. If $B > x$, a bankruptcy or claim problem occurs in the CPR for a pair (b, x). A solution to the claims problem is a function $\theta(b, x)$, a rule that associates with each problem in the class a division of the estate x between the claimants. $\theta_i(b, x)$ is the amount of CPR allocated to agent i.

We consider the special case where the size of the resource is sufficient to satisfy demand in the state of nature h whatever the total claim to B ($h = 40$). As a result, each player receives his claim to B when the state of nature is h and the sharing rule $\theta(b, l)$ applies only when the state of nature is l and $B > l$. The objective function of each agent $i = 1, 2$ is equal to the expected payoff given by:

$$\begin{aligned} E\left[\prod_i\right](b_i, b_{-i}) &= \tfrac{1}{2}\prod_{i,h}(b_i, b_{-i}) + \tfrac{1}{2}\prod_{i,l}(b_i, b_{-i}) \\ with\ \prod_{i,h}(b_i, b_{-i}) &= (1-c).(20-b_i) + b_i \\ \prod_{i,l}(b_i, b_{-i}) &= \begin{cases} (1-c).(20-b_i) + \theta_i(b,l) & if\ B > l \\ (1-c).(20-b_i) + b_i & if\ B \leq l \end{cases} \end{aligned} \tag{3.1}$$

We consider sharing rules that have the following properties in order to guarantee that no agent receives more than his claim or a negative number of units, and the total amount of resource is allocated in case of shortage ($B > l$)

$$\begin{aligned} &(1) \qquad 0 \leq \theta_i(b, l) \leq b_i \\ &(2) \qquad \sum_{i=1,2} \theta_i(b, l) = l \end{aligned}$$

We examine three classical solutions to the claims problem (the "bankruptcy rules") that fulfill these two conditions.

The proportional rule (PROP): For all (b, l) and $i = 1, 2$,

$$\theta_i^{PROP}(b, l) = \frac{b_i}{B} l$$

The constrained equal-awards (CEA): For all (b, l) and $b_2 \geq b_1$,

$$\begin{aligned} \theta_1^{CEA}(b, l) &= min\{b_1; \frac{l}{2}\} \\ \theta_2^{CEA}(b, l) &= min\left[l - \theta_1^{CEA}; b_2\right] \end{aligned}$$

It guarantees that no agent receives more than his claim and the total amount of resource x is allocated when $B > l$. For example, if agent i's claim is less than $\frac{l}{2}$, the other agent is allocated all the resource left $l - b_i$.

The constrained equal-losses (CEL): For all (b, l) and $b_2 \geq b_1$,

$$\begin{aligned} \theta_1^{CEL}(b, l) &= max\{0; b_1 - \frac{1}{2}(B - l)\} \\ \theta_2^{CEL}(b, l) &= l - \theta_1^{CEL} \end{aligned}$$

It guarantees that all the resource l is allocated when $B > l$ and the awards cannot be negative.

We also consider the no allocation rule, which captures the rule traditionally used in CPR game. This rule does not fulfill condition (2) and therefore some resource may be wasted in state l.

The no allocation rule (NA): For all (b, l) and $i = 1, 2$,

$$\theta_i^{NA}(b, l) = 0$$

Nash Equilibrium

We determine the non-cooperative solution of the game when the rule introduces strategic interactions between players. A Nash equilibrium $b^* = (b_1^*, b_2^*)$ is a profile such that for each risk neutral player $i = 1, 2$:

$$b_i^* = arg\ max\ E\left[\Pi_i\right](b_i, b_{-i})\ with\ 0 \leq b_i^* \leq 20$$

For a risk-neutral expected profit maximizer agent, the first-order conditions are:

$$\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} = \begin{cases} -(1-c) + \frac{1}{2}\frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i} + \frac{1}{2} & if\ B > l \\ -(1-c) + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = c > 0 & if\ B < l \end{cases}$$

The solution depends on the sign of $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i}$ for $B > l$

NA rule:

If $B > l$, $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} = c - \frac{1}{2}$.

For $c < \frac{1}{2}$, $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} < 0$ for $B > l$ and player i's best reply function is a corner solution given by $r_i(b_{-i}^*) = l - b_{-i}^*$. The Nash equilibrium satisfies $b_i^* = r_i(b_{-i}^*)$ for all i. Solving simultaneously for both agents, one finds the unique aggregate Nash equilibrium: $B^* = l$.

For $c > \frac{1}{2}$, $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} > 0$ for $B > l$ and the Nash equilibrium satisfies $b_i^* = 20$ for all i.

CA rule:

If $B > l$, $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} = \begin{cases} -(1-c) + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = c & if\ b_i < \frac{l}{2} \\ -(1-c) + \frac{1}{2} = c - \frac{1}{2} & if\ b_i \geq \frac{l}{2} \end{cases}$.

For $c < \frac{1}{2}$, $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} < 0$ for $B > l$ and $b_i \geq \frac{l}{2}$. Player i's best reply function is a corner solution given by $r_i(b_{-i}^*) = l - b_{-i}^*$ and $b_i^* \geq \frac{l}{2}$. Solving simultaneously for both agents, one finds the unique Nash equilibrium: $b_i^* = b_{-i}^* = \frac{l}{2}$ and therefore $B^* = l$.

For $c > \frac{1}{2}$, $\frac{\partial E\left[\Pi_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial b_i} > 0$ for $B > l\ \forall b_i$ and the Nash equilibrium satisfies $b_i^* = 20$ for all i.

CL rule:

If $B > l$, $\frac{\partial E[\prod_i](b_i, b_{-i})}{\partial b_i} = \begin{cases} -(1-c) + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} = c - \frac{1}{4} & if\ b_i - \frac{1}{2}(B-l) \geq 0 \\ -(1-c) + \frac{1}{2} = c - \frac{1}{2} & if\ b_i - \frac{1}{2}(B-l) < 0 \end{cases}$.

For $c < \frac{1}{4}$, $\frac{\partial E[\prod_i](b_i, b_{-i})}{\partial b_i} < 0$ for $B > l\ \forall b_i$. Player i's best reply function is a corner solution given by $r_i(b^*_{-i}) = l - b^*_{-i}$. The Nash equilibrium satisfies $b^*_i = r_i(b^*_{-i})$ for all i. Solving simultaneously for both agents, one finds the unique aggregate Nash equilibrium: $B^* = l$.

For $\frac{1}{4} < c < \frac{1}{2}$, $\frac{\partial E[\prod_i](b_i, b_{-i})}{\partial b_i} < 0$ for $B > l$ and $b_i - \frac{1}{2}(B-l) < 0$. Player i's best reply function is a corner solution given by $r_i(b^*_{-i}) = l - b^*_{-i}$ and $b^*_i > l$, which is not possible with the parameters of the experiment. In that case, there is no equilibrium solution.

For $c > \frac{1}{2}$, $\frac{\partial E[\prod_i](b_i, b_{-i})}{\partial b_i} > 0$ for $B > l\ \forall b_i$ and the Nash equilibrium satisfies $b^*_i = 20$ for all i.

PROP rule:

If $B > l$, $\frac{\partial E[\prod_i](b_i, b_{-i})}{\partial b_i} = -(1-c) + \frac{1}{2}\frac{b_{-i}}{B^2}.l + \frac{1}{2}$.

$\frac{\partial E[\prod_i](b_i, b_{-i})}{\partial b_i} < 0$ for $B > l$ *and* $b_i < \frac{1-2c}{l}B^2$. Player i's best reply function is a corner solution given by $r_i(b^*_{-i}) = l - b^*_{-i}$. Solving simultaneously for both agents, one finds the unique aggregate Nash equilibrium $B^* = l$ with $b^*_i < (1-2c).l\ \forall i$.

As a result, with the parameters of the experiment ($c = 0.2$), the four rules lead to the same aggregate Nash equilibrium

$$B^* = l$$

This aggregate equilibrium is compatible with multiple vectors of individual claims for some of the rules. *Table 3.2* gives the multiple equilibria for each rule.

Table 3.2: Nash Equilibria

Rule	Nash Equilibria (bi*;b-i*)
NA	(12;0)(11;1)(10;2)(9;3)(8;4)(7;5)(6;6)(5;7)(4;8)(3;9)(2;10)(1;11)(0;12)
CEA	(6;6)
CEL	(12;0)(11;1)(10;2)(9;3)(8;4)(7;5)(6;6)(5;7)(4;8)(3;9)(2;10)(1;11)(0;12)
PROP	(7;5)(6;6)(5;7)

Moreover, equilibrium predictions for the aggregate claim to B are unchanged under the assumption of risk aversion under the parameters of the experiment and assuming subjects have CRRA utility functions (see Appendix 3.A).

Optimum

The optimal risk-neutral solution to the game maximizes total pair payoff given by:

$$\sum_{i=1,2} E\left[\prod_i\right](b_i, b_{-i}) = \begin{cases} (1-c).(40-B) + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}\sum_{i=1,2}\theta_i(b,l) & if\ B > l \\ (1-c).(40-B) + B & if\ B \leq l \end{cases} \quad (3.2)$$

The first-order conditions are:

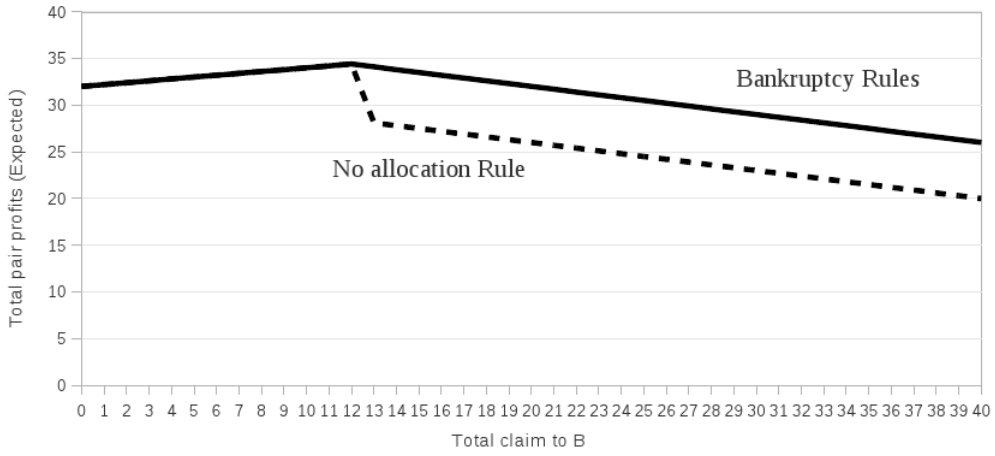
$$\frac{\partial \sum_{i=1,2} E\left[\prod_i\right](b_i,b_{-i})}{\partial B} = \begin{cases} -(1-c) + \frac{1}{2} < 0 & if\ B > l \\ -(1-c) + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} > 0 & if\ B < l \end{cases}$$

Maximizing (3.2) over B, one finds that the optimum solution is a total claim to the CPR equal to l (provided $c < \frac{1}{2}$). Any division of this total claim between the two agents is optimal. This result stands for any sharing rule θ.

Note that the aggregate Nash equilibrium is equal to the optimal total claim. In other words, coordination on the lowest quantity available from account B (l) is maximizing both total and individual gains. However, agents face a coordination problem as each player must make a specific choice that is valuable only if the other player makes the complementary selection.Multiple equilibria increase strategic uncertainty and the probability of a coordination failure (Van Huyck et al. (1990)). The unicity of Nash equilibrium for the CEA rule is expected to facilitate coordination, whereas the three other rules have multiple equilibria. However, the cost of deviation from Nash equilibrium is higher with the NA rule as no resource is allocated with probability one half if total claim is higher than l. This rule is therefore also expected to lead to high coordination levels. *Figure 3.2* shows the total gains according to the total claim and the sharing rule. It clearly shows that deviation from a total claim of 12 units is more costly in terms of total gains with the NA rule than with the three bankruptcy rules.

Along with coordination failure, a second concern of coordination games is which equilibrium arises. When games have multiple Nash equilibria, this is problematic from a forecasting perspective. What factors of the game determine which is the reasonable or plausible equilibrium? In this game, agents cannot agree on a ranking of the possible coordination outcomes: there is no Pareto-dominant equilibrium among all the possible Nash equilibria. Moving from one equilibrium to the other, one player has higher gains and the other has lower gains, the total gains being constant.

Figure 3.2: Cost of Deviation from Total Optimal Claim



The concept of risk dominance enables to select the equilibrium that minimizes the risk for each player. The least risky decision is the one that has the greatest number of possible strategies resulting in it being the best response. We apply the definition of risk-dominance based on Nash products given by Harsanyi and Selten (1988) to determine which of the multiple Nash equilibria are risk dominant: an equilibrium is risk dominant if the Nash Product (product of the surpluses generated through successful coordination) of that equilibrium is greater than the Nash Product of every other equilibrium. The risk dominant equilibrium is $(b_1; b_2) = (6; 6)$ for the PROP and the NA rule. However, for the CEL rule, there are 7 risk-minimizing equilibria among the 13 equilibria -$(b_1; b_2) = (9; 3)(8; 4)(7; 5)(6; 6)(5; 7)(4; 8)(3; 9)$-. In order to discriminate among these equilibria, one has to use the concept of focal point introduced by Schelling (1960). A focal point represents a natural outcome for the game. If participants believe that others will focus on one of the Nash equilibria, it makes it the outcome of their interaction. The issue of selection then reduces to a search for a "natural" focal point for the game. One obvious arrangement, if subjects are averse to inequality, is sharing equally the total claim among the two participants $(b_1; b_2) = (6; 6)$. This is the unique pure strategy symmetric equilibrium. As a result, one expect the equilibrium $(6; 6)$ to be the more frequent for each rule: it's the unique Nash equilibrium for the CEA rule, it is the risk dominant equilibrium for the PROP and the NA rule, and an obvious focal point for the CEL rule.

The use of the Nash equilibrium concept to predict individual behaviors has been challenged by experimental data in CPR games (Walker and Gardner (1992), Keser and Gardner (1999)) as well as coordination games (Heinemann et al. (2009)). As Keser and Gardner mentioned, "if individuals in a CPR game do not play Nash equilibrium, then policies based on that equilibrium's predictions are suspect". Experimental data are therefore a useful complement to theory to compare the rules. Section 4 presents the results of the experiment. We analyze whether the sharing rule has an impact on self-insurance levels, efficiency and reliability as well as on coordination levels around the optimal use of the CPR.

3.4 Results

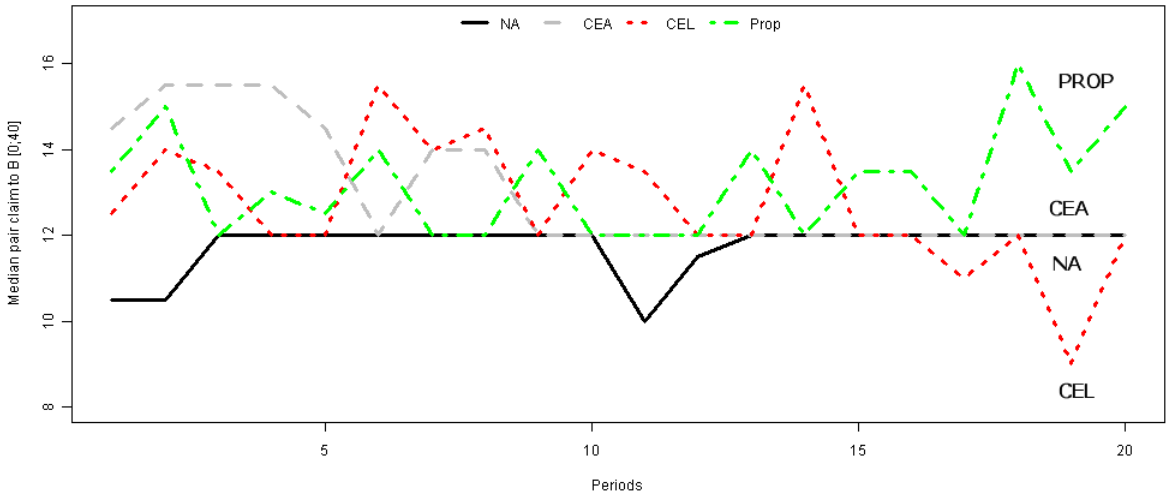
The results are presented according to three dimensions. We first compare the use of the CPR and the costly substitute in the different treatments. Then, we compare the performance of the rules in terms of efficiency and reliability. As lower performance can be due to the difficulty of subjects to coordinate, we finally compare the rules according to their performance as coordination devices.

For each indicator, we first consider some descriptive results on the effect of the rule using comparisons implied by the treatment plan. We then estimate parametric regression models to control for more potentially confounding co-variates and to gain further insights. *Tables 3.4* to *3.7* present the results and are at the end of the chapter.

3.4.1 Coordination on optimal total claim

According to theoretical predictions, the total claim to B should be the same in all treatments (equal to the optimal total claim of 12 units). Median total claims to B over all periods are equal to the optimal claim for all treatments (*Table 3.4*). *Figure 3.3* presents the evolution of the median total claim to B in a pair over all periods. The no allocation rule leads to a total claim closer to the optimum than the other rules in the first period. After 10 periods, the median total claim converges toward the optimal solution in treatments CEA as well. The deviation from optimum remains positive for the CEL and PROP rule in the last period.

Figure 3.3: Median Pair Claim to B



We run nonparametric two-sided Mann-Whitney tests with exactly one summary statistic value per pair (in order to satisfy the statistical independence required for this kind of a test): the median total claim to B in a pair over all periods.[11] One observes that the median total claim is significantly lower for the NA rule compared to each of the bankruptcy rules but there is no significant difference across the bankruptcy rules (*Table 3.5*). The hypothesis of equal total claim to B with all the four rules is thus partially rejected and we observe a small treatment effect. However, the simple descriptive statistics may not deliver good evidence as the high variability in decisions make it hard to detect significant differences in the statistical noise. Therefore, we provide additional results from multivariate regression models which evaluate the impact of the treatment on the decisions made by pairs.

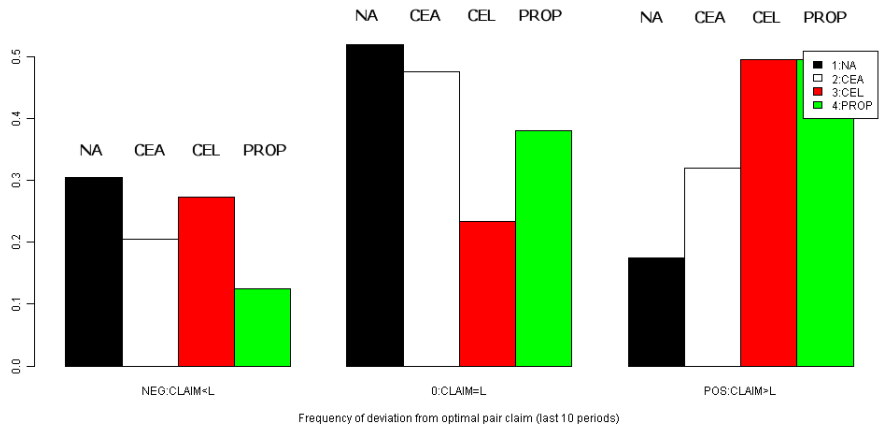
11. The use of the median (rather than the mean) is favored in order to reduce the impact of large deviations from the optimal claim observed in very few groups. We also ran the tests on the mean total claim to B and obtained similar results.

Column 1 of *Table 3.6* presents the results from a random effects generalized least squares regression, where the dependent variable is the absolute difference between the observed total claim and the optimal total claim. The deviation of total claim to account B are left-censored at zero when optimum is reached and right-censored at 28 (40-12=28). Since ordinary linear regression models are not suited for this problem, we rely on Tobit regression. We include treatment dummies as explanatory variables, omitting the dummy corresponding to the NA treatment. We find that deviation from optimal claim is significantly higher with the PROP and CEL rules, but there is no significant difference between the CEA and the NA rule. The deviation from optimal claim reduces over time (as suggested by the negative sign of the period variable) but the learning effect occurs at a decreasing rate (positive sign of the squared period variable).

The same pattern is observed by comparing the frequency of optimal claim to B. In the first period, 4 pairs out of 20 have reached the optimal claim in the NA treatment (3/20 pairs in CEA, 2/18 pairs in CEL and 1/20 pair in PROP). In the last period, 11 pairs out of 20 have reached the optimal claim in the NA treatment (10/20 pairs in CEA, 5/18 pairs in CEL and 7/20 pair in PROP). It confirms the catch-up of the CEA rule whereas the CEL and PROP rules have a higher frequency of coordination failure. *Figure 3.4* presents the % of groups where pairs deviate positively (total claim >12), negatively (total claim <12),and do not deviate (total claim =12), from optimal claim for the last 10 periods (each group appears 10 times). The CEA rule and the NA rule have the highest frequency of optimal claim and the lowest frequency of shortage.[12] Shortage frequency is not a sufficient indicator of performance as a total claim lower than low resource size reduces the risk of shortage but it is also suboptimal. The NA rule has the highest frequency of claims lower than optimal claims (frequency of 30%): it is suboptimal as it provides too strong incentives to self-insure to the subjects. The CEL rule creates heterogeneous reactions among subjects: total claim to B is higher than optimal in 49% of the cases, but it is also lower than optimal in 27% of the cases.

12. When the total claim is higher than the optimal claim, shortage occurs with probability one half (it occurs only in the low scenario).

Figure 3.4: Frequency of Deviation from Optimal Total Claim to B



We found some evidence that the CEA and NA rules lead more often to CPR claims which are closer to the optimal claim. This can be explained by the fact that the cost of deviation from equilibrium is higher for the NA rule and this rule therefore provides more incentives to coordinate on the total optimal claim. On the contrary, the PROP and CEL rules create incentives to increase the individual claims to B since if the total claim is higher than resource size, the share of the resource received by each subject increases with the individual claim to B. Such an incentive is not present for the CEA rule, which therefore lead to a total claim closer to the optimal claim. However, the objective for the regulator is not to reach optimal claim to B per se but rather to maximize total gain from resource use. We therefore compare total gains generated under each rule.

3.4.2 Efficiency and Reliability

Efficiency ratio are often used in experiments to compare the observed gains with the potential maximum gains (in our case, equilibrium gains). Because the total claim to B is equal for all the rules at equilibrium, the equilibrium total gains are also equal: 34.4 Euros for a pair. As a result, there is no difference between comparing treatments according to total gains or efficiency ratio (the denominator is the same). The efficiency is high with the four instruments (95,5% in average). The median total gains over all periods are not significantly different across rules (see non-parametric test in *Table 3.5*).

However, further results provide some evidence of significant differences across rules.

Column 2 of Table 3.6 presents the results of a random effects generalized least squares regression, where the dependent variable is the total gains in a pair (the average between total gains if head is drawn and total gains of tail is drawn). The gains are higher with the CEA rule but not significantly. In *column 3 of Table 3.6* , we control for the absolute deviation from optimal claim. Unsurprisingly, the lower the deviation, the higher the total gains. Even if the observed claims are closer to optimum with the no allocation rule than with the three bankruptcy rules, average total gains remain lower. This is due to the fact that no resource is allocated in the low scenario when the total claim is higher than resource size, whereas there are l units available. On the contrary, the bankruptcy rules enable to allocate fully the resource available and therefore lead to higher profits.

Efficiency alone is not sufficient to judge the performance of an instrument. Another significant feature to take into account is the variability of efficiency, which gives an insight in the reliability of instruments (Cochard et al. (2005)). Indeed, the regulator in charge of choosing a sharing rule may not only be interested in a rule that performs well in average but also in a rule that leads to foreseeable and reliable outcomes. The standard deviation of total gains is taken as a measure of reliability. It is significantly higher with the NA and PROP rule (test of equality of variance in *Table 3.5*). Most of the variance is due to inter-group variability (as opposed to inter-period variability). The higher variance with the no allocation rule is due to the fact that no resource is allocated when the resource size is low if the total claim is higher than the resource available. Comparatively, the difference between high and low scenarios is lower when resource is shared according to the three other sharing rules.

Rules have been compared according to their efficiency and reliability. The CEA rule is the best rule according to these criteria. The next sub-section presents further insights on the difficulty of subjects to coordinate on the optimal claim to the CPR. Rules are compared according to their ability to facilitate subjects' coordination.

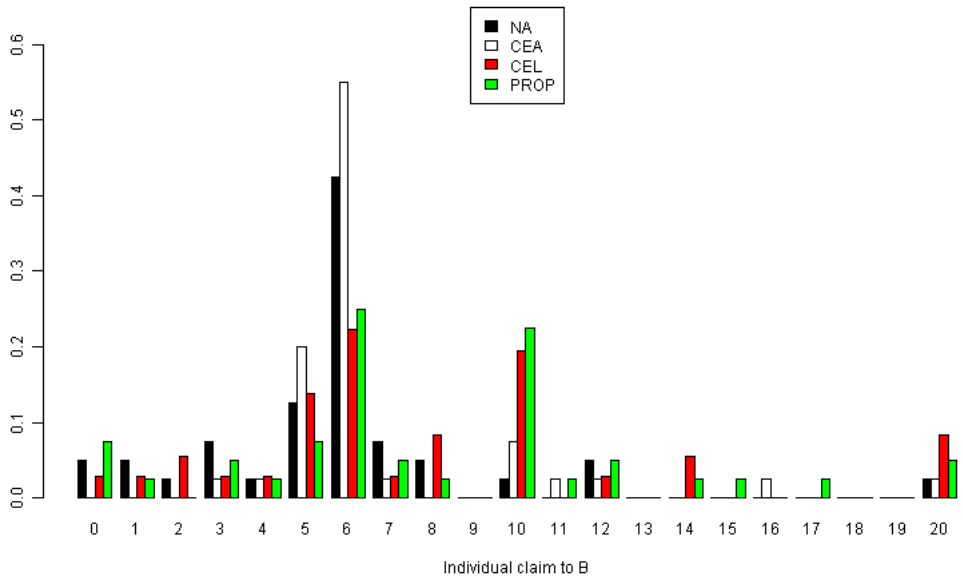
3.4.3 What explains coordination ?

Coordination is analyzed according to three criteria. Firstly, under the presence of multiple theoretical equilibria, we look at which equilibrium more often arises. The differences in coordination success across rules can be due to the number of equilibria. Secondly, beliefs are analyzed and prediction errors are compared across rules. The ability to predict what the other is going to play can potentially be impacted by the complexity of the sharing rule. Lastly, we compare best-response rates. Failure to best-respond is another potential determinant of differences in coordination level across rules. It may be easier for subjects to find out what is the aggregate equilibrium and the best response under some rules than others.

Coordination under the presence of multiple equilibria

The total Nash equilibrium claim is equal for all rules but there are multiple individual Nash equilibria as presented in *Table 3.3*. We look at individual data in order to determine which equilibria arise more frequently. *Figure 3.5* presents the frequency of choice of each possible individual claim to B for each rule in the last period (it is assumed that the coordination is maximal in the last period). Claiming 6 units to B is clearly a focal point in all treatments. It is the median as well as the modal choice, with 42.5% of the subjects making that choice for the NA rule, 55% for the CEA rule, 22% for the PROP rule and 25% for the CEL rule.

Figure 3.5: Frequency of individual claim to B (last period)



In the first period, 8 of the 10 pairs that have converged towards the total optimal claim across all treatments coordinate on the symmetric equilibrium with each subject claiming 6 units. In the last period (period 10 or 20 according to the sessions), 24 of the 33 pairs that have converged towards the total optimal claim coordinate on the symmetric equilibrium with each subject claiming 6 units. Other equilibria observed in the last period are $(b_1; b_2) = (0; 12)$ (3 pairs), $[(1; 11)]$ (2 pairs), $(2; 10)$ (2 pairs) and $(5; 7)$ (3 pairs).

There is significant differences across rules in the variance of individual choices. Graphically (*Figure 3.5*), we observe more heterogeneous choices with CEL and PROP rules as compared to the CEA and NA rules. The distribution of individual claims in the last period has a sharper peak and shorter thinner tails in the CEA and NA treatments, while the distribution has more rounded peak and fatter tails in the PROP and CEL rules. We observe individual claims to B above 12 only for the PROP and the CEL rule in the last period. These subjects bet on the draw of a "tail" but if "head" is drawn, they are sure to receive less units than their claim. More risky choices are observed with the CEL and PROP rules as they create greater incentives to increase claims of free units (from the B account) since the number of units received from B depends

positively on claims to this account. All these results suggest that coordination is more difficult under the CEL treatment.

In order to understand the determinant of individual decisions, we report in *Table 3.7* additional results from multivariate regression models which evaluate the contribution of different factors on the decisions made by each subject individually. We run random effects generalized least squares Tobit regressions, where the dependent variable is the individual claim to account B (censored between 0 and 20).[13] They confirm that claims are significantly higher with the bankruptcy rules as compared to the NA rule. The coefficient of the PROP rule is the highest as this rule creates incentives to claim more to B. Risk aversion significantly reduces individual claims to B at the 1% level, whereas aversion to strategic uncertainty has also a negative but less significant effect (10% level).

The subjects are expected to adjust their individual claims according to the total claim to B as they learn this information after each period . Of course this can be the case only if they guess what is the total optimal claim. In columns 2 and 3 of *Table 3.7*, the regression includes a dummy variable indicating if total claim to B in the previous period was higher (positive deviation) or lower (negative deviation) than the optimal claim (the reference situation is when the total claim is optimal in the previous period). We run two different regressions for the NA and the bankruptcy rules as the results strongly differ. In the NA treatment, as expected, subjects significantly reduce their claims if the total claim was higher than 12 in the previous previous. As already mentioned, the incentives to do so are higher in the NA treatment than in the bankruptcy treatments because the cost of deviation is higher. On the contrary, in the bankruptcy rules regression, we find that subjects significantly increase their claims when total claim deviates from 12, whatever the sign of the deviation (compare to the case where there is no deviation). Its surprising to note that subjects increase their claims when the total claim is already too high. This results are mainly driven by the PROP rule: if subjects realize that coordination will fail anyway, they are better off increasing their own claim in order to get an higher share of the resource.

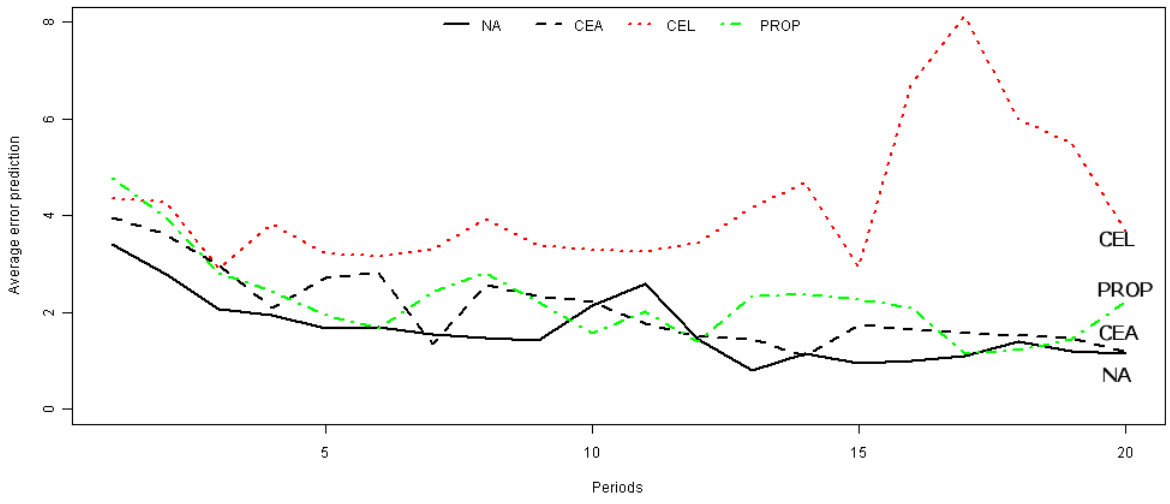
13. We also run a complementary random effects generalized least squares regressions, where we cluster the errors at the pair level to capture any unobserved heterogeneity in the pair (the tobit model does not enable to cluster error terms). As the results are similar in both regressions, we only presents the results from the Tobit model.

Prediction errors and failure to best-respond

We further study two possible explanations to coordination failure: difficulty in anticipating others' behavior and failure to best respond to expectations. We investigate the impact of these two biases in the different treatments.

The more accurately the outcome of a game can be predicted the lower the strategic uncertainty and the more effective the coordination and ultimately the design of mechanisms used to establish efficient outcomes (Heinemann et al. (2009)). We measure predictability by the prediction error - equal to the difference between stated beliefs on the other's claim to B and the observed claim of the other -. Average errors are decreasing over time (*Figure 3.6*). Column 1 of *Table 3.8* presents results from a random effect linear regression model for the error of prediction. The errors are higher in all treatments compared to the no allocation rule but the treatment effect is significant only for the CEL rule. Errors decrease over time but learning occurs at a decreasing rate (as suggested by signs of the period and sq-period variables). This learning effect is observable on *Figure 3.6*. We have no particular explanation for the observed sharp increase in the average prediction error in periods 16 and 17 with the CEL rule.

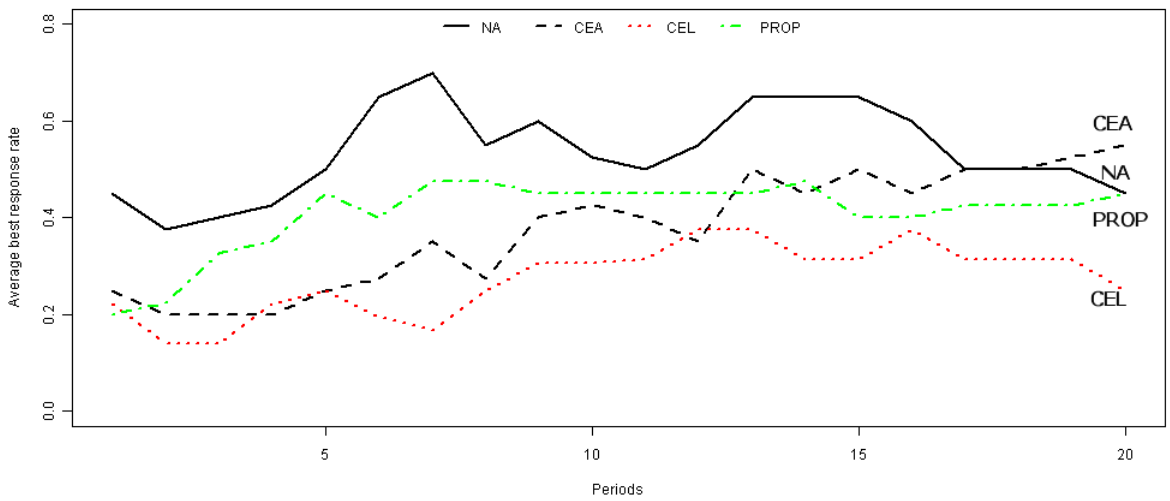
Figure 3.6: Average Error of Prediction



In order to achieve coordination, subjects must not only be able to predict accurately the other player's behavior but also to make their own choice such as too reach the best aggregate outcome. In this game, subjects should coordinate on claiming a total of 12 units. We compare stated beliefs and decisions and measure the best-response rate. A best response is such that the claim to B is equal to the difference in absolute value between the total optimal claim 12 and the belief on the other's claim to B. The best response rate is the percentage of subjects that best respond to their beliefs on the other's claim.

Figure 3.7 shows the evolution of best-response rate over time. The best-response rate are significantly different across treatments. The best-response rate is low for the CEA rule at the beginning but learning is higher for this rule. CEA has the higher best-response rate in the last period. However, according to a chi-square frequency test, these rates are not significantly different from a random distribution (probability of 50% of chance to best respond) in the last period. Column 2 of *Table 3.8* presents results from a random effect Probit model explaining the probability of best responding. The Probit model examines the factor the subjects' decisions to best respond or not. The estimated probability to best respond is significantly lower in all the bankruptcy treatments as compared to the reference (NA): the probability is reduced by 38% for CEL, 30% for CEA and 27% for PROP (marginal effects). The lower cost of deviation with the bankruptcy rules can explain that subjects best respond less often. Individual risk preferences have no significant effect on the probability to best respond. Subjects learn over time (at decreasing rate) as the probability to best respond increases with period. Column 3 of *Table 3.8* presents estimates from a random effects regression model on the magnitude of deviation from the best-response claim. The results mirror those from the Probit model and show that the amount of deviation (in absolute value) is significantly higher in the three bankruptcy treatments compared to the no allocation rule and decreases over time.

Figure 3.7: Average Best-Response Rate



Finally, we compare "deviation from coordination" - defined as the difference between the observed claim and the claim that would guarantee that equilibrium is reached, which is equal to 12 minus the claim of the other -. Both deviation from best response and prediction error contribute to coordination failure. Notice that the deviation from coordination is not necessarily equal to the sum of deviation from best response and prediction error as the two effects may cancel out. Column 4 of *Table 3.8* presents estimates from a random effects linear regression model on the magnitude of deviation from coordination. The model specification includes the amount of deviation from the best-response claim and the prediction error, on top of the usual treatments and risk preferences variables. Both the failure to best respond and the error in prediction explain significantly the amount of deviation from coordination, with the first factor having a stronger effect. It suggests that the most difficult task is not to predict the other's decision but to understand what is the aggregate equilibrium. There is no remaining treatment effect once the deviation from best response and the prediction error are taken into account.

The results are summarized in *Table 3.3*, where the four rules are ranked from 1 (best) to 4 (worse) according to each criterion. Taking into account all criteria, the most performant rule is the CEA rule.

Table 3.3: Multi-criteria ranking of the sharing rules

		NA	CEA	CEL	PROP
Efficiency	Total gains (Table 3.4 and 3.6)	4	1	3	2
Reliability	Variability of total gains(Table 3.4)	4	2	1	3
	Frequency of total optimal claim (Fig 3.4)	1	2	4	3
Coordination	Error prediction (Table 3.8)	1	2	4	3
	Frequency of best response rate (Table 3.8)	1	3	4	2

3.5 Conclusion

When CPR users have ex-ante claims over the resource and resource size is not sufficient to cover all the individual claims, there is a need to establish a scarcity-sharing rule. When agents have access to a substitute secure resource, rules should not only allocate the resource in case of scarcity but also facilitate the coordination of individual decisions on the optimal resource use, i.e. the optimal claim to the CPR and the optimal investment in a secure resource. There is a trade-off between having access to a free resource and supporting the risk of shortage. Investing a total of $l = 12$ units in the safe resource maximizes both individual and total gains. The sharing rule can act as a coordination mechanism to influence the coordination towards a total claim to the CPR equal to the optimal claim. We compare rules that are described in the bankruptcy literature to share the available resource and used in the practice of water management: the constrained-equal awards, the constrained-equal losses and the proportional rules. The no allocation rule (the traditional rule used in CPR game) is used as a benchmark. In theory, the four rules lead to the same total claim to the CPR and the same efficiency at equilibrium. However, we observe differences across rules in the experiment.

We find that the most efficient coordination institution is the no allocation rule but efficiency and reliability are higher with the constrained-equal awards rule. The no allocation rule favors coordination as it is easy to understand and the costs of coordination failure are high. However, the total gains are reduced and the variability increased as no resource is allocated in case of over-lapping claims. The rule facilitates coordination but at the cost of reduced efficiency. We find that the best rule is the constrained-awards rules as its simplicity facilitates coordination and it limits strategic interactions between agents. Rules which are defined as a proportion of claims such as the PROP and CEL rules induce sub-optimal investments in alternative safe resources and therefore lead to an increase in the frequency and severity of shortage.

Our work can contribute to the improvement of scarcity sharing rule implemented in the fields. France is presently implementing a water reform in order to adjust to the increased frequency of drought. A first message to policy makers is that water restriction rules which are defined as a proportion of existing pumping rights or licences create strategic interactions among farmers and are likely to induce sub-optimal investments in alternative safe resources (such as reservoirs). This is an important result since many countries do rely on such restriction rules. For example in Australia, water rights held

by farmers determine their water allocation as a proportion of total water available for agriculture. In some regions in Spain, volumes distributed in times of shortage are also calculated as proportions of the subscribed quotas. According to our results, such rules can potentially lead to too low levels of self-insurance, lower profits from irrigation and higher variability. Our result suggests that the French practice of sharing water through temporary restriction roster systems (where left bank farmers are allowed to irrigate on the first two days of the week, and right bank farmers are allocated the last two days) is not inefficient as it is close to the constrained-equal awards rule. The restrictions are independent from volumetric licences and this reduces the incentives of farmers to rely too much on the river water.

The work should be extended to capture further elements of the field reality and therefore increase the external validity of the results. For example, the heterogeneity that exists in the fields among farmers is not captured in the experiment. Further work could include an extension to bigger groups with subjects of different types within the group to see what is the more performant rule in an heterogeneous environment. Our theoretical work presented in chapter 2 suggests that the optimal sharing rule in the presence of heterogeneous agents depend on the marginal value from resource use and risk tolerance. We could also run a treatment where the rule is unknown at the moment of deciding the claims to each resource. The available resource would be shared randomly once its size is known. The use of this alternative benchmark could provide insights on the gains from announcing clearly the sharing rule and see whether these gains differ according to the rule. Contrarily to the first intuition, one may observe that the announcement of the rule reduces the incentives of the agents to self-insure and therefore reduces efficiency. An other treatment would introduce the possibility for subjects to simultaneously choose the sharing rule (with a collective voting procedure as in Gachter and Riedl (2006), Herrero et al. (2010)) and their claims to the secure resource and the CPR. Such a treatment will better capture the essence of the ongoing reform in France: committees will be constituted at the sub-basin level (Organismes Uniques) and responsible for collectively defining the sharing rule simultaneously with the allocation of water volumetric licences. Finally, conducting a field experiment with farmers (with non-neutral terms) could increase the external validity comparing with a laboratory experiment with students. If farmers may have a better understanding of the issues at stake around water, it's not obvious how it will impact the coordination in the experiment.

Table 3.5: Pairwise Non parametric and Parametric tests

Note: The pairwise estimates use the rows as the comparison base. The first number reported is the U statistic from the two-sided Mann-Whitney rank-sum test (or the F statistic for the variance test). The second number in parenthesis is the p-value.

	CEA	CEL	PROP
Mann-Whitney Rank-Sum Tests for the difference in median total pair claim to B			
NA	108(0.009)	83(0.003)	107(0.008)
CEA		153.5(0.4369)	184(0.664)
CEL			183(0.940)
Mann-Whitney Rank-Sum Tests for the difference in median total gains in a pair			
NA	196(0.922)	213.5(0.329)	210(0.792)
CEA		238(0.090)	178(0.552)
CEL			204.5(0.478)
Tests for the difference in variance in total gains in a pair			
NA	1.49(0.385)	2.63(0.049)	0.67(0.390)
CEA		0.57(0.248)	2.24(0.087)
CEL			3.93(0.006)

Chi square frequency test for the best response rate (chi square statistic in the last period)

NA	0.20
CEA	0.20
CEL	3.5
PROP	0.20

The critical values for df=1, two-tailed, and alpha=0.01 are 0.00016 and 6.635. Since our chi2 is within this range for each treatment, the observed frequencies are not significantly different from a draw from the random distribution.

Table 3.4: Descriptive statistics (all periods)

	NA			CEA			CEL			PROP		
	Avg	Me	Sd	Avg	Me	Sd	Avg	Me	Sd	Avg	Me	Sd
Total claim B	11.63	12	4.27	15.16	12	6.51	14.08	12	7.4	16.24	13	8.02
Freq opt claim	0.61			0.36			0.22			0.34		
Freq shortage	0.28			0.44			0.48			0.5		
Total gains	32.51	34.2	2.95	33.23	34	1.75	32.93	33.2	1.65	32.79	33.8	2.2
Efficiency	0.94	0.99		0.97	0.99		0.96	0.96		0.95	0.98	
Ind claim to B	5.92	6	3.5	7.57	6	4.18	7.05	6	5.03	8.16	6	5.15
Error pred	1.86	1	2.77	2.13	0	3.25	3.97	2	5.04	2.3	0	3.73
Freq BR	0.53			0.38			0.25			0.41		
Risk av	12.35	13	5.04	12.65	13	5.66	12.89	15	5.91	11.03	12	6.09
Strategic av	12.53	13	3.38	11.7	12	5.09	13.19	13	3.33	12.62	12	3.26

Table 3.6: Random Effects Estimates for Pair Claims and Gains

Explanatory variables	Deviation from optimal claim (Tobit)	Total pair gains (GLS)	
CEA	2.480	0.596	1.185***
	(2.218)	(0.486)	(0.225)
CEL	4.628**	0.393	1.306***
	(2.275)	(0.503)	(0.235)
PROP	4.142*	0.161	1.217***
	(2.217)	(0.486)	(0.226)
|Deviation from optimal claim|			-0.312***
			(0.00721)
Period	-0.503***	0.0903***	0.0265
	(0.108)	(0.0313)	(0.0209)
sq-Period	0.0149***	-0.00289**	-0.000999
	(0.00516)	(0.00147)	(0.000981)
Constant	2.290	32.10***	33.18***
	(1.627)	(0.368)	(0.183)
Observations	1,360	1,360	1,360
Number of groups	78	78	78
Chi2	55.85	16.98	1924
Prob>Chi2	0	0.00195	0
df	4	4	5

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Table 3.7: Random Effects Tobit Estimates for Individual Claims

Explanatory variables	Individual claim to B		
	(All rules)	(NA)	(CEA,CEL,PROP)
CEA	2.128***		
	(0.808)		
CEL	1.803**		
	(0.836)		
PROP	2.640***		
	(0.809)		
Risk av	-0.143***	-0.154*	-0.138**
	(0.0524)	(0.0882)	(0.0604)
Strat av	-0.131*	-0.0697	-0.146*
	(0.0771)	(0.132)	(0.0881)
Negative deviation (t-1)		-0.262	0.742**
		(0.321)	(0.338)
Positive deviation (t-1)		-0.701**	1.130***
		(0.346)	(0.295)
Constant	8.764***	8.487***	10.38***
	(1.203)	(1.992)	(1.256)
Observations	2,720	600	2,120
Number of subjects	156	40	116
Chi2	25.64	7.339	25.63
Prob>Chi2	0.000105	0.119	3.75e-05
df	5	4	4

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1
Individual claim to B is censored between 0 and 20

Table 3.8: Random Effects Models on Error and Best-response Rate

Explanatory variables	Error (GLS)	BR (Mgl Effects Probit)	Dev BR (GLS)	Dev coord claim (GLS)
CEA	0.588	-0.3068***	1.867**	-0.0704
	(0.477)	(0.099)	(0.820)	(0.288)
CEL	2.212***	-0.3875***	2.859***	0.163
	(0.786)	(0.071)	(0.788)	(0.313)
PROP	0.807	-0.2726***	2.705**	0.374
	(0.579)	(0.104)	(1.070)	(0.344)
Risk av	-0.0230	0.0058	-0.0829	-0.0392*
	(0.0302)	(0.009)	(0.0721)	(0.0216)
Strat av	-0.0840*	0.0007	-0.0709	-0.00434
	(0.0462)	(0.0134)	(0.0661)	(0.0259)
Period	-0.271***	0.0648***	-0.173**	-0.0491
	(0.0591)	(0.009)	(0.0725)	(0.0485)
sq-Period	0.00***	-0.0020***	0.00518*	0.00171
	(0.00259)	(0.0004)	(0.00285)	(0.00210)
Deviation BR				0.715***
				(0.0441)
Error				0.145***
				(0.0328)
Constant	4.316***		4.657***	1.538***
	(0.773)		(1.198)	(0.506)
Observations	2,720	2,720	2,720	2,720
Number of subjects	156	156	156	156
Chi2	70.23	141.3	36.19	545.2
Prob>Chi2	0	0	6.68e-06	0
df	7	7	7	9

Robust standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Error: difference between predicted claim of the other and observed claim
BR:=1 if claim is equal to best-response claim
Dev BR: difference between claim to B and best-response claim to B
Dev coord claim: difference between claim to B and claim that would lead to optimal claim (12-other's claim)

Appendix 3.A: Nash equilibrium under risk aversion

We extend the equilibrium results presented in section 3.3 to the case where agents are not risk-neutral (with U_i a well-behaved increasing utility function with $U_i' > 0$ and $U_i'' < 0$)). The objective function becomes:

$$\begin{aligned} EU_i(b_i, b_{-i}) &= \tfrac{1}{2}U_i\left[\prod_{i,h}(b_i, b_{-i})\right] + \tfrac{1}{2}U_i\left[\prod_{i,l}(b_i, b_{-i})\right] \\ \prod_{i,h}(b_i, b_{-i}) &= (1-c).(20-b_i) + b_i \\ \prod_{i,l}(b_i, b_{-i}) &= \begin{cases} (1-c).(20-b_i) + \theta_i(b,l) & if\ B > l \\ (1-c).(20-b_i) + b_i & if\ B \leq l \end{cases} \end{aligned}$$

and the best response functions are:

$$\frac{\partial EU_i(b_i,b_{-i})}{\partial b_i} = \begin{cases} c.U_i'\left(\prod_{i,h}\right) + \left[-(1-c) + \frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i}\right] U_i'\left(\prod_{i,l}\right) & if\ B > l \\ c.\left(U_i'\left(\prod_{i,h}\right) + U_i'\left(\prod_{i,l}\right)\right) & if\ B < l \end{cases}$$

If $B < l$,

$\frac{\partial EU_i(b_i,b_{-i})}{\partial b_i} = c.\left(U_i'\left(\prod_{i,h}\right) + U_i'\left(\prod_{i,l}\right)\right) > 0$ for any increasing utility function.

If $B > l$,

the sign of $\frac{\partial EU_i(b_i,b_{-i})}{\partial b_i}$ depends on the relative size of $\frac{c}{(1-c)-\frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i}}$ and $\frac{U_i'(\prod_{i,l})}{U_i'(\prod_{i,h})}$.

- If $\frac{c}{(1-c)-\frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i}} < \frac{U_i'(\prod_{i,l})}{U_i'(\prod_{i,h})}$, hence $\frac{\partial EU_i(b_i,b_{-i})}{\partial b_i} < 0$ for $B > l$. Player i's best reply function is a corner solution given by $r_i(b_{-i}^*) = l - b_{-i}^*$. The Nash equilibrium satisfies $b_i^* = r_i(b_{-i}^*)$ for all i. Solving simultaneously for both agents, one finds the unique Nash equilibrium: $B^* = l$.
- If $\frac{c}{(1-c)-\frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i}} > \frac{U_i'(\prod_{i,l})}{U_i'(\prod_{i,h})}$, hence $\frac{\partial EU_i(b_i,b_{-i})}{\partial b_i} > 0$ for any B. The Nash equilibrium is the corner solution where agents claim all the possible resource to the CPR : $b_i^* = b_{-i}^* = 20$.
- If $\frac{c}{(1-c)-\frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i}} = \frac{U_i'(\prod_{i,l})}{U_i'(\prod_{i,h})}$, hence $\frac{\partial EU_i(b_i,b_{-i})}{\partial b_i} = 0$ for $B > l$. The Nash equilibrium is an interior solution such that $B^* > l$ and $\frac{c}{(1-c)-\frac{\partial \theta_i(l,b_i,b_{-i})}{\partial b_i}} = \frac{U_i'(\prod_{i,l})}{U_i'(\prod_{i,h})}$.

Assuming subjects have a CRRA utility function with $U_i'(\prod_i) = \prod_i^{-\alpha_i}$, with the parameters of the experiment we find :

$$\frac{c}{(1-c) - \frac{\partial \theta_i(l, b_i, b_{-i})}{\partial b_i}} < \frac{U_i'\left(\prod_{i,l}\right)}{U_i'\left(\prod_{i,h}\right)} \quad for\ any\ \ (\alpha_i, \alpha_j)$$

Therefore the Nash equilibrium remains unchange with risk aversion and is equal to $B^* = l$ for all the rules.

Appendix 3.B: Experimental instructions

The instructions reported are translated from French by a native French speaker who is fluent in English. The text in italics has been added to make the instructions clearer for the reader, the participants did not see this.

The experiment compounds of 3 parts. In parts 1 and 2, you'll make a unique decision. Part 3 is compounds of several periods (*the exact number is not annonced*) and you'll make one decision and one prediction in each period.

Earnings

You'll be paid in Cash at the end of the experiment for one of your decision or prediction. This will be randomly selected by the central computer at the end of the experiment. Prior to receiving your payment, you will realize a coin flip at the experimenter desk when a random draw is necessary to calculate your final earnings.

Decision

A decision consists in claiming a total of 20 units in two accounts (A and B). You will receive units that will give you 1 Euro each. The number of units received can be lower, equal or higher than the number of units claimed. It depends on the characteristics of each account that will be different in each part of the experiment.

You will indicate to the computer the number of units you want to claim in each account (an integer). There are 21 possibilities (A ;B) where A is the number of units claimed in account A and B the number of units claimed in account B : (20 ;0)(19 ;1)(18 ;2)(17 ;3)(16 ;4)(15 ;5)(14 ;6) (13 ;7)(12 ;8)(11 ;9)(10 ;10)(9 ;11)(8 ;12)(7 ;13)(6 ;14)(5 ;15)(4 ;16)(3 ;17)(2 ;18)(1 ;19)(0 ;20). The computer will verify that the total is equal to 20 units when you are entering your two claims.

Next page presents the instuctions of part 1. Instructions of part 2 and 3 will be distributed once part 1 has ended.

Part 1

Your decision consists in claiming a total of 20 units in two accounts (A and B). The characteristics of the two accounts are the following :

ACCOUNT A :

Each unit claimed to account A has a cost of 0.2 Euro per unit.

All the units claimed to account A are received.

ACCOUNT B :

There is no cost to claim units in account B.

The number of unit received from account B depends on a coin flip.

- If "tail" is drawn, you will receive 2 units for each unit claimed in account B
- If "head" is drawn, you will receive 0 units from account B

You don't know the outcome of the coin flip when you are taking your decision. You will only flip the coin at the end of the experiment if this decision is selected for payment.

Table 3.9 presents the earnings in Euros for each possible choice and for the two possible outcomes of the coin flip. Earnings are computed as follows :

Tail : $(1 \times A + 2 \times B) \times 1 - 0,2 \times A$ Euros

Head : $(1 \times A + 0 \times B) \times 1 - 0,2 \times A$ Euros

TABLE 3.9 – Earnings in Euros Part 1

(A ;B)	Tail	Head
(20 ;0)	16,0	16,0
(19 ;1)	17,2	15,2
(18 ;2)	18,4	14,4
(17 ;3)	19,6	13,6
(16 ;4)	20,8	12,8
(15 ;5)	22,0	12,0
(14 ;6)	23,2	11,2
(13 ;7)	24,4	10,4
(12 ;8)	25,6	9,6
(11 ;9)	26,8	8,8
(10 ;10)	28,0	8,0
(9 ;11)	29,2	7,2
(8 ;12)	30,4	6,4
(7 ;13)	31,6	5,6
(6 ;14)	32,8	4,8
(5 ;15)	34,0	4,0
(4 ;16)	35,2	3,2
(3 ;17)	36,4	2,4
(2 ;18)	37,6	1,6
(1 ;19)	38,8	0,8
(0 ;20)	40,0	0,0

Part 2

Prior to part 2, the central computer will randomly form pairs. From now, you will interact with another person in the room. You can't identify who you are interacting with. Pairs will be fixed until the end of the experiment.

Your decision consists in claiming a total of 20 units in two accounts (A and B). You and the other member of your pair will take your decisions simultaneously. The characteristics of the two accounts are the following :

ACCOUNT A :

Account A is a private account.

Each unit claimed to account A has a cost of 0.2 Euro per unit.

All the units claimed to account A are received.

ACCOUNT B :

Account B is a joint account for you and the other member of your pair.

There is no cost to claim units in account B.

The number of unit received from account B depends on the total claim to account B. The total claim is equal to your claim plus the claim of the other member of your pair.

- If the total claim to B is lower or equal to 20 units, you will receive 2 units for each unit claimed in account B
- If the total claim to B is strictly higher than 20 units, you will receive 0 units from account B

You don't know the decision of the other when you are taking your decision as you take your decisions simultaneously.

Table 3.10 presents the earnings in Euros for each possible choice according to the total claim to B. Your decisions are indexed by 1 $(A_1; B_1)$ and the decisions of the other by 2 $(A_2; B_2)$. Earnings are computed as follows :

If $B_1 + B_2 \leq 20$: $(1 \times A_1 + 2 \times B_1) \times 1 - 0,2 \times A_1$ Euros.

If $B_1 + B_2 > 20$: $(1 \times A_1 + 0 \times B_1) \times 1 - 0,2 \times A_1$ Euros

TABLE 3.10 – Earnings in Euros Part 2

$(A_1; B_1)$	$B_1 + B_2 \leq 20$	$B_1 + B_2 > 20$
(20 ;0)	16,0	16,0
(19 ;1)	17,2	15,2
(18 ;2)	18,4	14,4
(17 ;3)	19,6	13,6
(16 ;4)	20,8	12,8
(15 ;5)	22,0	12,0
(14 ;6)	23,2	11,2
(13 ;7)	24,4	10,4
(12 ;8)	25,6	9,6
(11 ;9)	26,8	8,8
(10 ;10)	28,0	8,0
(9 ;11)	29,2	7,2
(8 ;12)	30,4	6,4
(7 ;13)	31,6	5,6
(6 ;14)	32,8	4,8
(5 ;15)	34,0	4,0
(4 ;16)	35,2	3,2
(3 ;17)	36,4	2,4
(2 ;18)	37,6	1,6
(1 ;19)	38,8	0,8
(0 ;20)	40,0	0,0

Part 3

For each of the periods of part 3, you'll have to make one decision and one prediction. Your decision consists in claiming a total of 20 units in two accounts (A and B). You will also have to indicate your prediction concerning the number of units the other member of your pair is going to claim to account B.

The characteristics of account A and B are identical in all periods.

ACCOUNT A :

Account A is a private account.

Each unit claimed to account A has a cost of 0.2 Euro per unit.

All the units claimed to account A are received.

ACCOUNT B :

Account B is a joint account for you and the other member of your pair.

There is no cost to claim units in account B.

The number of unit received from account B is uncertain but always lower or equal than your claim to account B.

The total number of units available from account B depends on the outcome of a coin flip.

- If "tail" is drawn, there is a total of 40 units available from account B.

There is enough units for both subjects in a pair as the total claim is necessarily lower than the number of units available (40 units). Each subject will receive the number of units he claimed to account B.

- If "head" is drawn, there is a total of 12 units available from account B.

The number of unit received from account B depends on the total claim to account B.

▶ If the total claim to B is lower or equal than 12 units, there is enough units for both subjects in a pair and each subject will receive the number of units he claimed to account B.

▶ If the total claim to B is strictly higher than 12 units, the following rule applies.

You don't know neither the outcome of the coin flip neither the decision of the other when you are taking your decision.

Your gain is equal to :

Number of units received from A $\times(1-0,2)$ + Number of units received from B $\times 1$

Sharing Rule ***[only one rule is presented to subjects]***

No allocation rule

No units is received from account B

Proportional rule

The 12 available units are shared proportionally to each subject's claim to account B. The number of units received is rounded to one decimal.

You will receive from account B : $\frac{B_1}{B_1+B_2} \times 12$ units

The other will receive from account B : $\frac{B_2}{B_1+B_2} \times 12$ units

CA rule

There are two possible cases :

- If each member of your pair has claimed 6 units or more from account B :

Each subject receive half of the available units (6 units).

- If one of the member of your pair has claimed mess than 6 units from account B and the other has claim more than 6 units :

The subject that has claimed less than 6 units receive the number of units he claimed.

The subject that has claimed more than 6 units receive the remaining units : 12 - claim of the other to B

CL rule

The excess demand is the difference between the total claim to account B $(B_1 + B_2)$ and the number of units available from B (12). Each suject receive his claim minus a share of the excess demand.

You will receive from account B : $B_1 - \frac{1}{2}(B_1 + B_2 - 12)$ units

The other will receive from account B : $B_2 - \frac{1}{2}(B_1 + B_2 - 12)$ units

Special case : If the claim to account B minus half of the excess demand is negativ for one of the member of the pair, this subject will receive 0 units from B and the other will receive all the units available.

Example 1 :

Your choice is (A ;B)=(20 ;0) and the choice of the other member of your pair is (A ;B)=(10 ;10). The total number of units claimed to account B is 10 units.

Whatever the result of the coin flip and the number of units available from account B (12 or 40), there is enough units to satisfy the claims of the two members of the pair. Each subject will receive the number of units he claimed to account B. Your gain is $20 \times 0,8 + 0 \times 1 = 16$ Euros and the gain of the other is $10 \times 0,8 + 10 \times 1 = 18$ Euros.

Example 2 :

Your choice is (A ;B)=(0 ;20) and the choice of the other member of your pair is (A ;B)=(8 ;12). The total number of units claimed to account B is 32 units.

• If the result of the coin flip is "tail", the number of units available is 40 and there is enough units to satisfy the claims of the two members of the pair.

Your gain is $0 \times 0,8 + 20 \times 1 = 20$ Euros.

The gain of the other is $8 \times 0,8 + 12 \times 1 = 18,4$ Euros.

• If the result of the coin flip is "head", the number of units available is 12 and there is not enough units to satisfy the claims of the two members of the pair. [only the example corresponding to the rule is presented to subjects]

No allocation rule : both subjects will receive 0 units from account B.

Your gain is $0 \times 0,8 + 0 \times 1 = 0$ Euros.

The gain of the other is $8 \times 0,8 + 0 \times 1 = 6,4$ Euros.

Proportional rule : you will receive $\frac{20}{20+12} \times 12 = 7.5$ units from account B and the other will receive $\frac{12}{20+12} \times 12 = 4.5$ units from account B.

Your gain is $0 \times 0,8 + 7.5 \times 1 = 7.5$ Euros.

The gain of the other is $8 \times 0,8 + 4.5 \times 1 = 10.9$ Euros.

CA rule : each subject receive 6 units from account B

Your gain is $0 \times 0,8 + 6 \times 1 = 6$ Euros.

The gain of the other is $8 \times 0,8 + 6 \times 1 = 12,4$ Euros.

CL rule : you will receive $20 - \frac{1}{2}(32 - 12) = 10$ units from account B and the other will receive $12 - \frac{1}{2}(32 - 12) = 2$ units from account B

Your gain is $0 \times 0,8 + 10 \times 1 = 10$ Euros.

The gain of the other is $8 \times 0,8 + 2 \times 1 = 8,4$ Euros.

Prediction

One of your prediction may be selected for payment at the end of the experiment (you'll be paid for either a decision of part 1, 2 or 3 or a prediction of part 3).

If a prediction is selected for payment, your earnings in Euros will depend on your prediction error. Your error is the difference between the number of units claimed to B by the other and your prediction.

Table 3.11 describes the earnings according to your prediction error.

TABLE 3.11 – Earnings for a prediction

Prediction error (number of units)	0	1	2	3	4	5	6	≥ 7
Earnings (in Euros)	20	19.5	18	15.5	12	7.5	2	0

Example : Your choice is (A ;B)=(20 ;0) and the choice of the other is (A ;B)=(14 ;6). Your prediction is that the other will claim 10 units. Your prediction error is 4 units. If this prediction is selected for payment, your gain is 12 Euros.

Information available before taking your decision

Before taking a decision, you can use a simulator. You'll need to indicate the number of units you want to claim to B and the number of units claimed to B by the other. You can choose if you want to know your gain in the "head" or "tail" case. The calculator will return the number of units you receive from each account and your gain.

You have also access to your decisions and results for previous periods. The history table gives you your claim to account A, your claim to account B, the total claim to B, your gain in each scenario, your prediction, your prediction error and your gain for the prediction in each of the previous period.

Results provided after each period

Once all the subjects have made their decisions, you will learn : the total claim to account B, your gain in Euros if "head" is drawn, your gain in Euros if "tail" is drawn, your prediction error, your gain in Euros for the prediction.

Seconde Partie : Allocation de l'eau par le marché en Australie

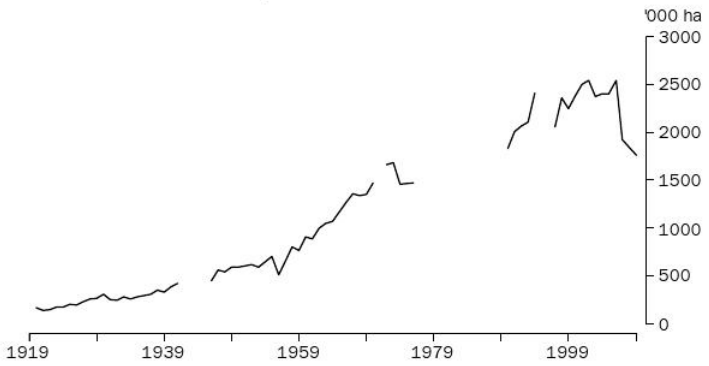
Chapitre 4

La gestion de l'eau agricole en Australie

L'Australie est parfois considérée comme le continent le plus sec du monde. Pourtant, certaines régions australiennes ont une pluviométrie moyenne annuelle de 600–1500 mm, ce qui est comparable à l'Europe ou l'Amérique du Nord. L'Australie est aussi parmi les pays les mieux dotés en terme de quantité d'eau disponible par habitant : 40ème place selon le classement de l'UNESCO 2002 (la France est 104ème). C'est la variabilité des précipitations, entre les régions bien sûr, mais aussi entre les saisons et entre les années qui caractérise le climat australien. Il y a une inadéquation spatiale entre la répartition des besoins et celle des ressources : les usagers sont principalement situés sur la côte Est et Sud alors que l'eau n'y est pas très abondante. C'est le pays de l'OCDE dont la variabilité temporelle de la pluviométrie est la plus élevée (OECD (2009)). L'Australie a répondu à cette variabilité en développant une très grande capacité de stockage de l'eau (Tisdell et al. (2002)). Sydney stocke 932 m^3 d'eau par habitant alors que New York stocke 250 m^3 et Londres 182 m^3. Pour l'eau d'irrigation, l'État australien du New South Wales stocke 1580 m^3 par km^2 de surface irriguée alors que les États-Unis stockent en moyenne 760 m^3, l'Égypte 380 m^3, et l'Inde 150 m^3.

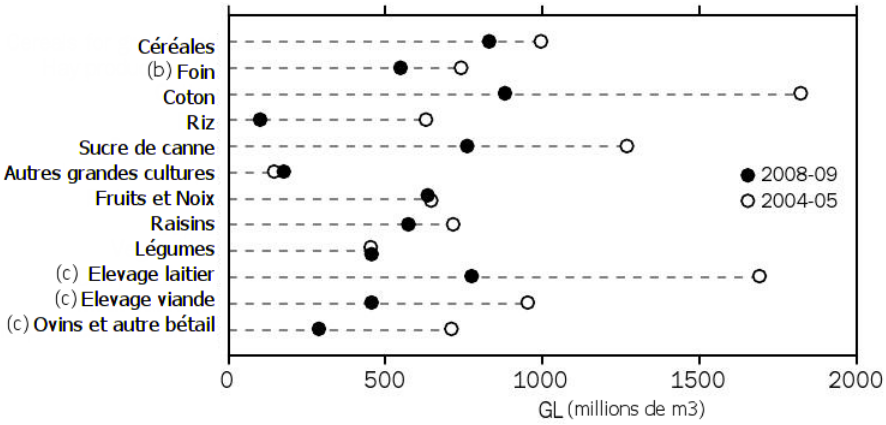
Une grande partie du développement économique de l'Australie est liée à l'agriculture irriguée. Les premiers investissements dans les équipements pour l'irrigation remontent aux débuts de la colonisation européenne. La vision de l'agriculture à haute valeur ajoutée est au 21ème siècle toujours celle des standards européens (les céréales, la vigne, l'horticulture irriguées), peu adaptés au climat australien (Crase (2008)). Les épisodes de sécheresse à répétition depuis 2002 ont néanmoins conduit à une baisse récente des surfaces irriguées (*Figure 4.1*). Seules 0.4% des terres cultivées (1,8 million d'hectares) sont irriguées en 2008-09, année relativement pluvieuse. Pourtant, la production irriguée équivaut à 29% de la valeur totale de la production agricole et l'agriculture représente 54% de la consommation d'eau, soit 7589 millions de m^3 (Water account ABS (2008-09)). Les plus gros utilisateurs d'eau pour l'irrigation sont les fermes laitières (pour le fourrage et les prairies), le coton, le riz et l'horticulture (*Figure 4.2*), cultures principalement tournées vers l'exportation. Entre 2004 et 2007, 61% de la production agricole a été exportée (ABARE (2008)).

FIGURE 4.1 – Évolution des surface irriguées en Australie



Source : Australian Bureau of Statistics, Water account 2008-09

FIGURE 4.2 – Consommation d'eau par activité agricole en Australie



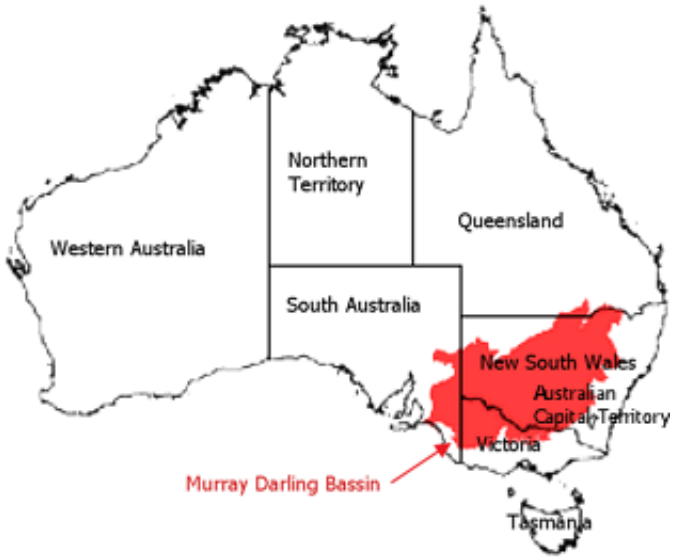
Source : Australian Bureau of Statistics, Water account 2008-09

(b) La production de foin inclut l'ensilage (c) Terres irriguées pour le pâturage
La différence dans la consommation d'eau entre 2004-05 et 2008-09 est due au fait que la première période était plus sèche. En 2004-05, l'irrigation représentait une plus grosse part de la consommation d'eau : 12191 millions de m^3 pour 2,4 millions d'hectares irrigués, soit 65% de la consommation d'eau totale

Trois quarts des surfaces irriguées australiennes dépendent du Murray-Darling Basin (MDB), le bassin versant des deux principaux fleuves australiens : le Murray et le Darling. Recouvrant 1 million de km^2 à l'Est de l'Australie, avec une population de 2 millions d'habitants, le MDB correspond à 50% de la consommation d'eau et 40% de la production nationale agricole en valeur de l'ensemble de l'Australie. Le MDB s'étend sur quatre des huit États australiens, ce qui lui confère une place de premier rang parmi les enjeux de la gestion de l'eau en Australie (*Figure 4.3*).

La constitution australienne précise que la propriété de l'eau et la responsabilité de sa gestion reviennent aux États. La gestion intégrée de la ressource passe donc par des accords entre États. Le premier de ces accords, le *River Murray Waters Agreement* signé en 1914-1915, souligne la nécessité d'une approche de la gestion de l'eau par bassin-versant. Des institutions inter-États ont été mises en place comme par exemple la *Murray-Darling Basin Commision* (MDBA), créée en 1987 et remplacée en 2008 par la *Murray-Darling Basin Authority*. La mission principale de la MDBA est le développement d'un plan inter-étatique pour gérer l'eau de surface et l'eau souterraine du MDB (qui sera rendu courant 2011), ainsi que l'établissement d'une limite aux prélèvements en eau sur la base des meilleures connaissances scientifiques, économiques, culturelles et sociales disponibles. Le gouvernement fédéral intervient aussi de plus en plus souvent dans les questions relatives à l'eau depuis ces vingt-cinq dernières années (Crase (2008)). Le *Council Of Australian Governments* (COAG) qui regroupe le premier ministre et les représentants de chaque État) a joué un rôle majeur avec la proposition de réformes de l'eau en 1994 (*Water Reform Framework*) et 2004 (*National Water Initiative*). Plus récemment, le gouvernement fédéral a renforcé son intervention par le biais du financement d'initiatives comme le *National Plan for Water Security* (2007) et *Water for the Future* (2008).

FIGURE 4.3 – États australiens et Murray Darling Basin



Si la gestion équilibrée de la ressource en eau a toujours été un enjeu majeur en Australie, les tendances actuelles renforcent la place de l'eau dans l'agenda politique. Les tendances météorologiques à long terme indiquent une augmentation des précipitations au Nord-ouest et une baisse sur la côte Est, là où la population et l'agriculture sont concentrées (Productivity Commision (2009)). Nombreux sont les signaux qui indiquent que l'agriculture est le premier secteur auquel il sera demandé de réduire sa consommation d'eau. En effet, l'agriculture est le plus gros utilisateur d'eau pour une valeur économique créée relativement faible (*Figure 3* introduction). L'agriculture australienne irriguée repose encore sur des techniques peu efficientes (40% des surfaces sont irriguées en gravitaire en 2008-09) alors que dans le même temps les villes ont recours à des solutions très coûteuses, comme la désalinisation de l'eau, pour assurer leur approvisionnement. De plus, le futur *Murray Darling Basin Plan*, qui va être rendu public courant 2011 mais dont certaines orientations sont déjà connues, prévoit la revalorisation des volumes d'eau réservés à l'environnement et une baisse de l'eau disponible pour l'agriculture.

Afin de gérer la rareté et les conflits d'usage croissants autour de l'eau pour l'agriculture, l'Australie a mis en place dans les années 90 un système d'allocation de l'eau d'irrigation par le biais de marchés de l'eau. Nous détaillerons l'historique et le fonctionnement de ces marchés de l'eau (4.1) avant de voir quels sont les enjeux actuels autour de ces

marchés, notamment vis à vis de la gestion du risque sécheresse (4.2).

4.1 Principes de l'allocation de l'eau par le marché

4.1.1 Bref historique de la création des droits et marchés de l'eau

Durant l'époque pré-européenne et au début de la colonisation, l'eau était une ressource en accès libre répartie sur la base du principe "premier arrivé premier servi". La création de droits d'usage de l'eau définissant le volume ou débit qui peut être utilisé par chacun a été une première étape pour limiter la sur-exploitaion de la ressource. Les colons anglo-saxons ont transplanté en Australie la *common law* anglaise, qui institue des "droits ripariens" sur l'eau des cours d'eau, c'est-à-dire qu'il faut être propriétaire d'une terre située le long d'un cours d'eau pour pouvoir jouir de cette eau. En 1905, afin d'encourager le développement de nouveaux espaces agricoles, le *Water Act* institue des droits à l'eau proportionnels à la surface irrigable détenue par un agriculteur. Il devient alors possible de disposer d'un droit d'eau juridiquement reconnu sans être propriétaire d'une terre agricole à proximité d'un cours d'eau. Pour pouvoir permettre un accès à l'eau sur toutes les terres cultivables et sécuriser l'accès à la ressource, des ouvrages hydrauliques de stockage et transport de l'eau se mettent en place. Jusque dans les années 1970, l'essentiel de la politique de l'eau passe par la construction de grands ouvrages hydrauliques (barrages, canaux) pour permettre le développement de l'agriculture irriguée.

Dans les années 80, le constat est fait que l'Australie a atteint le stade de la maturité quant à l'utilisation de l'eau. Randall (1981) caractérise le stade de la maturité par : i) une augmentation des coûts marginaux de l'augmentation de la ressource en eau car tous les ouvrages les moins coûteux ont déjà été construits ; ii) une augmentation des conflits d'usages dans un contexte de rareté et d'interdépendances croissantes entre les usagers. L'allocation efficace de l'eau entre usages conflictuels et le recouvrement des coûts des ouvrages hydrauliques deviennent donc des enjeux majeurs en Australie dans les années 80.

Parmi les réformes économiques lancées au début des années 90, le conseil des gouvernements australiens (COAG) fixe un cadre pour la gestion de l'eau visant entre autres à

homogénéiser les pratiques dans les différents États (*Water Reform Framework* 1994). Ce cadre prescrit notamment la mise en place de droits d'eau détachés des droits fonciers (afin de permettre de vendre un droit d'eau sans vendre la terre sur laquelle ce droit d'eau s'exerce) et l'instauration de mécanismes de marché pour le transfert des droits d'eau entre agriculteurs, afin que les forces de marché allouent l'eau aux usagers dont la productivité marginale est la plus grande. De plus, il incite à la mise en place d'outils tarifaires de recouvrement des coûts des ouvrages hydrauliques et à la reconnaissance de l'eau nécessaire à l'environnement et aux écosystèmes. Il revient aux États de mettre en place ces différents principes. Les États de South Australia en 1982, New South Wales et Queensland en 1989, et Victoria en 1991 ont mis en place des marchés de l'eau pour l'échange de droits (Grafton et al. (2010)). Les anciens droits d'usage de l'eau ont été peu à peu transformés en droits d'eau plus clairement définis, sécurisés et échangeables. Néanmoins, face à la lenteur des réformes, le COAG a réaffirmé en 2004, par le biais du *National Water Initiative*, l'importance de l'échange de droits d'eau pour une meilleure allocation de l'eau entre usages conflictuels et a souligné que des efforts doivent être faits pour limiter les restrictions aux échanges. La *National Water Commission* a été créée pour aider les États à conduire ces réformes.

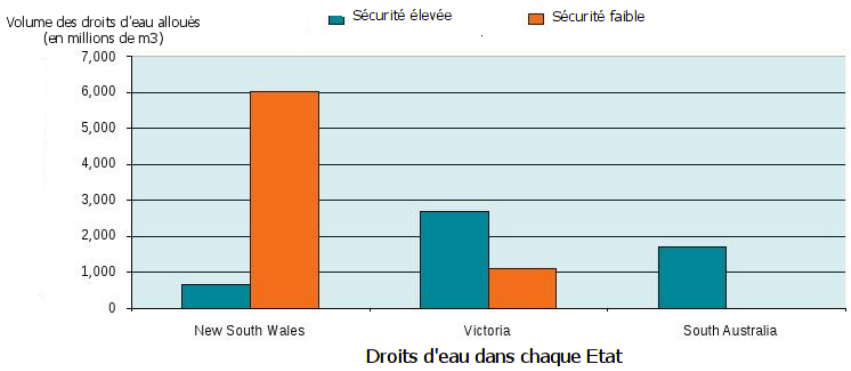
4.1.2 Droit d'eau et allocation

Les droits d'eau, appelés *entitlements* en Australie, constituent un actif qui donne le droit à une allocation d'eau annuelle. Le volume total d'eau alloué est variable en fonction de la quantité d'eau disponible dans les barrages et des prévisions sur les précipitations. En début de chaque saison d'irrigation, les allocations individuelles sont annoncées pour chaque usager. La première annonce est souvent basse mais cette allocation peut ensuite être révisée tous les mois (le plus souvent à la hausse si la première annonce a été conservatrice) en fonction du remplissage du réservoir (Bjornlund (2006)). Les décisions du régulateur quant à la gestion durable de l'eau, à la répartition entre les usages et le changement climatique sont susceptibles d'impacter l'allocation moyenne en eau reçue à partir d'un droit d'eau à plus long terme. Qu'ils soient approvisionnés par un réseau collectif ou qu'ils aient leur propre infrastructure de pompage, les agriculteurs doivent détenir une allocation afin d'utiliser la ressource. Les allocations constituent une ressource temporaire car si l'eau n'est pas utilisée ou vendue, elle est perdue. Il existe néanmoins des possibilités de transférer l'eau d'une année sur l'autre en la stockant dans les réservoirs (*carryover*) mais celles-ci sont limitées et coûteuses, afin d'inciter les agriculteurs à l'échange et d'éviter l'encombrement des réservoirs (Hughes and Goesch (2009)).

Les droits de propriété sont définis soit en termes volumétriques, soit comme une part du volume disponible. Ils existent deux modèles permettant de concilier définition volumétrique et variabilité des ressources disponibles (Freebairn (2003)) : i) le partage proportionnel de l'eau disponible en fonction des droits volumétriques détenus, chaque droit ayant le même niveau de sécurité ; ii) le partage selon un système de file d'attente quand il existe des droits avec différents niveaux de sécurité : les détenteurs de droits à haute sécurité sont servis en premier alors que ceux qui détiennent des droits à basse sécurité reçoivent les volumes restants. Prenons un exemple : soit un agriculteur A détenant un droit d'eau volumétrique de 20 Ml (1 Mega Litre = 1000 m3) et un agriculteur B détenant un droit de 40 Ml. Le volume total disponible est de 30 Ml. Si les droits sont identiques, A va recevoir une allocation de 10ML alors que B recevra une allocation de 20ML. Par contre, si A détient un droit à haute sécurité et B un droit à basse sécurité, A recevra une allocation de 20ML et B ne recevra que les 10ML restant. Contrairement au cas français, la gestion de la rareté dans le court terme est donc intrinsèquement liée à la gestion des droits d'eau à long terme car la règle de partage fait partie intégrante de la définition du droit.

Le partage par niveaux de priorité correspond au système de l'Ouest américain basé sur la doctrine de *prior appropriation*. Les droits les plus anciens sont prioritaires (*seniors*) alors que les détenteurs de droits *juniors* ne reçoivent de l'eau que lorsqu'elle est relativement abondante. Les deux options coexistent en Australie et illustrent les différentes stratégies agricoles des États (*Figure 4.4*). Les États du Victoria et de South Australia ont favorisé l'horticulture, la viticulture et l'élevage laitier, activités qui nécessitent un approvisionnement en eau sécurisé pour éviter les dommages sur les cultures permanentes. Dans ces États, les agriculteurs ayant besoin d'une eau sécurisée peuvent acheter des droits à haute sécurité. Au contraire, l'agriculture du New South Wales est basée sur les cultures annuelles comme le riz, qui peuvent s'arrêter et reprendre en fonction de la disponibilité et du prix des ressources en eau. Le New South Wales a choisi de ne pas restreindre l'allocation de droits d'eau, au risque de diminuer la sécurité de chacun de ces droits. La majorité du volume alloué en New South Wales est donc de faible sécurité.

FIGURE 4.4 – Droits d'eau dans les différents États du MDB par niveau de sécurité



Source : National Water Commission, Australian Water Market Report 2008-2009

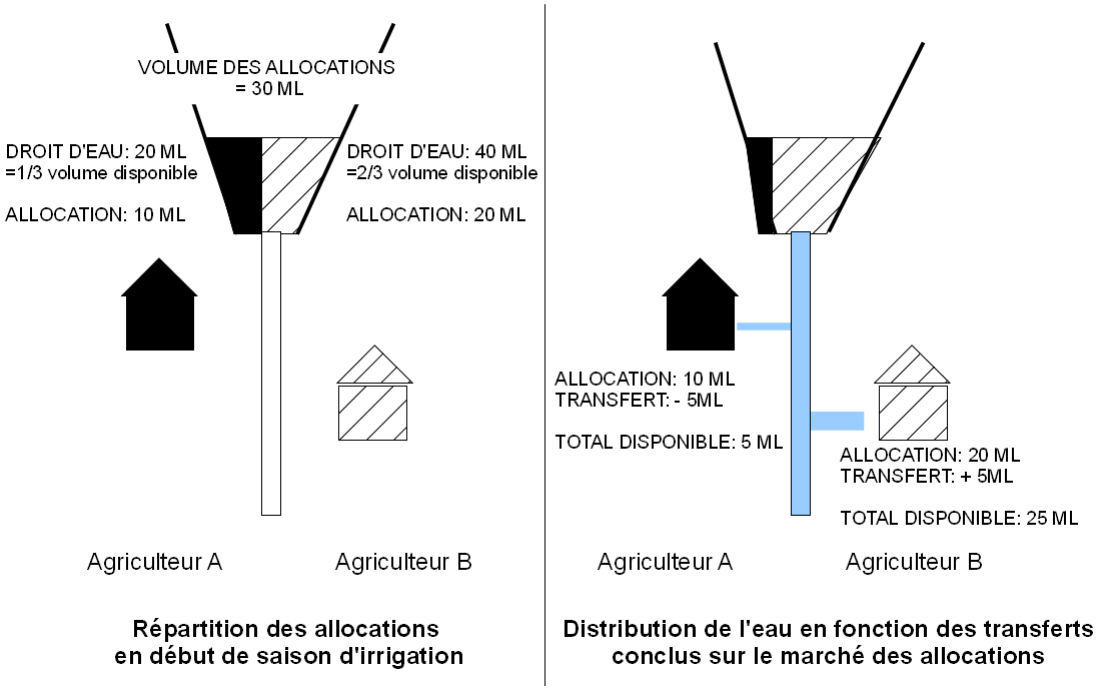
4.1.3 Marchés de l'eau

L'expression " marché de l'eau " recouvre une large palette de situations, parfois très éloignées du fonctionnement idéal du marché de la théorie néoclassique. Le terme "marché de l'eau" fait référence à des transferts temporaires ou permanents d'eau ou de droits d'eau. Derrière cette définition très générale se cachent des systèmes d'organisation des transactions très variés : des échanges informels de tours d'eau de canal entre des agriculteurs (Meinzen-Dick (1996), Strosser and Montginoul (2001)), le transfert de droits d'eau du secteur agricole vers le secteur urbain (Michelsen and Young (1993)), la réallocation des ressources en eau entre différents pays (Booker and Young (1994), Ansink and Ruijs (2008)) ...

Dans la plupart des périmètres irrigués australiens où des marchés de l'eau sont en place, il existe deux marchés : celui pour les droits d'eau (dit marché permanent) et celui pour les allocations (dit marché temporaire).[1] Les agriculteurs ont donc le choix de s'approvisionner en eau par le biais des droits d'eau ou des allocations. Les échanges se font principalement entre agriculteurs car les droits d'eau pouvant être détenus par des agents non propriétaires de terres agricoles sont limités à 10% des volumes totaux (avant 2007, les non agriculteurs ne pouvaient pas du tout acheter de droits d'eau). La *Figure 4.5* schématise les transferts d'allocation entre deux agriculteurs dépendant d'un réseau collectif alimenté par un barrage et ayant des droits volumétriques différents. L'agriculteur A détient un droit d'eau de 20ML, l'agriculteur B détient un droit de 40ML. La disponibilité totale dans le réservoir n'étant que de 30ML, les agriculteurs sont rationnés. Ils reçoivent chacun une part du volume total disponible proportionnelle à leurs droits d'eau. 5 Ml d'eau sont ensuite échangés sur le marché des allocations entre les deux agriculteurs. Le gestionnaire de barrage est informé des transferts conclus et distribue les allocations sur demande, dans la limite du volume alloué en début de saison, auquel s'ajoutent ou se retranchent les transferts réalisés sur le marché des allocations (5 Ml pour A et 25ML pour B).

1. Le terme de "marché" au singulier est un abus de langage car il existe plusieurs places de marché dans différents périmètres irrigués des différents Etats australiens. Les échanges sont possibles entre Etats mais restreints. Il n'y a donc pas réellement de marché unifié à l'échelle du pays. Les termes "marché des allocations" et "marché des droits" renvoient donc à l'ensemble des échanges réalisés dans les différents périmètres.

FIGURE 4.5 – Schématisation de transferts sur le marché des allocations



Source : auteur

L'allocation de l'eau par le marché est dite efficace lorsque l'eau est réallouée des usages avec une valeur de l'eau relativement faible vers ceux ayant une valeur marginale plus élevée, jusqu'au point où le bénéfice marginal lié à l'utilisation de l'eau est égal pour tous les participants au marché. Dans ce cas, la somme des profits retirés de l'utilisation de l'eau et des transactions sur le marché est maximisée. Si le marché des allocations est en théorie suffisant pour atteindre l'allocation efficiente de la ressource en eau en l'absence de coûts de transaction, le marché des droits permet d'offrir plus d'opportunités de gestion de l'eau et du risque sécheresse aux usagers (Freebairn and Quiggin (2006), Bjornlund (2006), voir aussi section 4.2.2). L'eau est en effet un bien particulier qui ne permet pas d'organiser des marchés respectant toutes les conditions de la concurrence pure et parfaite : l'eau n'est pas transportable sans coûts, notamment d'un bassin versant à l'autre ; l'eau n'est pas non plus un bien homogène car, plus que le bien lui même, ce sont ses caractéristiques intrinsèques (moment et lieu de disponibilité, fiabilité de l'approvisionnement, qualité bio-chimique de l'eau) qui sont recherchées ; les droits d'eau ne constituent donc pas parfaitement des droits de propriété car l'eau est une ressource dont la disponibilité est variable et dont la gestion reste la responsabilité

des États. Cependant, l'absence d'une ou plusieurs de ces conditions n'empêche pas le marché de fonctionner, il en limite simplement la portée (Strosser and Montginoul (2001)).

Afin de maximiser la valeur économique de l'eau, il conviendrait d'étendre les marchés à tous les usages de l'eau (Quiggin (2006)). Les usagers générant le plus de profit à partir de l'eau pourraient ainsi acquérir plus d'eau. Néanmoins, en pratique, les marchés de l'eau sont réduits à une catégorie d'usagers (les agriculteurs) en raison d'enjeux autres, notamment liés à la protection du secteur agricole. S'ils ne permettent pas une allocation efficace de l'eau entre usages, les marchés de l'eau permettent néanmoins d'agir comme tout autre outil de tarification en envoyant un signal de rareté de l'eau. Le prix de l'eau incite les agriculteurs à la mise en place de techniques d'irrigation plus efficaces et peut influencer les arbitrages productifs. Par exemple, la vente de droits d'eau peut permettre à certains agriculteurs de sortir de l'agriculture ou de modifier leur assolement pour des cultures sèches au profit d'agriculteurs valorisant mieux l'eau. Ce système jouit globalement d'une bonne acceptabilité de la part des agriculteurs australiens car il leur reconnaît un droit sur l'eau duquel ils peuvent tirer profit s'ils décident de diminuer leur consommation d'eau.

Les marchés de l'eau ne peuvent se mettre en place que si les infrastructures permettant de déplacer physiquement l'eau d'un endroit à l'autre existent. Le système hydraulique australien est très régulé. Il y a environ 120 barrages sur les rivières Murray et Darling, ce qui fait de l'Australie le pays avec le capacité de stockage par habitant la plus élevée (ABARE (1996)). Seulement quelques rivières sont encore hydrologiquement non affectées par les activités humaines. Le système de stockage et de canaux facilite les transferts physiques d'eau et donc diminue les coûts de l'échange. Avant d'irriguer, les agriculteurs font une demande au gestionnaire de la ressource qui lâchera le volume souhaité, après vérification que ce volume est compatible avec l'allocation détenue par l'irrigant. L'eau est ensuite conduite jusqu'à l'exploitation par un système de canaux. Dans les systèmes sous pression, l'eau est disponible "à la demande". Dans les systèmes gravitaires, la distribution doit être optimisée afin de minimiser les risque d'encombrement des canaux et éviter les débordements, tout en maintenant les débits minimums nécessaires aux écosystèmes et satisfaisant les préférences des usagers sur le moment de la livraison (Productivity Commision (2003)).

Des plateformes d'échanges électroniques ont été mise en place afin de faciliter la rencontre entre acheteurs et vendeurs d'eau. Les agriculteurs peuvent se connecter à la

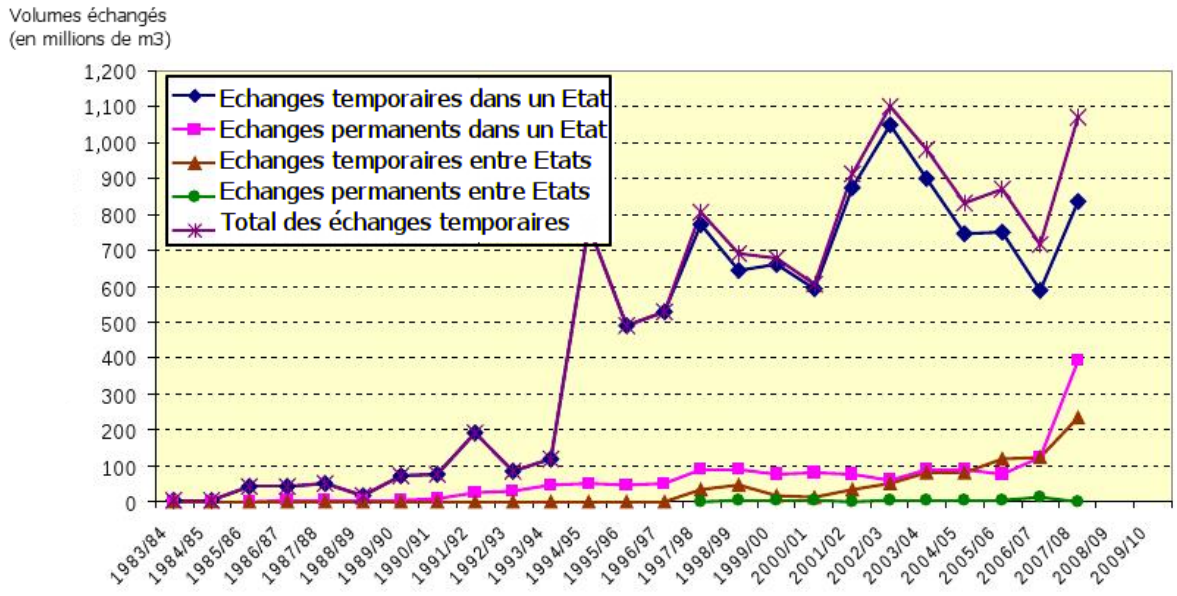
plateforme par internet et entrer les quantités qu'ils souhaitent acheter ou vendre et à quel prix. Les offres sont ensuite ordonnées par ordre croissant pour les vendeurs et décroissant pour les acheteurs et associées de façon à équilibrer le marché (Brooks and Harris (2008)). Selon les plateformes, les échanges se font en continu (double enchère) ou un prix équilibrant les offres et demandes enregistrées est établi chaque semaine (Productivity Comission (2010)).

Chaque transaction est coûteuse pour l'acheteur et le vendeur qui doivent s'acquitter d'une taxe versée au gouvernement (Allen Consulting Group (2006)). Les taxes varient en fonction des États. Pour le transfert permanent d'un droit d'eau, la taxe varie entre 275 dollars australiens dans l'État de Victoria et 500 dollars dans l'État de South Australia. Pour le transfert temporaire, la taxe est de 65 dollars dans le Victoria, 112 dollars dans le Queensland, et 500 dollars en South Australia. De plus, il existe des coûts non monétaires liés à la recherche d'un acheteur ou vendeur, la négociation et l'écriture du contrat, la demande de l'agrément du transfert (qui peut prendre plusieurs semaine pour les échanges permanents) ... Certains agriculteurs ont recours à un intermédiaire qui facture alors ses services. L'utilisation de la place de marché électronique *Watermove* coûte par exemple 55 dollars australiens à l'acheteur et 3% de la valeur du transfert au vendeur pour un transfert temporaire (avec un minimum de 55 dollars), et 110 dollars australiens à l'acheteur et 3% de la valeur du transfert au vendeur pour un transfert permanent (avec un minimum de 550 dollars). Il apparaît clairement que les coûts de transaction sur le marché temporaire sont beaucoup plus faibles que sur le marché permanent : les demandes d'agrément sont moins longues (quelques jours) et la taxe gouvernementale et le prix de l'utilisation des places de marché moins élevés. Par conséquent, les échanges sur le marché des allocations sont plus nombreux (*Figure 4.6*). La *Figure 4.7* montre l'évolution des prix moyens et des volumes échangés sur le marché des allocations au cours d'une année.

L'existence d'un marché de droits n'est pas inconciliable avec la mise en place d'une tarification volumétrique. La tarification renforce les incitations à économiser l'eau et permet aux gestionnaires des infrastructures de stockage et de transport de l'eau de recouvrir leurs coûts. Si les États ont dans le passé massivement investi dans les infrastructures, la gestion de celles-ci a peu à peu été privatisée ou déléguée à des entreprises privées qui doivent tarifer leurs services pour s'assurer des revenus. Dans la réforme proposée par le COAG en 1994, il est demandé aux États et gestionnaires de mettre en place des tarifs pour le stockage et le transport de l'eau qui soient à la fois incitatifs

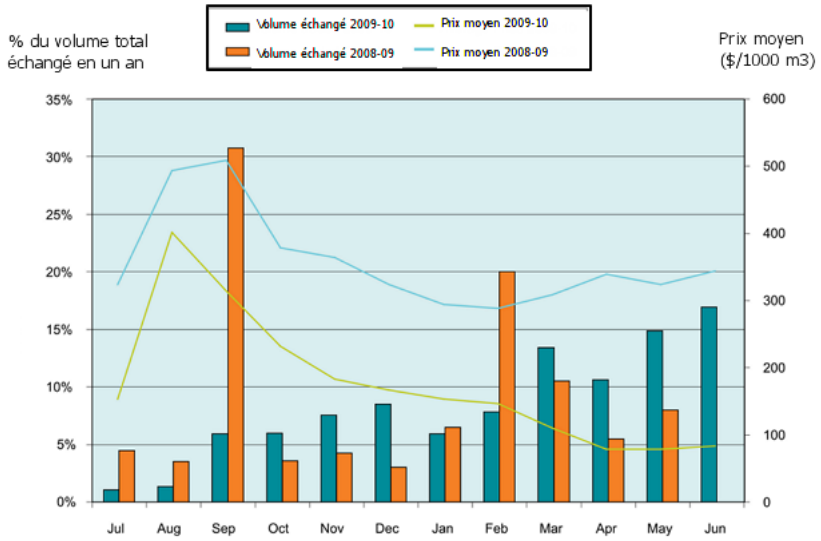
pour l'utilisation efficace et durable de la ressource, suffisants pour recouvrir les coûts et conciliables avec le bon fonctionnement des marchés de l'eau. Les tarifs observés sont très variables selon les États et les gestionnaires. Ils comportent le plus souvent une part fixe pour le stockage d'un volume correspondant au droit d'eau de chaque agriculteur et une part variable qui dépend du nombre de jours où l'agriculteur a demandé de l'eau et du volume demandé. Le tarif peut être différencié en fonction du niveau de sécurité du droit. En 2010, Parker and Speed (2010) constatent que la plupart des gestionnaires ont achevé la mise en place des tarifs permettant de couvrir les coûts de fonctionnement et de maintenance, les intérêts de la dette (quand les investissements ont été financé par endettement) et les externalités.

FIGURE 4.6 – Évolution des échanges de droits d'eau et d'allocation dans le MDB



Source : Grafton et al. (2010) avec des données de Murray Darling Basin Authority (2009)

Figure 4.7: Marchés des allocations d'eau dans le MDB



Source: National Water Commission, Australian Water Market Report 2009-2010

4.1.4 La nécessaire régulation des marchés de l'eau

Le bon fonctionnement des marchés de l'eau passe nécessairement par une forte régulation. L'existence de droits de propriété bien définis et la possibilité d'échanger sans coûts de transaction sont les conditions nécessaires au bon fonctionnement du marché (Coase (1960)). Il est nécessaire de définir et protéger juridiquement les droits d'eau et de contrôler les externalités liées aux transferts. Si certains craignent la privatisation de l'eau par la mise en place de droits de propriété échangeables, l'intervention de l'État reste forte pour garantir que l'ensemble de ces conditions pour la mise en place et le bon fonctionnement du marché soient respectées : "la main invisible ne fonctionne qu'en présence du pied bien visible du régulateur " (King (2005)). Comme pour toute intervention sur les marchés, la régulation des marchés de l'eau nécessite un réglage fin pour que les limites inhérentes à l'action publique (manque d'information, éloignement du terrain...) n'outrepassent pas les avantages de la régulation.

L'allocation des droits d'eau pour l'agriculture

Le marché permet d'allouer l'eau disponible pour l'irrigation entre agriculteurs mais il est nécessaire de déterminer en amont la part du volume total disponible qui est réservée pour l'agriculture et d'allouer les droits aux agriculteurs en conséquence. La planification sur 10 à 15 ans se fait en consultation avec les parties prenantes et aboutit à des plans de partage de l'eau (*water sharing plans*) (Young (2010)). Ces plans définissent notamment les volumes nécessaires à la maintenance du système et à l'environnement. Les autres usages de l'eau (agricoles, industriels, urbains, dits usages consommateurs) peuvent consommer les volumes restants. Les plans de répartition entre usages définis dans chaque État doivent respecter les accords entre États. Le *Murray Darling Basin Agreement* de 1994 a notamment établi une limite volumétrique sur la quantité d'eau qui peut être utilisée par chaque État sur une année. Les autorités de chaque État sont ensuite en charge de faire respecter cette limite (*the Cap*) en limitant les usages au sein de leur État. Le *Murray Darling Basin Plan*, attendu courant 2011, doit redéfinir les volumes qui peuvent être prélevables au niveau de chaque unité hydrographique, sans nuire au milieu naturel.

Une fois les volumes prélevables par l'agriculture déterminés, la répartition de ces volumes prélevables en droits de propriété est un exercice délicat. D'après le théorème de Coase, l'allocation initiale des droits de propriété est sans impact sur l'allocation de l'eau si les transferts sont possibles sans coût de transaction. Néanmoins, la littérature nous enseigne que l'allocation initiale et la définition des droits ont un impact sur la coût-efficacité et le risque supporté par les agents ((Greenwood and Ingene, 1978, Zivin and Small, 2003)). La mise aux enchères des droits permet d'atteindre une allocation plus proche de l'allocation efficace de la ressource car l'enchère révèle la valeur de la ressource pour chaque individu.

Historiquement, les droits d'eau ont été alloués en trop grand nombre. Avec la réduction des volumes prélevables, la question est donc davantage "comment récupérer des droits d'eau ?" plutôt que "comment allouer des droits d'eau ?". Néanmoins, la même question se pose pour garantir que les droits d'eau rachetés soient ceux qui génèrent le moins de valeur. Si les États peuvent généralement légalement exproprier les usagers, les solutions retenues sont le plus souvent sur la base d'accords volontaires avec compensation (Thoyer (2006)). Dans la section 4.2.1 sont décrites les modalités de la récupération de droits d'eau mises en œuvre actuellement par le gouvernement fédéral australien.

Une fois les droits d'eau pour l'agriculture alloués, il faut les contrôler, c'est à dire mesurer les volumes consommés et échangés et sanctionner les prélèvements ne correspondant pas aux droits d'eau

La prise en compte des externalités

De par le caractère particulier de cette ressource, les transferts d'eau ont souvent des effets externes sur d'autres acteurs, utilisateurs ou non de l'eau. Un échange de droits d'eau de surface dans une rivière peut modifier le milieu naturel si les débits restants ne suffisent pas à la survie des écosystèmes. Il peut également modifier le volume d'eau apporté à des usagers ne participant pas à la transaction. Le transport de l'eau par l'eau peut être mis à mal et les coûts de pompage augmenté si les débits dans les canaux et rivières sont réduits. Les transferts d'eau peuvent aussi avoir un impact sur la recharge nette de la nappe, et donc sur l'accès à la nappe et sur les coûts de pompage des usagers qui utilisent l'eau souterraine (Provencher and Burt (1993)). De plus, il est souvent craint qu'un transfert massif de droits d'eau en dehors d'une région agricole entraîne des effets négatifs sur la communauté qui dépend indirectement de l'agriculture (perte d'emplois, de revenus pour la collectivité locale, rupture sociale...). L'abandon de l'agriculture irriguée dans les zones qui ont été équipées en infrastructures pour l'irrigation est aussi coûteux pour la communauté car l'investissement est perdu.

L'allocation de la ressource sera efficace et les profits totaux maximisés seulement si les externalités sont prises en compte par le marché. Le plus souvent, c'est l'instauration de restrictions interdisant les transferts aux impacts négatifs les plus importants qui prévaut. Par exemple, pour limiter les externalités environnementales, il existe des limites au transfert d'eau dans les zones où la salinité est un problème majeur et des restrictions sur les débits afin que l'eau puisse s'écouler et diluer le sel (Productivity Commision (2006)). Afin de protéger les externalités positives liées à l'agriculture, l'État du Victoria restreint les échanges permanents en dehors d'un périmètre irrigué à 4% du total des échanges permanents. Cette règle est cependant accusée de limiter les gains à l'échange et devrait être supprimée d'ici 2014 (Qureshi et al. (2009)). Les personnes vendant leur droit d'eau doivent s'acquitter d'une taxe de sortie du réseau d'irrigation qui vise à limiter la charge d'entretien du réseau (coûts fixes) pour les irrigants qui restent (Goesch et al. (2006)). Le transfert entre les différents usages consommateurs sont aussi limités de façon à ne pas pénaliser le secteur agricole qui ne peut pas payer autant pour l'eau que les villes ou les industries. Afin de garantir le respect de ces différents

seuils, chaque échange doit être approuvé par les autorités. Les procédures administratives sont relativement longues. Ces restrictions ne s'appliquent généralement pas aux transactions sur le marché des allocations qui, du fait de leur caractère temporaire, ont des effets externes réduits.

4.2 Les enjeux autour des marchés de l'eau australien

La gestion de l'eau en Australie a fait de nets progrès depuis les années 90. Néanmoins, les changements climatiques attendus renforcent la nécessité d'aller plus loin, et notamment de résoudre deux enjeux prioritaires : le renforcement des débits d'eau réservés à l'environnement afin d'atteindre le bon état des écosystèmes aquatiques ; un fonctionnement plus efficace des marchés de l'eau afin de faciliter l'adaptation de l'agriculture à la rareté et variabilité de la disponibilité de l'eau. Nous détaillons dans cette deuxième partie ces deux enjeux et définissons les apports de la thèse concernant le deuxième enjeu.

4.2.1 Sécuriser l'eau pour l'environnement

Le terme "eau pour l'environnement" décrit l'eau nécessaire pour couvrir les pertes dues à l'évaporation et au transport (eau de maintenance) ainsi que pour l'inondation périodique des milieux humides (eau pour les écosystèmes). L'eau laissée dans les cours d'eau par le biais des débits environnementaux est assimilable à un bien public : ses bénéfices ne sont pas intégrés au marché car personne ne veut acheter de l'eau pour alimenter les débits environnementaux.[2]La puissance publique doit donc limiter les débits prélevables par les autres usages de façon à garantir les débits minima nécessaires au bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et ripisylves.

La définition de l'allocation d'eau optimale pour l'environnement se heurte à de nombreux problèmes. Il subsiste notamment une grande incertitude scientifique concernant les bénéfices environnementaux, comme par exemple les liens entre débit d'eau et état des écosystèmes. La valorisation par les citoyens du bon état des cours d'eau est aussi difficilement appréhendable malgré le développement des techniques d'évaluation. De plus,

2. Certaines organisations non gouvernementales ont envisagé le rachat de droits d'eau mais aucune transaction n'a été finalisée

les coûts d'opportunités liés au fait de laisser l'eau dans les rivières varient constamment : ils dépendent des évènements climatiques, des prix sur les marchés de produits nécessitant l'usage de l'eau pour leur production ...

Un audit de vingt-trois rivières du MDB conduit entre 2004 et 2007 a conclu que seules trois de ces rivières étaient en bon état écologique (Davies et al. (2010)). Depuis, des études scientifiques ont été menées pour déterminer le volume d'eau qu'il fallait réallouer à l'environnement. Celles-ci concluent qu'il y a un risque substantiel pour la santé des écosystèmes aquatiques si les débits sont en deçà des deux tiers de leurs niveaux naturels. Pour atteindre ce niveau dans tout le MDB, la récupération de 4,400GL (1GL=1 million de m3) d'eau pour l'environnement, soit une réduction de 40% des prélèvements, est nécessaire. (Wenthworth Group of Concerned Scientists (2010))

Afin d'atteindre cet objectif, il convient de trouver des moyens peu coûteux et acceptables permettant de récupérer de l'eau utilisée pour des usages marchands, notamment l'agriculture (Thoyer (2006)). Bien que les États aient le droit de se réapproprier des droits d'eau sans compensation, les gouvernements australiens n'ont pas retenu cette option en raison des impacts négatifs forts que cela pourrait avoir sur les irrigants et leurs communautés (Productivity Comission (2010)). Le programme *Water For the Future*, lancé en 2008, prévoit un investissement de 8.9 milliards de dollars australiens sur 10 ans par le gouvernement fédéral pour augmenter la sécurité de l'approvisionnement en eau. Deux options ont été choisies : 1) l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau en investissant dans la rénovation des infrastructures pour 5.8 milliards ; 2) le rachat de droits d'eau aux agriculteurs pour 3.1 milliards. Ces deux options sont très coûteuses mais à la hauteur des enjeux liés aux besoins de l'environnement.

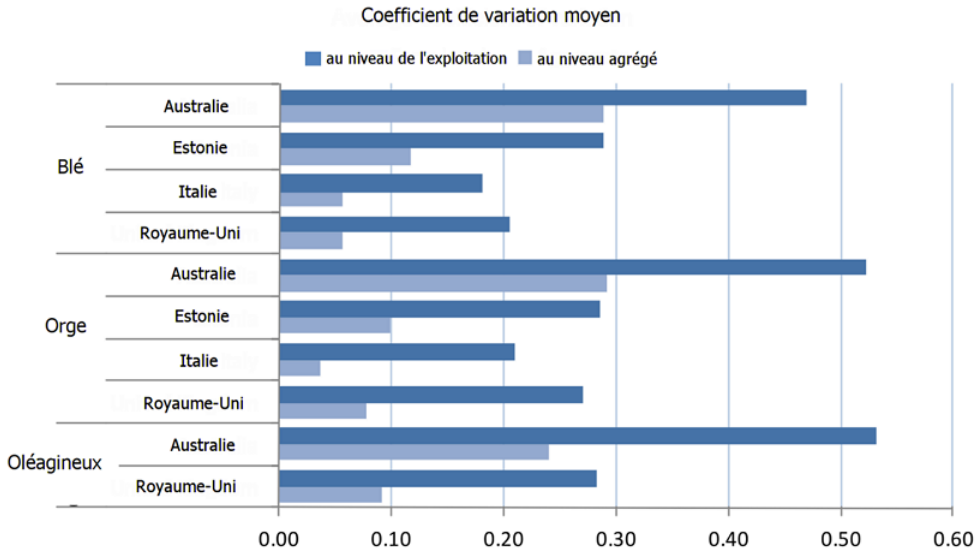
Le rachat de droits d'eau aux agriculteurs contribue à la diminution de l'eau disponible pour l'agriculture et à l'augmentation de sa variabilité. Le deuxième enjeu important et sur lequel la thèse se penche plus particulièrement est l'impact de l'organisation des marchés de l'eau sur le risque subi par les agriculteurs.

4.2.2 Gérer le risque de manque d'eau pour les agriculteurs

La variabilité de la disponibilité de l'eau entraîne pour les agriculteurs des risques importants car de nombreuses décisions de production sont faites avant de connaître la disponibilité de l'eau. Une étude par Nguyen et al. (2006) indique que les agriculteurs des États de South Australia et Queensland classent le risque climatique comme plus

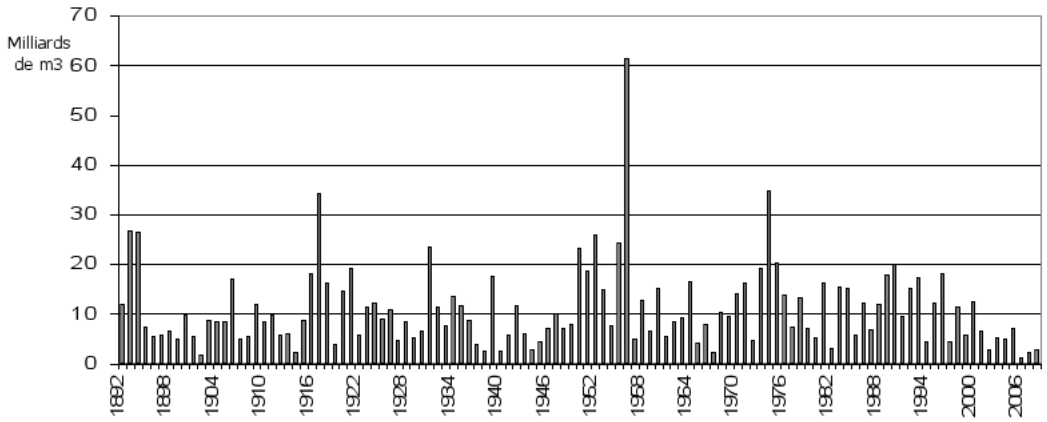
grande source de risque, devant les risques financiers et commerciaux. La *Figure 4.8* confirme que la variabilité moyenne des rendements en Australie sur le blé, l'orge et les oléagineux est supérieure par rapport à d'autres pays de l'OCDE. Les agriculteurs irrigants subissent en plus du risque climatique, le risque de recevoir des allocations en eau très variables à partir de leurs droits d'eau. La variabilité des débits dans les rivières du MDB qui se traduit par une forte variabilité des allocations en eau est illustrée par la *Figure 4.9* . Ces allocations dépendent des variables climatiques, mais aussi des décisions du régulateur concernant le partage de la ressource entre les différents usages.

FIGURE 4.8 – Coefficient de variation moyen sur les rendements



Source : Kimura and Antón (2011)

Figure 4.9: Débits dans la rivière Murray (incluant la rivière Darling)



Source: Productivity Commision (2009)

Face à une telle variabilité des ressources disponibles pour l'irrigation, la gestion efficace de l'eau est donc une stratégie clé des agriculteurs australiens irrigants. L'impact de l'incertitude sur les décisions de production en agriculture a largement été étudié, mais les articles sur la spécificité de l'input eau sont plus limités. Howitt and Taylor (1993) ont montré qu'un producteur averse au risque et maximisateur d'utilité espérée utilisera moins d'eau si la quantité d'eau disponible est incertaine. Mais quand il existe des marchés de l'eau, les agriculteurs ne sont pas seulement acheteurs d'eau mais aussi vendeurs. Calatrava and Garrido (2006b) ont montré qu'un acheteur net réduit son utilisation (et donc ses achats) d'eau alors qu'un vendeur net augmente son utilisation d'eau (et donc réduit ses ventes). L'incertitude pouvant être interprétée comme un coût de transaction du point de vue des agriculteurs averses au risque, l'activité sur le marché est réduite quand les quantités disponibles sont incertaines (Freebairn and Quiggin (2006)).

Les marchés de l'eau diminuent le risque subi par les agriculteurs en transformant le risque quantité en risque prix : il est toujours possible d'acheter de l'eau sur le marché mais le prix que l'on devra payer est incertain (Howitt (1998)). Calatrava and Garrido (2005) montrent analytiquement et empiriquement que le risque est réduit en présence de marchés de l'eau, à la fois pour les vendeurs et les acheteurs. Plus précisément, la variance des profits est réduite, ainsi que l'asymétrie négative des profits. Cependant, la VaR (*value-at-risk*, montant de pertes qui ne devrait être dépassé qu'avec

une probabilité donnée) est augmentée.

La possibilité d'échanger à la fois sur le marché des droits et sur celui des allocations permet de plus à chaque agriculteur de choisir la stratégie de gestion du risque la plus adaptée (Bjornlund (2006)). Sous l'hypothèse d'un marché parfaitement compétitif et sans coûts de transaction, si les usagers sont neutres au risque, le marché des allocations est suffisant pour réaliser une allocation efficace de la ressource (Freebairn and Quiggin (2006)). Il ne devrait donc pas y avoir d'échanges sur le marché des droits. Empiriquement, on observe en effet que le marché des droits est largement moins actif que celui des allocations (Shi (2006)). Néanmoins, malgré l'incertitude autour de l'allocation qui sera reçue pour chaque droit détenu et les restrictions et coûts de transactions pour les transferts de droits d'eau, l'activité sur le marché des droits décolle peu à peu (Young (2010)). Certains agriculteurs préfèrent s'assurer un minimum d'eau en acquérant des droits d'eau, même si le volume exact qu'il leur sera alloué est inconnu. D'autres préfèrent vendre leur droits et acheter de l'eau principalement sur le marché des allocations en fonction des conditions climatiques du moment. C'est l'hétérogénéité dans les préférences vis à vis du risque et les anticipations des agriculteurs qui créent des opportunités pour l'échange de droits d'eau (Hadjigeorgalis (1999), Cristi (2007)).

Les stratégies des agriculteurs sont diverses et leur participation au marché des droits plutôt qu'à celui des allocations (et vice versa) dépend de nombreux paramètres comme le type de culture, les capacités financières de l'exploitation, l'âge de l'irrigant, la flexibilité de son exploitation... (Bjornlund (2006), Bjornlund and Rossini (2005, 2007), Wheeler et al. (2009)). En 2006-07, 2% des agriculteurs irrigants du MDB ont échangé des droits permanents (en tant qu'acheteurs et/ou vendeur) et 23% ont échangé de l'eau temporairement (*Tableau 4.1*). La participation au marché des allocations dépend des besoins en eau et du prix et permet d'ajuster sa prise de risque dans le court terme. L'élasticité de la demande d'allocation au prix dépend essentiellement du type de culture. Les éleveurs laitiers avec des pâturages déclarent être très sensibles au prix : ils n'achètent pas sur le marché temporaire quand le prix est trop élevé même s'ils ont besoin d'eau. Par contre, les horticulteurs sont prêt à acheter de l'eau très chère en cas de besoin pour ne pas risquer de mettre en danger leurs arbres (Ashton and Oliver (2008)).

TABLE 4.1 – Participation aux marchés de l'eau par type de culture dans le MDB

% des exploitations participant à chaque marché en 2006-07

	Pâturages	Grandes cultures	Horticulture	Total MDB
Droits permament	3	1	4	2
Allocations	31	20	23	23

Source : Ashton and Oliver (2008)

Les marchés de l'eau offrent aux agriculteurs des possibilités pour gérer le risque de manque d'eau. Le chapitre 5 s'intéresse à la sophistication des marchés de l'eau et évalue les gains de la mise en place de droits d'eau avec différents niveaux de sécurité, notamment en terme de gestion du risque de manque d'eau par les agriculteurs.

Chapitre 5

Do security-differentiated water rights improve efficiency ?

Abstract

Most existing water markets combine water rights trading and water allocation trading. Offering different levels of security for rights can make the market more sophisticated and allow water users to manage the risks of supply uncertainty better. We compare results from a laboratory experiment with two water right designs, one with a unique security level and another with two security levels. We find that a two security levels system improves both allocative efficiency and risk management, but only when transactions costs are higher in the market for water allocation than in the market for water rights. A system with different levels of security for water rights can be detrimental to cost-effectiveness by increasing the number of costly trades on the water rights market.

Keywords : Experiment, Irrigation, Risk allocation, Risk management, Water markets, Transactions costs

Résumé

La plupart des marchés de l'eau existant dans le monde combinent échanges de droits d'eau et d'allocations d'eau. La sophistication des marchés de l'eau par la création de droits d'eau avec différents niveau de sécurité peut permettre aux usagers de l'eau de mieux gérer le risque de pénurie d'eau. Nous comparons les résultats d'une expérience en laboratoire avec un deux types de droits d'eau (un droit avec un niveau de sécurité élevé et un droit avec un niveau de sécurité bas) versus une expérience avec des droits d'eau tous identiques. Nous trouvons qu'un système avec deux niveaux de sécurité améliore l'efficacité allocative et le partage du risque mais seulement quand les coûts de transaction sont plus élevés sur le marché des allocations que sur le marché des droits d'eau. La mise en place de droits différenciés peut conduire à une diminution de la coût-efficacité du mécanisme en raison de l'augmentation des échanges sur le marché des droits d'eau et donc des coûts de transaction payés par les agriculteurs quand ceux-ci sont élevés sur le marché des droits.

Mots-clés : Experience, Irrigation, Partage de risque, Gestion du risque, Marchés de l'eau, Coûts de transaction

JEL Codes: Q25, C91

This paper is coauthored by Lata Gangadharan (Monash University Melbourne) and Sophie Thoyer (Montpellier Supagro). It has been submitted in June 2011 to the American Journal of Agricultural Economics.

5.1 Introduction

Water markets are acknowledged to allocate scarce water efficiently by encouraging water conservation and by moving water from low to high value uses. Although there is now widespread adoption of trading mechanisms to re-allocate water, there is an ongoing debate on how to improve the trading process. The existing literature has mainly focused on two aspects of water trading: trading constraints and transactions costs which reduce efficiency gains (Gardner and Fullerton (1968), Colby (1990), Allen Consulting Group (2006), Carey et al. (2002)); and third party impacts when trade might affect other users who are not involved in the transaction (Productivity Commission (2006, 2010), Bourgeon et al. (2008)). However, another important issue that deserves attention is the role that water markets can play to mitigate the risk of water shortage for farmers. [1]

The co-existence of both a market for water rights and a market for water allocation has been recognized as a useful risk management tool for irrigating farmers (Bjornlund (2006)). In most countries where water can be traded, farmers can buy or sell water rights, which entitle them to a given share of total available water within a season. The water volume that each right holder gets is called his allocation. When needed, farmers can also buy or sell water on the seasonal allocation market. Water markets improve the efficiency of water allocation and reduce farmers' exposure to risk as they transform the risk related to the availability of the water input into a risk on input prices (Calatrava and Garrido (2005)). Moreover, farmers are better able to manage their risks by shifting from the right market to the allocation market (and vice-versa) according to production conditions.

Under increasing pressure to manage water more efficiently, water trade institutions are being progressively strengthened, as the benefits of doing so (in terms of property rights being well-defined and markets becoming more complete) can offset the inherent costs involved (Bjornlund and Rossini (2008), Libecap (2011)). Under most statutory water right laws, as in Chile, Mexico and most of Australia, water rights are all identical in terms of security. They are defined as a proportion of stream flow or storage capacity and the total available water in a season is shared between water right holders in proportion to the volumetric rights they own. In other countries and states however,

1. While this problem is particularly crucial for unregulated river systems where there is no water storage through reservoir dams, it also exists for regulated systems because the probability of reserve replenishment from one year to another is seen to increasingly fluctuate with climatic change.

water rights can have different security levels, with the holders of high security rights being served first in case of scarcity. Once provisions for high security water rights have been made, the remaining volume of water determines the low security allocations. As a result, low security water right holders bear the bulk of the risk of low water supply. Such hierarchy of rights is also the basis of the prior appropriation doctrine, much in use in western United States: when shortage occurs, priority is given to the most senior rights, those which were historically appropriated first. When a water right is sold, it retains its original appropriation date. The security of a water-right can thus be purchased by buying a senior right on the right market. Since 1994, some Australian states (New South Wales and Victoria) have created a differentiated water right system. Farmers can constitute a portfolio of water rights of two security levels. It is expected that a differentiated water rights system would improve the efficiency of resource and risk allocation across farmers. However such reforms are administratively complex and can lead to substantial transaction and learning costs for water users. Before encouraging a wider adoption of such complex systems, it is necessary to understand and evaluate whether they can lead to genuine gains for water users. This question is at the heart of a number of recent water market reforms.

The objective of this article is to compare the allocative efficiency, cost-effectiveness and risk management properties of a market with two security levels for water rights relative to a market with a unique type of water right. There is insufficient field data to examine this research question using statistical techniques because water rights markets are still rather thin. For example, in Australia, little activity is observed yet in the market for low security rights (National Water Comission (2009)) and in the western United States, the trading of senior water rights is restricted by regulations controlling third party effects (Libecap (2011)). As a result, there are too few situations where farmers can freely constitute a portfolio of water rights with different levels of security. Moreover, differences between countries or states in terms of hydrology and socio-economic environment can make the comparison of the performance across the systems difficult. This article therefore uses data from laboratory experiments. It presents an experimental design that captures the main characteristics of existing water markets.

The design is noteworthy in two respects. First, we introduce two markets in our experiment: a market for water rights and a market for water allocation. While other experimental studies have explored one market in isolation (for example, Cristi and Alevy (2009) and Garrido (2007b) focus on the allocation market, whereas Hansen

et al. (2007) include the allocation market and an option market but no rights market), this article is the first to consider both markets. In the emission trading experimental literature, Godby et al. (1997) designed an experiment mimicking the Canadian emissions trading market including both a share and a coupon market. A coupon gives permission to discharge a unit quantity of waste. A share represents an entitlement to a specified fraction of the total available coupons to be issued in future periods. Our experiment is inspired by this design. Subjects first participate in a "share market" (corresponding to the water rights market) without knowing the allocation of "coupons" (corresponding to water allocation) they will get from their shares. In a second stage, they can trade their coupons on the coupon market (corresponding to the market for water allocation).

The second novelty of our design is the introduction of different levels of security for shares which enables us to compare the proportional rights system with the priority system. While Calatrava and Garrido (2006a) compared these two definitions of water rights using simulation data, they do not consider water rights trading in their analysis. To our knowledge this design feature has not been examined systematically using experimental methods. [2]

The two main treatment variables of our experiment are the number of security levels for shares (1 or 2) and the presence of transactions costs in the share and coupon markets. With these treatments, we examine the role of transactions costs which are recognized as an important feature of water markets and show how these costs can impact the performance of a two security levels system. While several researchers have studied transactions costs in environmental markets (Kerr and Mare (1995), Gangadharan (2000), Cason and Gangadharan (2003)), the impacts of such costs on participants' decisions to trade in one market relative to the other have been largely ignored. We find that while risk allocation improves with a two security levels system irrespective of which market displays higher transactions costs, the efficiency of water allocation and the total profits generated are more dependent on the configuration of the transactions costs.

2. Noussair and Porter (1992) ran an auction experiment, inspired by the priority service literature, on proportional versus priority rationing systems (Wilson and Chao (1987), Wilson (1989)). As there is no reconciliation market in their design, the only way to achieve efficient allocation is through the auction and the rationing scheme. Our article on the contrary has a reconciliation mechanism: the coupon market is a kind of reconciliation market in case the allocation is not efficient after the share market. Therefore, efficient allocation is the result of both the coupon and the share market.

This article is organized as follows. Section 5.2 summarizes the existing literature on the expected benefits and limitations of having differentiated water rights. The experimental design and corresponding theoretical predictions are presented in Sections 5.3 and 5.4. Section 5.5 reports the experimental results and Section 5.6 concludes with some implications for policy.

5.2 Rationale for differentiated water rights

The benefits from a water market with differentiated rights rely on the existence and efficiency of the water rights market itself. Most of the countries that are engaging in water market reforms are investing into the creation or the enhancement of water rights markets, for example through the formal separation of water rights from land rights, mainly to facilitate real structural change within the irrigation industry. If the water market is perfectly competitive and transaction-cost free, and if water users are risk-neutral, then it is well-known that trading on the seasonal allocation market is sufficient to reach an efficient allocation of water amongst users (Freebairn and Quiggin (2006)). In theory, trading on the water rights market should not occur since all water users have the same expected value for water rights (expected value of the corresponding allocation on the allocation market which is the same for all since there is a unique expected price for water) and thus display the same willingness to pay for rights. Nevertheless, it is observed that farmers are showing growing interest in water rights trading and water rights markets are slowly picking up (Young (2010)). Demand and supply of water rights are driven by heterogeneous risk attitudes and anticipations (Cristi (2007)), long term speculation (related to the uncertainty about the level of future water supply) or saving motives. Some irrigators view high security water rights as a hedge against future uncertainties and as high value capital assets which can be used as a mortgage guarantee (Bjornlund (2003), Grafton and Peterson (2007)). A system with differentiated water rights allows users to hold a sophisticated portfolio of rights with different levels of security, therefore potentially improving their management of water and the associated risks.[3] The arguments can be summarized as follows:

Firstly, Freebairn and Quiggin (2006) argue that multiple security levels for water rights

3. In this paper, we focus exclusively on the role that such a system could play in the management of short-term water shortage risks, leaving aside the other benefits listed above which concern mainly the management of long-term uncertainties.

can improve the cost-effectiveness of water allocation by allowing users to hold rights which match their water needs in each climatic scenario better, thus reducing trade on the allocation market and the corresponding transactions costs. Indeed, despite the existence of trade-facilitating solutions such as electronic market places or brokers, trading water remains costly. Transactions costs are incurred in searching for a trading partner, ascertaining the characteristics of the water commodity, negotiating a price and other terms of transfer and obtaining legal approval of the transfer (Colby (1990), Carey et al. (2002), Bjornlund (2003), Allen Consulting Group (2006)). Freebairn and Quiggin's argument is nevertheless controversial because it relies on the assumption that transactions costs in the allocation market are greater than transactions costs in the water rights market. Instead, most water markets seem to display greater transactions costs on the latter, first because water right transactions are more heavily taxed than water trading, and second because it is more administratively and legally complex. Bjornlund (2003) and Brennan (2006) examine this issue for Australian water markets. Libecap (2011) also mentions the reluctance to trade senior rights in the western US because of the increasing number of protests and litigation procedures launched by junior rights holders. As a result, if transactions costs in the rights market are prohibitive, they might offset the benefits of active trading in the water rights market, which is required to constitute a portfolio of rights matching water needs.

Secondly, a differentiated system can improve both the risk management opportunities for risk averse farmers, as well as overall risk allocation. Even though water markets help in reducing the risk born by farmers by converting a quantity risk into a price risk (Calatrava and Garrido (2005)), they fail to share the remaining risk efficiently (Howitt (1998)). As underlined by Quiggin (2008), "the quest to eliminate uncertainty is futile but uncertainty can be managed, allocated and sometimes mitigated". The principle of risk allocation (or risk sharing) is that risk should be allocated to the party best able to manage or accept it. In principle, this can be achieved through risk-sharing contracts such as options on the water market or conditional leases of water. Risk-averse users can trade-off lower expected gains for lower variability of gains and more risk-tolerant users may be willing to support a greater share of water variability in exchange of lower prices or higher water volumes in wet seasons. Bjornlund and Rossini (2008) have studied Australian water markets at length and they suggest that the risk differential between high value water users (eg. perennial crops) and producers of annual crops is sufficiently large to enable sophisticated risk-sharing instruments to operate.

Water rights with different levels of security can mimic these risk-sharing contracts and may be easier to implement. It has been observed that uncertainty relating to water allocation motivates farmers to hold more rights than necessary (Brennan (2006)). With differentiated rights, they can instead buy more secure rights. Resource security being a zero-sum commodity, the more security is given to a group of users, the less there is for everybody else (Quiggin (2008)). Some users will therefore bear more risks but they will also benefit from lower water prices.

A two security levels system thus displays two major advantages, compared to a single security system: transactions costs saving and improved risk allocation. On the negative side however, it increases the complexity of water market management for the administrators and the complexity of water market participation for the farmers (Hughes and Goesch (2009), Shi (2006)). Overall, the benefits of water rights differentiation will depend on the strength of these positive and negative effects. The next section describes the experiment designed to compare the two market designs.

5.3 Experimental design

Our experimental design captures the main characteristics of mature water markets where agricultural users participate both in the water rights market and in the allocation market. Each water right entitles its owner to a share of available seasonal water, which varies stochastically (with a known distribution) and is only known with certainty at a certain time of year (usually at the end of spring, when water levels in dams have stabilized). Water is used as an input in the agricultural production process with a decreasing marginal productivity. To mimic the relevant features of water markets for the research question we wish to address, the experimental design simplifies the market structure. Subjects trade water rights and water allocation in two successive non overlapping phases. Water rights and allocation are only traded within a period and not across periods. This choice precludes trading motives associated with long-term strategies such as banking and speculation on the future value of water rights. It enables us to observe trading strategies associated with the need to reduce transactions costs and manage risk better, and to compare these strategies for a single security system (which has only one level of security for shares) with a two security levels system (that has two security levels for shares).

To prevent prior attitudes about environmental policy from influencing subjects' behavior, a neutral terminology is used: in particular, water rights are called "shares" and water allocations are called "coupons". A share is thus an entitlement to a pre-specified fraction of the total available coupons to be issued. At the end of each period, coupons held are converted into ECU benefits, the ECU being an experimental monetary unit convertible at a fixed rate into cash.

5.3.1 Treatments

We use a 2x2 factorial design with 6 observations per cell. The treatment variables are the number of levels of security for shares (1 or 2) and the presence or absence of transactions costs (TC) in the share and coupon market. We use a between subject design where each subject participated in one of four treatments.

	One level of security	Two security levels
TC in the coupon market only	C1	C2
TC in the share market only	S1	S2

The first treatment dimension is the number of security levels. In C1 and S1, there is only one type of shares called "shares". In the two security levels treatment (C2 and S2), high security ("shares A") and low security shares ("shares B") are traded sequentially, with the high security shares traded first. [4]

The second treatment dimension is the transactions costs. Our first set of treatments (C1 and C2) follows Freebairn and Quiggin (2006) who suggest that seasonal allocation trading is likely to be associated with larger transaction costs. However Brennan (2006) suggests that the financial and administrative costs of allocation trade are relatively small. Field interviews that we conducted in northern Victoria (Australia) also largely provide evidence of higher transactions costs in the water rights market. This constitutes our second set of treatments (S1 and S2). [5] This article mainly focuses on the comparison of the first treatment dimension (number of security levels). We use

4. In field settings (for example in the Australian context), both markets could operate simultaneously but the high security market tends to be more active. Theoretically, the order of the two markets will not impact the equilibrium of both markets. Experimentally, some order effects may be observed. To limit the number of treatments, we choose to run the experiment with the high security share market first then the low security market as it is more intuitive to trade first the more secure assets.

5. We could also have run complementary and intermediary treatments with no transactions costs

the second treatment dimension in order to test if our results are consistent with an alternative configuration of transactions costs. This alternative is seen to be more empirically relevant and hence improves the external validity of our results. We do not directly compare C1 with S1 and C2 with S2 as these are just two different states of the world where transactions costs are higher in one or the other market. In the experiment, when one market entails low transaction costs, we normalize them to 0 (for shares trading in C1 and C2 and coupons in S1 and S2). The higher transaction costs are captured in the experiment by a fee of 2 ECUs per coupon (in C1 and C2) or per share (in S1 and S2) traded, paid both by the buyer and by the seller. [6]

5.3.2 Game structure

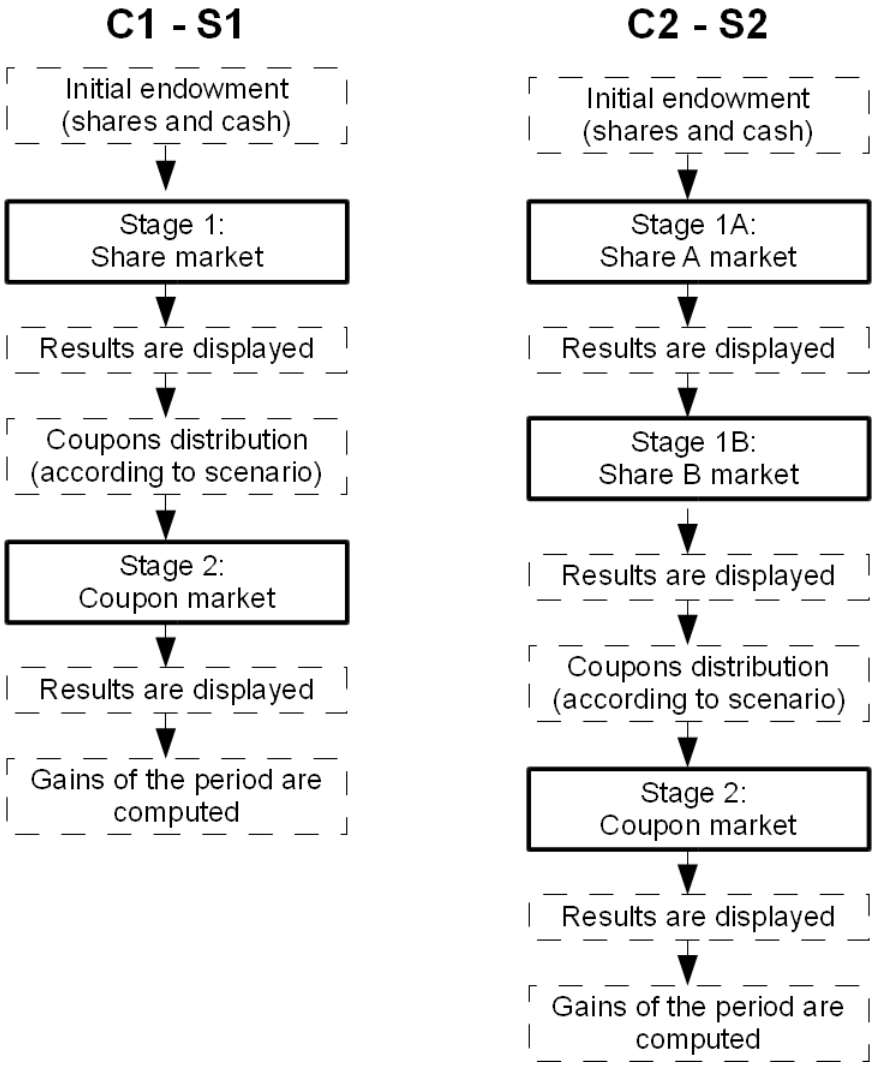
Figure 5.1 presents the game structure. At the beginning of each period, each of the subject is endowed with an equal number of shares: 9 shares in the treatments with a single level of security and 3 shares A (high security) and 12 shares B (low security) in the treatments with two security levels. Each subject is also given an initial cash amount of 50 ECUs which enables him to buy shares and coupons if he wishes.

In stage 1, subjects can choose to modify the number of shares they hold by buying and selling in the share market. Between stage 1 and stage 2, a random draw selects the scenario (blue or yellow, both of which are equally likely) that determines the number of coupons subjects get from their shares (*Table 5.1*). The scenarios are a simplified representation of the climatic variability. A wet season is described by the "blue scenario" whereas a dry season is called the "yellow scenario" and corresponds to three times less water available: 54 coupons are available in the blue scenario, and 18 coupons in the yellow scenario. The succession of scenarios was randomly drawn in advance and is identical across treatments and groups. This ensures that we can compare behavior across treatments keeping the climatic distribution constant. The

or equal transactions costs in both markets. However, under these configurations of transactions costs, we can show that the incentives to trade shares are reduced, thus limiting the gains from a two security levels system. Due to budget limitations, we focus our data collection efforts on the two treatments for which the gains from a two security levels system are theoretically the highest (C1-C2) and the lowest (S1-S2).

6. This fee is high compared to the fee/water price ratio observed in operational water trading platforms. We chose to set a high transaction fee in the lab to capture all the non-monetary but time-consuming transactions costs born by farmers including writing contracts, locating and identifying trading partners. Moreover, it may be unusual for buyers and sellers to pay the same transaction cost although theoretically the burden of the cost should be shared equally if the market is competitive.

Figure 5.1: Game structure



blue scenario was drawn in periods 1, 2, 5, 7, 8 and 12 and the yellow scenario in periods 3, 4, 6, 9, 10, 11. In treatments C1 and S1, 54 shares are distributed, corresponding to 54 coupons under the blue scenario and 18 coupons under the yellow scenario. In treatments C2 and S2, 18 high security shares (A) are distributed corresponding to a guaranteed allocation of 18 coupons in both the blue and yellow scenarios; and 72 low security shares (B) corresponding to 36 coupons in the blue scenario and no coupon allocation in the yellow scenario. Both the probability of each scenario and *Table 5.1* are common knowledge.

Table 5.1: Coupons allocation

	Blue scenario	Yellow scenario
Number of coupons received from 1 Share	1	0.33
Number of coupons received from 1 Share A	1	1
Number of coupons received from 1 Share B	0.5	0
Total number of coupons allocated in a group	54	18

In stage 2, subjects can trade coupons in the coupon market: they can choose to hold on to their coupons, sell them or buy more, provided they have sufficient cash to do so. At the end of stage 2, coupons are converted into ECUs according to a benefit function (*Table 5.2*). The total gains in the period are the sum of ECUs held after the trading stages plus the ECUs generated by coupons held. Then a new period starts. [7]

7. In one treatment of Godby et al. (1997), shares are kept from one period to the other (banking). This design feature could be relevant for water markets as water rights are equivalent to an asset yielding returns every season. As this design places substantial cognitive demands on the subjects, Godby et al. provided computerized advice on intertemporal optimization of shares and coupons holding. We want to avoid such complexity. Moreover, banking of shares is not necessary to observe the types of market gains we are interested in (transaction costs saving and better risk allocation). As a result, our design is simpler: each period starts with the same initial number of shares.

Table 5.2: Unit and total benefits (in ECUs) for coupons held at the end of a period

Coupons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\geqslant 16$
Type 1																
Unit	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0
Total	10	19	27	34	40	45	49	52	54	55	55	55	55	55	55	55
Type 2																
Unit	0	0	0	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
Total	0	0	0	24	46	66	84	100	114	126	136	144	150	154	156	156

The share and coupon markets are organized according to continuous double auction (CDA) rules in order to mimic the electronic clearing houses used by farmers to trade water. Most of these trading platforms work on the basis of a continuous double auction (Productivity Comission (2010), Brooks and Harris (2008)). Moreover, CDA is a useful mechanism in the lab because multiple trading opportunities are important in experimental markets to improve efficiency (Cason and Friedman (2008)). Subjects can place their price bids to buy extra shares or coupons, and/or price offers to sell them. All these strategies, namely buy, sell and keep, can be pursued simultaneously. Each trading stage is open for 2 minutes.

5.3.3 Subject types

Subjects have marginal benefit functions parametrized to mimic two types of farmers (*Table 5.2*). Type 1 subjects' marginal benefits mimic a mixed crop producer, with relatively low value for water and an elastic water demand. Type 2 subjects represent farmers with high-value crops such as orchards or vineyard, who are highly sensitive to irrigation restrictions. They need a minimum volume of irrigation water to preserve the long term productivity of their plantations or to avoid catastrophic harvest losses. Type 2 subjects therefore display a high marginal value for water, a rather inelastic water demand, and a minimum water requirement. The first three coupons have no value for a type 2 subject because they are insufficient to ensure production, but the fourth coupon yields a high marginal value. In each market group, we randomly assign marginal benefit functions to subjects so as to have three type-1 subjects and three type-2 subjects.

5.3.4 Experimental procedure

The experiment was programmed and conducted at the University of Montpellier experimental lab (LEEM) using the software z-Tree (Fischbacher (2007)). The subjects were drawn from the undergraduate student population. Subjects interacted anonymously in 6 person fixed groups. For each treatment, we conducted 2 sessions of 3 groups each, thus obtaining 6 independent observations per treatment, with a total of 144 subjects. Each session lasted 3 hours.

At the beginning of each session, subjects participated in an individual lottery task that helped us elicit their risk preferences (Brown and Stewart (1999)). The switch point of this lottery task was used as a relative indicator of risk aversion. In our sample, 57% of the subjects are risk averse (switch point from 1 to 4), 40% are risk neutral (switch point of 5 or 6) and 3% risk lovers (switch point from 6 to 10). The random assignment of subjects to types was successful as we do not observe any significant correlation between type and elicited risk aversion (coefficient of correlation r= -0.0837; p value=0.3437). This will enable us to compare the relative impact of type and risk aversion on behavior in the game.

After the lottery task, subjects were invited to read the instructions of the experiment explaining the different stages of the game, the trading software and the monetary incentives. They also answered a quiz which tested their understanding of the game. Subjects played two practice periods (with the same parameters as the rest of the experiment), which did not count toward subjects' earnings, followed by a series of 9 (C2), 10 (S2) and 12 (C1-S1) periods, one of which could potentially be selected for payment. Subjects earned 18.50 euros on average and received an additional 1, 3.5 or 6 euros, depending on their choice and the outcome of the lottery task. In order to control for wealth effects, subjects' gains from the lottery were only revealed at the end of the session. Qualitative and quantitative information was collected in the form of questionnaires from the participants at the end of each session. Instructions for treatment C2 are available in the appendix 5.A.

5.4 Theoretical predictions

This section presents the theoretical predictions on quantities and prices in the share and the coupon markets in each treatment. We first solve the model under the risk neutrality assumption and then present some intuition on the effect of risk aversion. We solve the model for a two-agent market (with one agent of each type). For a market of 6 participants (3 type-1 and 3 type-2), the price predictions are the same and the traded quantities are simply multiplied by 3. The model is solved by backward induction: the equilibrium of the coupon market is computed first, then the equilibrium in the share market is derived. In the experiment, share trading takes place first, followed by coupon trading once the scenario is drawn.

A risk neutral agent chooses the number of shares as well as the number of coupons in order to maximize his net expected benefit from trading and coupon holding.

$$\underset{S_i, c_{i,t}}{Max} \quad \sum_{t=1,2} \pi_t \left[B(c_{i,t}) + p_{c,t}.\left(W_t.S_i - c_{i,t}\right) - Tc.dc_{i,t}.\left(W_t.S_i - c_{i,t}\right) \right] + p_s.\left(Q_i - S_i\right) - Ts.ds_i.\left(Q_i - S_i\right)$$

Share: Q_i is the initial allocation of shares to agent i, S_i is the number of shares held in equilibrium, p_S is the equilibrium price of a share.

Allocation of coupons: t indexes the scenario ($t = 1, 2$ for the two scenarios: yellow and blue), π_t is the probability of occurrence of scenario t (with $\pi_1 + \pi_2 = 1$), W_t is the number of coupons received per share under scenario t. This value is known before the opening of the coupon market.

Coupon: $c_{i,t}$ is the number of coupons held by agent i in scenario t, $B(c_{i,t})$ is the marginal benefit function of agent i, which depends on the number of coupons held.
$B_i'(c_{i,t}) = a_i - 2b_i c_{i,t}$, $a_{type1} < a_{type2}$ and $b_{type1} < b_{type2}$,
$p_{c,t}$ is the equilibrium price of a coupon under scenario t.

Transactions costs: Tc is the transaction cost to buy and to sell in the coupon market, Ts is the transaction cost to buy and to sell in the share market, $dc_{i,t}$ is the net position of agent i in the coupon market in the scenario t and ds_i in the share market. It is equal to 1 for a net seller, -1 for a net buyer.

We note here that the market for shares is unaffected by the scenario. This is explained in the section 5.4.2.

5.4.1 Equilibrium in the coupon market

Trading of coupons takes place until coupons' marginal benefits, net of transaction costs, are equal for the two agents. *Figure 5.2* represents the demand functions for coupons of type 1 and type 2 subjects. Equilibrium prices and quantities of coupons held are found where total demand is equal to total supply in each scenario. Parameters are chosen so that in equilibrium, type 1 subjects sell all their coupons to type 2 and do not held coupons when they are scarce and expensive (in the yellow scenario). This is because the equilibrium price is greater than the marginal value of even the first coupon held for type 1. The equilibrium price is between the minimum price type 1 is willing to sell at and the maximum price type 2 is willing to buy at. The bargaining power of each type in the game determine the equilibrium price. In treatments C1 and C2 (compared to S1 and S2) in the blue scenario, the final number of coupons held is greater for a type 1 net seller (because he sells less in the presence of transactions costs) and lower for a type 2 net buyer (because he buys less). *Table 5.4* summarizes the equilibrium prices and quantities in the coupon market in each scenario.

Figure 5.2: Equilibrium in the coupon market

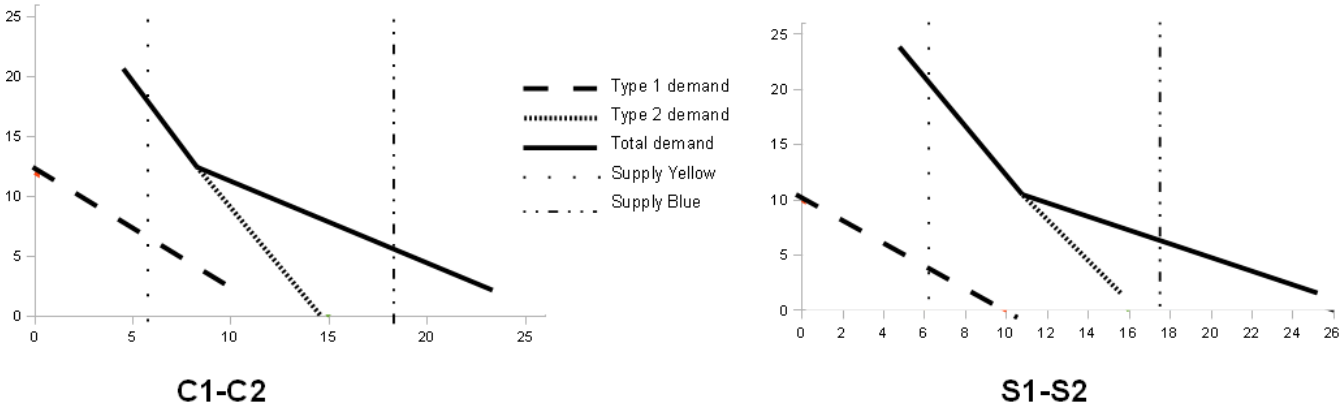


Figure 5.2 presents the equilibrium for a 2-subjects market. For a 6-subjects market, the supply is multiplied by 3 and the equilibrium price and number of coupons held remain the same. Quantities traded are multiplied by 3.

5.4.2 Equilibrium in the share market

The maximum willingness to pay for the purchase of one share (or the minimum willingness to accept for the sale of one share) is its expected value: it is equal to the expected number of coupons obtained from this share multiplied by the expected price of coupons. The marginal benefits of coupons have no impact on the willingness to pay for shares because the coupon market plays the role of a reconciliation market: agents can buy more or sell extra coupons in the coupon market.

In the absence of transactions costs in the coupon market (S1 and S2), the expected value of a share is equal for all risk-neutral agents. As a result, no trade should take place in the share market. The presence of transactions costs in the share market reinforces this result. On the contrary, transactions costs in the coupon market (C1 and C2) create heterogeneity in the expected value of a share across subjects if they anticipate that they will have a different position (net buyer or net seller) in the coupon market. As a result, trading of shares occurs in equilibrium in treatments C1 and C2. The equilibrium price of a share is an interval, with the lower bound the minimum price at which a net seller in the coupon market is willing to sell a share and the higher bound being the maximum price at which a net buyer of coupons is willing to buy a share: $p_S \in [E[W \times (p_c - TF_c)]; E[W \times (p_c + TF_c.)]]$ (*see Table 5.4*).

Being net buyers in the coupon market, type 2 subjects are willing to pay more for shares than type 1 subjects. As a result, type 1 will sell shares to type 2. The equilibrium allocation of shares in C1 and C2 is such that the need for costly trade in the coupon market is minimized. When only one level of security shares are available (C1), the equilibrium number of shares held by each subject is such that coupon trading is required only in the yellow scenario. Each subject will hold shares such that it corresponds to his needs for coupons in the blue scenario. A simple calculation shows that any other allocation of shares is less efficient as it requires more trade in the coupon market.[8] When two security levels for shares are available (C2), the experiment is

8. Assume type 1 holds 6 shares. He will receive 2 shares in the yellow scenario and 6 shares in the blue scenario. He will have to sell 2 coupons if the scenario is yellow and 0 coupons if the scenario is blue. If he holds less than 6 shares, he will have to sell less than 2 coupons in the yellow scenario but will have to buy coupons in the blue scenario. He will on average pay more transactions costs to trade coupons. If he holds more than 6 shares, he will have to sell more than 2 coupons in the yellow scenario and will also have to sell coupons in the blue scenario. He will pay more transactions costs to trade coupons. The same reasoning applies for type 2 with 12 shares. Therefore, at equilibrium, each subject hold shares such that it corresponds to his needs for coupons in the blue scenario.

parametrized such that, by constituting an efficient portfolio of shares, no trade is required in the coupon market in either scenario. High security shares are bought to cover the need for coupons in the yellow scenario. Low security shares are bought to complement the allocation from high security shares in the blue scenario.

From the equilibrium predictions in the share market, one can compute the number of coupons that will be received by each type in each treatment and scenario. This needs to be compared to the equilibrium number of coupons held by each type to determine the equilibrium number of trades in the coupon market. Equilibrium predictions for the number of trades in each market are presented in *Table 5.4*.

5.4.3 Impact of risk aversion

In theory, there is no impact of risk aversion on the number of coupons held at the end of the experiment since uncertainty is resolved when decisions on coupons are taken. However, risk aversion potentially impacts the willingness of subjects to participate in one market rather than the other. This effect is ambiguous when subjects can be both buyers and sellers and can trade both in the coupon and the share market. Risk aversion can potentially have two effects. On the one hand, risk averse subjects may prefer to trade in the coupon market as more information is available at this stage. Even if coupons trading is costly (treatments C1-C2), they may be willing to trade-off greater transactions costs for a gain in information. On the other hand, risk averse subjects may be willing to buy shares as an insurance against a small allocation of coupons (if the scenario is yellow), in order to secure a minimum number of coupons. This is particularly true for type 2 subjects because they need at least 4 coupons to get benefits from coupons. As a result, if the first (second) effect is stronger, the trading activity in the share market is expected to be lower (higher) under risk aversion as compared to the risk neutral prediction. The lack of clear theoretical predictions under risk aversion reinforces the reason for conducting experiments.

5.4.4 Profits

Theoretical profits are different across treatments as they are dependent on transactions costs (*Table 5.4*). Under the risk neutrality assumption, profits are in theory equal in S1 and S2 because no trade is expected in the share market, thus no transactions costs are paid in equilibrium. Profits are on average higher in C2 than C1, because the two security levels system offers the possibility to subjects to hold a portfolio of shares which matches their needs for coupons in each scenario perfectly. Subjects can thus avoid trading in the coupon market and therefore save transactions costs in C2 compared to C1. *Table 5.4* presents equilibrium profits under the assumptions of risk neutrality and equal bargaining power of buyers and sellers (the latter assumption helps avoid the problem of having interval predictions).

The variability of profits - measured by the difference between equilibrium profits in the blue scenario and profits in the yellow scenario - is different across types and across treatments. By definition of the variability of profits, it is lower for type 1 subjects as they have lower profits in absolute value. The interesting prediction that arises however is that the effect of treatment is type-dependent: type 2 has less variable gains in C2 than C1 but it is the opposite for type 1. How can we relate this result to the efficient risk sharing theory ? Efficient risk sharing theory suggests that agents should bear a share of the risk proportional to their risk tolerance (Borch (1962), Wilson (1968), Eeckhoudt et al. (2005)). An improved risk allocation decreases the variability of profits for the less risk-tolerant and increases it for the more risk-tolerant (risk tolerance is equal to the inverse of risk aversion). Type 2 subjects do not display significantly different intrinsic risk aversion than type 1 (due to randomization), but they have a more concave benefit function in the experiment. This may induce more reluctance to adopt risky decisions by type 2 subjects, or more "induced risk aversion". We assume that subjects' behaviors are influenced more by induced risk aversion (through type) than by intrinsic risk aversion (ERA, elicited in the lottery game) (see Schoemaker (1993) for a review of the difference between elicited risk aversion and observed risk taking behavior). If this assumption holds, an efficient allocation of risk is such that type 2 subjects, who have lower induced risk tolerance, transfer part of their risk to type 1 subjects. In equilibrium, the allocation of risk is therefore improved in C2 as compared to C1. This result does not hold when transactions costs are higher in the shares market (S2-S1) as there is no difference in the variability of profits between S1 and S2 .

5.4.5 Hypotheses

From the theoretical predictions discussed above, we draw the following hypotheses:

Hypothesis 1: A share system with two security levels increases overall profits when the transactions costs are higher on the coupon market (H1a). However, when it is more costly to trade shares than to trade coupons, there are no profit gains from a system with two security levels (H1b).

Hypothesis 2: The two security level system improves risk management: the overall variability of profits is decreased (H2a) and risk allocation is improved (H2b). Since the two security level system offers better options to subjects to adjust their portfolio of rights to their preferences, more "risk-averse" subjects (type 2) will have less variable profits and less "risk-averse" subjects (type 1) more variable profits. Hypothesis 2 holds under the condition that trade occurs in the share market. Therefore, we expect hypothesis 2 to be verified only in treatments C2 vs C1 (and not in S2 vs S1).

5.5 Results

We compare the market performance of treatments C1 and S1 with treatments C2 and S2 in terms of profits, efficiency and variability of profits in order to test our hypotheses. [9]

For each hypothesis, we first present the results from the treatments for which the gains of the two security level system are theoretically expected to be higher (C1 and C2). Then, we present the results for the treatments that better reflect empirical reality (S1 and S2) and examine how higher transaction costs in the share market impact the performance of the two security level system.

We examine the differences across treatments using nonparametric Mann-Whitney U tests with exactly one summary statistic value for each of the six independent groups in each treatment. We present the p-values of the one-sided tests in most comparisons as it provides more power to detect an effect when there is a specific hypothesis about the direction of the effect. When relevant, we also report results from multivariate

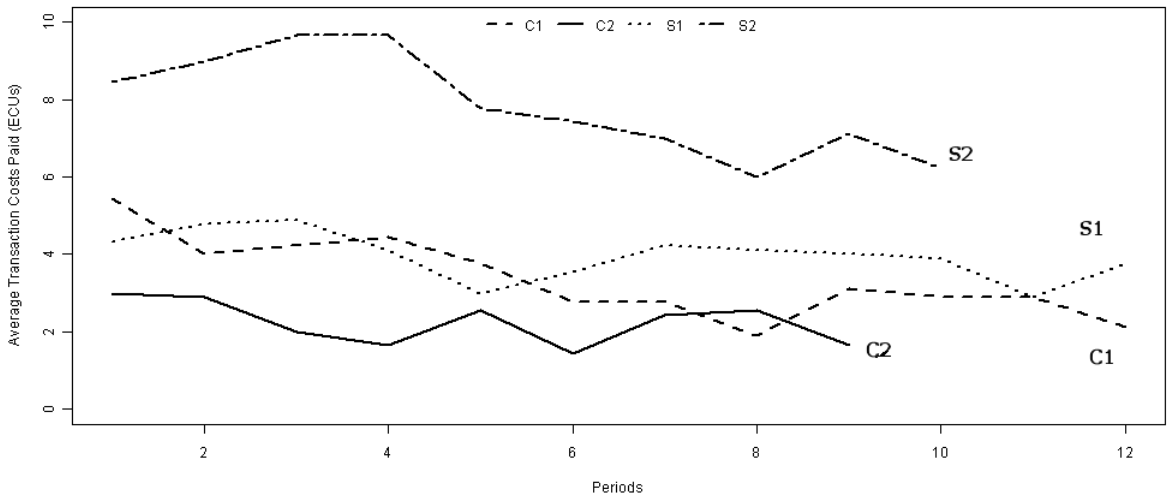
9. Profits are a function of market prices and quantities traded, which are presented in *Table 5.6*. However, in this article, we do not analyze market prices and quantities traded and focus on aggregate results in order to provide a clearer message in terms of comparison of policy options.

regression models which evaluate the contribution of different factors on the decisions made by subjects. Unless specified, we compute the statistics for the last four periods of the experiment common to all the treatments (periods 6 to 9), as we are interested in the performance in the later part of the sessions after an initial learning and equilibration phase. The last four periods include 2 blue periods (7 and 8) and 2 yellow periods (6 and 9). The results show similar patterns when all periods are considered.

5.5.1 Hypothesis 1: Profits

Hypothesis H1a is supported by the experimental results: when transactions costs are greater in the coupon market, average profits are significantly higher under a two security level system (C2 compared to C1, *Table 5.5*). The lower number of coupons traded and therefore the lower transactions costs paid in C2 compared to C1 explain this result (*Figure 5.3* and *Table 5.6*). Theory predicts that in equilibrium no trade of coupons should occur in C2. In the experiment, 39.6% of subjects in C2 reach the equilibrium portfolio of shares and hence do not have to trade coupons and pay transactions costs.

Figure 5.3: Transactions costs paid by each subject



We can measure the share of the potential gain realized by using an efficiency ratio. The max-gain efficiency ratio is defined as the observed profits over the maximum attainable profits (equilibrium prediction assuming equal bargaining power of the subjects). Max-gain efficiency ratios are high in all treatments (*Table 5.5*). This is partly due to the parameters of the experiment: if agents do not trade at all during the experiment (they keep their initial allocation of shares and coupons), they can reach an average efficiency level of more than 85%. We nevertheless observe differences across treatments: the max-gain efficiency ratios are on average lower in C1 than C2. We also compute the no-trade efficiency ratio - defined as the observed profits over the profits if subjects do not trade at all - for each treatment. The no-trade-efficiency ratios are higher than 100%, which indicates that subjects increase their profits by trading in the different markets, even if they do not reach the maximum potential gains (as defined by the max-gain efficiency ratio). The no-trade-efficiency ratios are also on average significantly lower in C1 than C2. These results suggest that the complexity of the two security level market is not detrimental to efficiency.[10]

Profits are theoretically identical under treatments S1 and S2, but in the experiment, we observe that profits are significantly lower in S2 (*Table 5.5*). This can be explained by the fact that subjects fail to reach the predicted no-trade equilibrium in the share market: only one quarter of the subjects do not trade shares (in S1, 29.9% do not trade any shares; in S2, 25.6% do not trade low security shares and 25% do not trade high security shares). However, there is evidence that subjects learn to approach the no-trade equilibrium as the transactions costs paid in S1 and S2 decrease over time (*Figure 5.3*).

10. We mentioned in section 5.2 that the increased complexity of water markets with different types of water rights may reduce farmers' participation in the market. In the lab, we may therefore find that the complexity of treatments C2 and S2 could lead to less trades and hence lower efficiency. To examine this, we define the deviation from the efficient portfolio of shares (the one that minimizes their needs to buy and sell coupons in stage 2) and coupons (the one that maximizes their gains) as a measure of the effect of complexity on the market performance of each treatment. The complexity of a two security levels system does not have any impact on the capacity of subjects to reach the equilibrium portfolio of shares and coupons as they do not deviate more in the two security levels treatments (C2 and S2) as compared to the single-security treatments (C1 and S1). In addition, we also estimated random effects generalized least squares regression models with clustering, where the dependent variable is the difference (in absolute terms) between the observed variable (number of coupons received and number of coupons held) and the theoretical prediction. Consistent with the results from the other tests, the treatment dummy has no significant impact. These results are not presented here but they suggest that subjects did not find the trading setup in C2 and S2 more complex. We tried to ensure that complexity or confusion was reduced to the extent possible, for example subjects participated in a quiz after the instructions were read out to ensure that they understood the experiment. In the post experimental questionnaire, subjects did not indicate any confusion with any aspect of the experiment.

The failure to reach the no-trade equilibrium could be the result of an experimental demand effect, which is higher in S2 than S1, since there are two opportunities to trade shares in S2 (Zizzo (2010)). As a consequence, the number of shares traded (as a sum of high and low security shares) and the total transaction costs paid in a group are significantly higher in S2 than S1 (*Table 5.6*). Max-gain efficiency and no-trade efficiency are reduced in S2 as compared to S1 because subjects trade more shares than necessary. This leads to the lower performance of the two security levels treatment in terms of average profits when there are higher transactions costs associated with share trading. Hypothesis H1b (equality of profits in S1 and S2) is thus not supported by our data.[11]

Table 5.7 confirms these results with random effects generalized least squares regressions, where the dependent variable is the profit made at the individual level in periods 1 to 9. Errors are clustered at the group level to capture any unobserved heterogeneity in the group. Two separate regressions are run for C1-C2 and S1-S2. Explanatory variables are treatment dummies, scenario dummies, type dummies as well as period and elicited risk aversion (ERA). As expected, profits are lower under the yellow scenario and for type 1 subjects. In the first regression, the parameter of the treatment dummy (C2) is significant and positive, confirming the non parametric test results that profits are higher under C2 (thus providing additional support for H1a). In the second regression, the treatment dummy (S2) is negative and significant. H1b can therefore be rejected. We also observe a significant and positive effect of period, revealing a learning effect. The elicited risk aversion (ERA) is not significant.

11. This could partly be due to a design feature in our experiment that introduces the high and low security share markets sequentially. With simultaneous trading of high and low security shares, we may not observe more share trading in the two security levels treatment as compared to the treatment with a single type of shares.

5.5.2 Hypothesis 2: Risk management

Table 5.5 shows that the standard deviation of profits (which can be interpreted as a proxy for overall risk) is not significantly different across treatments. This initial test invalidates hypothesis 2a which postulated that overall risk could be reduced with a two security levels system.

Even though a two security levels system does not seem to reduce overall risk, data show that it helps to share risk more efficiently. We argued before that the shape of the benefit functions suggests that type 2 subjects may display a greater "induced" risk-aversion than type 1 subjects. Therefore type 1 subjects are expected to favor trading decisions that may increase the variability of their profits but increase their average profits, whereas type 2 subjects are expected to take decisions which contribute to a reduction in the variability of their profits, even if this reduction of risk has a cost in terms of lower average profits.

Table 5.5 shows that the standard deviation of profit is indeed significantly greater in C2 than in C1 for type 1 and lower in C2 than C1 for type 2. Contrary to theoretical predictions, the same results hold for S1 and S2. A two security level system therefore leads to an increase in the risk for type 1 and to a decrease for type 2 irrespective of the transactions costs. *Table 5.8* presents regressions of the difference between average profits in the blue scenario and average profits in the yellow scenario for each subject type in each treatment comparison. The treatment variable (C2 and S2) has a positive sign for type 1 (statistically significant for C2 and marginally significant for S2) and negative sign for type 2. While the statistical significance is not uniformly strong in *Table 5.5* and *Table 5.8*, the direction of the effect is clear, hence providing some support for hypothesis 2b. Elicited risk aversion mostly does not have an impact (except for type 1 in S1-S2) and this indicates that type is more relevant than elicited risk aversion in explaining variability of profits.

The results concerning risk allocation are similar whatever the configuration of transactions costs. It suggests that a two security levels system does not reduce risk but it can improve risk allocation if the share market is active (even if there are no gains from trading shares as in S2).

Table 5.3 summarizes all the experimental results and compares them to the theoretical predictions.

Table 5.3: Summary of results

Hypotheses	C2 compared to C1	S2 compared to S1
H1a: Increased Profits	supported ++	
H1b: Equal Profits		not supported
H2a: Decreased Variability of Profits	not supported	not supported
H2b: Improved Risk Allocation between Types	some support +	some support +

++ supported by both non-parametric and parametric analysis
+ in the expected direction but not always statistically significant

5.6 Conclusion

There is a major impetus for water reforms around the world. Much is expected from the development of sophisticated water markets to improve the economic efficiency of water allocation, especially in times of increasing scarcity and variability. In this article we focus on the design of markets for water rights by analyzing the relative benefits of having rights with different levels of security. This research can provide the first step towards designing water markets that can simultaneously achieve an efficient and cost-effective allocation of water and risk. While there are on-going policy debates for improving the risk management potential of water markets, no previously reported laboratory experiment has studied the impact of introducing water rights with different security levels. We show in this article that security-differentiated water rights can improve the performance of water markets but the outcome is also dependent on market transactions costs.

Our results suggest that being allowed to hold and trade water rights with different levels of security increases water users' profits, provided that transactions costs in the rights market are lower than in the allocation market (treatments C1 and C2). If instead the allocation market is efficient and trading in this market is costless whereas trading rights is costly, the profits from trading rights are reduced, as well as the gains from a differentiated water rights market. This system offers nevertheless interesting

opportunities in terms of risk allocation, irrespective of the transactions cost scenario.

Our findings indicate that there is a trade-off between water allocation and risk allocation when trading rights is more costly as suggested by empirical evidence. In the absence of perfect information about the preferences of farmers and water managers with respect to these two objectives (efficient water allocation and risk allocation), the potential benefits of differentiated markets for water rights cannot be overlooked. As risk becomes a major concern for farmers, differentiated markets may become a valuable water policy option as they can improve the allocation of risk by decreasing the variability of profits for less risk-tolerant water users. This analysis does not include the other benefits of creating a water right system with several security levels: for example, since water rights are permanent assets, whose value depends on the level of security attached to them, farmers may be willing to hold high security rights in order to improve the management of their long-term risks. These arguments reinforce our case in favor of a differentiated right system. Another policy recommendation is to ensure that transactions costs on the market for water rights be minimized so that participants can take the full advantage of the rights differentiation.

Alternative mechanisms, such as option markets, have been proposed by policy makers in order to improve the tools available to farmers to hedge the risk of water availability. A water user can buy and option and pay a premium for the right to purchase water at a later date, contingent on the pre-specified strike price (Howitt (1998), Hansen et al. (2008)). Future research in this area could compare both policies using experimental methods: water rights markets to trade rights with different level of security or an option market for future allocation. In order to compare these two alternative systems, the trade-off between potential efficiency of the scheme and the necessary level of participation in the markets would need to be considered. For example, it is possible that the performance of a future market may be less dependent on the number of trades and transactions costs as compared to a differentiated water market. Further research could also include field experiments with farmers trained in water trading to examine if farmers can take better advantage of a two security levels system than subjects in a laboratory (Herberich et al. (2009)).

Table 5.4: Equilibrium Predictions

	C1	C2	S1	S2
Shares		**(A;B)**		**(A;B)**
Number held by Type 1	6	(0;12)	9	(3;12)
Number held by Type 2	12	(6;12)	9	(3;12)
Number of trades in a group	9	(9;0)	0	(0;0)
Equilibrium price*	[4.67;6.33]	([8;13];)		
Coupons				
Blue scenario				
Coupons held by Type 1	6	6	5	5
Coupons held by Type 2	12	12	13	13
Number of trades in a group	0	0	12	12
Equilibrium price	6	6	4.67	4.67
Yellow scenario				
Coupons held by Type 1	0	0	0	0
Coupons held by Type 2	6	6	6	6
Number of trades in a group	6	0	9	9
Equilibrium price	[10;20]	[10;20]	[12;18]	[12;18]
Total TC paid in a group				
Blue scenario	0	0	0	0
Yellow scenario	12	0	0	0
Profits (assuming equal bargaining power of subjects)				
Blue scenario				
Type 1	111.5	126.5	109	109
Type 2	177.5	162.5	181	181
Yellow scenario				
Type 1	92.5	81.5	95	95
Type 2	65.5	84.5	71	71
Difference of profits between scenarios				
Type 1	19	45	14	14
Type 2	112	78	110	110

(A;B) Shares A are the high security shares and shares B the low security shares.
* When no trade is expected at equilibrium, there is no equilibrium price

Table 5.5: Observed Profits

	C1	C2	*p-value* *	S1	S2	*p-value* *
Average profits in ECUs (H1)	626	656	*0.04+*	655	629	*0.04*
Efficiency Ratio (%)(H1)						
Max-gain efficiency	93.25	96.10	*0.12*	95.80	91.96	*0.02*
No-trade efficiency	102.46	107.43	*0.04*	105.78	101.53	*0.02*
Standard Deviation of Profits (H2)						
All subjects	35.45	35.93	*0.70*	36.74	36.96	*0.82*
Type 1	18.58	21.05	*0.07*	17.79	21.27	*0.12*
Type 2	52.33	50.81	*0.24*	55.69	52.66	*0.15*

* In addition to the Mann-Whitney U tests reported above, we also conducted a robust-rank order test on average profits as the samples dispersions seem different between treatments (Feltovich (2003)). For C2-C1, with U=-6.25, the robust rank order test is significant at the 0.5% level (U left-tail critical value=-4.803): profits are significantly higher in C2 than C1. For S2-S1, with U=3.07, the test is significant at the 2.5% level (U right-tail critical value=2.55): profits are significantly lower in S2 than S1.

+ The data reject the hypothesis that average profits are the same with one or two security levels for shares but this effect is driven by the yellow periods. One cannot reject the hypothesis that total profits are equal in the blue scenario (one-tailed p-value=0.11 with alternative hypothesis C1<C2) but one can reject that they are equal in the yellow scenario (one-tailed p-value=0.03 with alternative hypothesis C1<C2).

Table 5.6: Trading Activity and Market Prices

	C1	C2	*p-value*	S1	S2	*p-value*
Shares		**(A;B)**			**(A;B)**	
Number of trades in a group	10.5	(6.9;10.5)		6	(5.2;4.4)	
Equilibrium price	7.9	(11.6;2.0)		6.9	(12.9;3.2)	
Coupons						
Average						
Number of trades in a group	4	3	*0.17*	8.1	5.7	*0.10*
Equilibrium price	8.7	9.6		9.2	9.2	
Blue scenario						
Number of trades in a group	3.5	3.8		10	7.4	
Equilibrium price	7.3	6.6		7.3	6.6	
Yellow scenario						
Number of trades in a group	4.4	2.3		6.2	4.0	
Equilibrium price	10.2	12.5		11.0	11.7	
Total TC paid in a group						
Average	15.8	12.2	*0.17*	23.8	41.3	*0.09*
Blue scenario	14	15		25	39	
Yellow scenario	17.7	9.3		22.7	43.7	

(A;B) Shares A are the high security shares and shares B the low security shares.
All the statistics presented are the average over the last 4 periods for the subjects in each treatment.

Table 5.7: Random effect model of individual profits

Explanatory variables	C1 - C2	S1 - S2
C2	4.931***	
	(1.604)	
S2		-4.386**
		(2.099)
Yellow scenario	-59.76***	-63.02***
	(2.880)	(1.539)
Type 1	-18.63***	-17.90***
	(3.667)	(3.187)
Period	0.556***	0.761***
	(0.204)	(0.169)
ERA	1.193	0.315
	(1.107)	(1.035)
Constant	133.4***	142.6***
	(7.072)	(6.576)
Observations (periods 1 to 9)	576	594
Number of subjects	64	66
Wald Chi-squared (6)	94418	18710
Prob > Chi-squared	0.00	0.00

Robust standard errors in parentheses, clustered at the group level
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Table 5.8: Regression models for variability of profits between scenarios

Explanatory variables	C1-C2		S1-S2	
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2
ERA	-2.087	-2.681	-2.689**	-0.934
	(1.273)	(1.761)	(1.219)	(1.530)
C2	7.314**	-7.067		
	(3.138)	(7.263)		
S2			3.927 +	-2.772
			(2.419)	(5.595)
Constant	39.51***	113.6***	49.00***	100.8***
	(10.09)	(8.790)	(8.341)	(10.09)
Observations	33	31	32	34
F(2,11)	9.745	3.653	3.891	0.243
Prob>F	0.004	0.061	0.053	0.788

Robust standard errors in parentheses, clustered at the group level
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

We take the absolute difference between average profit in the blue scenario (periods 7 and 8) and average profit in the yellow scenario (periods 6 and 9) as a measure of variability of profits. As a result, we have only one data per subject and we run a linear regression.

+ The effect of treatment S2 for type 1 is close to being significant (p-value=0.133).

Appendix 5.A: Experimental instructions

The instructions reported are for treatment C2. Instructions were modified slightly for the other treatments depending on the transaction costs scenario and the type and return of shares. Instructions are translated from French by native French speakers who are fluent in English. The text in italics has been added to make the instructions clearer for the reader, the participants did not see this.

As a participant in this experiment, you will be asked to make decisions using a computer. This document gives you the instructions for the experiment. Please make sure you understand them correctly. This experiment has two parts You'll get the instructions of the second part after all of you have completed the first part. You will be paid according to your decisions for both parts. The computer will calculate your gains at the end of the experiment. They will be paid to you privately in cash at the end of the experiment.

Part 1: Risk aversion elicitation

For each of the 10 choices, you have to choose your preferred option between X and Y. The gain is fixed for option X. There are two possible outcomes for option Y. The realized outcome will depend on the random draw of a number. One of you will be chosen by the experimenter to draw a ball from a bag with the balls numbered from 1 to 10.

Your gain in Euros for part 1 depends on your choice and the number drawn.

	Option X		Option Y	
	Payoff	Number	Payoff	Number
Choice 1	3.5	1-10	1	1-9
			6	10
Choice 2	3.5	1-10	1	1-8
			6	9-10
Choice 3	3.5	1-10	1	1-7
			6	8-10
Choice 4	3.5	1-10	1	1-6
			6	7-10
Choice 5	3.5	1-10	1	1-5
			6	6-10
Choice 6	3.5	1-10	1	1-4
			6	5-10
Choice 7	3.5	1-10	1	1-3
			6	4-10
Choice 8	3.5	1-10	1	1-2
			6	3-10
Choice 9	3.5	1-10	1	1
			6	2-10
Choice 10	3.5	1-10	1	0
			6	1-10

Part 2

General principles of the experiment

The server computer will form randomly 3 groups of 6 participants. You will be part of one group, fixed during the experiment. You can't identify the other members of your group and they can't identify you.

In this experiment, you will have the opportunity to realize transactions (buying or selling) of different goods: shares A, shares B and coupons. All transactions will be realized in ECUs.

You can only trade with participants of your own group.

You will play over a number of periods. You will not learn the number of periods until the end of the experiment.

The same rules apply to each period: You are endowed with an initial number of shares and an initial cash endowment of 50 ECUs. In stage 1, you can buy or sell shares

A (stage 1A). Then, you can buy or sell shares B (stage 1B). In stage 1, shares will be converted into coupons according to their "return" and according to the draw of a scenario. In stage 2, you can buy or sell the coupons you received. At the end of stage 2, coupons are converted into ECUs, according to their "benefit".

The following explains the relation between shares, coupons and gains in ECUs. Each stage within a period is further explained.

Shares, coupons and gain of the period

Return of shares

At the end of Stage 1, shares are converted into coupons according to a "return rate". The number of coupons you obtain from one share depends on the scenario, drawn in each period by the central computer. The scenario can be "Blue" or "Yellow". The scenario is the same for all participants in each period. Both scenario are equally likely (50% chance of being "Blue" and 50% of being "Yellow"). Table 1 (*same as the one reported in the paper*) gives the number of coupons received from each share according to the scenario.

The number of coupons you receive will always be an integer (nearest highest integer).

For example, if you hold 30 shares A and 9 shares B, you will get: if the scenario is blue, 30*1+9*0.5=34.5 coupons, which is rounded off to 35 coupons; if the scenario is yellow, 30*1+9*0=30 coupons.

Benefits from coupons

Each coupon you hold at the end of stage 2 gives you benefits, according to *table 2* (*The table 2 given to the subjects is slightly different as we only give them the total and marginal benefits of their type*). The benefit of each unit is given in the second line. The total benefit you get is the sum of the benefit of each coupon you hold. The total benefit is given in line 3.

The benefit of each coupon held is typically different from the benefits of other coupons held and your benefits may be different from the benefits of other participants.

For example, imagine your first coupon gives you a benefit of 50 ECUs, your second coupon gives you a benefit of 49, etc. If you hold 2 coupons, your total benefits would be 50+49=99.

Gains

Your gains in ECUs for each period are determined as follows: Gains = Benefits from coupons held at the end of the period + Cash left at the end of the period (=Initial endowment of 50 ECUS + Gains from shares and coupons trading - Expenses from shares and coupons trading).

Detailed information on each stage within a period

Initial endowment

Everyone starts each period with 3 Shares A and 12 Shares B. You also get an initial amount of cash of 50 ECUs at the beginning of each period. You can use this money to buy in the share and coupon market. You can buy shares or coupons only if you have enough cash to do so (no borrowing is allowed). This initial allocation is the same for all participants and for all periods.

Stage 1: Share market

Anyone can adjust their own holding of shares by buying and selling them in the share market in stage 1. This share market will operate over the computer network. You won't know the return of a share when trading shares as the scenario (blue or yellow) will be drawn only at the end of stage 1.

If you buy a share, you will have to spend ECUs to buy shares. Shares allow you to get some coupons in stage 2. You will get benefits from each coupon held or you can sell these coupons in stage 2.

If you prefer to buy coupons in the coupon market, you don't need to hold shares. You can get some gains from selling your shares.

You will be first allowed to trade shares A (Stage 1A) and then shares B (Stage 1B).

Stage 2: Coupon market

The coupon market (Stage 2) occurs after you learn the scenario and the number of coupons you get from one share. Anyone can adjust their own holding of coupons by buying and selling them in the coupon market in stage 2. This coupon market will operate over the computer network.

If you buy coupons and keep them until the end of the period, you will get some benefits from these coupons. If the price of a coupon in the market is lower than your benefit from this coupon, you will have a net gain from buying this extra coupon. If the price of a coupon in the market is higher than your benefit from this coupon, you will have a net gain from selling this coupon.

Transaction fee

Each time you buy or sell a coupon, you will have to pay a transaction fee of 2 experimental dollars. This fee will automatically be withdrawn from your cash amount.

For example, if you find a buyer for one of your coupon at the price of 5 experimental dollars, your net gain from trade will be 5-2=3. The buyer will pay a total of 5+2=7 experimental dollars for this coupon.

You pay no transaction fee to buy or sell a share

Period Results

A summary of the results from the period are shown on the Period Results screen. At the end of the instructions you will find a sheet labeled Personal Record Sheet, which will help you keep track of your earnings. You can copy this information onto your Personal Record Sheet at the end of each period, and then click "continue" to begin the next period. You are not to reveal this information to anyone. It is your own private information.

Earnings

You will play for several periods but you will be paid for only one period. This will be randomly determined at the end of the experiment, where one of the participants will pick a ball from a bag where there will be as many balls as periods played. Your final earnings will be the earnings of the period corresponding to the number of the ball drawn.

All earnings on your computer screens are in ECUs. These ECUs will be converted to real euros at the end of the experiment, at a rate of 1 ECU= 0.2 real Euro.

Before you begin making decisions for real money, we will conduct 2 practice periods for you to get comfortable with the trading software. These practice periods do not affect your earnings from the experiment.

How to Buy and Sell

The trading software enables you to trade one share or one coupon at a time. At any time during either market stage, everyone is free to buy an extra unit:

– by making an offer to buy and choose the price offered,
– by buying at the best offer price specified by someone wishing to sell,

You can also sell a coupon or a share:

– by making an offer to sell and choose the price offered,
– by selling at the best offer price specified by someone wishing to buy.

You will enter offer prices and accept prices to execute transactions using your computer.

A screen shot of the market stage is given to the subject.

Some information is given on the upper right of the screen (for example, time left, cash, number of shares). This information is updated after each trade in the period.

Each time you enter an offer to buy or sell, this offer price is immediately displayed on all traders' computers on the part of the screen labeled "Buy Offers" or "Sell Offers". Once an offer price has been submitted, anyone can accept this price offer. Such an acceptance results in an immediate trade at that price. The previous trading prices in the current period are displayed in the "Trading Prices" list in the center of your computer screen.

If there are already buy offers displayed in the current period, then new buy offers submitted by anyone wishing to buy must provide better trading terms to the sellers. Sellers prefer higher prices, so any new buy offers must be higher than the current highest buy offer. Your computer will give you an error message if you try to offer a lower price than the best price currently available. If there are already Sell Offers displayed in the current period, then new sell offers submitted by anyone wishing to sell must provide better trading terms to the buyers. Buyers prefer lower prices, so any new sell offers must be lower than the current lowest sell offer. Your computer will give you an error message if you try to offer a higher price than the best price currently available.

Eventually, after your trade has been finalized, all your previous offers will be removed from the system. To trade another coupon or share, you will need to submit a new offer. For each share or coupon you want to sell or buy, the price you offer can be different.

Summary

Figure 1 (*same as reported in the paper*) summarizes the different stages of the game. Note that you will make decisions only in the stages represented by solid lines boxes.

- Your gains in ECUs for each period is the sum of the cash you have at the end of a period and the benefits you get from the coupons you held.
- You can trade shares A in stage 1A and shares B in stage 1B, before knowing the scenario. You can then trade coupons in stage 2, once the scenario is known.
- The number of coupons you get from one share depends on the scenario ("Blue" or "Yellow") and the type of share (A or B). see table 1
- Your benefits from holding coupons are shown in table 2 (in ECUs).
- You pay a transaction fee of 2 ECUs to buy or sell a coupon. There is no transaction fee to trade shares.
- Everyone starts the experiment with an initial endowment of 50 ECUs and some initial number of shares (3 shares A and 12 shares B). These numbers are the same for all the participants in the room.
- Shares are not kept from one period to the other. At the beginning of a period, you start with the initial number of shares.
- Your final earning will be the earnings from the period corresponding to the number drawn randomly from the bag at the end of the experiment. Your gains from this period in ECUs will be converted to Euros at the end of the experiment, at a rate of 1 ECU = 0.2 Euro.

Conclusion générale

Cette thèse a permis de définir quelques pistes pour l'amélioration des dispositifs d'allocation de l'eau d'irrigation en vue d'une meilleure gestion du risque sécheresse, notamment dans les contextes français et australien. L'objectif était d'une part de mieux comprendre l'impact qu'ont les dispositifs de partage de l'eau sur le risque subi par les agriculteurs et d'autre part de les améliorer afin d'allouer efficacement à la fois la ressource en eau et le risque sécheresse. Nous résumons ici brièvement le cadre général étudié et les contributions de la thèse à la littérature économique et à la gestion de l'eau. Enfin, nous présentons des pistes pour de futures recherches.

Cadre général étudié dans la thèse

Le cadre général étudié dans les différents chapitres de la thèse peut se définir comme suit :

- Étape 1 : Plusieurs agents partagent une ressource en eau de taille incertaine. Les agents établissent des demandes d'un volume d'eau ex-ante, c'est à dire avant de connaître la taille de la ressource. L'approvisionnement en eau n'est pas garanti si la taille de la ressource est insuffisante pour satisfaire les demandes.
- Étape 2 : Une fois la taille de la ressource connue, chacun reçoit une allocation en eau qui dépend de la taille de la ressource et de la règle de partage en vigueur. L'allocation reçue dépend le plus souvent de la demande exprimée ex-ante.
- Les agents ont la possibilité de s'approvisionner en eau autrement qu'en demandant un volume d'eau ex-ante dans la ressource commune.

Ce cadre général est modulé pour capturer les réalités de la gestion de l'eau d'irrigation en France et en Australie.

Les agriculteurs irrigants français font des demandes d'autorisation de prélèvement volumétriques pour pouvoir utiliser la ressource en eau . Cette ressource est commune et sa disponibilité est fluctuante avec les conditions climatiques. Si les agriculteurs décident de construire une réserve sécurisée, ils doivent réduire le volume demandé dans leur autorisation de prélèvement du volume correspondant à celui de la réserve sécurisée. Cette situation est traduite comme suit dans les chapitres 2 et 3 : les agents doivent en étape 1 allouer leur demande totale entre la ressource commune risquée et une ressource sécurisée. L'investissement dans la ressource alternative sécurisée se fait avant de connaître la taille de la ressource commune. Une fois la taille de la ressource commune connue (étape 2), le partage se fait entre les différents agents en fonction d'une règle explicite et connue de tous à l'avance.

En Australie, les agents peuvent détenir des droits d'eau qui leur donnent le droit tous les ans à une allocation d'eau en fonction du volume total disponible. Le cadre est modulé comme suit dans le chapitre 5. L'étape 1 correspond à l'achat de droits d'eau. La règle de partage utilisée dans l'étape 2 pour répartir le volume total disponible entre les détenteurs de droit sous forme d'allocation d'eau est intégrée dans la définition du niveau de sécurité du droit (partage proportionnel s'il n'existe qu'un niveau de sécurité et partage par priorités s'il existe différents niveaux de sécurité). Les allocations sont échangeables. Le marché des allocations permet donc aux usagers non propriétaires de droits d'eau permanents d'acheter de l'eau sous forme d'allocations temporaires, qui constituent dans le chapitre 5 la source d'approvisionnement alternative.

Contributions à la littérature économique

La première contribution de la thèse est liée à l'application de la littérature sur le partage de risque au cas de l'allocation d'eau. Quand il existe des marchés contingents complets et parfaits, l'allocation optimale de la ressource dans chaque état du monde est équivalent à un partage optimal des risques. Dans le contexte australien, l'eau est échangeable sur un marché sous forme de droits d'eau ou sous forme d'allocation d'eau. Ces marchés ne sont néanmoins pas parfaits, notamment en raison des coûts de transaction. Nous avons donc étudié le partage du risque sur les marchés de l'eau en présence de coûts de transaction dans le chapitre 5. L'organisation du partage de l'eau dans le contexte français ne se base pas sur un marché mais sur des règles de rationnement. Il a donc fallu modéliser le problème différemment de façon à définir une règle de rationnement de l'eau qui permet au régulateur d'optimiser à la fois l'allocation de l'eau et le partage du risque. De plus, nous avons ajouté à la question du partage de risque optimal celle de la prise de risque optimale car le risque sécheresse est comme beaucoup de risques environnementaux un risque partiellement endogène (Shogren and Crocker (1992, 1999)) : la probabilité et la sévérité du manque d'eau sont influencées non seulement par les évènements climatiques exogènes, mais aussi par les décisions de prise de risque (et de protection contre le risque) prises par les agents. Le chapitre 2 a permis de déterminer la règle de partage et le niveau de prise de risque qui minimisent le coût social de la sécheresse en allouant l'eau et le risque en tenant compte des différences entre agents dans la valorisation de l'eau ou dans la tolérance au risque. Nous démontrons que la règle optimale partage la ressource en proportion de la tolérance au risque de chaque agent (relative à celle du groupe). Ce résultat n'est pas sans rappeler le théorème de

Borch présenté dans l'*Encadré 5* mais le chapitre 2 va plus loin en définissant la règle optimale de partage quand la prise de risque est endogène.

Une seconde contribution de la thèse est l'étude de l'impact des règles de rationnement sur les décisions des agents quant à l'utilisation d'une ressource commune risquée et d'une ressource payante sécurisée. Nous avons utilisé les règles de partage étudiées par la littérature sur les faillites et proposé une transposition originale au cas d'une ressource en bien commun sur laquelle les agents font des demandes ex-ante et qui doit être rationnée quand le niveau de ressource se révèle insuffisant pour couvrir l'ensemble des demandes individuelles. Nous montrons que la règle de rationnement a un impact sur la prise de risque des individus et donc in fine sur le risque qu'ils subissent. Dans le chapitre 2, à l'équilibre de Nash, les demandes individuelles dans chaque ressource dépendent de la règle. La meilleure règle de partage est alors telle que les interactions stratégiques entre agents sont minimisées. Elle répartit la ressource indépendamment des demandes faites ex-ante à la ressource commune. Les agents ne sont donc pas incités à demander plus de ressource commune, ce qui réduit les effets d'éviction de la règle de partage sur les choix de protection contre le risque des agents. Le chapitre 3 présente un test en laboratoire d'une variation du modèle présenté dans le chapitre 2. L'expérience est un jeu de ressource en bien commun, dans laquelle les sujets arbitrent entre l'utilisation de la ressource commune ou l'investissement dans une ressource sécurisée, et où la règle de partage utilisée en cas de rareté de la ressource est une variable de traitement. Nous pouvons donc observer l'effet de la règle sur les décisions des sujets. Alors même qu'en théorie la règle n'a aucun effet sur la prise de risque d'équilibre (dans le cadre testé dans l'expérience), nous observons néanmoins en laboratoire des différences significatives entre les règles. Dans le cadre du laboratoire, c'est la règle qui partage égalitairement la ressource disponible (CEA) qui est la plus efficace.

La thèse contribue aussi à la littérature expérimentale en intégrant dans des jeux existants des éléments de réalisme pertinents pour la question de la gestion de l'eau. Dans le chapitre 3, nous avons testé l'effet de la règle de partage dans une expérience de ressource en bien commun alors que les expériences existantes considèrent soit que la ressource n'est pas partagée car elle est détruite si les demandes dépassent la taille de la ressource (Budescu et al. (1995)), soit qu'elle est partagée proportionnellement (Walker and Gardner (1992)). Notre expérience permet au contraire de tester différentes règles. Dans le chapitre 5, notre design expérimental est novateur par rapport aux expériences existantes sur les marchés de l'eau car il comprend à la fois un marché des droits d'eau

et un marché des allocation alors que la plupart des expériences existantes ne comprennent que le marché des allocations. De plus, nous testons l'impact de l'existence de droits avec différents niveaux de sécurité, ce qui existe en pratique mais n'a jamais été testé expérimentalement.

Enfin, la thèse apporte une contribution à la littérature expérimentale sur la mesure de l'aversion au risque dans les expériences. Le chapitre 3 a permis de mettre en évidence les effets différenciés de deux types d'aversion au risque dans des situations de coordination avec incertitude : l'aversion à un risque exogène versus l'aversion à l'incertitude stratégique. Nous souhaiterions analyser davantage ce résultat qui semble suggérer que la recherche expérimentale sur les déterminants comportementaux de la coordination devrait inclure plus systématiquement une tâche d'élicitation de l'aversion à l'incertitude stratégique. Le chapitre 5 met en lumière le rôle des préférences vis à vis du risque induites par le design expérimental, et notamment par les fonctions de bénéfices. Dans notre expérience, les préférences induites par le type (chaque type étant défini par une fonction de bénéfice particulière) ont un impact plus fort que les préférences vis à vis du risque élicitées par le choix de loterie. Ce résultat renforce la nécessité de réfléchir davantage à la pertinence de la mesure de l'aversion au risque pour prédire les comportements dans les expériences quand l'élicitation est réalisée avec une tâche très différente du cadre de l'expérience (Wilcox (2009)).

Contributions pour la gestion de l'eau

L'actualité du printemps 2011 en France nous a rappelé que le risque de manque d'eau pour les agriculteurs est bien présent même dans les régions où la pluviométrie est en moyenne relativement élevée. En France, en cas de sécheresse, c'est la gestion de crise qui prévaut avec des restrictions à l'irrigation et, parfois, l'indemnisation des agriculteurs pour le préjudice subi. La thèse a permis de mener une réflexion sur l'usage des dispositifs d'allocation de l'eau dans l'objectif de diminuer le coût social des évènements de sécheresse en partageant efficacement à la fois la ressource et les risques.

Nous avons étudié dans les chapitres 2 et 3 les dispositifs de rationnement mis en place en France en période de crise et montré comment ils peuvent être améliorés de façon à mieux partager les risques entre usagers et orienter les choix d'investissement des agriculteurs dans des ressources en eau alternatives et sécurisées. Nous avons aussi étudié dans les chapitres 4 et 5 les apports des marchés de l'eau, tels qu'existant en

Australie, pour gérer l'allocation de l'eau et du risque. Sur la base de nos résultats, nous formulons ici quelques messages à l'attention des gestionnaires de la ressource en eau en France et en Australie.

Quand l'eau est rationnée par le biais de règles de partage dans les épisodes de sécheresse (France)

L'organisme en charge de définir les règles doit tenir compte de leurs effets sur les décisions des agriculteurs, notamment en terme de protection contre le risque.

- La définition des règles de restriction en fonction de la tolérance au risque des agriculteurs permet de minimiser le coût social de la sécheresse en partageant efficacement la ressource et en envoyant les bons signaux aux agents pour qu'ils prennent des décisions d'auto-assurance adaptées aux coûts et risques en jeu (chapitre 2). Afin de mettre en place cette règle, il convient de définir quels sont les bons indicateurs de la tolérance au risque des agriculteurs et/ou de construire des contrats permettant la révélation de cette information privée.
- Quand les Organismes Uniques auront été constitués, ils devront prendre en compte les interactions possibles entre les règles de partage de l'eau qu'ils devront fixer et les stratégies de gestion du risque des irrigants. Ils devront notamment veiller à ce que les décisions de répartition du volume global prélevable et les règles de restriction en cas de sécheresse soient déconnectées des décisions d'investissement dans des réserves de substitution.
- La règle a priori la plus simple qui consiste à partager l'eau en proportion des demandes faites ex-ante (règle proportionnelle) a des effets pervers. Elle incite les agents à plus compter sur l'eau du périmètre irrigué (ressource commune) et à moins investir dans des ressources sécurisées. En cas de sécheresse, les règles qui partagent le volume prélevable sans tenir compte des demandes réalisées ex-ante sont à privilégier (comme mis en évidence dans l'expérience présentée dans le chapitre 3).

Quand l'eau est allouée par le biais de marchés de l'eau (Australie)

L'institution en charge de la régulation des marchés de l'eau doit veiller aux conséquences de leur éventuelle sophistication.

- La création de droits d'eau avec différents niveaux de sécurité permet aux agents de construire un portefeuille de droits d'eau adapté à leurs préférences vis à vis du risque et ainsi d'aboutir à un meilleur partage des risques entre les agriculteurs.
- La mise en place de droits différenciés permet certes de mieux gérer le risque, mais peut conduire à une diminution de la coût-efficacité du mécanisme en raison de l'augmentation des échanges sur le marché des droits d'eau et donc des coûts de transaction payés par les agriculteurs (qui sont élevés sur le marché des droits) (comme mis en évidence dans l'expérience présentée dans le chapitre 5).

Pistes de recherches futures

Les conclusions de chaque chapitre présentent quelques pistes de recherche. Nous présentons ici des idées plus générales pour compléter la recherche menée pendant la thèse.

La réflexion sur l'allocation des risques de manque d'eau est engagée depuis plusieurs années en Australie. Une des pistes de recherche est la sophistication des marchés de l'eau pour y intégrer des instruments de gestion du risque. Nous avons étudié dans le chapitre 5 une possibilité de sophistication des marchés de l'eau par la création de droits avec différents niveaux de sécurité. L'introduction de marchés d'options est aussi envisagée en Australie. Lors de la signature d'un contrat d'option, les acheteurs achètent le droit d'acheter de l'eau à un prix prédéfini quand certaines conditions pré-établies sont réunies (Howitt (1998)). Il est souvent admis que les agriculteurs seraient prêts à signer des contrats de type option avec d'autres usagers pour recevoir des transferts monétaires en échange de supporter un risque de non approvisionnement en eau. On peut imaginer la signature d'un contrat d'option entre une ville et des agriculteurs (Michelsen and Young (1993), Gomez-Ramos and Garrido (2004), Hansen et al. (2008)), entre gestionnaires de l'eau pour l'environnement et agriculteurs (Hafi et al. (2005)) ou entre industrie hydroélectrique et agriculteurs (Hamilton et al. (1989)). Néanmoins, les études sur les préférences des agriculteurs vis à vis de la sécurité de l'approvisionnement en eau sont rares et ne permettent pas de conclure que l'agriculture dans son ensemble est un secteur prêt à se passer d'eau et arrêter son activité en cas de sécheresse (Rigby et al. (2010), Azahara Mesa-Jurado et al. (2011)). L'étude des préférences des

agriculteurs entre de multiples attributs de l'eau comme le volume, le prix et la sécurité permettrait d'affiner l'analyse et de prévoir les conséquences de la mise en place d'un marché d'option sur la répartition de l'eau entre usages.

De plus, avant de mettre en place des instruments sophistiqués de financiarisation des marchés de l'eau, il paraît nécessaire de mieux étudier le rôle des marchés de l'eau les plus simples (un marché des droits et un marché des allocations) dans la gestion du risque. Ceci est d'autant plus important si les gouvernements souhaitent limiter les marchés de l'eau aux échanges entre agriculteurs (comme cela semble être le cas étant donné les restrictions à l'entrée sur le marché d'autres usagers). La participation au marché des droits ou à celui des allocations en fonction du climat, des conditions du marché et de leurs préférences vis à vis du risque permet déjà aux agriculteurs de gérer leur risque (Bjornlund (2006)). S'il existe des études empiriques sur les déterminants de la participation sur chacun des marchés (voir Bjornlund and Rossini (2005), Wheeler et al. (2009) pour le marché des allocation et Colby et al. (1993), Bjornlund and McKay (1998), Michelsen et al. (2000), Hadjigeorgalis (2002), Bjornlund and Rossini (2007) pour le marché des droits d'eau), aucune étude ne s'est penchée sur les inter-connections entre les deux marchés. Les déterminants de la participation à chaque marché doivent être déterminés simultanément car il existe des effets de substitution entre les deux. L'étude de cette question avec des données de terrain est rendue délicate par la présence de multiples facteurs (conditions climatiques, taux d'intérêt, incertitude sur les changements institutionnels...). Au contraire, les données récoltées en laboratoire permettraient d'observer les préférences des individus pour chaque marché toutes choses égales par ailleurs.

Une réflexion plus large est nécessaire autour de la question de l'échelon optimal pour gérer le risque sécheresse. Dans la thèse, nous avons pris le parti de nous concentrer sur les possibilités de gestion du risque sécheresse offertes au niveau des dispositifs d'allocation de l'eau alors même qu'il existe de multiples instruments à différentes échelles pour la gestion de ce risque (indemnisation par des assureurs privés, par l'État, auto-assurance des agriculteurs ...). Les dispositifs d'allocation de l'eau constituent-ils un bon instrument pour gérer le risque sécheresse ? L'utilisation du même instrument pour deux objectifs différents (l'allocation efficace de l'eau et la gestion du risque sécheresse) est-elle souhaitable et efficace ? Quels sont les impacts du partage du risque par le biais de l'allocation de l'eau sur les autres stratégies et dispositifs de gestion du risque sécheresse ? Peut-on quantifier l'efficacité relative des différents instruments ? Toutes ces

questions restent ouvertes et pourront faire l'objet de nouveaux travaux académiques.

La valorisation de la thèse pourrait aussi passer par des entretiens avec des gestionnaires de l'eau, afin de mieux connaître leur perception du risque et de jauger dans quelle mesure ils considèrent qu'ils ont un rôle à jouer dans la gestion du risque sécheresse. En effet, si la réflexion sur les risques dans la gestion de l'eau est bien présente en Australie (Quiggin (2005)), elle semble pour l'instant plutôt absente en France. Les futurs responsables des Organismes Uniques semblent a priori une cible intéressante pour ces entretiens. L'analyse du processus de négociation autour des nouvelles règles de restriction qui seront choisies au sein de chaque Organisme Unique peut aussi apporter un complément intéressant à notre travail théorique et expérimental sur les règles de partage.

Bibliographie

ABARE (1996). Environmental water flows. Technical report, ABARE, Outlook 96. 4.1.3

Aggarwal (2007). Role of risk sharing and transaction costs in contract choice : Theory and evidence from groundwater contracts. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 63 :475–496. 6

Aguilera, K., Perez Moriana, E., and Sanchez Garcia, J. (2000). The social construction of scarcity. the case of water in tenerife (canary islands). *Ecological Economics*, 34(2) :233–245. 2

Allen Consulting Group (2006). Transaction costs of water markets and environmental policy instruments. Technical report, Productivity Commision, Australia. 4.1.3, 5.1, 5.2

Ambec, S. (2008). Sharing a resource with concave benefits. *Social Choice and Welfare*, 31 :1–13. 2.1, 4

Amigues, J., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., and Thomas, A. (2006). Sécheresse et agriculture : Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Technical report, Expertise scientifique collective INRA (France). (document), 0.1.1, 0.1.3, 0.2.1, 0.2.2, 1.2, 1

Ansink, E. and Ruijs, A. (2008). Climate change and the stability of water allocation agreements. *Environment and Resource Economics*, 41 :249–266. 4.1.3

Ansink, E. and Weikard, H.-P. (2009). Contested water rights. *European Journal of Political Economy*, 25(2) :247–260. 2.1, 3.1

Antle, J. (1987). Econometric estimation of producers' risk attitudes. *American Journal of Agricultural Economics*, 69(3) :509–522. 0.1.4

Ashfaq, M., Jabeen, S., and Ahmad Baig, I. (2005). Estimation of the economic value of irrigation water. *Journal of Agriculture and Social Science*, pages 270–272. 0.1.1

Ashton, D. and Oliver, M. (2008). An economic survey of irrigation farms in the murray-darling basin. Technical report, ABARE, Canberra. 4.2.2, 4.1

Aumann, R. and Maschler, M. (1985). Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the talmud. *Journal of Economic Theory*, 36 :195–213. 2.1, 3.1

Australian Bureau of Statistics (2004). Water account 2004-2005. Technical report, Australian Bureau of Statistics.

Australian Bureau of Statistics (2008). Water account 2008-2009. Technical report, Australian Bureau of Statistics.

Azahara Mesa-Jurado, M., Martin-Ortega, J., Ruto, E., and Berbel, J. (2011). The economic value of guaranteed water supply for irrigation under scarcity conditions. In *EAERE annual conference Roma 2011*. 0.1.4, 5.6

Babcock, B. A. and Shogren, J. F. (1995). The cost of agricultural production risk. *Agricultural Economics*, 12(2) :141 – 150. 0.1.4

Barbier, R., Barreteau, O., and Breton, C. (2007). Gestion de la rareté de l'eau : entre application négociée du décrêt sécheresse et émergence d'arrangements locaux. Technical report, Cemagref. 1.2.1

Bardsley, N., Cubitt, R., Loomes, G., Moffat, P., Starmer, C., and Sugden, R. (2010). *Experimental Economics : Rethinking the Rules*. Princeton University Press. 0.3.3, 7

Berbel, J. and Gomez-Limon, J. A. (2000). The impact of water-pricing policy in spain : an analysis of three irrigated areas. *Agricultural Water Management Science*, 43 :219–238. 0.1.1

Bergez, J.-E. and Lacroix, B. (2008). Gestion de l'irrigation : du stratégique au tactique. quelques apports de la recherche. *Innovations Agronomiques*, 2 :53–63. 1

Binswanger, H. P. (1980). Attitudes toward risk : Experimental measurement in rural india. *American Journal of Agricultural Economics*, 62(3) :395–407. 0.1.4, 2.3.2

Bjornlund, H. (2003). Farmer participation in markets for temporary and permanent water in southeastern australia. *Agricultural Water Management*, 63 :57–76. 5.2

Bjornlund, H. (2006). Can water markets assist irrigators managing increased supply risk ? some australian experiences. *Water International*, 31(2) :221–232. 0.1.4, 4.1.2, 4.1.3, 4.2.2, 5.1, 5.6

Bjornlund, H. and McKay, J. (1998). Factors affecting water prices in a rural water market : A south australian experience. *Water Resources Research*, 34(6) :1563–1570. 5.6

Bjornlund, H. and Rossini, P. (2005). Fundamental determining prices and activities in markets for water allocations. *International Journal of Water Resources Development*, 21(2) :355–369. 4.2.2, 5.6

Bjornlund, H. and Rossini, P. (2007). Fundamentals determining prices in the market for water entitlements : An australian case study. *International Journal of Water Resources Development*, 23(3) :537 – 553. 4.2.2, 5.6

Bjornlund, H. and Rossini, P. (2008). Are the fundamentals emerging for more sophisticated water market instruments ? In *Proccedings from the 14th Annual Conference of the Pacific Rim Real estate Society, Kuala Lumpur, Malaysia*. 5.1, 5.2

Blanco, M., Engelmann, D., Koch, A. K., and Normann, H.-T. (2010). Belief elicitation in experiments : Is there a hedging problem ? *Experimental Economics*, 13(4) :412–438. 8

Bohnet, I. and Zeckhauser, R. (2004). Trust, risk and betrayal. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 55(4) :467 – 484. Trust and Trustworthiness. 3.2.2

Bond, G. and Wonder, B. (1980). Risk attitudes amongst australian farmers. *Austalian Journal of Agricultural Economics*, 24(1) :16–34. 0.1.4

Booker, J. and Young, R. (1994). Modeling intrastate and interstate markets for colorado river water resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, 26(1) :66–87. 4.1.3

Borch, K. (1962). Equilibrium in a reinsurance market. *Econometrica*, 30(3) :424–444. *a*, 5.4.4

Boulanger, P. (2007). Subventions directes agricoles et gestion quantitative des ressources en eau. Policy Brief GEMPB-2007-4. 1

Bourgeon, J.-M., Easter, K. W., and Smith, R. B. (2008). Water markets and third-party effects. *American Journal of Agricultural Economics*, 90(1) :902–917.

Brennan, D. (2006). Water policy reform in australia : lessons from the victorian seasonal water market. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 50 :403–423. 5.2

Brooks, R. and Harris, E. (2008). Efficiency gains from water markets : Epirical analysis of watermove in australia. *Agricultural Water Management*, 95 :391–399. 4.1.3, 5.3.2

Brown, P. M. and Stewart, S. (1999). Avoiding severe environmental consequences : Evidence on the role of loss avoidance and risk attitudes. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 38 :179–198. 5.3.4

Budescu, Rapoport, and Suleiman (1995). Common pool resource dilemnas under uncertainty : Qualitative tests of equilibrium solutions. *Games and Economic Behavior*, 10 :171–201. 3.1, 3.2.1, 3.2.2, 5.6

Calatrava, J. and Garrido, A. (2005). Spot water markets and risk in water supply. *Agricultural Economics*, 33 :131–143. 4.2.2, 5.1, 5.2

Calatrava, J. and Garrido, A. (2006a). Difficulties in adopting formal water trading rules within users' associations. *Journal of Economic Issues*, XL(1) :27–44. 5.1

Calatrava, J. and Garrido, A. (2006b). *Risk aversion and gains from water trading under uncertain water availability*, pages 43–67. Frontiers in Water Resource economics. Goetz and Berga, springer edition. 2.3.2, 4.2.2

Calatrava Leyva, J. and Sayadi, S. (2005). Economic valuation of water and willingness to pay analysis with respect to tropical fruit production in southeastern spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3 :25–33. 0.1.1

Carey, J., Sunding, D. L., and Zilberman, D. (2002). Transaction costs and trading behavior in an immature water market. *Environment and Development Economics*, 7(4) :733–750. Special Issue : The economics of water : environment and development. 5.1, 5.2

Cason, T. N. and Friedman, D. (2008). *A comparaison of Market Institutions*, volume 1 of *Handbook of Experimental Economic Results*, pages 264–272. North Holland. 5.3.2

Cason, T. N. and Gangadharan, L. (2003). Transactions costs in tradable permit markets : An experimental study of pollution market designs. *Journal of Regulatory Economics*, 23(2) :145–165. 5.1

Charness, G. and Gneezy, U. (2009). Portfolio choice and risk attitudes : An experiment. 3.2.2

Chavas, J. and Holt, M. (1996). Economic behavior under uncertainty : A joint analysis of risk preferences and technology. *The Review of Economics and Statistics*, 78(2) :329–335. 0.1.4

Cheminaud, M., Cros, P., Fauré, P., Roux, A., Gilot, A., Lafitte, J.-J., Nau, F., and Nicolazo, J.-L. (2007). Préconisations pour la mise en oeuvre du plan national de gestion de la rareté de l'eau. Technical report. 1.1.3, 1.2.2

Chermak, J. and Krause, K. (2002). Individual response, information, and intergenerational common pool problems. *Journal of Environmental Economics and Management*, 43 :47–70. 3.2.2

Coase, R. (1960). The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, 3 :1–44. 4.1.4

Cochard, F., Willinger, M., and Xepapadeas, A. (2005). Efficiency of nonpoint source pollution instruments : An experimental study. *Environmental & Resource Economics*, 30(4) :393–422. 3.4.2

Colby, B., Crandall, C., and Bush, D. (1993). Water right transactions : Market values and price dispersion. *Water Resources Research*, 29(6) :1565–1572. 5.6

Colby, B. G. (1990). Transaction costs and efficiency in western water allocation. *American Journal of Agricultural Economics*, 72(5) :1184–92. 5.1, 5.2

Coman, K. (1911). Some unsettled problems of irrigation. *American Economic Review*, 101(1) :36–48. 3.1

Conseil des minstres du 26 octobre 2005 (2005). Plan de gestion de la rareté de l'eau. 1.1.3

Cooper, R., De Jong, D., Forsythe, R., and Ross, T. (1990). Selection criteria in coordination games : Some experimental results. *American Economic Review*, 80 :218–233. 9

Cooper, R., De Jong, D., Forsythe, R., and Ross, T. (1992). Communication in coordination games. *Quarterly Journal of Economics*, 107 :739–771. 9

Couture, S. and Reynaud, A. (2010). Stability of risk preference measures : Results from a field experiment on french farmers. TSE Working Papers 10-151, Toulouse School of Economics. 0.1.4, 2.3.2

Crase, L. (2008). *Water Policy in Australia, the impact of Change and Uncertainty.* Resources for the Future. 4, 4

Cristi, O. (2007). *The influence if heterogeneous risk preferences on water market activity : an application to the Paloma System of the Limari Water Basin, Chile.* PhD thesis, Agriculture and Resource and Economics Department, University of California, Davis. 4.2.2, 5.2

Cristi, O. and Alevy, J. E. (2009). Water market experiments in the limari valley of chile. Working paper. 5.1

Croson, R. (2000). hinking like a game theorist : Factors affecting the frequency of equilibrium play. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 41 :299–314. 3.2.2, 8

Cummings, R., Holt, C., and Laury, S. (2004). Using laboratory experiments for policy making : an example from the georgia irrigation reduction auction. *Journal of Policy Analysis and Management*, 23(2). 0.3.3

Davies, P. E., Harris, J. H., Hillman, T. J., and Walker, K. F. (2010). The sustainable rivers audit : assessing river ecosystem health in the murray-darling basin, australia. *Marine and Freshwater Research*, 61(7) :764–777. 4.2.1

Denant-Boèmont, L. (2008). L'économie expérimentale comme outil d'aide á la décision. *Economie & prévision*, 182(1) :1–6. 0.3.3

Désolé, M. (2011). *Théorie des jeux, Jeux de rôles, expérimentation pour la gestion de l'eau : étude expérimentale des effets de contexte sur les résultats d'un jeu de rôles.* PhD thesis, Montpellier Supagro, Centre international d' études supérieures en sciences agronomiques. 0.3.3

Devetag, G. and Ortmann, A. (2007). When and why ? a critical survey on coordination failure in the laboratory. *Experimental Economics*, 10 :331–344. 9

Di Cagno, D. and Spallone, M. (2010). An experimental investigation on optimal bankruptcy laws. *European Journal of Law and Economics.* 3.1

Dinar, A., Rosegrant, M. W., and Meinzen-Dick, R. (1997). Water allocation mechanisms : principles and examples. Policy Research Working Paper WPS1779, World Bank. 0.3.2

Duke, C. and Gangadharan, L. (2008). Salinity in water markets : An experimental investigation of the sunraysia salinity levy in australia. *Ecological Economics*, 68(1-2) :486 – 503. 0.3.3

Eeckhoudt, L. and Godfroid, P. (2000). Risk aversion and the value of information. *Journal of Economic Education*, 31(4) :382–388. 4

Eeckhoudt, L., Gollier, C., and Schlesinger, H. (2005). *Economic and Financial Decisions under Risk.* 0.3.1, 0.3.1, 2.5, 5.4.4

Ehmke, M. D. and Shogren, J. (2008). Experimental methods for environment and development economics. *Environment and Development Economics*, 14 :419–456. 0.3.3

Ehrlich, I. and Becker, G. (1972). Market insurance, self-insurance, and self-protection. *The Journal of Political Economy*, 80(4) :623–648. 0.2.2, 2.1, 3.1

Erdlenbruch, K. and Montginoul, M. (2009). Les réserves de substitution sont-elles une solution à la pénurie d'eau ?. *Ingenieries E.A.T.*, 59-60(c) :131–136. 0.1.3, 1.1.3, 1

Erdlenbruch, K., Montginoul, M., and Mullens, A. (2008). Gestion collective des prélèvements individuels : Etat d'avancement de l'article 21 de la lema et réflexions à partir de deux exemples sur ses perspectives de mise en place. Technical report, UMR G-eau Cemagref Convention 2007 Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - Cemagref. 1.1.3, 1.2.2

Etchart-Vincent, N. (2007). Expérimentation de laboratoire et économie : Contre quelques idées reçues et faux problèmes. *Actualité Economique*, 83(1) :91–116. 0.3.3, 0.3.3

Fafchamps and Lund (2003). Risk-sharing networks in rural philippines. *Journal of Development Economics*, 71 :261–287. 6

Fapchamps, M. (2003). *Rural poverty, Risk and Development*. Edward Elgar Publishing. 2.3.2

Faysse, N. (2001). *L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs Des petits perimètres irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière dans le bassin de l Adour*. PhD thesis, Université de Paris X Nanterre. 0.3.1, 1.5

Feltovich, N. (2003). Nonparametric tests of differences in medians : comparison of the wilcoxon-mann-whitney and robust rank-order tests. *Experimental Economics*, 6(3) :273–297. 5.6

Fischbacher, U. (2007). z-tree : Zurich toolbox for ready-made economic experiments. *Experimental Economics*, 10(2) :171–178. 5.3.4

Foudi, S. and Erdlenbruch, K. (2011). The role of irrigation in farmers' risk management strategies in france. *European Review of Agricultural Economics*, forthcoming. 0.1.1

Freebairn, J. (2003). Principles for the allocation of scarce water. *The Australian Economic Review*, 36 :203–212. 4.1.2

Freebairn, J. and Quiggin, J. (2006). Water rights for variable supplies. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 50 :295–312. 4.1.3, 4.2.2, 5.2

Gachter, S. and Renner, E. (2010). The effects of (incentivized) belief elicitation in public goods experiments. *Experimental Economics*, 13(3) :364–377. 3.2.2, 8

Gachter, S. and Riedl, A. (2006). Dividing justly in bargaining problems with claims. *Social Choice Welfare*, 27(3) :571–594. 3.1, 3.5

Gangadharan, L. (2000). Transactions costs in pollution markets : An empirical study. *Land Economics*, 76(4) :601–614. 5.1

Gardner, B. D. and Fullerton, H. H. (1968). Transfer restrictions and misallocations of irrigation water. *American Journal of Agricultural Economics*, 50(3) :556–571. 5.1

Garrido, A. (2007a). Designing water markets for unstable climatic conditions : Learning from experimental economics. *Review of Agricultural Economics*, 29(3) :520–530. 0.3.3

Garrido, A. (2007b). Water markets design and evidence from experimental economics. *Environmental & Resource Economics*, 38(3) :311–330. 0.3.3, 5.1

Gneezy, U. and Potters, J. (1997). An experiment on risk taking and evaluation periods. *The Quaterly Journal of Economics*, 112(2) :631–645. 3.2.2

Godby, R., Mestelman, S., Muller, R. A., and Welland, J. D. (1997). Emissions trading with shares and coupons when control over discharges is uncertain. *Journal of Environmental Economics and Management*, 32 :359–381. 5.1, 7

Goesch, T., Hafi, A., Heaney, A., and Szakiel, S. (2006). Exit fees and interregional water trade : an analysis of the efficiency impacts of exit fees. Technical Report 06.5, Abare research report, Australia. 4.1.4

Goetz, R., Martinez, Y., and Jofre, R. (2008). Water allocation by social choice rules : The case of sequential rules. *Ecological Economics*, 65(2) :304–314. 3.1

Gollier, C. (2008). Intergenerational risk-sharing and risk-taking of a pension fund. *Journal of Public Economics*, 92(5-6) :1463 – 1485. 10

Gomez-Limon, J. A. and Berbel, J. (2000). Multicriteria analysis of derived water demand functions : a spanish case study. *Agricultural Systems*, 63 :49–72. 0.1.1

Gomez-Ramos and Garrido (2004). Formal risk-transfer mechanisms for allocating uncertain water resources : The case of option contract. *Water Resources Research*, 40. 5.6

Grafton, Q., Clay, L., Libecap, G., and O'Brien, R. (2010). Water markets : Australia's murray darling basin and the us southwest. Technical Report March, National Bureau of Economic Research. 4.1.1, 4.6

Grafton, R. Q. and Peterson, D. (2007). *Water trading and pricing*, pages 73–84. Managing Water for Australia. CSIRO Publising. 5.2

Greenwood, P. and Ingene, C. (1978). Uncertain externalities, liability rules, and resource allocation. *American Economic Review*, 68(3) :300–310. 4.1.4

Groom, Koundouri, Nauges, and Thomas (2006). The story of the moment : risk averse cypriot farmers respond to drought management. *Applied Economics*. 0.1.4

Hadjigeorgalis, E. (1999). Trading under risk and uncertainty in an agricultural water market in chile. In *American Agricultural Economics Association, 1999 Annual meeting, August 8-11, Nashville, TN*. 4.2.2

Hadjigeorgalis, E. (2000). *Private Water Markets in Agriculture and the effects of Risk, Uncertainty, and Institutional Constraints*. PhD thesis, Agriculture and Resource and Economics Department, University of California, Davis. 0.1.4

Hadjigeorgalis, E. (2002). Water rights heterogeneity and price determination : How market and product attributes affect agricultural water market prices. In *American Agricultural Economics Association, 2002 Annual meeting, July 28-31, Long Beach, California*. 5.6

Hafi, Beare, Heaney, and Page (2005). Water options for environmental flows. Technical report, Abare. 5.6

Hamilton, Whisttley, and Halverson (1989). Interruptible water markets in the pacific northwest. *American Journal of Agricultural Economics*, 71 :63–75. 5.6

Hansen, K., Howitt, R., and Williams, J. (2008). Valuing risk : Options in california water markets. *American Journal of Agricultural Economics*, 90(5) :1336–1342. 5.6, 5.6

Hansen, K., Kaplan, J., Kroll, R., and Howitt, R. (2007). Valuing options in california water markets : A laboratory investigation. *Working Paper*. 0.3.3, 5.1

Harrison, G. W. (1989). Theory and misbehavior of first-price auctions. *American Economic Review*, 79 :749–762. 4

Harrison, G. W., Humphrey, S. J., and Verschoor, A. (2010). Choice under uncertainty : Evidence from ethiopia, india and uganda. *Economic Journal*, 120 :80–104. 0.1.4

Harrison, G. W. and List, J. A. (2004). Field experiments. *Journal of Economic Literature*, 42(4) :1009–1055. 0.3.3

Harsanyi, J. and Selten, R. (1988). *A General Theory of Equilibrium Selection in Games*. MIT Press. 3.3

Heinemann, F., Nagel, R., and Ockenfels, P. (2004). The theory of global games on test : experimental analysis of coordination games with public and private information. *Econometrica*, 72(5) :1583–1599. 3.2.2

Heinemann, F., Nagel, R., and Ockenfels, P. (2009). Measuring strategic uncertainty in coordination games. *The Review of Economic Studies*, 76 :181–221. 3.2.2, 3.3, 3.4.3

Henny, F. (2010). Gestion de la ressource en eau en alsace : Révision des arrêtés cadre šécheresse:. Master's thesis, Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES. 1.2.1, 1.2.2

Hensher, D., Shore, N., and Train, K. (2006). Water supply security and willingness to pay to avoid drought restrictions. *The economic Record*, 82 :56–66. 0.1.4

Herberich, D. H., Levitt, S. D., Ogden, W. B., and List, J. A. (2009). Can field experiments return agricultural economics to the glory days ? *American Journal of Agricultural Economics*, 91(5) :1259–1265. 5.6

Herrero, C., Moreno-Ternero, J., and Ponti, G. (2010). On the adjudication of conflicting claims : an experimental study. *Social Choice and Welfare*, 34(1) :145–179. 3.1, 3.5

Herrero, C. and Villar, A. (2001). The three musketeers : four classical solutions to bankruptcy problems. *Mathematical Social Sciences*, 42(3) :307–328. 2.1, 3.1

Hey, J. and Lee, J. (2005). Do subjects separate (or are they sophisticated) ? *Experimental Economics*, 8 :233–265. 3.2.2

Hoeberichts (1995). How do water users perceive the quality of their irrigation services ? application of participatory research methodologies. Technical report, International irrigation management institute, Lahore. 0.1.4

Horridge, M., Madden, J., and Wittwer, G. (2005). The impact of the 2002-2003 drought on australia. *Journal of Policy Modelling*, 27(3) :285–308. 0.1.3

Hounam, C., Burgosm, J., Kalik, M., Palmer, W., and Rodda, J. (1975). Drought and agriculture. WMO technical note 138, Geneva World Meteorological Organization. 0.1.2

Howe, C. and Smith, M. (1993). Incorporating public preferences in planning urban water supply reliability. *Water Resources Research*, 29(10) :3363–3369. 0.1.4

Howe, C. and Smith, M. (1994). The value of water supply reliability in urban water systems. *Journal of Environmental Economics and Management*, 26 :19–30. 0.1.4

Howitt, R. E. (1998). Spot prices, option prices and water markets : An analysis of emerging markets in california. In Easter, Rosegrant, D., editor, *Markets for water : Potential and Performance*. Kluwer Academic Publisher. 4.2.2, 5.2, 5.6, 5.6

Howitt, R. E. and Taylor, C. R. (1993). *Some microeconomics of agricultural resource use*, pages 28–68. Agricultural and Environmental Resource Economics. Oxford University Press. 4.2.2

Hughes, N. and Goesch, T. (2009). Management of irrigation water storages : carryover rights and capacity sharing. Technical report, ABARE research report 09.10. 4.1.2, 5.2

Iglesias, E., Garrido, A., and Gómez-Ramos, A. (2003). Evaluation of drought management in irrigated areas. *Agricultural Economics*, 29 :211–229. (document)

Innes, R. (2003). Crop insurance in a political economy : An alternative perspective on agricultural policy. *American Journal of Agricultural Economics*, 85(2) :318–335. 0.2.1

IPCC (2008). Climate change and water. Technical report, IPCC Secretariat, Geneva, Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof. (document), 0.1.2

Kerr, S. and Mare, D. (1995). Efficient regulation through tradable permit markets : The united states lead phasedown. University of Maryland Department of Agricultural and Resource Economics Working Paper 90-06. 5.1

Keser, C. and Gardner, R. (1999). Strategic behavior of experienced subjects in a common pool resource game. *International Journal of Game Theory*, 28(2) :241–252. 3.2.1, 3.3

Kimura, S. and Antón, J. (2011). Risk management in agriculture in australia. OECD Food, Agriculture and Fisheries Working Papers 39, OECD Publishing. 0.2.1, 0.2.2, 4.8

King, D. (2005). Cruch time for water quality trading. *Choices*, 20(1) :71–. 4.1.4

Knight (1921). *Risk, Uncertainty and Profit*. Boston, MA : Hart, Schaffner and Marx ; Houghton Mifflin Company. 0.1.2

Koundouri, P., Laukkanen, M., Myyra, S., and Nauges, C. (2009). The effects of eu agricultural policy changes on farmers' risk attitudes. *European Review of Agricultural Economics*, 36(1) :53–77. 0.1.4

Koundouri, P., Nauges, C., and Tzouvelekas, V. (2006). Technology adoption under production uncertainty : Theory and application to irrigation technology. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(3) :657–670. 0.2.2

Lafitte, J. and Nicolazo, J.-L. (2006). Mise en oeuvre du décret sécheresse : Audit des mesures prises. Technical report, Rapport de l'inspection générale de l'environnement. 1.1.1, 1.2.1

Lee, J. (2008). The effect of the background risk in a simple chance improving decision model. *The Journal of Risk and Uncertainty*, 36 :19–41. 3.2.2

Levy, J.-D., Bertin, M., Combes, B., Mazodier, J., and Roux, A. (2005). Irrigation durable. Technical report, Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. 1.1.2

Libecap, G. (2011). Institutional path dependence in climate adaptation : Coman's "some unsettled problems of irrigation". *American Economic Review*, 101 :1–19. 5.1, 5.2

Liu, L. (2004). A new foundation for the mean variance analysis. *European Journal of Operational Research*, 158 :229–242. 7

Lund, J. (1995). Derived estimation of willingness to pay to avoid probabilistic shortage. *Water Resour. Res.*, 31(5) :1367–1372. 0.1.4

Malcolm, B. and Larson, K. (2010). Exceptional persistence : Drought and drought policy. *Australian Agribusiness Perspectives*, 18(85). 0.2.1

Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*. 2.4

Meinzen-Dick, R. (1996). Groundwater markets in pakistan. Technical Report 105, International Food Policy Research Institute (IFPRI). 4.1.3

Ménard, C. (2004). Gestions des risques climatiques en agriculture. engager une nouvelle dynamique. Technical report, Assemblée Nationale, France. 0.2.1

Meyer, J. (1987). Two-moment decision models and expected utility maximization. *The American Economic Review*, 77(3) :421–430. 2.4

Michelsen and Young (1993). Optioning agricultural water rights for urban water supplies during drought. *American Journal of Agricultural Economics*, 75(4) :1010–1020. 4.1.3, 5.6

Michelsen, A., Booker, J., and Person, P. (2000). Expectations in water rights prices. *Water Resources Development*, 16(2) :209–219. 5.6

Moulin, H. (2000). Priority rules and other asymmetric rationing methods. *Econometrica*, 68 :643–684. 2.2.1, 2.2.2

Moulin, H. (2001). *Axiomatic cost and surplus-sharing*. Number 17 in The Handbook of Social Choice and Welfare. 2.1, 3.1

Murgai, R. (1998). Skirting the rules : Collective management and informal exchange of formal water rights in pakistan. Technical report, Development Economics Research Group, The World Bank. 0.2.2

Murphy, Dinar, A., Howitt, R., Rassenti, and Smith, V. (2000). The design of "smart" water market institutions using laboratory experiments. *Environmental and Resource Economics*, 17(4) :375–394. 0.3.3

Mushtaq, S., Hanjra, M. A., Chen, C., Hafeez, M., Maroulis, J., and Gabriel, H. (2009). The economic value of improved agrometeorological information to irrigators amid climate variability. *International Journal of Climatology*. 0.2.2

National Water Comission (2009). Australian water market report 2008-2009. Technical report, National Water Comission, NWC, Canberra. 5.1

National Water Comission (2010). Australian water market report 2009-2010. Technical report, National Water Comission, NWC, Canberra.

Nguyen, N., Wegener, M., and Russel, J. (2006). Risk management tools for dryland farmers in southwest queensland : an action research approach. In *APEN 2006 international conference, Beechworth, Victoria*. 4.2.2

Noussair, C., Plott, C., and Riezman, R. (1995). An experimental investigation of the patterns of international trade. *The American Economic Review*, 85(3) :462–491. 8

Noussair, C. and Porter, D. (1992). Allocating priority with auctions : an experimental analysis. *Journal of Econonomic Behavior and Organization*, 19 :169–195. 2

Nyarko, Y. and Schotter, A. (2002). An experimental study of belief learning using elicited beliefs. *Econometrica*, 70(3) :971–1005. 6

OECD (2009). The political economy of reform. lessons from pensions, product markets and labour markets in 10 oecd countries. Technical report, OECD. 4

OECD (2010). Sustainable management of water resources in agriculture. Technical report, OECD. (document), 4, 0.3.2

OECD (2011). Risk management in agriculture. Technical report, OECD. 0.2

Office International de l'Eau (2009). Organisation de la gestion de l'eau en france. Technical report, Office International de l'Eau. 1

Ostrom, E. (2011). Some unsettled problems of irrigation. *The American Economic Review*, 101(1) :49–63. 3.1

Parker, S. and Speed, R. (2010). Agricultural water pricing : Australia. Technical report, OECD. 4.1.3

Plott, C. (1979). *The application of laboratory experimental methods to public choice*, pages 137–160. Collective Decision Making : Applications from Public Choice Theory. Resources for the Future, Washington, DC. 0.3.3

Productivity Comission (2010). Market mechanisms for recovering water in the murray darling basin. Technical report. 4.1.3, 4.2.1, 5.3.2

Productivity Commision (2003). Water rights arrangements in australia and overseas. Technical report. 0.1.2, 4.1.3

Productivity Commision (2006). Rural water use and the environment : The role of market mechanisms. Technical report. 4.1.4

Productivity Commision (2009). Government drought support. Final Inquiry Report, Melbourne 46. 0.1.3, 0.2.1, 4, 4.9

Provencher, B. and Burt, O. (1993). The externalities associated with the common property exploitation of groundwater. *Journal of Environmental Economics and Management*, 24(2) :139–158. 4.1.4

Quiggin, J. (1981). Risk perception and the analysis of risk attitudes. *Austalian Journal of Agricultural Economics*, 25(2) :160–169. 0.1.4

Quiggin, J. (2005). Risk and water management in the murray-darling basin. Murray Darling Program Working Paper M05-4 , Risk & Sustainable Management Group. 5.6

Quiggin, J. (2006). Urban water supply in australia : The option of diverting water from irrigation. *Public Policy*, 1(1) :14–22. 4.1.3

Quiggin, J. (2008). *Uncertainty, Risk and Water management in Australia*, chapter 5. Water policy in Australia : the impact of change and uncertainty. Resources for the Future. 5.2

Quiggin, J. and Chambers, R. (2004). Drought policy : a graphical analysis. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 48(2) :225–251. 0.2.2

Qureshi, M., Shi, T., Qureshi, S., and Proctor, W. (2009). Removing barriers to facilitate efficienct water markets in the murray-darling basin of australia. *Agricultural Water Management*, 96 :1641–1651. 4.1.4

Randall, A. (1981). Property entitlements and pricing policies for a mature water economy. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 25 :195–220. 4.1.1

Reynaud, A. (2009). Adaptation à court et à long terme de l'agriculture au risque de sécheresse une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement*, 90(2) :121–154. 0.1.4, 0.2.2, 1.2.2

Reynaud, A., Couture, S., Duruy, J., and Bergez, J.-E. (2011). Farmer's risk attitude : Reconciliating stated and revealed preference approaches. Mimeo, University of Toulouse 1. 0.1.4

Rigby, D., Alcon, F., and Burton, M. (2010). Supply uncertainty and the economic value of irrigation water. *European Review of Agricultural Economics*, 37(1) :97–117. 0.1.1, 0.1.4, 5.6

Robinson, L. and Barry, P. (1987). *The competitive Firm's response to risk*. Mac Millan, New-York. 0.1.2

Roth, A. and Malouf, M. K. (1979). Game-theoretic models and the role of bargaining. *Psychological Review*, 86 :574–594. 9

Roth, E. A. (1988). Laboratory experimentation in economics : A methodological overview. *Economic Journal*, 98(393) :974–1031. 0.3.3

Rubinstein, A. (2001). A theorist' s view of experiments. *European Economic Review*, 45 :615–628. 7

Saha, A., Shumway, C. R., and Talpaz, H. (1994). Joint estimation of risk preference structure and technology using expo-power utility. *American Journal of Agricultural Economics*, 76(2) :173–184. 0.1.4

Samuelson, P. A. (1970). The fundamental approximation theorem of portfolio analysis in terms of means, variances and higher moments. *The Review of Economic Studies*, 37(4) :537–542. 7

Schelling, T. C. (1960). *The Strategy of Conflict*. Cambridge Massachusetts : Harvard University Press. 3.3

Schoemaker, P. J. H. (1993). Determinants of risk-taking : Behavioral and economic views. *Journal of Risk and Uncertainty*, 6 :49–73. 5.4.4

Schoengold, K., Sunding, D. L., and Moreno, G. (2006). Price elasticity reconsidered : Panel estimation of an agricultural water demand function. *Water Resources Research*, 42. 0.1.1

Schroyen, F. and Oyenuga, A. (2011). Optimal pricing and capacity choice for a public service under risk of interruption. *Journal of Regulatory Economics*, 39 :252–272. 2.1

Schuck, E., Frasier, W. M., Webb, R. S., Ellingson, L. J., and Umberger, W. (2005). Adoption of more technically efficient system as a drought response. *Water Resources Development*, 21(4) :651–662. 0.2.2

Shi, T. (2006). Simplifying complexity : Rationalising water entitlements in the southern connected river murray system, australia. *Agricultural Water Management*, 86 :229–239. 4.2.2, 5.2

Shogren, J. and Crocker, T. (1992). Endogeneous risk and environmental policy. Working paper Centre for Agricultural and Rural Development 1992. 0.3.1, 5.6

Shogren, J. and Crocker, T. (1999). Risk and its consequences. *Journal of Environmental Economics and Management*, 37 :44–51. 0.3.1, 5.6

Sinn, H.-W. (1983). *Economic Decisions under uncertainty*. North-Holland Publishing Company, 2nd edition edition. 2.4

Sonnemans, J. and Offerman, T. (2001). Is the quadratic scoring rule really incentive compatible. Working Paper CREED. Amsterdam, University of Amsterdam. 6

Starmer, C. and Sugden, R. (1991). Does the random-lottery incentive system elicit true preferences ? an experimental investigation. *American Economic Review*, 81 :971–978. 3.2.2

Stiglitz, J. (1974). Incentives and risk sharing in sharecropping. *Review of Economic Studies*, 41 :219–255. 6

Strosser, P. and Montginoul, M. (2001). Vers des marchés de l'eau en france ? quelques éléments de réflexion. *Annales des Mines*, pages 13–31. 4.1.3, 4.1.3

Tanaka, T., Camerer, C., and Nguyen, Q. (2010). Risk and time preferences : Linking experimental and household survey data from vietnam. *The American Economic Review*, 100(1) :557–571. 0.1.4

Tardieu, H. (1999). La valeur de l'eau en agriculture irriguée. Technical report, CACG. 0.1.1

Tarlock, A. D. (2000). How well can international water allocation regimes adapt to global climate change. *Journal of Land Use & Environmental Law*, 15. 2.3.2

Thomson, W. (2003). Axiomatic and game theoretic analysis of bankruptcy and taxation problems. *Mathematical Social Sciences*, 45 :249–297. 2.2.2

Thoyer, S. (2006). How to reallocate water rights when environmental goals conflict with existing entitlements. *International Journal of Sustainable Development*, 9(2) :122–137. 4.1.4, 4.2.1

Thoyer, S., Peterson, D., and Salles, J. (2008). Who gets what ? policy lessons on how to share scarce irrigation water during droughts. In *13th IWRA World Water Congress, Montpellier, 1-4 september 2008*. 0.2.2

Tisdell, J., Ward, J., and Grudzinski, T. (2002). The development of water reform in australia. Technical Report 02/5, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. 4

Udry (1994). Risk and insurance in a rural credit market : An empirical investigation in northern nigeria. *The Review of Economic Studies*, 61(3) :495–526. 6

Van Huyck, J. B., Battalio, R. C., and Beil, R. O. (1990). Tacit coordination games, strategic uncertainty, and coordination failure. *American Economic Review*, 80 :234–248. 3.3

Vandeveer, L., Paxton, K., and Lavergne, D. (1989). Irrigation and potential diversification benefits in humid climats. *Southern Journal of Agricultural Economics*, 21 :167–174. 0.1.1

Walker, J. and Gardner, R. (1992). Probabilitic destruction of common-pool resources : Experimental evidence. *The Economic Journal*, 102(414) :1149–1161. 3.1, 3.2.1, 3.3, 5.6

Ward, F. A. and Michelsen, A. (2002). The economic value of water in agriculture : concepts and policy applications. *Water Policy*, 4 :423–446. 0.2.2

Wenthworth Group of Concerned Scientists (2010). Sustainable diversions in the murray-darling basin. Technical report, Wenthworth Group of Concerned Scientists. 4.2.1

Wheeler, S., Bjornlund, H., Shanahan, M., and Zuo, A. (2009). Who trades water allocations ? evidence of the characteristics of early adopters in the goulburn-murray irrigation district, australia 1998-1999*. *Agricultural Economics*, 40(6) :631–643. 4.2.2, 5.6

Wilcox, N. (2009). Measuring risk attitudes for prediction and explanation : A discussion of some issues. In *2009 International ESA Meeting June 25 - 28, 2009 Washington, D.C. George Mason University*. 10, 5.6

Willinger, M. (1989). Risk aversion and the value of information. *The Journal of Risk and Insurance*, 56(1) :104–112. 4

Wilson, R. (1968). The theory of syndicates. *Econometrica*, 36 :113–132. *a*, 5.4.4

Wilson, R. (1989). Efficient and competitive rationing. *Econometrica*, 57(1) :1–40. 2

Wilson, R. and Chao, H. (1987). Priority service : pricing, investment and market organization. *American Economic Review*, 77 :899–916. 2

Ximing, C., McKinney, D., and Rosegrant, M. (2001). Sustainability analysis for irrigation water management : Concepts, methodology, and application to the aral sea region. Environment and Production Technology Division Discussion Paper nÂ° 86 International Food Policy Research Institute. 0.1.2

Young, M. (2010). Environmental effectiveness and economic efficiency of water use in agriculture : The experience of and lessons from the australian water reform programme. Technical report, OECD Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. 4.1.4, 4.2.2, 5.2

Zivin, J. and Small, A. (2003). Risk sharing in coasean contracts. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45 :394–415. 4.1.4

Zizzo, D. (2010). Experimenter demand effects in economic experiments. *Experimental Economics*, 13 :75–98. 5.5.1

Table des figures

1 Les différentes demandes en eau : de la plante à l'agriculteur 16
2 Valeur ajoutée créée par 1000m3 d'eau (Agriculture-Australie) 18
3 Valeur ajoutée créée par 1000m3 d'eau (tous secteurs-Australie) 20
4 Prélèvements d'eau mondiaux prévus par secteur 20
5 Prise de risque optimale 37

1.1 Surface équipées pour l'irrigation en 2007 en France 53
1.2 Répartition des cultures irriguées en surface en 2000 53
1.3 Nombre de départements de France métropolitaine concernés par au moins un arrêté préfectoral de restriction des usages de l'eau en période estivale 65
1.4 État des arrêtés de limitation des usages de l'eau au 4 juillet 2011 65
1.5 Répartition du débit en fonction de la disponibilité de la ressource 68

2.1 The CA rule does verify constraints C1 and C2 (case 2) 83
2.2 Optimal sharing rule under risk neutrality 86
2.3 Optimal sharing rule under risk aversion 93
2.4 Social welfare (labeled OS) according to the sharing rule (Mean-Variance agents with $T_1 < T_2$) 95

3.1 Distribution of Risk and Strategic Uncertainty Aversion 119
3.2 Cost of Deviation from Total Optimal Claim 126
3.3 Median Pair Claim to B 128
3.4 Frequency of Deviation from Optimal Total Claim to B 130
3.5 Frequency of individual claim to B (last period) 133
3.6 Average Error of Prediction 135
3.7 Average Best-Response Rate 137

4.1 Évolution des surface irriguées en Australie 160

4.2 Consommation d'eau par activité agricole en Australie 160
4.3 États australiens et Murray Darling Basin 162
4.4 Droits d'eau dans les différents États du MDB par niveau de sécurité 166
4.5 Schématisation de transferts sur le marché des allocations 168
4.6 Évolution des échanges de droits d'eau et d'allocation dans le MDB 171
4.7 Marchés des allocations d'eau dans le MDB 172
4.8 Coefficient de variation moyen sur les rendements 177
4.9 Débits dans la rivière Murray (incluant la rivière Darling) 178

5.1 Game structure 192
5.2 Equilibrium in the coupon market 197
5.3 Transactions costs paid by each subject 202

Liste des tableaux

1.1 Taxes sur l'eau d'irrigation perçues par les Agences de l'eau 61

3.1 Experimental Design 115
3.2 Nash Equilibria 123
3.3 Multi-criteria ranking of the sharing rules 138
3.5 Pairwise Non parametric and Parametric tests 141
3.4 Descriptive statistics (all periods) 142
3.6 Random Effects Estimates for Pair Claims and Gains 143
3.7 Random Effects Tobit Estimates for Individual Claims 144
3.8 Random Effects Models on Error and Best-response Rate 145
3.9 Earnings in Euros Part 1 150
3.10 Earnings in Euros Part 2 152
3.11 Earnings for a prediction 156

4.1 Participation aux marchés de l'eau par type de culture dans le MDB 180

5.1 Coupons allocation 193
5.2 Unit and total benefits (in ECUs) for coupons held at the end of a period . . . 194
5.3 Summary of results 206
5.4 Equilibrium Predictions 208
5.5 Observed Profits 209
5.6 Trading Activity and Market Prices 210
5.7 Random effect model of individual profits 211
5.8 Regression models for variability of profits between scenarios 212

Liste des encadrés

Encadré 1 : Prélèvements en eau pour l'irrigation 16
Encadré 2 : Définition du risque sécheresse retenue dans la thèse 21
Encadré 3 : Mesure de l'aversion au risque des agriculteurs 25
Encadré 4 : Plan Sécheresse 2011 en France 29
Encadré 5 : Théorème de Borch 38
Encadré 6 : Portée et Limites de l'expérimentation en économie 43
Encadré 7 : Apports et limites de la thèse 48
Encadré 8 : La gouvernance de l'eau en France 55

VU et PERMIS D'IMPRIMER

A Montpellier, le

Le Président de l'Université Montpellier I

Philippe Augé