HAL
open science

Expérimentation d'instruments fiscaux pour gérer l'exploitation des aquifères côtiers

G.A. Giordana

▶ **To cite this version:**

G.A. Giordana. Expérimentation d'instruments fiscaux pour gérer l'exploitation des aquifères côtiers. Sciences de l'environnement. Doctorat Analyse Économique - Modélisation et Quantification, Université Montpellier I, 2007. Français. NNT : . tel-02590288

HAL Id: tel-02590288

https://hal.inrae.fr/tel-02590288v1

Submitted on 15 May 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 DE MONTPELLIER I

Faculté des Sciences Économiques

Laboratoire Montpelliérain d'Économie Théorique et Appliquée

LAMETA - UMR 5474

EXPERIMENTATION D'INSTRUMENTS FISCAUX POUR GERER L'EXPLOITATION DES AQUIFERES COTIERS

Thèse présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER I

Formation doctorale : Analyse Économique - Modélisation et Quantification

Groupe des disciplines : **Sciences Économiques** du CNU

Section 05

Soutenue publiquement

6 Décembre 2007

par

Gastón Andrés GIORDANA

Jury :
M. Marc Willinger Professeur - Université de Montpellier I - Directeur de thèse
M. Charles Noussair Professeur - Université de Tilburg (Pays-Bas) - Rapporteur
M. Gilles Rotillon Professeur - Université Paris X - Nanterre - Rapporteur
Mme Marielle Montginoul Chargée de Recherche - Cemagref - Encadrante scientifique
M. Michel Moreaux Professeur - Université de Toulouse I - Examinateur
Mme Mabel Tidball Chargée de Recherche - INRA Montpellier - Examinateur

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

« 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 ».

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A María Noel y Manuel... todo por y para

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Remerciements

Tout d'abord, un très grand merci au Professeur Marc Willinger. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité, son aide, ses conseils avisés et les discussions scientifiques que nous avons pu avoir, et qui m'ont permis de faire ma thèse. Je tiens également à lui remercier son soutient dans les moments difficiles de cette période thèse. Je voudrai aussi remercier Marielle Montginoul que par ces conseils m'a permis de m'ouvrir au « monde » de la recherche appliquée. Je remercie tout les deux également d'avoir corrigé ce manuscrit.

Je voudrai remercier les membres du comité de pilotage de la thèse, que malgré les peu nombreuses réunions, m'ont donné des conseils utiles et justes : Héléne Rey-Valette, Jean-Daniel Rinaudo et Jean-Phillipe Terreaux.

Je souhaite exprimer ma gratitude au Professeur Michel Moreaux, Professeur Charles Noussair, Professeur Gilles Rotillon et Mabel Tidbal pour avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je remercie la Région Languedoc-Roussillon et le Cemagref qui ont financé cette thèse dans le cadre du programme SysCoLag. Je voudrai également remercier les coordinateurs de SysCoLag, notamment Nabila Mazouni, car ce programme a été pour moi une arène d'échange et discussion pluridisciplinaire qui m'a profondément marqué.

C'est en grande partie grâce aux Professeurs Camilo et Estela Dagum que je suis venue continuer mes études en France. Je tiens à les remercier parce qu'ils m'ont toujours encouragé à aller plus loin.

Je tiens aussi à remercier très sincèrement tous ceux qui directement ou indirectement ont contribué à l'avancement des travaux : Mabel Tidbal par sa disponibilité, aide et conseils, ainsi que sa patience pour écouter et analyser mes propositions (toujours trop compliquées) ; Professeur Charles Noussair et Professeur Jordi Brandts par leurs conseils sur mon protocole tout au début de ma thèse ; Bertrand Aunay qui m'a permis de comprendre, au moins un peu, comment les aquifères fonctionnent ; Professeurs Daniel Houser et Alain Jean-Marie qui m'ont précieusement aidé dans la programmation de l'algorithme bayesien du dernier chapitre ; Charles Figueres et Annie Hofsteter qu'ont mis à ma disposition un poste de calcul ; tous ceux qui j'oublie mais que j'ai pu aller demander conseil pour mes nombreuses « aller-retours » pour arriver à faire cette thèse.

Je ne peux pas oublier de remercier toutes celles et tous ceux qui ont fait de notre (Maria Noel et moi, et maintenant Manuel aussi) séjour à Montpellier plus agréable. Tout d'abord à la famille Gallai : Nicola, Jean Carlo, Muriel, et Michael. Dès le premier jour à la faculté, Nicola nous a ouvert les portes de sa maison et de sa famille, et depuis ils ont été toujours présents pour nous aider et accompagner. A Mabel Tidball et Alain Jean Marie (avec qui nous pouvons toujours compter), ainsi qu'à « los mendocinos », Guillermo et Maria Elena Martin. Je n'oublie pas les peu mais très bonnes amis qui nous avons pu rencontrer, Angéla Sutan, Benoît Sévi,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sandra Said et Leslie Aymard pour tous les bons moments partagés. Sans oublier les personnes qui ont fait que la vie au Lameta soit plus sympathique et que mon séjour au Cemagref ait été plus agréable : Yves, Isabelle, Irène, Patricia, Thèsy, David, Alex, Marwan et Elene.

Je voudrai remercier mes parents d'avoir faire l'effort de venir d'Argentine pour la soutenance de ma thèse.

Un très grand merci à Maria Noel pour son appui constant, son encouragement dans les moments difficiles, pour s'avoir investit à me faire comprendre et regarder tout d'un autre angle, pour trouver les bons conseils et les mots justes quand j'en avais besoin. Merci pour tout ce que tu m'appris et tu m'apprends chaque jour. Et bien sûr, à mon fils Manuel, que même s'il est très prenant il m'apprend à être chaque jour un peu plus patient et me comble de jouie.

Je voudrais finir pour remercier mes beaux-parents, Silvia et Luis, qui ont cru en moi et m'ont toujours encouragé et soutenu. Je ne peux pas oublier à Juan Martin, mon beau-frère, pour tous ses conseils (qui m'ont évité d'attendre pendant 20000 jours que mes calculs finissent), son soutien et sa bonne humeur constante.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sommaire

Chapitre 1 La gestion de l'exploitation des aquifères côtiers : le cas de la plaine du Roussillon

1.1 Introduction
1.2 La complexité intrinsèque de la gestion de l'eau souterraine : la ressource, les préleveurs et le régulateur
1.3 La gestion de la demande : un défi majeur pour la plaine du Roussillon
1.4 Conception et évaluation des politiques publiques à l'aide de l'économie expérimentale
1.5 Conclusion

Chapitre 2 Un modèle conceptuel de régulation des prélèvements en eau souterraine

2.1 Introduction
2.2 Le modèle
2.3 Régulation
2.4 Conclusion

Chapitre 3 Instruments fixes ou flexibles ? Une étude expérimentale sur l'efficacité et l'efficience des instruments économiques dans la régulation de l'exploitation de l'eau souterraine

3.1 Introduction
3.2 Le design expérimental
3.3 Les résultats
3.4 Conclusions

Chapitre 4 Classification du comportement individuel à partir des données expérimentales et simulations pour la construction des scénarios de gestion des nappes

4.1 Introduction
4.2 Un algorithme de classification de type bayésien : l'algorithme HKM
4.3 Spécification empirique
4.4 Résultats de l'algorithme classification
4.5 Simulations pour la construction des scénarios de gestion
4.6 Conclusion

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Introduction générale

Les zones côtières représentent d'importants pôles de développement économique subissant des nombreuses pressions : pression touristique, forte croissance démographique, agriculture irriguée. Ces pressions se traduisent par une demande en eau importante et croissante. Pour y répondre, les ressources en eau de surface ne suffisant pas ou ne répondant pas directement aux attentes des utilisateurs, elles conduisent souvent à une exploitation croissante des aquifères côtiers, dont un certain nombre sont aujourd'hui surexploités, menacés d'intrusion d'eau salée, et dégradés au point de être inexploitables dans certains cas. Face à cette situation, les décideurs publics s'interrogent sur les mesures à mettre en œuvre pour assurer une gestion durable des eaux souterraines dans les zones côtières.

D'une façon générale, deux types de mesures peuvent être envisagées : une action sur l'offre ou une action sur la demande. La première vise à augmenter la disponibilité de l'eau souterraine, la protéger ou à réduire la pression sur la ressource en proposant des substituts : elle présente l'avantage de ne pas contraindre la demande le conférant ainsi une large acceptabilité. Néanmoins, cette politique se heurte à des limites, soit parce qu'elle n'est pas toujours réalisable, soit parce qu'elle est trop coûteuse. La gestion de la demande, agissant sur les quantités prélevées et/ou le nombre de préleveurs, devient alors incontournable.

La gestion de la demande peut être faite grâce à différents instruments. Les économistes ont traditionnellement préconisé des taxes comme l'instrument le mieux adapté pour « gérer la demande » et traiter avec les externalités environnementales (Baumol et Oates, 1988). Contrairement aux instruments basés sur les quantités et aux régulations classiques non incitatives, les taxes unitaires sont considérées comme particulièrement avantageuses par leur flexibilité et leur efficacité statique et dynamique (Bohm et Russell, 1985). Néanmoins, pour qu'une taxe unitaire soit efficace dans la gestion de l'exploitation de l'eau souterraine, le régulateur doit pouvoir observer les prélèvements individuels des agents ainsi que leur type. Si les prélèvements ne sont pas observables (prélèvements « diffus »), la taxe unitaire (comme d'ailleurs les instruments basés sur les quantités tels que les quotas) sera généralement inefficace du fait du risque moral associé. Par contre, si le régulateur est en mesure d'évaluer l'état de la ressource à différents pas de temps, les instruments basés sur une information sur l'état de l'environnement (taxe ambiante), développés dans la littérature sur la régulation de la pollution diffuse, sont applicables et efficaces (Segerson, 1988 ; Xepapadeas, 1991, 1992,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1995 ; Hansen, 1997 ; Horan et al, 1998). L'impossibilité du régulateur d'observer les prélèvements individuels résulte d'une incapacité technologique d'auditer les actions des agents et/ou du coût exorbitant de cette technologie (Millock et al, 2002). Deux possibilités s'offrent au régulateur : (*i*) investir dans des moyens techniques d'observation des prélèvements individuels et dans un système d'audit ou (*ii*) investir dans l'observation de l'état de la ressource. Si le régulateur ne connaît pas le type de chaque préleveur, il ne sera pas en mesure d'instaurer une taxe unitaire efficace. Deux nouvelles possibilités s'offrent alors à lui : (*i*) identifier le type de chaque préleveur, soit par des contrôles individuels coûteux (si possibles), soit par la proposition des contrats incitatifs également coûteux ; (*ii*) proposer un instrument appliqué uniformément à tous les préleveurs.

Une panoplie d'instruments de nature différente s'ouvre ainsi aux décideurs publics. Guidée par plusieurs critères concomitants, le choix parmi les diverses options peut déboucher sur des arbitrages de type performance versus acceptabilité. Pour départager les différents instruments d'action sur la demande, il est donc nécessaire d'avoir une idée assez précise des conséquences de la mise en place de chaque instrument.

L'économie expérimentale offre un champ de test des arrangements institutionnels préalable à leur mise en pratique : à partir de la reconstitution d'une situation stylisée dans le laboratoire, les différents instruments peuvent être testés et leurs performances et conséquences hiérarchisées selon différents critères. L'avantage des expériences en laboratoire par rapport aux autres méthodes de validation empirique des théories économiques réside dans le « contrôle » : dans les situations « naturelles », contrairement au laboratoire, plusieurs variables ou facteurs non observables (et dont l'impact ne peut être mesuré) sont susceptibles d'affecter le phénomène étudié. De plus, ils viennent contrarier les effets de variables que l'on souhaite identifier. L'environnement aseptisé d'un laboratoire permet au chercheur d'identifier et, éventuellement, de mesurer l'impact sur le comportement de différentes variables ou institutions. Il est possible alors de construire des relations de causalité en toute sûreté car les résultats sont robustes et peuvent être répliqués, ceci correspond à la « validité interne » de la méthode (Loewenstein, 1999). Cependant, les observations du laboratoire peuvent résulter d'un artefact qu'on ne retrouve pas dans le monde réel, représentant ainsi un obstacle majeur pour la « validité externe » des résultats expérimentaux (Schram, 2005).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Afin d'aider à la conception de politiques efficaces pour gérer l'exploitation de l'eau souterraine dans une situation de non observabilité des prélèvements individuels, nous évaluons dans cette thèse l'efficacité de divers types de taxes à partir d'expériences en laboratoire puis à l'aide de simulations d'un modèle descriptif construit à partir des données expérimentales.

Avant de présenter les différents chapitres de cette thèse, nous souhaitons insister sur la démarche pluridisciplinaire adoptée. En effet, le niveau d'exploitation ou de surexploitation d'un aquifère dépend non seulement des quantités d'eau extraites mais également de ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques. Il est ainsi possible que, selon les caractéristiques physiques d'un aquifère, il soit exploité en accès libre et de manière soutenable ne nécessitant aucune intervention de ce fait (Gisser et Sanchez, 1980). Il est donc apparu nécessaire d'adopter une approche pluridisciplinaire pour l'analyse de la gestion de l'eau souterraine, notamment les aquifères côtiers, qui peuvent présenter une géologie très complexe (Aunay et al., 2006). Cette thèse s'est ainsi inscrite dans le cadre du groupe « gestion des réservoirs d'eau » du programme SysCoLag (Système Côtier et Lagunaire), qui est une démarche partenariale pour la mise en œuvre d'une gestion intégrée et durable du littoral du Languedoc-Roussillon. Ce programme de recherche appliquée fondé initialement par la Région Languedoc-Roussillon et l'Ifremer s'inscrit dans le contrat Etat-Région 2000-2006. Le groupe « gestion des réservoirs d'eau » a été constitué autour de trois thèses (une thèse en géologie, une en hydrogéologie et la présente thèse en économie) dont l'objectif est de proposer une méthodologie d'étude intégrée pour la gestion des aquifères côtiers à partir d'un terrain d'étude commun : la plaine du Roussillon.

Dans le premier chapitre de cette thèse, le problème de la gestion de l'eau souterraine dans la plaine du Roussillon (Département des Pyrénées Orientales, France) est présenté. Cette plaine est un cas représentatif de la problématique de gestion des aquifères côtiers dans le pourtour méditerranéen et d'autres régions à caractéristiques similaires. Ce chapitre justifie également l'intérêt de l'économie expérimentale dans l'analyse des politiques de gestion de l'eau souterraine et discute des avantages et des limites de la méthode.

Afin d'établir des prédictions testables dans le laboratoire, le deuxième chapitre développe un modèle conceptuel de régulation de l'exploitation d'eau souterraine. L'objectif est de prendre en compte les caractéristiques essentielles du terrain d'étude dans notre protocole

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

expérimental et notamment les risques auxquels l'eau souterraine de la plaine du Roussillon est soumise. Dans le cadre d'un jeu dynamique en temps discret et fini, nous nous intéressons, d'une part, à la conception d'instruments incitatifs théoriquement efficaces dans une situation de non observabilité (du type et du prélèvement de chaque agent) et, d'une autre part, au choix du régulateur parmi ces différents instruments pour gérer les prélèvements. Nous étudions une ressource renouvelable exploitée par des agents hétérogènes vis-à-vis de leur *préférence pour le présent*. Supposée faible pour les préleveurs prévoyants, elle se traduit dans un facteur d'actualisation plutôt élevé. Au contraire, le futur n'ayant aucune valeur pour les préleveurs myopes, leur facteur d'actualisation est nul. Dans une population de préleveurs avec différentes préférences pour le présent, l'augmentation de la proportion de préleveurs myopes exacerbe l'inefficacité de l'exploitation. La mise en place de politiques de gestion de la ressource est ainsi davantage justifiée. Un régulateur ayant l'information nécessaire à la mise en œuvre des taxes de premier rang (les dommages sociaux marginaux des prélèvements et le « coût d'ajustement » de chaque agent) peut être conduit, du fait de contraintes politiques ou budgétaires, à mettre en place des instruments de second rang. Par exemple, une taxe fixe dont le taux demeure inchangé pour l'ensemble de l'horizon temporel, peut être mise en place au lieu d'une taxe flexible de premier rang (introduisant à chaque période les incitations correctes pour rester sur la trajectoire de prélèvement optimale). Nous justifions ainsi la pratique assez courante d'utiliser les taxes comme un instrument de finances publiques sans exploiter son potentiel incitatif.

Commentaire [GG1] : Ver si pongo esta frase

Le troisième chapitre de cette thèse est consacré à l'expérimentation. Notre travail expérimental s'inscrit dans la lignée du papier de Herr et al (1997) qui compare l'efficacité de l'exploitation d'une ressource en propriété commune (CPR) dans un cadre statique et dynamique. Nous reproduisons le traitement avec externalités dynamiques du protocole d'expérience de Herr et al (1997) en introduisant deux modifications : (i) une ressource en propriété commune renouvelable et, (ii) des externalités dynamiques indépendantes des externalités statiques. La principale innovation de ce chapitre demeure dans l'évaluation des instruments incitatifs pour corriger l'inefficacité de l'appropriation dans un contexte dynamique.

Nous commençons le chapitre par la présentation du design de l'expérience et du protocole expérimental. Les résultats sont ensuite exposés : l'hypothèse d'une population de préleveurs mixte est évaluée dans une situation de laissez faire. Puis la performance, mesurée par rapport

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

au « laissez faire », des instruments flexibles (temporellement cohérents) de premier rang est comparée à celle des instruments fixes (temporellement incohérents) de premier et second rang. Nos résultats ne mettent pas en évidence une supériorité des instruments flexibles. Cela s'explique principalement par un rejet de la part des sujets des instruments trop contraignants.

Nous adoptons enfin, dans le quatrième chapitre de cette thèse, une démarche exploratoire pour essayer de modéliser économétriquement le comportement observé dans le laboratoire. Le premier objectif de ce chapitre est de prendre en compte l'hypothèse de rationalité limitée dans la prise de décision, dans le cadre du jeu dynamique étudié. Dans les chapitres 2 et 3, nous avions mis en avant un paramètre de préférence, *la préférence pour le présent*, afin d'expliquer l'existence possible d'une population mixte : des préleveurs myopes et des préleveurs rationnels qui interagissent au sein de la même communauté. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur la rationalité limitée des agents au sens où ils appliquent des « règles de décision simplificatrices » (« rules of thumb ») parmi un ensemble de règles possibles.

Le deuxième objectif du chapitre est de s'interroger sur l'exploitation des données expérimentales pour calibrer des modèles d'aide à la décision. De la même façon que Harrison et al (1996) pour le cas des enquêtes d'évaluation contingente, nous pensons que les observations générées en laboratoire peuvent être exportées vers des contextes plus généraux grâce à des traitements économétriques adaptés. Or la description du comportement fournie dans la première partie de ce chapitre qui est, dans une certaine mesure, validée empiriquement peut être utilisée pour réaliser des simulations afin d'apprendre les effets des modifications du contexte : ainsi, à partir des simulations, nous avons évalué l'impact de différentes politiques publiques (e.g. taxes sur les prélèvements, impôt sur le revenu, le profit ou la richesse) dans des contextes variés. Néanmoins, la validité de ces simulations suppose implicitement que le modèle positif fourni demeure inchangé face à la modification de la valeur des paramètres qui ont servit à établir les relations entre observables et inobservables.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 1

La gestion de l'exploitation des aquifères côtiers : le cas de la plaine du Roussillon

1.1 Introduction

L'eau souterraine est une « ressource en propriété commune » (CPR), les droits de propriété n'étant pas clairement définis, le marché ne peut pas fonctionner. En effet, chaque individu en tant que « propriétaire commun » a le droit de prélever dans la ressource, mais il ne peut pas obliger les autres à ne prélever que la quantité qui lui garantisse une jouissance absolue de son droit (Cole et Grossman, 2002). A la différence des ressources en libre accès, pour accéder à une CPR, les individus doivent être des propriétaires communs, dans ce sens ils appartiennent à un ensemble plus ou moins fermé (Helm et Pearce, 1991). En conséquence, ils sont mieux placés pour éviter « la tragédie des communs » (*c.f.* Hardin, 1968) par rapport aux ressources en accès libre ; cependant, une telle éventualité existe puisque nous sommes dans le cadre d'un dilemme du prisonnier avec N joueurs. L'origine de cette meilleure position vient, non pas du nombre de joueurs (qui peut être élevé), mais du fait qu'ils sont mieux définis et identifiés, donc il pourrait exister une expérience d'interaction (ou de marchandage) plus ancienne entre ces joueurs. Ainsi, des formes d'action collective pourraient émerger permettant de combler l'inexistence du marché (Dasgupta, 1991; Ostrom, 2000).

De manière générale, les préleveurs rationnels et égoïstes vont extraire l'eau souterraine en considérant uniquement leur coût privé de l'activité. Ceci est à l'origine des externalités négatives dont, à partir de la littérature, on identifie quatre types :

(i) *Externalité de stock* : En prélevant une unité marginale dans la période *t*, le préleveur réduit les possibilités d'extraction pour les autres dans les périodes suivantes (Negri, 1989 ; Provencher et Burt, 1993).

(ii) *Externalité de coût de pompage* : En prélevant une unité marginale d'eau souterraine dans la période *t*, la firme affecte le coût de pompage des autres préleveurs pour cette période et les suivantes (Provencher, 1995).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(iii) *Externalité sur la couverture du risque* : L'eau souterraine n'est pas un substitut parfait de l'eau de surface, mais elle représente une assurance lorsque le flux des eaux de surface est stochastique (Provencher and Burt, 1993). En prélevant une unité marginale le préleveur affecte la « valeur tampon » de l'eau souterraine.

(iv) *Externalité sur la qualité* : La quatrième externalité est présente lorsqu'il existe une relation entre le stock disponible d'eau souterraine et la qualité de ses eaux (Tsur et Zemel, 1994; Roseta-Palma, 2002, Roseta-Palma, 2003).

L'inefficacité économique d'une telle situation demande l'intervention d'un régulateur qui représente l'intérêt général. Nous considérons ici un régulateur bénévole, lequel à l'aide d'instruments d'intervention directe, peut équilibrer les demandes des préleveurs avec l'offre de la ressource. Néanmoins, dans une perspective coasienne, le régulateur pourrait faciliter l'emergence d'institutions pour que les usagers négocient entre eux (Coase, 1960). La gestion de l'eau souterraine peut être alors schématisée de la manière suivante : des préleveurs ont une action sur le niveau et la qualité de la ressource en eau souterraine. Le régulateur intervient pour équilibrer l'offre et la demande d'eau. Il peut donc agir soit sur l'offre, soit sur la demande.

La gestion de l'offre vise à augmenter la disponibilité en eau souterraine, à la protéger ou à réduire la pression sur la ressource proposant des substituts. Les actions sur l'offre présentent l'avantage de ne pas affecter les activités économiques à l'origine de la demande et sont donc largement acceptées. Néanmoins, elles ne peuvent pas suffire éternellement et atteignent tôt ou tard leurs limites, soit parce qu'elles ne sont pas physiquement faisables, soit parce qu'elles sont trop coûteuses. La gestion de la demande (agissant sur les quantités prélevées et/ou le nombre de préleveurs) devient alors incontournable. Une panoplie d'instruments de nature différente s'ouvre aux autorités compétentes. Guidée par plusieurs critères concomitants, le choix parmi les diverses options peut déboucher dans des arbitrages de type performance versus acceptabilité. Pour départager les différents instruments d'action sur la demande, il faut donc avoir une idée assez précise des implications de la mise en place de chaque instrument. L'économie expérimentale offre un champ de test des arrangements institutionnels au préalable à la mise en pratique de nouvelles politiques. En constituant un prototype en laboratoire, les différents instruments peuvent être testés à l'aide des sujets humains. La performance de ce prototype peut ainsi être évalué sous différentes configurations.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Dans la section 2, nous décrirons les caractéristiques des aquifères côtiers, des préleveurs et de la gestion de cette ressource. La section 3 est consacrée à la description du cas empirique qui motive cette thèse, la plaine du Roussillon (département des Pyrénées Orientales, France). Nous suivrons la même structure que dans la section 2, nous décrirons la ressource, les préleveurs et les politiques de gestion de l'eau souterraine. Dans la section 4, nous proposons l'utilisation de l'économie expérimentale pour évaluer des instruments de gestion de la demande et nous abordons la question méthodologique de la « validité externe » des expériences de laboratoire. Cette question est au cœur de l'utilité de la méthode expérimentale pour l'aide à la décision.

1.2 La complexité intrinsèque de la gestion de l'eau souterraine : la ressource, les préleveurs et le régulateur

La mise en place d'un système de gestion de l'eau souterraine peut être une tâche très complexe du fait des diverses caractéristiques de la ressource, des préleveurs et du régulateur. Bien que les principes généraux d'une gestion intégrée des ressources en eau soient évidemment applicables dans tous les cas (GWP, 2000), leur mise en pratique concrète soulève de nombreux problèmes inhérents à l'histoire de chaque cas particulier. Dans les zones littorales précocement confrontées à l'intrusion d'eau de mer, le cadre institutionnel nécessaire à la mise en place des politiques de gestion a été développé et des instruments de gestion ont été mis en place (Giordana et Montginoul, 2006). Les préleveurs ayant été confrontés aux conséquences d'une intrusion d'eau de mer d'origine anthropique admettent le besoin d'une gestion de la ressource et en sont même demandeurs. Cette « demande sociale » se traduit généralement par la construction d'un cadre institutionnel et réglementaire à la base de tout système de gestion efficace (GWP, 2000). L'émergence plus ou moins précoce de cette « demande sociale » d'intervention peut être en partie expliquée par les caractéristiques du substrat aquifère et la disponibilité naturelle de substituts. En effet, le type d'aquifère détermine la vitesse de propagation des effets d'une surexploitation, pouvant être immédiats ou retardés, et le degré de réversibilité de ces effets. Ainsi, suite à une intrusion d'eau de mer, un aquifère sableux peut rester saumâtre pendant des années, tandis que l'eau d'un aquifère en milieu fissuré peut redevenir potable d'une saison à l'autre. Il est donc important de décrire conceptuellement le phénomène d'intrusion d'eau de mer ainsi que ses nuances selon le type

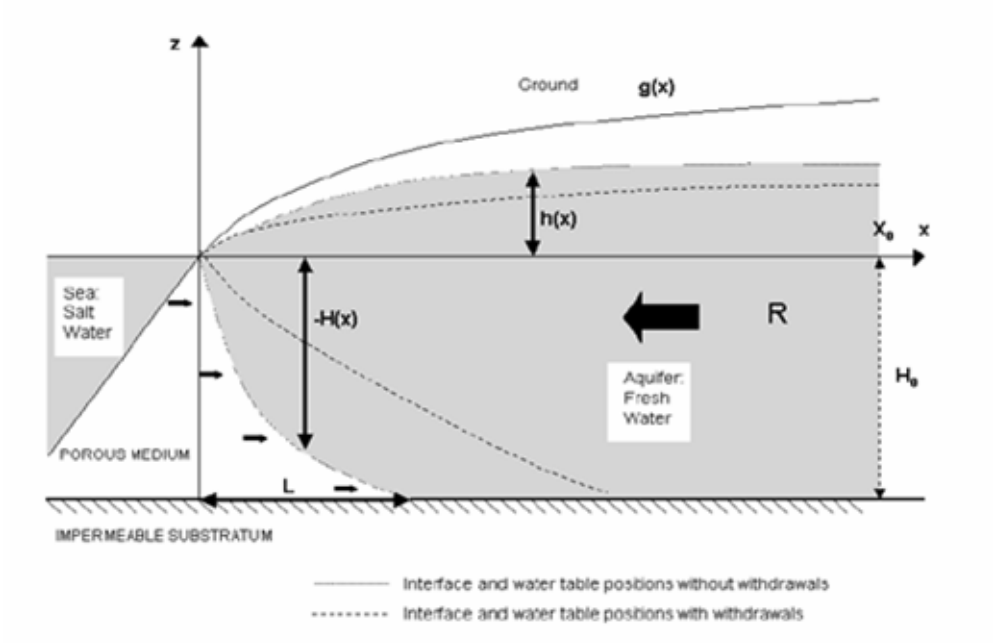
CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

d'aquifère, ce qui nous allons aborder dans le premier point. Nous décrirons ensuite les demandeurs d'eau souterraine dans les zones côtières, avec un intérêt particulier pour l'usage agricole. Finalement, nous présenterons les instruments de politique pour lutter contre l'intrusion d'eau de mer recensés par Giordana et Montginoul (2006) dans différents cas empiriques.

1.2.1 La ressource : les aquifères côtiers

Nous considérons l'eau souterraine comme étant la principale ressource en eau dans les zones côtières. Les autres ressources, telles que les rivières, les lacs, les canaux, etc. sont ici considérées comme des substituts, éventuellement imparfaits, de l'eau souterraine. Le fait d'être dans une zone côtière n'implique aucune particularité par rapport à la nature géologique des aquifères (*cf.* Petit (1996) pour une typologie suffisamment générale pour englober toutes les nappes littorales). L'élément caractéristique de l'eau souterraine dans les zones côtières est l'éventuelle relation des aquifères avec la mer, étant donnée la proximité de cette dernière. Les aquifères côtiers peuvent être libres ou captifs : un aquifère captif est un aquifère enfermé entre deux couches imperméables (une en bas et l'autre en haut). Le schéma exposé dans la Figure 1.1 illustre un aquifère côtier libre à fond plat avec une recharge naturelle égale à R, cette dernière générant un flux d'eau douce vers la mer. L'axe x représente la distance à la mer et l'axe z la profondeur. La relation avec la mer est représentée par une interface eau douce/eau salée abrupte, L indique l'entrée maximale de l'eau salée dans la terre. Cette visualisation incorpore le principe de *Badon Ghyben-Herzberg* pour déterminer la localisation de l'interface eau douce/eau salée en fonction du niveau de la nappe et de la différence relative des densités (Oude Essink, 2001). A partir de cette figure, on identifie quatre aspects déterminants pour le phénomène d'intrusion d'eau de mer : (i) le niveau relatif de l'aquifère (par rapport à la mer), (ii) la recharge nette des prélèvements, (iii) la localisation des forages et (iv) le type de substrat.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



Source : (Oude Essink, 2001)

Figure 1.1 : Schéma interface abrupte eau salée/eau douce d'aquifère superficielle libre

(i) Le niveau de la mer constitue un niveau de base hydraulique auquel se raccordent les niveaux d'eau des aquifères superficiels. Les fluctuations des marées, phénomène naturel qui ne correspond pas à un transfert d'eau de la mer vers l'aquifère, peuvent se propager cependant assez loin dans les terres favorisant le mélange entre l'eau douce et l'eau salée (Petit, 1996). De plus, l'augmentation relative du niveau de la mer conduirait à un déplacement vers l'intérieur des terres de la zone de transition eau douce/eau salée (Oude Essink, 2001).

(ii) La même conséquence que dans l'item (i) peut être observée suite à une diminution de la recharge de l'eau souterraine comme conséquence de la réduction des précipitations ou l'augmentation de l'évapotranspiration (conséquence du changement climatique). Des activités extractives peuvent renforcer ces phénomènes naturels (en abaissant le niveau piézométrique) et être à l'origine de l'intrusion d'eau de mer.

(iii) Si les prélèvements sont réalisés à partir de forages localisés près de la côte, avec une profondeur suffisante, l'interface peut atteindre le captage.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(iv) L'ampleur de l'intrusion saline, la vitesse avec laquelle il se répand, ainsi que sa réversibilité sont directement liées à la conductivité hydraulique[1] des aquifères (Oude Essink, 2001). Chaque type de sédiments et de roches possède une conductivité différente : par exemple, un sol sableux est très perméable, a une capacité de stockage d'eau importante et génère une intrusion d'eau de mer lente.

Selon leur histoire géologique, certaines zones côtières résultent de milliers d'années d'accumulation de sédiments constituant des couches réservoirs organisées à différentes profondeurs, et avec des caractéristiques et des tailles différentes. Les différentes couches aquifères peuvent être indépendantes (séparées par des couches argileuses imperméables), avoir des productivités différentes ainsi que des eaux à qualité distinctes. Par exemple, une couche aquifère profonde, séparée des réservoirs plus contemporains par une couche imperméable, peut être très productive sous l'effet de la pression. En plus, si la qualité chimique de ses eaux est bonne, elle devient une ressource très intéressante, étant protégée des éléments polluants de surface par sa profondeur. Néanmoins, l'indépendance entre l'aquifère profond et le superficiel peut être altérée par une action anthropique. La surexploitation de l'aquifère profond peut ainsi générer une inversion du sens de la drainance : d'un côté, la couche qui sépare la nappe de surface de l'aquifère profond peut être perméable par endroits facilitant la percolation des eaux (flèches continues dans la Figure 1.2), d'un autre côté, des ouvrages de mauvaise qualité peuvent altérer l'étanchéité de la couche imperméable (flèches discontinues dans la Figure 1.2). Si les eaux de la nappe superficielle sont d'une qualité moindre que celles de l'aquifère profond, la mise en relation des deux couches est à l'origine des externalités dynamiques par la qualité.

[1] La conductivité hydraulique (en valeur absolue) dépend positivement de la perméabilité qui elle-même dépend positivement de la porosité effective. Par souci de simplification, nous utiliserons ici uniquement le terme de conductivité hydraulique.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

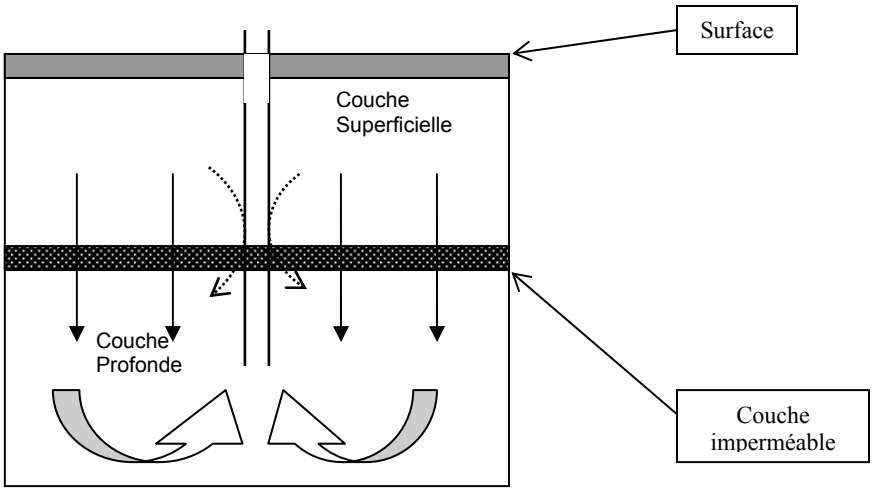


Figure 1.2 : Schéma de la mise en relation des réservoirs profond et superficiel dans un aquifère multicouche

1.2.2 Les préleveurs

L'appartenance au groupe des préleveurs potentiels est déterminée par la possession ou non d'un terrain à l'intérieur des limites du système aquifère en question. Dans les zones côtières, on trouve différents usages concurrents de l'eau souterraine : l'agriculture, l'alimentation en eau potable, l'industrie et autres (comme l'utilisation de l'eau par les ménages ou d'autres entités tels les municipalités, les golfs, les campings pour l'arrosage et/ou remplissage des piscines).

L'usage de l'eau souterraine par l'agriculture est présent lorsque les conditions climatiques rendent l'irrigation nécessaire pour cultiver les cultures choisies et lorsque l'eau de surface n'a pas les caractéristiques requises. L'eau souterraine peut avoir une qualité plus adaptée à la technique d'irrigation utilisée, cette dernière étant souvent liée au type de culture à irriguer. En plus des raisons d'ordre technique, des raisons d'ordre économique expliquent le choix de l'eau souterraine : elle permet aux agriculteurs d'avoir de l'eau à la demande et de garantir ainsi un débit constant pendant la saison d'irrigation, ce que n'assure pas toujours le réseau collectif de surface (OCDE, 1999). De même, des prix élevés de l'eau de ce réseau collectif incite à prélever de l'eau souterraine en l'absence d'une régulation pertinente.

L'usage « alimentation d'eau potable » (AEP) concerne les prélèvements destinés à fournir de l'eau potable aux personnes raccordées : ménages, industries, agriculteurs, … Une des caractéristiques de cet usage est la déconnexion entre l'utilisateur final et le préleveur (à

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

savoir la commune, le syndicat de communes, etc.). Pour l'industrie, l'eau souterraine représente un intrant qui fonctionne comme un substitut de l'eau de surface (ou du réseau) et qui peut offrir une fiabilité dans la fourniture de la ressource avec une qualité donnée (dans le cas où le choix entre les deux existe).

Chaque usage peut se caractériser en termes de quantité d'eau demandée, de niveau minimum de qualité de l'eau requise ainsi que de moment d'accès. En effet, la demande en eau peut présenter un caractère saisonnier et cette caractéristique est particulièrement prégnante en zones côtières qui sont souvent des lieux de tourisme. Dans le contour méditerranéen, la saison d'irrigation coïncide avec cette période touristique, rendant forte la pression sur l'eau souterraine à un moment où la recharge naturelle des nappes superficielles est au point le plus bas. En général, ce cycle inversé entre la demande et la recharge des eaux souterraines n'est pas pertinent pour les aquifères profonds car leur processus de recharge est plus complexe et les pas de temps peuvent dépasser l'échelle humaine.

En résumé, le problème qui se pose ici combine deux aspects : un aspect spatial et un aspect temporel. L'aspect spatial résulte de la localisation de la ressource et des activités humaines et l'aspect temporel de la dynamique généralement inversée entre l'offre et la demande en eau. Toute politique de gestion (de l'offre et/ou de la demande) doit, pour être efficace, prendre en compte ces deux aspects.

1.2.3 Le régulateur

Le régulateur n'est pas une entité unique. Tout d'abord, il n'est pas uniquement chargé de réguler mais aussi de contrôler, de se porter garant de l'application des lois en vigueur, etc. De plus, il y a une très grande complexité institutionnelle qui vient affecter le choix des instruments de gestion et leur efficacité : complexité dans les rôles institutionnels des différents niveaux administratifs qui interviennent, complexité également du cadre législatif et réglementaire, complexité enfin dans les instruments de gestion de l'eau qui peuvent être mobilisables. Nous regroupons dans trois groupes les moyens dont le régulateur dispose pour gérer la ressource en eau souterraine :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1. *Moyens d'action sur l'offre* : ce sont les actions visant à augmenter la disponibilité de l'eau souterraine, la protéger ou à réduire la pression sur la ressource en augmentant les substituts disponibles (Tableau 1.1).

2. *Moyens d'action sur la demande* : l'objectif est ici de gérer les quantités prélevées et/ou le nombre de préleveurs. Trois types d'instruments sont envisageables : économiques, réglementaires et contractuels (Tableau 1.1). Parmi les instruments économiques, on trouve des mécanismes de tarification, des taxes (subventions), de quotas, des marchés, etc. Remarquons que la non observabilité des quantités prélevées (consommées) réduit la panoplie d'instruments, en exigeant la mise en place des contrats incitatifs (mécanismes révélateurs).

3. *Moyens d'action offre-demande* : ils cherchent à agir simultanément sur plusieurs dimensions du problème (temps, espace et quantité prélevée) (Tableau 1.1). Par exemple, la politique visant la localisation optimale des captages dans un aquifère côtier ou visant à lisser les prélèvements dans le temps (étant données la quantité à prélever et la localisation des captages).

Gestion de l'offre	**Gestion de la demande**	**Gestion de l'offre-demande**
Recharge artificielle. Construction des réservoirs superficiels, d'aqueducs.	Instruments économiques : systèmes de tarification, de taxes-subventions, de quotas, de marchés.	Localisation optimale des captages.
Réutilisation des eaux usées.	Réglementaires : déclaration/autorisation des forages (avec système d'audit et pénalités).	Lissage des prélèvements dans le temps.
Barrages souterrains pour empêcher l'avancée du biseau salé (en béton ou par injection d'eau douce à haute pression). Construction de galeries souterraines (pour augmenter la capacité de stockage).	Contrats incitatifs.	Politique spatio-temporelle : dans une saison uniquement les forages dans la localisation *x* sont exploités ; la saison suivante, c'est autour de ceux de *y*.
Dessalement d'eau de mer.		

Tableau 1.1 : Instruments et actions de gestion des aquifères côtiers (Giordana et Montginoul, 2004)

De la panoplie d'instruments disponibles pour un régulateur, les actions sur l'offre de la ressource en eau sont attrayantes car ne contraignent pas les activités économiques à l'origine de la demande et sont donc largement acceptées. Néanmoins elles atteignent tôt ou tard leurs limites, rendant incontournable une gestion de la demande (agissant sur les quantités prélevées et/ou le nombre de préleveurs) pour réallouer la ressource limitée. En conséquence,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

dans de nombreux cas empiriques de gestion de l'eau souterraine (comme dans la plaine du Roussillon), on observe la chronique « gestion de l'offre → gestion de la demande » (Giordana et Montginoul, 2006).

Le niveau d'exploitation ou de surexploitation d'un aquifère dépend non seulement des quantités d'eau extraites mais également de ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques. Il est ainsi possible d'avoir un aquifère en accès libre mais exploité de manière soutenable et ne justifiant donc aucune intervention du fait de ses caractéristiques physiques (Gisser et Sanchez, 1980). Il est donc apparu nécessaire d'adopter une approche pluridisciplinaire pour l'analyse de la gestion de l'eau souterraine, notamment les aquifères côtiers, qui peuvent présenter une géologie très complexe (Aunay et al., 2006). Cette thèse s'est ainsi inscrite dans le cadre du groupe « gestion des réservoirs d'eau » du programme SysCoLag (Systèmes Côtiers et Lagunaires). Le groupe « gestion des réservoirs d'eau » a été constitué autour de trois thèses (une thèse en géologie, une en hydrogéologie et la présente thèse en économie) dont l'objectif est de proposer une méthodologie d'étude intégrée pour la gestion des aquifères côtiers à partir d'un terrain d'étude commun : la plaine du Roussillon.

1.3 La gestion de la demande : un défi majeur pour la plaine du Roussillon

Le Conseil Général des Pyrénées-Orientales a depuis longtemps pris conscience de l'importance stratégique pour la région de la pérennisation des ressources en eau souterraine disponibles dans la plaine du Roussillon. Très abondante et de bonne qualité, l'eau souterraine dans cette zone littorale est soumise à différents risques, conséquence d'une exploitation de plus en plus généralisée (alimentation d'eau potable, irrigation et usage domestiques) et modestement contrôlée. Ainsi, des investissements pour améliorer la connaissance de la ressource et pour soulager la pression exercée (des barrages et des réseaux sous-pression) ont été entrepris avec d'autres partenaires, dont l'Etat, le BRGM et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerrané-Corse (AERMC). Ceci n'a pas empêché la multiplication non contrôlée des captages, notamment à des fins agricoles, dans les nappes superficielles et profondes du système aquifère.

La connaissance des volumes et de la localisation des prélèvements est essentielle à tout système de gestion efficace de l'eau souterraine. D'un côté, connaître la demande en termes

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

quantitatifs ainsi que la valeur économique de la ressource permet de se projeter sur le futur et, par exemple, de planifier la mise en place de substituts à l'eau souterraine le moment venu. D'un autre côté, elle ouvre la porte à des politiques de prévention du risque de surexploitation et, en particulier, à la tarification au volume prélevé. Cette dernière permet en effet d'envoyer des signaux aux préleveurs sur la valeur économique de la ressource, de garantir des ressources financières et d'être équitable entre les différents types d'usages au moment présent et entre l'ensemble d'usagers actuels et les générations futures.

Or le recensement des ouvrages captant l'aquifère peut s'avérer très coûteux s'il ne se fait pas à partir des déclarations volontaires des préleveurs. Mais si les politiques mises en pratique ne sont pas acceptées par les préleveurs, car perçues comme inutiles, inéquitables et/ou onéreuses, elles sont vouées à l'échec sauf si le régulateur dispose de moyens illimités pour assurer sa police.

Dans cette section, nous décrivons les ressources en eau disponibles dans la plaine du Roussillon, les différentes utilisations de ces ressources et un historique des actions de gestion mises en place.

1.3.1 Les ressources en eau de la plaine du Roussillon

La plaine du Roussillon se distingue de l'ensemble de l'espace méditerranéen par l'abondance en ressources en eau superficielles et souterraines. Les eaux superficielles issues du massif des Corbières et des versants pyrénéens sont régulées par plusieurs grands barrages et dérivées dans un important chevelu de canaux. Les eaux souterraines forment quant à elles un aquifère multicouche composé de nappes alluviales libres surplombant une nappe profonde fossile.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1.3.1.1 Les eaux superficielles : trois fleuves côtiers

La plaine du Roussillon est traversée par trois fleuves côtiers orientés ouest-est qui sont, du nord au sud l'Agly, la Têt et le Tech (Figure 1.3).

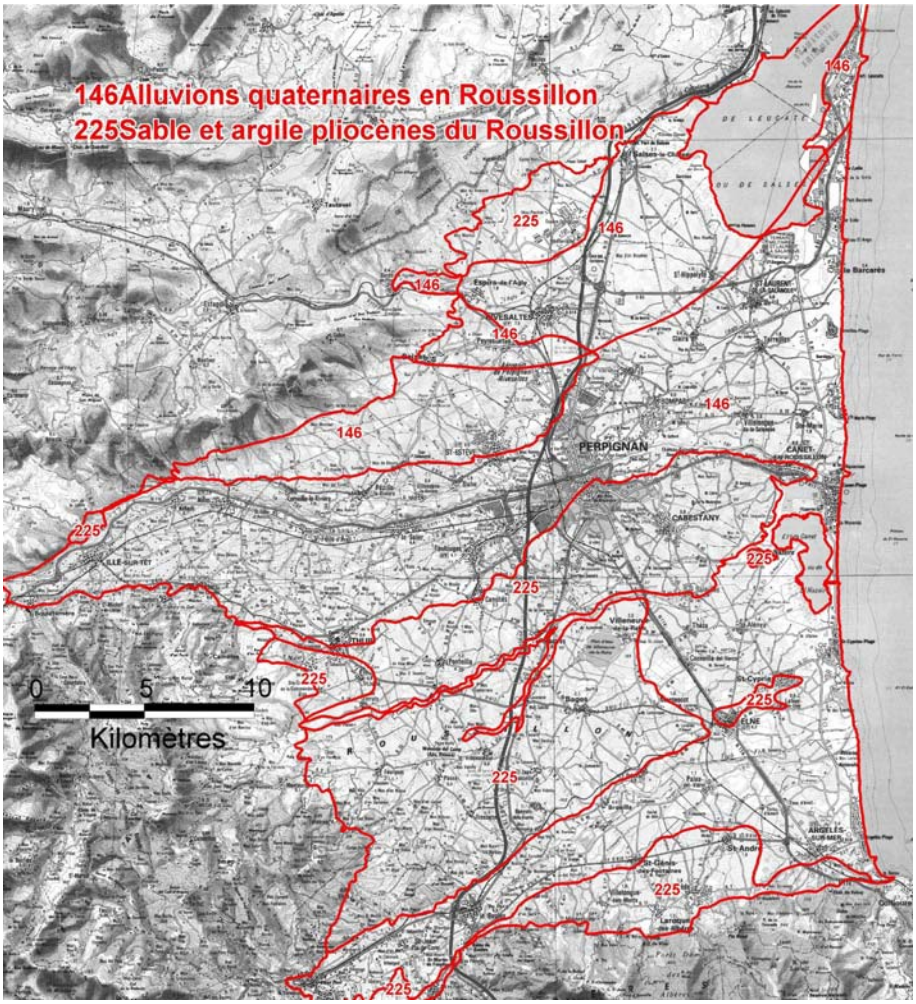


Figure 1.3 : Localisation des aquifères dans la plaine du Roussillon, Département des Pyrénées Orientales (AERMC et al., 2003)

L'Agly prend source dans le massif karstique des Corbières. En 1994, un barrage de 30 millions de m³ situé à Caramany en amont de la plaine a été mis en eau sur le fleuve. L'Agly passe ensuite à Rivesaltes (ville située à une dizaine de kilomètres au nord de Perpignan) avant de traverser le Nord de la Salanque et de se jeter dans la mer Méditerranée juste au sud de l'étang de Salses-Leucate, près de la limite départementale avec l'Aude.

La Têt prend sa source en montagne (Cerdagne) à l'ouest du département. Ce fleuve alimente deux barrages : les Bouillouses (en Cerdagne) d'une capacité de 17 millions de m³ et Vinça

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(25 millions de m³) qui se situe à l'aplomb de la plaine du Roussillon. Ensuite, la Têt parcourt la plaine du Roussillon sur une quarantaine de kilomètres, traverse Perpignan et se jette dans la mer à Canet.

Enfin, le bassin versant du Tech correspond à la vallée du Vallespir au sud du département. Jusqu'à présent, aucun barrage n'y a été aménagé. Le fleuve se jette dans la mer entre Saint-Cyprien et Argelès sur mer.

1.3.1.2 L'eau souterraine

La plaine du Roussillon est richement dotée en eaux souterraines organisées dans un aquifère multicouche plio-quaternaire s'étendant sur 850 km². Depuis 1960, cet aquifère est l'objet d'études hydrogéologiques d'abord initiées par la faculté de sciences de Montpellier puis reprises en 1979 par le BRGM.

Dans l'état actuel des connaissances, de nombreuses incertitudes persistent quant à la géométrie et lithologie et quant au fonctionnement hydrodynamique des nappes. Il est toutefois possible de caractériser l'aquifère multicouche de la plaine du Roussillon en deux ensembles de nappes (AERMC et al., 2003).

a) Le réservoir plio-quaternaire profond[2]

Au sein de ces formations à géométrie variable (épaisseur allant de 200 à 850 mètres), constituées de dépôts pliocènes recouverts par les dépôts holocène et pléistocènes du Quaternaire, on distingue de haut en bas le Pliocène Continental (PC), le Pliocène Marin Sableux (PMS) et le Pliocène Marin Argileux.
Le Pliocène Continental et le Pliocène Marin Sableux sont des formations aquifères, on les regroupe pour constituer « l'aquifère du pliocène de la plaine du Roussillon » (dans la Figure 1.3 seuls les affleurements sont exposés).

[2] Ecrite à partir de Aunay (2007) et AERMC et al. (2003).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les ouvrages que captent la série du Pliocène continental et le marin sableux ont des débits potentiels d'exploitation pouvant dépasser la centaine de m^3/h, voire $150m^3/h$, témoignant ainsi d'une perméabilité assez élevée.
La recharge du réservoir plio-quaternaire profond semble s'effectuer dans les massifs de bordure de la plaine. Néanmoins, cette ressource très productive est considérée comme fossile car le temps de séjour des eaux est estimé à plus de 20 000 ans.
L'eau de l'aquifère pliocène est de bonne qualité. L'eau est moyennement minéralisée et les concentrations en chlorures sont inférieures à 100 mg/l (sauf dans le secteur de Barcarès où les concentrations peuvent dépasser les 250 mg/l). Localement, une pollution par les nitrates a été recensée dont la concentration dépasse les 50 mg/l.

b) Les aquifères alluviaux superficiels

Les formations quaternaires pléistocènes et holocènes déposées par les fleuves constituent les aquifères superficiels alluviaux du Quaternaire (Figure 1.3). Leur épaisseur reste généralement inférieure à 30 mètres, même sur le littoral.
Ces alluvions ont un véritable intérêt en tant que réservoir lorsqu'il existe une liaison avec le système hydrographique de surface actuel (cours d'eau et/ou canaux d'irrigation). Dans ce cas, la perméabilité élevée des alluvions permet une exploitation à raison de 360 m^3/h (captage situé à Néfiach). Ceci est dû au fait qu'ils sont constitués de plusieurs unités qui, souvent, n'ont pas de continuité hydraulique entre elles, même si elles peuvent être en continuité géographique.
La recharge des nappes alluviales n'est pas directement liée aux pluies tombant sur la zone d'affleurement mais se réalise par les cours d'eau (Agly, Têt et Tech) et les canaux d'irrigation.
L'eau des aquifères alluviaux est de bonne qualité. Elle est moyennement minéralisée et les concentrations en chlorures sont inférieures à 100 mg/l (sauf dans le secteur de Barcarès où les eaux sont saumâtres sur la frange côtière jusqu'à environ 3 km de la mer). Une pollution diffuse par les nitrates a été mise en évidence avec des zones localisées assez fortement contaminées (>200 mg/l).

Afin de simplifier l'exposé, nous appellerons désormais « nappe profonde » l'aquifère plio-quaternaire profond, et « nappe superficielle » les aquifères alluviaux.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1.3.2 Les prélèvements dans l'eau souterraine

Comme conséquence des prélèvements pour des différents usages, l'aquifère multicouche de la plaine du Roussillon souffre d'un abaissement des niveaux piézométriques de ses nappes. La Figure 1.4 montre l'évolution piézométrique de la nappe profonde sur le site St-Laurent-de-la-Salanque.

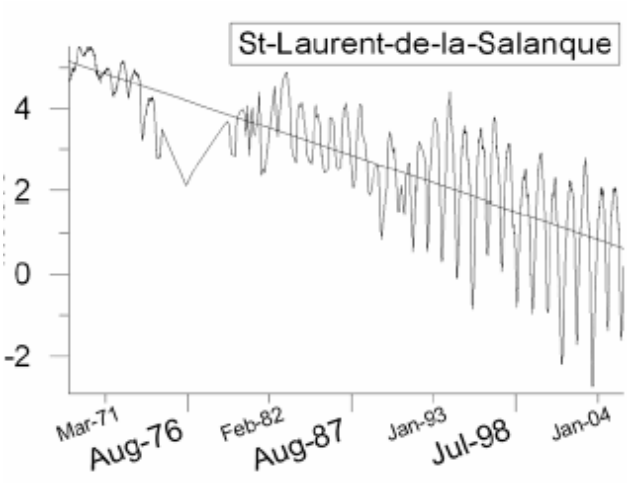


Figure 1.4 : Evolution piézométrique enregistrée à St-Laurent-de-la-Salanque dans la nappe profonde entre 1968 et 2005. Source : Conseil Général des Pyrénées-Orientales (2005) et Aunay et al. (2006)

Pour le cas de la nappe profonde, cette baisse à caractère chronique est susceptible d'entraîner, notamment en bord de mer, deux sortes de désordres :

(i) Des risques de pollution localisée, conséquence d'une inversion du sens de la drainance (des flux de la nappe superficielle vers la nappe profonde se produisent propageant des polluants dans celle-ci). Ce risque est d'autant plus important lorsqu'il y a des forages de mauvaise qualité qui peuvent mettre en communication les deux nappes.

(ii) Des risques d'intrusion d'eaux saumâtres ou marines si le niveau piézométrique passe sous la cote de 0m NGF.

Pour le cas de la nappe superficielle, il est plus difficile de dégager une tendance évolutive de la piézométrie en raison du manque de suivi et des discontinuités hydrauliques au sein de cette nappe.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Le système aquifère est exploité par différents usages, dont les plus importants en termes quantitatifs sont l'AEP et l'irrigation agricole.

a) Les prélèvements pour l'eau potable

Les prélèvements pour l'AEP ont doublé entre 1975 et 2001 (AERMC et al., 2003). Ceux réalisés dans la nappe superficielle augmentent jusqu'en 1986, puis diminuent pour retomber en 2001 au même volume que celui de 1975 (Figure 1.5) ; par contre, à partir de 1986, la croissance des prélèvements dans la nappe profonde s'accélère (Figure 1.5). A cette date plusieurs collectivités ont substitué la ressource en eau de la nappe superficielle par celle de l'aquifère profond en réponse à l'apparition, dans certains secteurs des nappes superficielles, de pollutions saisonnières nitratées (en grande partie résorbée depuis). C'est notamment le cas pour la commune de Perpignan qui sollicite de plus en plus le réservoir profond (AERMC et al., 2003).

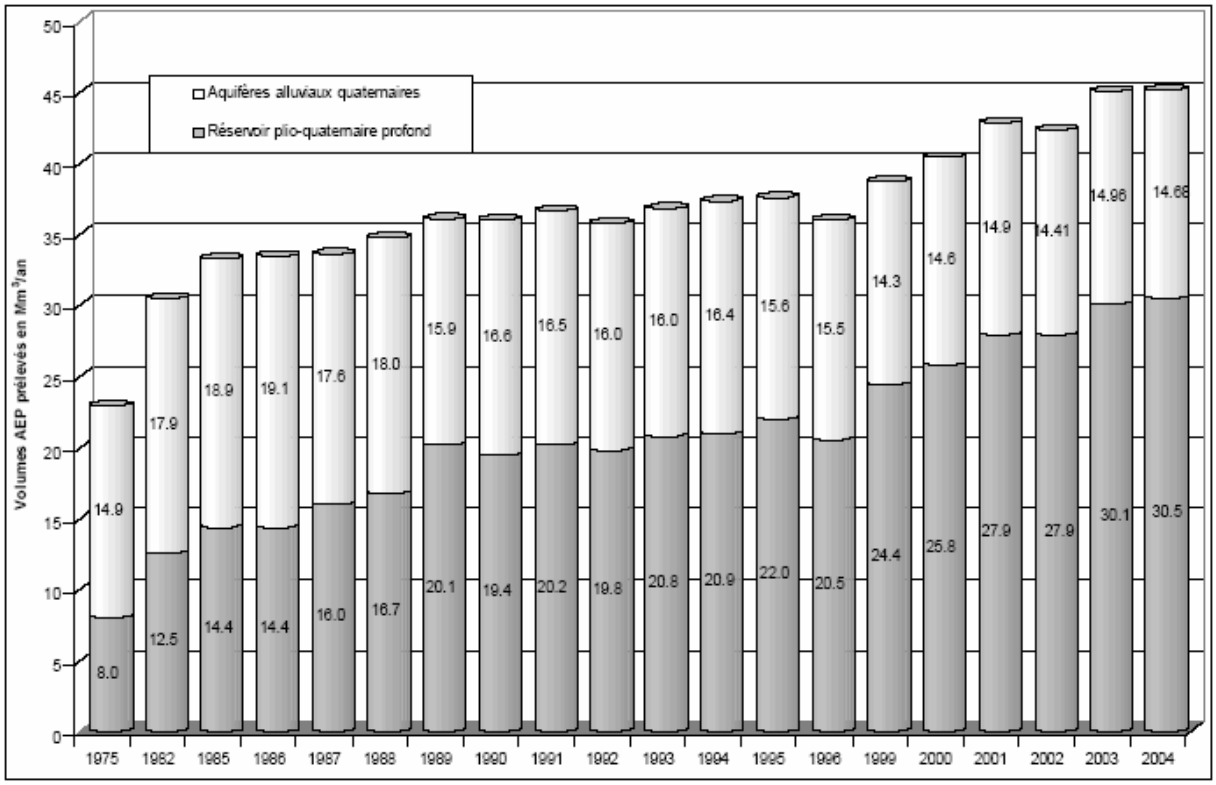


Figure 1.5 :Evolution des prélèvements pour l'alimentation en eau potable dans l'aquifère plio-quaternaire entre 1975 et 2004 (Source : Aunay, 2007).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

b) Les prélèvements agricoles

Compte tenu des conditions climatiques, l'irrigation est indispensable en Roussillon pour toute culture autre que la vigne et l'olivier. L'attrait des agriculteurs pour l'eau souterraine est expliqué, en dehors des périmètres irrigués non couverts par les canaux d'irrigation ou dans ceux desservis par des canaux gravitaires, par la modernisation de l'irrigation (Montginoul, 2005). L'utilisation des techniques d'irrigation modernes, économes en temps (comme l'aspersion) et en eau (l'irrigation de précision comme le goutte-à-goutte ou le microjet), exige de l'eau sous pression disponible à la demande et de très bonne qualité (pour éviter le bouchage des instruments) ; ceci n'est garanti que par l'eau souterraine (Montginoul, 2005)[3]. Certains agriculteurs, ayant accès à des réseaux sous pression, préfèrent néanmoins le forage individuel car l'eau est moins chère ou parce que cela leur confère une indépendance totale (Montginoul, 2005). A partir des données du Recensement Agricole de l'année 2000 (RA 2000), plus de deux tiers des surfaces irriguées dans le Roussillon le sont au moyen de techniques modernes et près de 60% des exploitations le font à l'aide de forages individuels.
La plupart des forages agricoles ne sont pas connus, et sur ceux qui sont connus, les volumes prélevés ne sont pas mesurés systématiquement. Une estimation réalisée par la Chambre d'Agriculture à partir des données des surfaces irriguées du RA 2000 et d'appréciations d'experts indique que 1300 à 1400 exploitants agricoles prélèvent chaque année 28 millions de m³ dont 23 dans les nappes superficielles et 5 dans les nappes profondes. Cette estimation a été réalisée sur la base uniforme d'une consommation de 5000 m³ /ha/an (AERMC et al., 2003).

c) Les prélèvements industriels et des particuliers

L'ensemble des prélèvements industriels, majoritairement effectués dans la nappe profonde, est évalué à environ 4 millions de m^3/an.
Les prélèvements particuliers quant à eux sont très mal connus, ils servent à l'arrosage des jardins familiaux et d'espaces verts et le remplissage de piscines. Bien que les volumes prélevés par ces ouvrages restent faibles (estimés à 6 millions de m^3/an dans l'ensemble du système (AERMC et al., 2003)), une grande inquiétude existe à propos de la qualité des

[3] Egalement, le type de culture peut affecter le choix de la technique d'irrigation et donc le choix de la ressource en eau à utiliser. *Cf.* Montginoul (2005) pour une typologie des irrigants selon leur localisation géographique (dans la plaine), la culture, la technique d'irrigation et l'accessibilité aux ressources en eau.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ouvrages. Présumés de mauvaise qualité, les forages des particuliers augmentent le risque de contamination de la nappe profonde par les eaux de la nappe superficielle et de surface (Montginoul, 2005).

En dépit de la législation en vigueur, le nombre de captages et le volume prélevé sont très mal connus à l'exception des prélèvements pour l'AEP et de l'industrie. Ceci pose une contrainte très forte sur les éventuels instruments à utiliser pour gérer les quantités prélevées. Dans la section suivante, nous faisons un historique des actions entreprises pour la gestion des nappes du Roussillon et nous décrivons la législation en vigueur concernant les instruments de gestion des prélèvements individuels.

1.3.3 La gestion de l'eau souterraine dans la plaine du Roussillon

Historiquement, les principales actions de gestion entreprises ont consisté, d'un côté, à investir dans la connaissance de la ressource et son fonctionnement et, d'un autre côté, à créer essentiellement pour l'agriculture, des substituts à l'eau souterraine.

Réalisé à l'initiative des Ministères de l'Industrie et de l'Agriculture, le premier réseau de suivi piézométrique a vu le jour dans les années 1970. Il a été depuis fortement développé et est actuellement financé par le Conseil Général, le BRGM et l'Agence de l'Eau (sa gestion et son exploitation ont été confiées au BRGM). Les données produites ont été ainsi utilisées pour élaborer et valider un modèle mathématique de simulation des nappes de la plaine du Roussillon[4].

En 1968, le Conseil Général des Pyrénées-Orientales définit comme politique de réserver l'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable (AERMC et al., 2003). Cette politique prévoyait de rendre irrigable l'ensemble de la plaine du Roussillon grâce à des réseaux collectifs sous pression alimentés par plusieurs retenues d'eau situées sur les trois fleuves majeurs. En rendant disponible une eau sous pression et à la demande, l'objectif était d'aider les agriculteurs à adopter des techniques modernes d'irrigation et économes en temps (comme

[4] Ce modèle résulte d'une convention signée en 1979 par la Direction Départementale de l'Agriculture et la Forêt avec le BRGM. Une première version est réalisée en 1984 suivie de plusieurs améliorations, la dernière datant de 1992.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'aspersion), techniques difficilement utilisables avec une eau gravitaire dont l'accès est discontinu dans le temps et le coût de la mettre sous pression n'est pas négligeable. Le projet de planification hydraulique de 1968 n'a finalement été que partiellement exécuté avec la construction de trois retenues (Vinça sur la Têt en 1975, Villeneuve la Raho en 1979, et Caramany sur l'Agly en 1994), mais l'objectif de généraliser sur la plaine l'irrigation collective sous pression n'a pas été atteint (Lecat, 2005). Néanmoins, l'irrigation s'est bien modernisée grâce à l'accès à la ressource en eau souterraine. Par conséquent, l'objectif initial de réserver l'eau souterraine à l'AEP n'a pas été atteint et les prélèvements agricoles diffus se sont multipliés.

Réduire les tensions sur la ressource en eau via une action sur la demande consiste soit à agir sur le nombre de forages soit sur la quantité prélevée. Ceci présuppose que les points de captage soient connus et les volumes mesurés. La législation impose la déclaration de tout forage à usage non domestique, de tout ouvrage de plus de 10 mètres de profondeur et de tout forage inclus dans les périmètres de protection des captages. Egalement, la déclaration (ou la demande d'autorisation) de certains types de prélèvement est exigée en fonction du type d'usage, de la tension sur la ressource en eau et de la capacité de la pompe. De plus, l'article 11 de l'arrêté du 11/09/2003 rend obligatoire un compteur volumétrique pour les usages non domestiques, adapté au débit horaire et à la pression d'utilisation et l'article 27 de la nouvelle loi sur l'eau en étend l'obligation à l'ensemble des utilisateurs. Un arrêté préfectoral (3471/2003 du 3 novembre 2003) déclare également certaines communes de la plaine du Roussillon en « zone de répartition des eaux » (ZRE)[5] à partir d'une profondeur de 30 mètres ; ceci a pour conséquence concrète l'élargissement du nombre de forages concernés par une déclaration et/ou autorisation car les règles de déclaration/autorisation des prélèvements sont durcies. Mais de nombreux agriculteurs sont réticents à révéler l'information exigée par la loi, craignant que la jouissance qu'ils ont de la ressource soit ainsi diminuée (Lecat, 2005). Cette situation de « piraterie » devrait être en train, au moins partiellement, de se régulariser, une procédure de déclaration simplifiée des ouvrages agricoles ayant été initiée depuis le classement de la nappe profonde en ZRE. La maîtrise d'ouvrage de cette procédure est assurée par la DDAF (MISE) et la maîtrise d'oeuvre a été confiée à la Chambre d'Agriculture. Il peut certes être surprenant qu'une telle action soit confiée à un organisme chargé de représenter les intérêts des agriculteurs. Cela présente toutefois deux types d'avantages : (1)

[5] Prévue dans le Code de l'environnement, la ZRE est définie comme une zone où est constatée une insuffisance, autre qu'exceptionnelle des ressources par rapport aux besoins.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

une connaissance fine du terrain par les techniciens et donc une diminution des coûts administratifs (Lecat, 2005), et (2) une meilleure acceptabilité de la démarche (la Chambre d'Agriculture étant par nature un organisme expérimenté dans le dialogue avec la profession agricole). D'autres démarches visant à établir un dialogue entre tous les acteurs concernés par la gestion et l'exploitation d'eau souterraine ont été entreprises. Notamment, dans l'objectif de parvenir à un programme global de protection et de gestion concertée de l'aquifère multicouche de la plaine du Roussillon, le 17 juillet 2002 un Accord-cadre a été signé par le préfet, la Chambre d'Agriculture, la Chambre des Métiers, la Chambre de Commerce, le Conseil Général et l'Agence de l'Eau RMC (Agence de l'Eau RMC et al., 2003).

Un instrument à vocation incitative pour agir sur la demande d'eau souterraine est la redevance ressource instaurée par la loi sur l'Eau de 1964. L'utilité de la redevance pour la gestion de la demande, autre qu'assurer la santé financière du système de gestion, réside dans son potentiel incitatif à l'économie d'eau. Une tarification correcte des prélèvements en eau souterraine permet d'envoyer les bons signaux pour la prise de décision concernant l'investissement en technologie d'irrigation et le choix de la ressource à exploiter, deux décisions intimement liées. Le taux de la redevance, bien que très faible, est fortement différencié selon la rareté de l'eau ; il est applicable sur les volumes prélevés dont le niveau est connu grâce à un relevé de compteurs ou estimé forfaitairement en leur absence. Pour inciter à l'adoption des moyens de mesure (rendus obligatoires par la loi sur l'Eau de 1992), les volumes déterminés grâce au comptage sont minorés par un coefficient représentant la restitution d'eau au milieu naturel (ceci peut plus que doubler la montant total de la redevance)[6]. Actuellement, le taux de la redevance est trop faible et parfois ne couvre même pas les coûts supportés pour son recouvrement, expliquant ainsi que certains agriculteurs ne soient pas soumis à paiement (Montginoul, 2007).

L'eau souterraine dans la plaine du Roussillon n'a pas été encore atteinte par une intrusion d'eau de mer et, dans l'état actuel de l'exploitation, cette intrusion est peu probable (Aunay, 2007). Néanmoins, l'abaissement chronique des niveaux piézométriques des nappes profondes est un signe de surexploitation qui rend incontournable la mise en place d'une structure de gestion de la demande.

[6] A partir de janvier 2008, les modalités de calcul des redevances actuelles seront profondément modifiées.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Malgré l'engagement précoce des autorités dans la gestion des eaux, l'exploitation non domestique de l'eau souterraine dans le Roussillon à des fins principalement agricoles s'est fortement développée sans aucun contrôle. En conséquence, les forages agricoles ne sont que partiellement connus et les volumes prélevés sont rarement mesurés. Suite à la signature de l'Accord Cadre en 2002, plusieurs démarches ont été entreprises visant à constituer une structure collective de gestion de l'eau souterraine et à recenser l'ensemble des points de captage.

Les captages connus sont soumis à une redevance par volume prélevé dont le taux reflète la rareté de la ressource. Ce type d'instrument (taxe pigouvienne) a été traditionnellement mis en avant par la littérature économique par ces avantages en termes de flexibilité : théoriquement, en augmentant le taux de la redevance le régulateur peut induire une réduction des volumes prélevés sans contraindre les choix technologiques des agents. Mais son utilité, autre que pour récupérer des fonds, a été critiquée par les gestionnaires, notamment dû à l'incertitude qui règne sur le résultat de la mise en place d'un tel instrument. En effet, rien n'indique a priori que les agents vont réagir de la façon qui est prédite par la théorie. L'élasticité de la demande en eau dépend de plusieurs facteurs (techniques et aussi comportementaux). Ainsi, même si techniquement les besoins en eau peuvent être optimisés dans le court terme (sans investissements majeurs comme un changement de technologie d'irrigation), les prélèvements peuvent ne pas être réactifs au prix de l'eau (taux de la redevance). Ceci peut s'expliquer par des facteurs comportementaux qui ne sont pas bien intégrés dans la théorie (ou le modèle) utilisée pour prédire une élasticité particulière. Un agriculteur peut valoriser l'eau d'une façon différente, et ceci peut l'amener à continuer à prélever beaucoup même si le taux de la redevance est élevé, soit à son péril financier (en payant la redevance), soit en éludant l'instrument. Aussi, un agriculteur peut avoir une rationalité limitée, prendre des décisions suivant des règles qui ne sont pas prises en compte dans le modèle théorique. Donc, la question qu'un régulateur peut se poser est, peut-on reposer la gestion de la demande en eau souterraine sur une redevance sur les volumes prélevés ou, il faut utiliser un instrument plus fiable (quotas ou marché d'eau) ? Autrement dit, s'il est techniquement possible, peut-on réguler les prélèvements en modifiant le taux de la redevance ?

La méthode expérimentale peut apporter de réponses à ce type de question : à partir d'expériences en laboratoire, il est possible d'avoir, ex ante à toute mise en pratique d'un instrument, une première confrontation empirique de la performance attendue de celui-ci. Il

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

permet donc d'éviter, en cas d'inadéquation de l'instrument, des coûts sociaux éventuellement importants. Egalement, les résultats des expériences sont très utiles pour servir de support aux discussions entre les différents acteurs, soit pour faire passer un message plus facilement qu'avec des théories abstraites et lourdes en mathématiques, soit pour servir de preuve en faveur d'un argument spécifique.

1.4 Conception et évaluation des politiques publiques à l'aide de l'économie expérimentale

Dans cette dernière partie du chapitre, nous effectuons une analyse, à partir d'une revue bibliographique, de l'utilité des expériences en laboratoire pour la conception et l'évaluation de politiques publiques[7]. L'objectif est de donner une valeur précise, en termes d'utilité pour l'aide à la décision, des résultats exposés dans les chapitres suivants de cette thèse, mais aussi en termes de l'apport au programme de recherche plus vaste sur la conception de politiques pour la gestion de prélèvements en eau souterraine.

Nous commençons par survoler les travaux expérimentaux en laboratoire concrètement motivés par la conception ou l'évaluation ex post de politiques publiques, que nous appellerons désormais « expériences de politique ». Nous révélons ainsi dans quels cas les expériences en laboratoire se sont montrées utiles. Nous exposons ensuite brièvement la très récente discussion méthodologique en économie expérimentale[8] sur la « validité externe » des résultats expérimentaux, en particulier des expériences de politique et des expériences en laboratoire en général. La validité externe fait référence à la mesure dans laquelle les situations stylisées mises en place dans le laboratoire permettent de tirer des conclusions sur le « monde réel ».

L'avantage des expériences en laboratoire par rapport aux autres méthodes de validation empirique des théories économiques réside dans le « contrôle ». Dans des situations « naturelles », contrairement au laboratoire, il y a plusieurs variables ou facteurs susceptibles d'affecter le phénomène étudié qui ne sont pas observables, donc leur impact ne peut pas être

[7] Cette partie est principalement motivée par les commentaires et remarques du public des séminaires semestriels du programme SysCoLag et du séminaire interne du TR-USAGES (Cemagref).
[8] Cette discussion est plus ancienne en psychologie.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

mesuré. De plus, les effets de variables dont on cherche à identifier l'impact peuvent être masqués. L'environnement aseptisé d'un laboratoire permet au chercheur d'identifier et éventuellement de mesurer l'impact sur le comportement de différentes variables ou institutions. Il est possible alors de construire des relations de causalité en toute sûreté car les résultats sont robustes et peuvent être répliqués ; ceci correspond à la « validité interne » de la méthode (Loewenstein, 1999). Cependant, le laboratoire peut être vue comme un artefact qu'on ne retrouve pas dans le monde réel, représentant ainsi un obstacle majeur pour la validité externe des résultats expérimentaux (Schram, 2005).

1.4.1 Les expériences de politique

Les expériences de politique ne sont pas restreintes à quelques domaines de l'économie, donc il semblerait que tous les problèmes peuvent être étudiés avec des expériences en laboratoire. A juger par le nombre de publications et l'impact des résultats expérimentaux sur la pratique, la contribution la plus réussie des expériences en laboratoire consiste au développement des « institutions de marché » pour l'allocation de ressources (Normann et Ricciuti, 2004). En particulier, différents mécanismes d'enchère ont été proposés par les expérimentalistes, et souvent ils ont été mis en pratique. Egalement, les expériences en laboratoire ont été utilisées pour évaluer ex post des institutions déjà en place et proposer des améliorations. Quelques exemples sont :

1. L'attribution de créneaux horaires pour les atterrissages dans les aéroports [*cf.* Grether, Isaac et Plott (1981, 1989)].
2. L'allocations de ressources dans les missions spatiales de la NASA [*cf.* Banks, Ledyard et Porter (1989) ; Plott et Porter (1989) ; Ledyard, Porter et Wessen (2000)].
3. Les enchères pour la vente du spectre radio [*cf.* Plott (1997) ; Banks et al (2003) ; Binmore et Klemperer (2002) ; Abbink et al (2004) ; Plott et Salmon (2004)].
4. Les marchés de l'eau [*cf.* Murphy et al (2000) ; Dinar et al (1998) ; Tisdel, Ward et Capon (2003) ; Krause, Chermark et Brookshire (2003)].
5. Le mécanisme d'enchère de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) [*cf.* Cason (1995) ; Cason et Plott (1996)].
6. Le « Reclaim Program » [*cf.* Cason et Gangadharan (1998) ; Ishikida et al (2001)].

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'expérience dans l'utilisation de l'économie expérimentale pour des fins d'aide à la décision. Normann et Ricciuti (2004) ont recensé, parmi d'autres, les avantages suivants : (i) les expériences se sont montrées utiles pour l'évaluation de politiques publiques, notamment lorsqu'il n'avait pas d'autre données empiriques disponibles ni de théorie robuste et/ou validée ; (ii) les différents mécanismes ou arrangements institutionnels peuvent être évalués d'une façon facile, rapide et économique (des erreurs ont été évitées dans la mise en place de nouveaux mécanismes) ; (iii) le fait de concevoir le protocole expérimental oblige à réfléchir en termes pragmatiques et non abstraits, ainsi des questions de timing, de flux d'information ainsi que de résolution des conflits doivent être abordées déjà de façon réelle ; (iv) les expériences se sont montrées bien adaptées à l'étude des changements dans les politiques publiques, notamment pour analyser la durée et les propriétés des périodes de transition entre le *statut quo* et le nouveau régime ; et (v) la participation des décideurs publics dans des séances de test peut être plus convaincant sur l'utilité d'un instrument que des théories abstraites.

1.4.2 La validité externe des expériences de politique

La pertinence des expériences en laboratoire pour la conception de politiques va dépendre de la possibilité de prendre compte dans le protocole expérimentale tous les facteurs pertinents du problème étudié (Ostrom et al, 1994). Afin d'assurer la validité interne du protocole expérimentale des simplifications sont opérées dans le phénomène représenté. La validité interne exige de l'abstraction et de la simplification pour rendre traitable l'objet du programme de recherche, ces concessions sont faites en réduisant la validité externe (Schram, 2005) ; il y a donc un arbitrage entre les deux. Loewenstein (1999) remarque que cette discussion a été complètement ignorée par les économistes. Il n'est pas surprenant que les économistes se soient focalisés plus dans la validité interne des expériences que dans la validité externe, remarque Schram (2005), car la première est à la base de la longue tradition de raisonnement déductive dans la modélisation économique.

La validité interne des résultats expérimentaux se fonde sur quatre préceptes avancés par Smith (1982) pour assurer le test des théories économiques, à savoir, *non-satiation, salience, dominance et privacy*. Un cinquième précepte, *le parallélisme*, permettrait l'applicabilité « en dehors du laboratoire » des propositions testées dans le laboratoire. Selon Plott (1987), le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

parallélisme est une notion vague sur comment les observations des phénomènes simples observés dans le laboratoire peuvent aider à comprendre et à prédire le comportement dans un monde plus complexe et changeant. Il propose, et illustre avec des exemples, plusieurs dimensions dans lesquelles des ponts peuvent être construits entre le laboratoire et le monde réel. La question est alors de savoir quels sont les protocoles expérimentaux qui respectent le précepte du parallélisme ? Ou comment concevoir un protocole expérimental dont les résultats peuvent être transférables hors du laboratoire ?

Loewenstein (1999) est assez abrupte dans sa réponse, il explique que la validité externe est très limitée pour la plupart des applications des expériences en laboratoire sauf pour celles où des marchés très structurés sont mis en place. Bardsley (2005) va plus loin encore en questionnant même la validité interne des expériences. Il argumente que les phénomènes économiques étudiés se produisent dans le monde réel et non pas dans le laboratoire et que, par conséquent, les expériences en laboratoire dans les sciences sociales n'ont pas la même force démonstrative qu'en sciences naturelles. Le laboratoire (où des mécanismes de contrôles sont introduits) est perçu comme un artefact que génère un comportement artificiel qui ne serait jamais observé à l'extérieur. Néanmoins, selon Carpenter et al. (2004), cette affirmation ne peut pas être généralisée, a priori, à tous les protocoles expérimentaux car l'évaluation du « degré » de représentativité est une question multidimensionnelle. Hogarth (2005), en empruntant le concept de « design représentatif » à Brunswik E., argumente que la validité externe d'un design expérimental peut être évaluée sur deux dimensions : (i) la représentativité des participants et (ii) la représentativité des situations ou des tâches auxquelles les participants sont confrontés. L'échantillon standard de l'économie expérimentale est constitué d'étudiants principalement en économie et gestion, typiquement âgés entre 18 et 23 ans. Bien évidement, ce n'est pas un échantillon représentatif de l'ensemble de population, mais la question n'est pas là : est-il vraiment déterminant que les caractéristiques démographiques de l'échantillon standard ne soit pas représentatif de la population ? L'important, c'est que les caractéristiques des sujets soient pertinentes pour les théories ou phénomènes testés dans le laboratoire (Hogarth, 2005). Ainsi Harrison et List (2005) indiquent 'la nature de l'information et des expériences personnelles que les sujets apportent dans le laboratoire', comme un des facteurs pouvant être utilisés pour déterminer si un protocole expérimental est une « expérience de terrain » ou non. Ce facteur est capital pour la validité externe des protocoles où les participants ont de rôles précis à joueur.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tandis que le problème de la non représentativité des échantillons peut être surmontée en recrutant les échantillons appropriés, la représentativité des situations est beaucoup plus complexe à gérer. Harrison et List (2005) proposent plusieurs facteurs, plus ou moins corrélés, qui affectent cette dimension de la validité externe du protocole expérimental dont la nature du « bien », la nature de la tâche et de l'institution mise en place, la nature de ce qui est en jeu (*stakes*) et la nature de l'environnement où les sujets opèrent. A partir de différentes combinaisons de ces facteurs (plus les deux facteurs cités précédemment), ils construisent une taxonomie des protocoles expérimentaux (cf. Harrison et List (2005) pour une analyse détaillée de chaque catégorie) :

- *Expérience en laboratoire conventionnelle* : utilise un échantillon standard de sujets, un cadre abstrait et un ensemble de règles est imposé.
- *Expérience de terrain artificielle* : idem que l'expérience en laboratoire conventionnelle mais avec un échantillon de sujets non standard.
- *Expérience de terrain cadrée* : idem que l'expérience de terrain artificielle mais avec des éléments du contexte, soit dans le bien, la tâche, ou l'information que les sujets peuvent utiliser.
- *Expérience de terrain naturelle* : idem que l'expérience de terrain cadrée mais dans un environnement réel où le sujet entreprend ses tâches et où il ne sait pas qu'il participe dans une expérience.

Un nouveau type d'expérience appelé « expérience virtuelle » a été développée par Fiore et al. (2007). En combinant les notions de la « réalité virtuelle » des sciences de la computation, de la « décision naturaliste » de la psychologie et des « expériences de terrain » en économie, les « expériences virtuelles » ont pour objectif de rassembler les avantages des différentes méthodes, à savoir, les expériences contrôlées en laboratoire, les expériences de terrain et les études de terrain (Fiore et al., 2007).

Pour identifier les facteurs pertinents qui affectent les décisions, il est important de réaliser plusieurs types d'expériences. Par exemple, Harrison et List (2003) ont mis en place des expériences de terrain « artificielles » et « cadrées » avec le même échantillon de sujets pour déterminer si les éléments de contexte modifient les heuristiques qui s'appliquent très naturellement dans le cas contextualisé. Donc, la représentativité des situations ne porte pas tort à l'expérimentation en sciences sociales en soit, car la validité externe de ces résultats

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

peut être évaluée avec plus d'expérimentation. A partir d'un design factoriel qui incorpore au fur et à mesure les éléments de contexte considérés comme pertinents pour le phénomène étudié, il est possible d'identifier leurs impacts sur le comportement.

La validité externe des expériences en laboratoire est d'une importance capitale si elles ont pour but d'aider à concevoir et à évaluer des politiques publiques. Le grand nombre d'expériences en laboratoire qui ont servi avec succès à des fins appliquées est déjà un indicateur de l'utilité et la validité des résultats en tirés. Néanmoins, ce sont des institutions très structurées et très proches de la réalité (comme la vente aux enchères) qui ont été testées. Dans d'autres applications, la validité externe devrait être « estimée » avec un protocole expérimental approprié. Des expériences abstraites en laboratoire sont donc le premier pas à franchir.

Nous pensons cependant qu'une évaluation « argumentée » de la validité externe d'une expérience en laboratoire peut être menée. La condition *sine qua none* pour qu'un protocole soit valide est que tous les aspects pertinents du problème étudié soient pris en compte et approximés de façon satisfaisante dans le laboratoire. Ceci va dépendre de plusieurs choses dont l'objectif précis de l'expérience ; le chercheur devrait justifier son choix et pourrait éventuellement le faire valider par le « client » (le décideur public). En plus, dans la conception du protocole visant à tester la « représentativité de la situation », et sachant que les programmes de recherche sont tous soumis à des contraintes de temps et de budget, uniquement certains éléments du contexte pourront être évalués. Donc, le chercheur devrait également identifier les éléments du contexte, dits pertinents, et justifier son choix. C'est à partir des justifications fournies par le chercheur qu'un jugement subjectif sur la validité externe des expériences abstraites dans le laboratoire peut être porté.

Nous tenons enfin à remarquer en tant que conclusion générale de notre brève discussion que les résultats des expériences abstraites en laboratoire sont en soi une évidence empirique du comportement et que le poids donné à cette évidence est une question subjective qui concerne chaque utilisateur des résultats.

1.5 Conclusion

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

L'eau souterraine dans la plaine du Roussillon n'a pas été encore atteinte par une intrusion d'eau de mer généralisée. Néanmoins, l'abaissement chronique des niveaux piézométriques des nappes profondes est un signe de surexploitation qui rend incontournable la mise en place d'une structure de gestion de la demande. Malgré l'engagement précoce des autorités dans la gestion des eaux, l'exploitation non domestique de l'eau souterraine dans le Roussillon, à des fins principalement agricoles, s'est fortement développée sans aucun contrôle. En conséquence, les forages agricoles ne sont que partiellement connus et les volumes prélevés sont rarement mesurés. Suite à la signature de l'Accord Cadre en 2002, plusieurs démarches ont été entreprises visant à constituer une structure collective de gestion de l'eau souterraine et à blanchir les points de captage pirates.

Un instrument à vocation incitative pour agir sur la demande d'eau souterraine est la redevance ressource instaurée par la loi sur l'Eau de 1964. L'utilité de la redevance pour la gestion de la demande, autre qu'assurer la santé financière du système de gestion, réside dans son potentiel incitatif à l'économie d'eau. Une tarification correcte des prélèvements en eau souterraine permettrait, en théorie, d'envoyer les bons signaux pour la prise de décision concernant l'investissement en technologie d'irrigation et le choix de la ressource à exploiter, ainsi que les volumes à prélever. Cependant, rien n'indique a priori que les agents vont réagir de la façon qui est prédite par la théorie utilisée. L'élasticité de la demande en eau dépend de plusieurs facteurs ; d'un côté, les facteurs techniques et, d'un autre, les facteurs comportementaux. C'est-à-dire que, même si techniquement les besoins en eau peuvent être optimisés dans le court terme (sans investissements majeurs, e.g. changement de technologie d'irrigation), les prélèvements peuvent ne pas être réactifs au prix de l'eau (taux de la redevance). Donc, la question qu'un régulateur peut se poser est la suivante : peut-on reposer la gestion de la demande en eau souterraine sur une redevance sur les volumes prélevés ou faut-il utiliser un instrument plus fiable (quotas ou marché d'eau) ? Autrement dit, si c'est techniquement possible, peut-on réguler les prélèvements en modifiant le taux de la redevance ? Ou encore, existe-t-il une conception optimale de la redevance afin d'atteindre ce but ?

La méthode expérimentale est très convenable pour répondre à ce type de question. A partir des expériences en laboratoire, il est possible d'avoir, avant toute mise en pratique d'un instrument, une première confrontation empirique de la performance attendue de celui-ci. Il

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

permet donc d'épargner, en cas d'erreur, des coûts sociaux éventuellement importants. Egalement, les résultats des expériences sont très utiles pour servir de support aux discussions entre les différents acteurs, soit pour faire passer un message plus facilement qu'avec des théories abstraites et lourdes en mathématiques, soit pour servir d'évidence en faveur d'un argument spécifique.

La validité externe des expériences en laboratoire est d'une importance capitale si elles ont pour but d'aider à concevoir et évaluer des politiques publiques. Le grand nombre d'expériences en laboratoire qui ont servi avec succès à des fins appliquées est déjà un indicateur de l'utilité et la validité des résultats en tirés. Néanmoins, ce sont des institutions très structurées celles qui ont été testées, e.g. la vente aux enchères, dont on trouve de similaires dans la réalité. Dans d'autres applications la validité externe devrait être « estimée » avec un design expérimental approprié dont, des expériences « abstraites » en laboratoire (expérience en laboratoire conventionnelle) sont le premier pas. C'est ce premier pas que nous comptons franchir dans cette thèse.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 2

Un modèle conceptuel de régulation des prélèvements en eau souterraine

2.1 Introduction

Afin d'établir des prédictions testables dans le laboratoire, ce chapitre développe un modèle conceptuel de régulation de l'exploitation d'eau souterraine. L'objectif est de prendre en compte les caractéristiques essentielles du le terrain d'étude (la plaine du Roussillon) dans notre protocole expérimental[1]. Notamment, une attention particulière sera donnée aux deux risques auxquels l'eau souterraine de la plaine du Roussillon est soumise : (i) l'intrusion d'eau de mer, et (ii) la pollution de l'aquifère profond par les eaux des nappes superficielles.

La littérature économique sur l'exploitation de l'eau souterraine s'est fortement développée depuis les années 1950. Les premiers travaux s'intéressent aux règles d'optimisation pour la gestion quantitative des ressources en eau souterraine (Renshaw, 1963 ; Burt, 1964 ; Burt, 1970). Le problème de l'exploitation en présence d'une relation entre quantité et qualité des eaux souterraines a également été abordé, et notamment l'intrusion d'eau de mer dans des aquifères côtiers (Cummings, 1971), et la salinisation des sols et des eaux (Cummings et McFarland, 1974). Les critiques adressées à ces premiers travaux concernaient essentiellement l'ampleur des gains en bien-être de l'instauration de règles de gestion optimales (Gisser et Sanchez, 1980). Ainsi, Gisser et Sanchez recommandent la non intervention publique dans l'exploitation de l'eau souterraine car l'amélioration du bien-être est insignifiante. Un grand nombre de travaux théoriques et empiriques ont vu le jour pour évaluer la robustesse de « l'effet Gisser-Sanchez » (*c.f.* Koundouri (2004a) et (2004b) pour une revue de cette littérature), révélant que les gains en termes de bien-être dépendent de différents paramètres économiques et hydrologiques du modèle utilisé. Autrement dit, le bien fondé de l'intervention publique va dépendre de chaque cas particulier. Par exemple, la présence des substituts à l'eau souterraine (e.g. rivières, nappes profondes) relâche la tension entre l'offre et la demande en eau rendant le besoin de gestion moins pressant. Une analyse théorique intéressante est développée dans l'article de Amigues et al (2001) mettant en

[1] Entre autres choses, dans les protocoles d'expérience, il faut instruire les participants, pas uniquement sur les règles du jeu, mais surtout sur les conséquences que chaque décision prise dans le cadre du jeu aura. Ceci est un pré requis essentiel pour pouvoir analyser le comportement observé.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

évidence que l'optimalité de la solution d'épuisement des réserves en eau souterraine est fonction de l'abondance du flux d'eau de surface (qui peut être consommé ou stocké dans la nappe) et du coût d'exploitation de ce flux et des réserves en nappe, ainsi que des propriétés des fonctions d'utilité. Néanmoins, si le flux d'eau de surface est aléatoire, l'eau souterraine possède la valeur ajoutée de permettre le lissage dans le temps des revenus face aux incertitudes quant à la disponibilité en eau de surface (Tsur, 1990 ; Tsur et Graham-Tomasi, 1991 ; Provencher et Burt, 1993 ; Knapp et Olson, 1995).

Les modèles théoriques développés jusque là partagent trois grandes hypothèses portant sur le fonctionnement de la ressource en eau souterraine, sur le comportement des agents dans une situation de non intervention (i.e. la solution compétitive) et sur l'instauration des politiques publiques.

Tout d'abord, la modélisation du fonctionnement de la ressource a été simplifiée au maximum. Comme le note Brozovic et al. (2006), seuls des modèles à un seul compartiment[2] sont généralement étudiés, faisant implicitement deux hypothèses fortes : (i) la distribution spatiale des prélèvements est sans effet, et (ii) l'état de la ressource est indépendant de l'historique des prélèvements. Le couplage d'un modèle physique plus élaboré et d'un modèle économique avec des agents distribués spatialement permettrait d'obtenir des conclusions plus justes sur l'utilité des politiques publiques. Par exemple, pour les aquifères à basse conductivité hydraulique l'intervention publique n'est pas nécessaire si les forages sont suffisamment distants en évitant toute interaction dans le court terme. Dans ce cas, l'aquifère est un bien privé à court terme, bien qu'une régulation de la localisation des forages peut être pertinente ; mais, à long terme, l'aquifère est une « ressource commune » si les prélèvements excèdent la recharge naturelle. A l'inverse, les aquifères à haute conductivité hydraulique (« les piscines ») sont à tout moment une ressource commune, et l'utilité de l'intervention va dépendre de la tension entre l'offre et la demande en eau. Indépendamment de la conductivité hydraulique, le phénomène d'intrusion d'eau de mer est intrinsèquement spatial. En effet, les préleveurs plus près de la côte sont plus exposés et seront les premiers affectés en cas d'intrusion, tandis que ceux localisés plus loin de la mer sont plus « protégés ». Le travail de Caussade et al (2000) détermine la localisation optimale des forages et l'extraction optimale

[2] Les aquifères à un compartiment sont aussi appelés « piscines » du fait de la grande conductivité hydraulique (Oude Essink, 2001). La conductivité hydraulique (K) et la transmissivité (T) sont des propriétés indirectes de l'aquifère qui mesurent la capacité de ce dernier pour conduire l'eau : T est égale à K intégré sur l'épaisseur verticale (b) de l'aquifère.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

dans chaque localisation à partir d'un modèle d'aquifère côtier avec une interface eau douce/eau salée abrupte déduit du principe de *Badon Ghijben-Herzberg*. Ils en dérivent également les principes généraux pour la conception des taxes correctives des externalités[3] en fonction de la localisation des préleveurs et de leur taille.

Les agents sont, de plus, dans tous les modèles développés dans cette littérature, généralement considérés comme myopes et égoïstes : ils prennent leurs décisions de prélèvement sans considérer l'impact sur l'état futur de la ressource. C'est à partir des papiers de Negri (1989) et Provencher et Burt (1993) que l'effet de l'interaction stratégique inter-temporelle a été modélisé. La prise en compte de préleveurs capables d'anticiper l'impact futur de leurs actes (agents prévoyants) a mis en évidence une externalité de stock et une externalité stratégique. L'externalité de stock est présente lorsque les prélèvements individuels sont restreints par le stock de la ressource (Provencher et Burt, 1993). L'externalité stratégique découle de la nature commune de la ressource. Chaque préleveur est propriétaire des volumes qu'il prélève donc, tout ce qu'un préleveur laisse sous le sol sera, au moins en partie, prélevé par les autres (Negri, 1989). La capacité des préleveurs à prendre en compte le futur peut être interprétée en terme de « préférence pour le présent ». Supposée faible pour les préleveurs prévoyants, elle se traduit dans un facteur d'actualisation plutôt élevé. Au contraire, le futur n'ayant aucune valeur pour les préleveurs myopes, leur facteur d'actualisation est nul[4]. En pratique, les préleveurs ont des préférences pour le présent hétérogènes. Dans une population de préleveurs avec différentes préférences pour le présent, l'augmentation de la proportion de préleveurs myopes exacerbe les externalités, nécessitant une intervention publique plus forte. A notre connaissance, aucun article ne s'est intéressé au cas d'une population mixte où interagissent des préleveurs avec différentes préférences pour le présent[5].

Enfin, peu de travaux sur l'exploitation de l'eau souterraine s'intéressent à l'efficacité des instruments de régulation. Or, en raison de l'épuisement progressif des possibilités d'élargir

[3] Dans le modèle statique de Caussade et al (2000), l'exploitation de l'aquifère côtier entraîne, premièrement, une externalité globale car le coût unitaire d'extraction augmente, et deuxièmement, une externalité localisée car l'intrusion d'eau de mer n'affecte dans un premier instant, que les forages en aval. L'externalité localisée opère par le coût de transport de l'eau douce parce qu'elle doit être transporté à partir de forages en amont.

[4] Il faut quand même être prudent sur la validité de cette interprétation car d'autres raisons peuvent être à l'origine des valeurs du facteur d'actualisation (entre autres, le changement des goûts, les contraintes de liquidité, l'incertitude sur le futur) (*c.f.* Arrondel et al, 2004).

[5] Le papier de Millock et Salanié (2005) étudie l'efficience de mécanismes incitatifs pour lutter contre la pollution diffuse quand des pollueurs avec des différentes capacités de coopération cohabitent.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'offre de ressources en eau, il existe un besoin croissant de gérer la demande en eau souterraine (*cf.* Chapitre 1). Le développement de politiques efficaces de réallocation d'une ressource limitée est dès lors nécessaire. Dans ce chapitre, notre intérêt se porte sur le choix du régulateur parmi différents instruments incitatifs pour gérer les prélèvements dans une situation de non observabilité des volumes prélevés individuellement[6]. Deux possibilités s'offrent à l'agence régulatrice : (i) investir dans des moyens techniques d'observation des prélèvements individuels et dans un système d'audit ou (ii) trouver une autre base pour appliquer les politiques incitatives. Si la première option est choisie, les instruments traditionnels (i.e. taxes ou subventions pigouviennes sur les prélèvements, quotas, marché de quotas)[7] peuvent arriver à la solution de premier rang sous certaines conditions. Pour ce faire, il faut pouvoir calculer les taux optimaux des taxes et subventions ou les montants des quotas, ce qui suppose que le régulateur connaisse les dommages sociaux marginaux des actions individuelles ainsi que le « coût d'ajustement » de chaque agent.

Supposons, que le régulateur possède l'information nécessaire au calcul des règles optimales d'exploitation et donc du taux de la taxe pigouvienne. Il reste encore à s'assurer que tous les préleveurs paient la taxe correspondante : s'il existe une technologie pour contourner le paiement, le prélèvement cible ne sera pas atteint. Une vaste littérature sur les politiques de contrôle s'est développé à partir du papier fondateur de Gary Becker[8] (une analyse plus formelle se trouve dans Polinsky et Shavell (1979)). Les politiques de contrôle résultent de la combinaison de deux éléments (qui déterminent également leur effectivité) : la fonction de pénalité et le système d'audit. Les travaux de Landsberger et Meilijson (1982) et Greenberg (1984) sont les premiers à s'intéresser aux décisions du régulateur et pas uniquement au comportement des agents face à une politique donnée. Ils modélisent le choix de l'autorité de la politique d'audit qui permettrait de maximiser les revenus des taxes et pénalités sous contrainte budgétaire. Plus précisément, à chaque période, les préleveurs sont réparties en groupes soumis à différentes probabilités d'audit selon leur comportement passé ; ils montrent

[6] Contrairement à ce qui est généralement le cas dans le terrain d'étude de cette thèse (*cf.* Chapitre 1), il est implicitement supposé que les points de captage sont connus par le régulateur. Bien que la tarification des prélèvements est, en partie, à l'origine des forages pirates, ces derniers ne peuvent être connus que par l'exercice su pouvoir de police du régulateur.

[7] Il existe une vaste littérature analysant les mérites théoriques et les limitations pratiques de ces instruments (parmi d'autres voir : Weitzman, 1974 ; Baumol et Oates, 1988 ; Hahn et Stavins, 1992).

[8] Becker, Gary S., "Crime and Punishment: An Economic Approach", Journal of Political Economy, March/April 1968, 76, 169-217.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

que cette politique avec des probabilités différenciées est plus efficace qu'un système d'audit à probabilité constante[9].

Les politiques traditionnelles, fondées sur l'observation fiable des volumes prélevés, sont inapplicables si les coûts de l'installation des compteurs ou de contrôle périodique efficace sont trop élevés. La littérature sur la régulation de la pollution diffuse, en appliquant le *mechanism design*, propose des systèmes incitatifs qui sont transférables à la gestion de ressources naturelles renouvelables (voir la revue de Shortle et Horan, 2001). Nous nous intéressons à des instruments basés sur une mesure de l'état de la ressource, i.e. la taxe ambiante initialement proposée par Segerson (1988), et qui a fait l'objet d'un grand nombre de travaux théoriques (Xepapadeas, 1992 ; Horan et al, 1998 ; Horan et al, 1999 ; Millock et Salanie, 2005) et expérimentaux (Spraggon, 2002 ; Cochard et al, 2005). Les principales critiques adressées à cet instrument concernent la multiplicité des équilibres et la pénalisation des préleveurs coopératifs en cas de défaut de coordination sur un des équilibres. Des approches mixtes ont été proposées pour palier les inefficiences de cet instrument lorsque les hypothèses du modèle de base sont modifiées (Xepapadeas, 1995 ; Kritikos, 2004).

Le chapitre est organisé de la façon suivante. La section 2 de ce chapitre présente le modèle, dans une situation de laissez faire, qui consiste en un jeu dynamique en temps fini et discret. Dans la section 3, nous caractérisons le régulateur et les formes d'intervention disponibles. Finalement, nos conclusions sont présentées dans la section 4.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.2 Le modèle

L'aquifère est représenté par une nappe unique à un seul compartiment exploité pendant T périodes par N préleveurs homogènes par rapport à la fonction de profit. Néanmoins, le modèle intègre la spatialisation des prélèvements (Brozovic et al, 2006), déterminant la configuration des externalités statiques sans pour autant affecter les externalités dynamiques. Le phénomène d'intrusion d'eau de mer est représenté par un impact certain et monotone sur la qualité des eaux de la nappe des variations du stock de la ressource (Cummings, 1971 ; Roseta-Palma, 2002).

[9] Le travail de Harrington (1988) propose une extension des modèles de Greenberg (1984) et Landsberger and Meilijson (1982) en considérant que les pénalités qui peuvent être imposées aux « tricheurs » sont limitées et peu probables. Le travail de Bchir et al. (2006) évalue expérimentalement le mécanisme de Greenberg (1984).

La section s'organise de la façon suivante : nous exposerons tout d'abord la modélisation de la ressource et des agents économiques. Puis nous discuterons l'implication, par rapport au terrain d'étude, des hypothèses faites pour faciliter la modélisation. Finalement, nous introduirons les différentes hypothèses de comportement des agents économiques (les préleveurs) et les prédictions correspondantes en matière de prélèvement et de profit.

2.2.1 La ressource

Nous supposons que N ($i = 1,\ldots, N$) préleveurs identiques exploitent une ressource en eau constituée d'une seule nappe côtière non confinée (avec des connections possibles avec la mer). Cette nappe est essentiellement caractérisée par l'évolution du stock exploitable d'eau et par la qualité (chimique) de ses eaux. L'évolution du stock est décrite par :

(2.1) $$S^{t+1} = S^t - Y^t + r$$

Où, S^t est le stock disponible dans la nappe au début de la période t ; r est la recharge naturelle par période, elle est connue, sans aléa et constante ; $Y^t = \sum_{\forall i} y_i^t$ est la somme des prélèvements individuels, y_i^t, à la période t. Donc, selon l'équation (2.1), à chaque période, le stock disponible augmente naturellement et diminue avec les prélèvements. L'aquifère est considéré comme une piscine avec un fond plat et des côtés perpendiculaires. Ceci est la représentation la plus simple de la dynamique d'une nappe (Brozovic et al, 2006), et pourtant largement utilisé dans la littérature en économie de l'exploitation de l'eau souterraine (Burt, 1964 ; Cummings, 1971 ; Negri, 1989 ; Roseta-Palma, 2002).

Nous appelons Ψ^t, l'indicateur de qualité de l'eau de la nappe (qualité homogène pour toute l'étendue de la nappe) au début de la période t. La qualité de l'eau doit être entendue au sens large, c'est-à-dire, comme étant un indicateur agrégé des différents éléments polluants dissous dans la nappe. La nappe, étant libre (non confinée) et superficielle, elle est susceptible d'être polluée par des intrusions d'eau de mer ainsi que par la percolation des éléments polluants.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

L'intrusion d'eau de mer est à la base un phénomène spatial. Sa représentation doit donc considérer des agents avec une exposition au risque d'intrusion dépendant de leur localisation. Dans la Figure 2.1, le préleveur *1* est affecté par l'intrusion d'eau de mer, tandis que les préleveurs *2* et *3* continuent à extraire de l'eau douce (bonne qualité). Pour incorporer cette dimension spatiale, des indicateurs de qualité $\Psi_i^t\left(S^t\right)$ individuelles ou locales sont considérés. L'indice *i*, indique la localisation du forage du préleveur *i*. On suppose que la qualité de l'eau de la nappe superficielle suit une dynamique simple donnée par la fonction suivante :

$$\Psi_i^t = \begin{cases} \Psi_i^{t-1} + \phi_i \cdot S^t + \varsigma & \text{si} \quad S^t < \overline{S} \\ \overline{\Psi} & \quad\quad\quad S^t \geq \overline{S} \end{cases} \tag{2.2}$$

où, $\overline{S}$, ϕ_i et ς sont des données hydrogéologiques ; nous supposons que ς est un bruit blanc avec moyenne nulle[10].

La dimension spatiale est capturée par le paramètre ϕ_i qui indique l'effet marginal des prélèvements sur la qualité de l'eau pour le préleveur *i*. Si $\phi_i < \phi_h$, la qualité de l'eau de la nappe à l'emplacement du préleveur *h* est plus fortement affectée par une diminution donnée du stock. En d'autres termes, le préleveur *h* est plus proche de la mer[11]. Si $\phi_i = \phi_h, \forall i \neq h$, la qualité de l'eau évolue de façon homogène dans toute la nappe. Dans le cas d'une intrusion d'eau de mer, cette configuration reviendrait à étudier un groupe de préleveurs placés tous à la même distance de la ligne côtière.

[10] Un bruit blanc est un processus à moyen et variance constante non autocorrélé.

[11] Avec cette formulation, la qualité de l'eau dans un emplacement à l'amont va aussi se détériorer avec une réduction du stock à cause de l'effet dilution Roseta-Palma (2002). L'intuition est que la fonction $\Psi_i^t\left(S^t\right)$ est un indicateur agrégé de la qualité de l'eau de la nappe (à l'emplacement *i*) et non seulement le niveau de chlorures dans l'eau.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

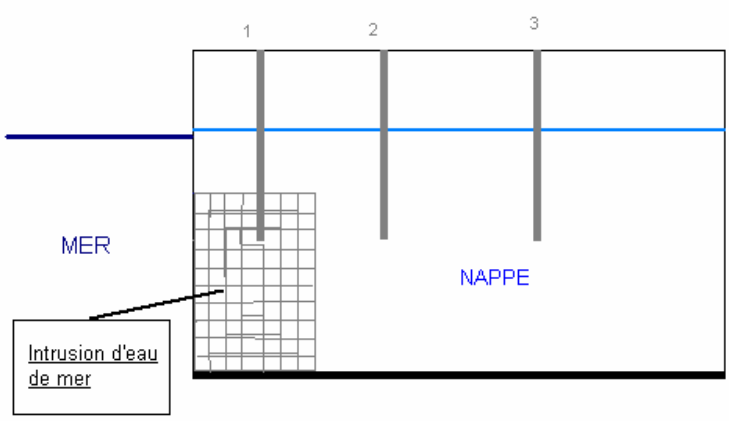


Figure 2.1 : Schéma intrusion d'eau de mer.

Il faut noter que l'équation (2.2) est une représentation extrêmement simple de la dynamique de la qualité d'une nappe côtière, d'autant plus, que des sources de pollution, autres que l'intrusion d'eau de mer, ne sont pas prises en compte (e.g. nitrates, métaux lourds, pesticides). L'équation (2.2) pourrait être alors, une représentation possible de l'effet dilution décrit par Roseta-Palma (2002), auquel il faudrait ajouter une définition de l'évolution de $\overline{\Psi}$, selon les différents sources de pollution (connues ou diffuses), pour compléter la description de l'évolution de la qualité des eaux. Donc, l'analyse est restreinte au cas où l'unique source de pollution est l'intrusion d'eau de mer.

La simplicité de cette modélisation la rend très générale, permettant ainsi de décrire les effets économiques des phénomènes conceptuellement différents. Dans le cas que la ressource modélisée soit une nappe profonde surplombée par une nappe superficielle dont elle est séparée par une couche imperméable (aquifère multicouche), l'équation (2.2) peut être utilisée pour décrire le phénomène d'inversion de drainance. C'est encore la simplicité extrême de cette représentation, qui empêche de prendre en compte tous les aspects du phénomène, notamment, l'impact des prélèvements dans chaque localisation[12].

L'interprétation serait la suivante : l'équation (2.2) représenterait la nappe profonde qui est naturellement de meilleure qualité que la nappe superficielle. Les forages captant cette nappe profonde peuvent être d'une qualité plus ou moins bonne, dans le sens qu'ils peuvent préserver plus ou moins bien l'étanchéité de la couche imperméable qui sépare les deux nappes. La valeur du paramètre ϕ_i représente la qualité du forage à la localisation du préleveur

[12] *Cf.* Chapitre 1 section 1.2.1 pour plus de détails.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

i (un seul forage par préleveur). La diminution du stock réduit la pression des eaux dans la nappe profonde : si la diminution est trop importante les eaux de la nappe superficielle peuvent percoler par les rebords des mauvais forages qui atteignent l'aquifère profond, et le polluer (*cf.* Figure 1.2, section 1.2.1 du Chapitre 1). Bien que la représentation mise en place par l'équation 2.2 prenne compte de la partie du problème (la qualité des forages) dont les politiques publiques peuvent avoir un impact, la représentation du phénomène physique n'est pas très fidèle. Notamment, il n'est pas pris en compte l'effet accélérateur qui peuvent avoir les prélèvements actuels sur l'inversion de drainance. Plus précisément, au moment où les prélèvements sont réalises un cône de dépression se forme autour du captage, ceci peut déclencher la percolation des eaux de la nappe superficielle vers la profonde, si le temps de pompage est suffisamment long. Donc, l'équation (2.2) ne considère que l'aspect dynamique de l'externalité liée à la qualité des eaux. Dans la sous-section suivante, en analysant la fonction de coût, nous verrons une façon possible de prendre en compte l'externalité « statique » liée à la qualité des eaux de la nappe profonde.

2.2.2 Les agents

Nous supposons que N ($i = 1,\ldots, N$) préleveurs identiques exploitent la ressource en eau à chaque période $t = 1,\ldots,T$. L'horizon temporel est fini et connu. Les prélèvements du préleveur i, y_i^t, génèrent à la période t un revenu égal à :

$$u\left(y_i^t\right) = \left(a + \alpha \cdot \Psi_i^t\right) \cdot y_i^t - b \cdot \left(y_i^t\right)^2 \tag{2.3}$$

où $a, b, \alpha > 0$.

La qualité de l'eau augmente le revenu marginal des préleveurs : une meilleure qualité permettrait d'utiliser des techniques d'irrigation plus économes en temps et/ou, éventuellement, plus productives. Mais, sachant que le choix technologique n'est pas modélisé dans ce cadre, il est plus convenable de considérer qu'une meilleure qualité de l'eau se traduit dans des coûts de maintenance amoindris. Le coût moyen (et marginal) d'exploitation de l'eau souterraine est définit par l'équation (2.4). Le coût d'exploitation comprenne d'un côté, le coût d'extraire l'eau de la nappe, et d'un autre côté, tous les autres

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

coûts nécessaires à amener l'eau jusqu'à la culture irriguée. Le coût de prélèvement dans la nappe dépend linéairement des stocks disponibles et du prélèvement total de la période :

$$AC(S^t, Y^t) = p + \sum_{\forall j} z_{i,j} \cdot y_j^t - f \cdot S^t \tag{2.4}$$

où, $z_{ij}, f \geq 0$, $\forall i, \forall j \neq i$. Le coefficient z_{ij} mesure l'externalité statique (externalité intra-période), et f l'externalité dynamique (externalité inter-période). Les externalités peuvent être générées par différents phénomènes physiques ayant un effet économique. L'équation 4 est une représentation du fait que, lorsque le niveau de la nappe (le stock) diminue, il est plus cher d'extraire de l'eau car il faut plus d'énergie pour la remonter à la surface. L'équation (2.4) inclus à la fois des effets instantanés et des effets durables des prélèvements sur le coût de pompage. Les coefficients z_{ij} représentent l'impact du prélèvement du préleveur *i* sur le coût du préleveur *j*, comme conséquence de la réduction instantanée du niveau de la nappe. L'action de prélever de l'eau génère un cône de dépression autour du forage, réduisant le niveau de la nappe dans le voisinage du forage (Brozovic et al, 2006). Après un certain temps, le cône disparaît et le niveau de la nappe s'ajuste à la baisse de manière homogène sur toute la surface de l'aquifère (nous supposons que cet ajustement s'opère instantanément d'une période à l'autre). Donc, les coefficients *z* sont une fonction $s(d_{ij}) \in [0, \mu]$ des distances entre les préleveurs, où nous appelons μ à la valeur maximale de *s(.)*.

$$z_{ij} = s(d_{ij}) \begin{cases} 0 & d_{ij} \geq \delta \\ \dfrac{\delta - \varepsilon}{d_{ij}} & si \;\; d_{ij} \in (\varepsilon, \delta) \\ \dfrac{\delta}{\varepsilon} - 1 & d_{ij} \leq \varepsilon \end{cases} \tag{2.5}$$

où, ε et δ sont les distances minimale et maximale, respectivement. Elles correspondent à la taille du cône de dépression qui est fonction des propriétés hydrogéologiques de l'aquifère et des caractéristiques techniques de la pompe utilisée. Si les forages sont trop éloignés les uns des autres ($d_{ij} \geq \delta$), il n'y a pas d'effet instantané. Dans le cas contraire ($d_{ij} \leq \varepsilon$), l'effet sera maximal. Toute transformation monotone croissante de l'équation (2.5) est également valable pour incorporer l'aspect spatial des effets instantanés sur le coût de pompage.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Même si les constantes z_{ij} et f sont nulles $\forall i, \forall j \neq i$, la nappe reste une ressource en propriété commune car le stock est limité (externalité de stock).

A côté de l'impact du niveau de la nappe sur le coût de pompage, d'autres phénomènes peuvent être à l'origine de l'externalité statique représentée dans l'équation (2.4). Par exemple, dans le cas d'un aquifère multicouche, et si on s'intéresse à l'exploitation d'une nappe profonde, les paramètres z pourraient mesurer l'impact des prélèvements sur la qualité de l'eau à travers le phénomène d'inversion de drainance discuté dans la section précédente. Donc, ici les paramètres z ne seraient pas déterminés par les distances entre les forages mais par la mesure dans laquelle l'imperméabilité de la couche séparant les deux nappes est gardée.

L'accès à la ressource est gratuit : tous les préleveurs sont supposés disposer d'un forage leur permettant un accès à l'eau. Le profit espéré à la période t est :

(2.6) $$EU\left(y_i^t\right) = E\left[u\left(y_i^t\right)\right] - AC^t \cdot y_i^t$$

où, E est l'opérateur espérance et U(.) est la réalisation des profits.

La richesse du préleveur i à la période t est définie comme la somme des profits des périodes précédentes et sa richesse initiale W_i^0 :

(2.7) $$W_i^t = W_i^0 + \sum_{s=1}^{t} U_i^s \qquad \forall i$$

2.2.3 Les stratégies des préleveurs en cas de *laissez faire*

A chaque période, après observation de la variable d'état (le stock disponible au début de la période), les préleveurs doivent décider simultanément de la quantité d'eau à prélever. Les prélèvements individuels ne sont pas observables par les préleveurs. Néanmoins, le prélèvement total peut être déduit à partir du stock observé au début de la période étant donné l'hypothèse déterministe sur l'évolution de la ressource. Trois types de comportements individuels sont considérés. Chacun d'entre eux détermine une trajectoire de prélèvement

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

particulière : (*i*) le comportement rationnel, (*ii*) le comportement myope, et (*iii*) le comportement optimal. Tandis que les deux premiers définissent respectivement des jeux, le dernier résulte dans un problème de contrôle qui coïncide avec celui d'un régulateur. Les comportements rationnel et myope correspondent à des préleveurs capables de prendre en compte l'impact de leurs décisions actuelles sur leurs profits futurs. Ainsi, selon la structure informationnelle du jeu, ils peuvent entreprendre des stratégies à boucle fermée ou ouverte (Provencher et Burt, 1993). Dans une stratégie à boucle ouverte, chaque préleveur choisit sa trajectoire de prélèvement en considérant les trajectoires de ses rivaux comme une donnée. En boucle fermée, les préleveurs considèrent la règle de décision de leurs rivaux comme une donnée. La différence réside donc dans la durée de l'engagement (Reinganum et Stockey, 1985). Tandis qu'en boucle ouverte les préleveurs s'engagent au début de l'horizon d'optimisation sur les niveaux des prélèvements dans les périodes futures, en boucle fermée ils révisent à chaque période leurs prélèvements selon une règle de décision (feedback optimal).

La différence entre le comportement rationnel et myope réside dans la préférence pour le présent de chaque type de préleveur se traduisant dans des valeurs particulières du facteur d'actualisation : le comportement rationnel suppose un facteur d'actualisation strictement positif, alors que pour le comportement myope le facteur d'actualisation est nul. En conséquence, les préleveurs myopes maximisent individuellement leur profit courant : l'impact de leurs décisions actuelles sur le stock de la ressource dans les périodes futures n'est pas pris en compte. Par contre, les préleveurs rationnels choisissent les stratégies de prélèvement qui maximisent la somme de leurs profits actualisés jusqu'à la fin de l'horizon d'optimisation (période T) ; ils prennent donc en compte uniquement l'impact des prélèvements courants sur leurs propres profits futurs. Enfin, le comportement optimum suppose que les préleveurs prennent leurs décisions en vue de maximiser le bien être collectif, ce dernier étant défini comme la somme, pour toutes les périodes, des profits actualisés de tous les préleveurs. Nous supposons que le facteur d'actualisation des préleveurs coopérateurs (ceux qui suivent le comportement optimum) est égal à celui des préleveurs rationnels. La trajectoire résultante de ce comportement coïncide avec la décision d'un planificateur central ayant pour objectif la maximisation du bien être de cette économie.

En vue de rester simple, nous apportons par la suite les quatre restrictions suivantes :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(i) Les préleveurs sont équidistants les uns des autres et ils sont placés à la même distance de la mer ($\phi_i = \phi_h = \phi, \forall i \neq h \in N$, $z_{ij} = z, \forall i, j \in N$). En d'autres termes, les variations du stock, en affectant la qualité de l'eau de la nappe, ainsi que les prélèvements individuels, affecteront de manière homogène tous les préleveurs. Il faut noter que la seule représentation géographique possible sous ces hypothèses est une île circulaire dans la mer.

(ii) $S^t < \overline{S} \quad \forall t$, c'est-à-dire que les prélèvements vont affecter à tout moment la qualité de l'eau (*cf.* équation 2.2).

(iii) Les préleveurs sont neutres vis-à-vis du risque. La perception du risque n'est pas affectée par des facteurs extérieurs aux caractéristiques de chaque décision à prendre, notamment, nous écartons la possibilité que les réalisations précédentes de ς affectent la perception du risque.

(iv) Les jeux sont résolus pour une information en boucle fermée.

Sauf indication contraire, dans l'ensemble du chapitre nous analyserons uniquement les solutions intérieures. Cette restriction simplificatrice permet de nous concentrer dans le cas où la solution est unique. Sachant que si le stock de la ressource n'est pas supérieur aux prélèvements totaux pour toutes les périodes, l'unicité de l'équilibre ne peut pas être assurée (Rosen, 1965 ; Tidball et Zaccour, 2005).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.2.3.1 Comportement Rationnel

L'horizon temporel, *T,* est fini et connu. Formellement, le jeu est résolu en appliquant le principe d'optimalité de Richard Bellman. Une loi de commande (feedback optimal) est ainsi calculée, c'est-à-dire, une fonction dépendant à la fois du temps et des variables d'état, qui détermine les prélèvements optimaux pour chaque moment du temps (i.e. équilibre parfait en sous jeu). En opérant par induction vers l'amont, chaque préleveur résolve le programme suivant en prenant les décisions de ses rivaux comme des données à chaque période *t* :

$$\max_{y_i^t} V_i^t(y^t, S^t)$$

$$\text{s.c.} \quad y^t \geq 0 \qquad i = 1,\ldots,N \qquad \text{Programme (A)}$$

$$S^t - Y^t \geq 0$$

où,

$y^t = (y_1^t, ..., y_i^t, ..., y_n^t)$,

$$V_i^t(y^t, S^t) = EU_i^t(y^t, S^t) + \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} \cdot EU_i^{*s}(y_r^{*s}, S^s) \qquad i = 1, ..., N$$

$\rho \in (0,1]$ est le facteur d'actualisation strictement positif (préleveurs prévoyants), et $y_r^{s*}(S^s)$ est la loi de commande de la période s issue de la résolution du système constitué par les N conditions de premier ordre (CPO) du programme (A) à la période s (supposant que les restrictions ne sont pas saturées donc les multiplicateurs de Lagrange sont tous nuls).

Sachant que ζ est un bruit blanc avec moyenne nulle, la solution du jeu n'est pas altérée par rapport au cas déterministe. Les prélèvements d'équilibre à chaque période pour une stratégie rationnelle sont représentés par une fonction récursive du stock et du temps (équations 2.8). Nous appellerons la trajectoire résultante, « trajectoire rationnelle ».

(2.8) $$y^t(S^t) = C^t \cdot \left[A^t \cdot E^t + l \cdot r \cdot (G^t + F^t)\right]$$

où,

(2.8.1) $$l = f + \alpha \cdot \phi, \qquad A^t = a - P + l \cdot S^t,$$

(2.8.2) $$E^t = 1 + \left(\frac{1}{C^t} - D\right)\frac{1}{l \cdot n}, \; C^T = 1/D, \; E^T = 1,$$

(2.8.3) $$D = 2b + (n+1)z,$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(2.8.4)

$$C^t = 1 \Big/ \left\{ D - nl \sum_{\tau=t+1}^{T} \rho^{\tau-t} \left[l \cdot E^\tau \cdot C^\tau \left[1 + \sum_{s=t+1}^{\tau-1} \prod_{q=s}^{\tau-1} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[2 \cdot \left(1 - l \sum_{s=t+1}^{\tau-1} E^s \cdot C^s \cdot \left[1 + \sum_{e=t+1}^{\tau-2} \prod_{q=e}^{\tau-2} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \right) \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - D \cdot E^\tau \cdot C^\tau \left[1 + \sum_{s=t+1}^{\tau-1} \prod_{q=s}^{\tau-1} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \right] \right] \right\},$$

(2. 8.5)

$$G^t = \left(E^t - 1 \right) - \rho \cdot l \cdot C^{t+1} \left(G^{t+1} + F^{t+1} \right) \cdot \left[E^{t+1} \cdot D - 1 \right],\ G^T = 0,$$

(2. 8.6)

$$F^t = -\sum_{\tau=t+2}^{T} \rho^{\tau-t} \left\{ l \cdot E^\tau \cdot C^\tau \left[1 + \sum_{s=t+1}^{\tau-1} \prod_{q=s}^{\tau-1} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[\left[\tau - (t+1) \right] \cdot \left(1 - D \cdot E^\tau \cdot C^\tau \right) - D \cdot C^\tau \left(F^\tau + G^\tau \right) - \right.\right.$$

$$- \left(1 - D \cdot E^\tau \cdot C^\tau \right) \cdot \left[nl \sum_{e=1}^{\tau-1} \left[1 + \sum_{s=t+1}^{e-1} \prod_{q=s}^{e-1} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[C^e \left(F^e + G^e \right) + E^e \cdot C^e \cdot \max\left[0, e - (t+1) \right] \right] \right] +$$

$$+ l \cdot \left(1 - l \sum_{h=t+1}^{\tau-1} E^h \cdot C^h \cdot \left[1 + \sum_{k=t+1}^{h-1} \prod_{q=k}^{h-1} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \right) \cdot \left[\left[\tau - (t+1) \right] \cdot E^\tau \cdot C^\tau + C^\tau \left(F^\tau + G^\tau \right) - \right.$$

$$\left.\left. - nl \cdot E^\tau \cdot C^\tau \sum_{e=1}^{\tau-1} \left[1 + \sum_{s=t+1}^{e-1} \prod_{q=s}^{e-1} \left(-l \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[C^e \left(F^e + G^e \right) + E^e \cdot C^e \cdot \max\left[0, e - (t+1) \right] \right] \right] \right\},$$

$$F^T = F^{T-1} = 0.$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(2. 8.7)
$$C^t = 1 \Big/ \left\{ D - nl \sum_{\tau=t+1}^{T} \rho^{\tau-t} \left[nl \cdot E^\tau \cdot C^\tau \left[1 + \sum_{s=t+1}^{\tau-1} \prod_{q=s}^{\tau-1} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[2 \cdot \left(1 - nl \sum_{s=t+1}^{\tau-1} E^s \cdot C^s \cdot \left[1 + \sum_{e=t+1}^{\tau-2} \prod_{q=e}^{\tau-2} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \right) \right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left. - D \cdot E^\tau \cdot C^\tau \left[1 + \sum_{s=t+1}^{\tau-1} \prod_{q=s}^{\tau-1} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \right] \right] \right\}$$

(2. 8.8)
$$G^t = \left(E^t - 1 \right) - \rho \cdot nl \cdot C^{t+1} \left(E^{t+1} + F^{t+1} \right) \cdot \left[E^{t+1} \cdot C^{t+1} \cdot D - 1 \right],$$

(2.8.9)
$$F^t = -\sum_{\tau=t+2}^{T} \rho^{\tau-t} \left\{ nl \cdot E^\tau \cdot C^\tau \left[1 + \sum_{s=t+1}^{\tau-1} \prod_{q=s}^{\tau-1} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[\tau - (t+1) \right] \cdot \left(1 - D \cdot E^\tau \cdot C^\tau \right) - D \cdot C^\tau \left(F^\tau + G^\tau \right) - \right.$$
$$- \left(1 - D \cdot E^\tau \cdot C^\tau \right) \cdot \left[nl \sum_{e=1}^{\tau-1} \left[1 + \sum_{s=t+1}^{e-1} \prod_{q=s}^{e-1} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[C^e \left(F^e + G^e \right) + E^e \cdot C^e \cdot \max\left[0, e - (t+1) \right] \right] \right] +$$
$$+ l \cdot \left(1 - nl \sum_{h=t+1}^{\tau-1} E^h \cdot C^h \cdot \left[1 + \sum_{k=t+1}^{h-1} \prod_{q=k}^{h-1} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \right) \cdot \left[\tau - (t+1) \right] \cdot E^\tau \cdot C^\tau + C^\tau \left(F^\tau + G^\tau \right) -$$
$$\left. - nl \cdot E^\tau \cdot C^\tau \sum_{e=1}^{\tau-1} \left[1 + \sum_{s=t+1}^{e-1} \prod_{q=s}^{e-1} \left(-nl \cdot E^q \cdot C^q \right) \right] \cdot \left[C^e \left(F^e + G^e \right) + E^e \cdot C^e \cdot \max\left[0, e - (t+1) \right] \right] \right\}.$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.2.3.2 Comportement Myope

Chaque joueur maximise son profit espéré à chaque période en prenant les règles de décision de ses rivaux comme données :

$$\max_{y_i^t} \quad EU\left(y^t, S^t\right)$$

$$\text{s.c.} \quad y^t \geq 0 \qquad i = 1,\ldots,N \qquad \text{Problème (B)}$$

$$S^t - Y^t \geq 0$$

Les prélèvements à chaque période sont représentés par une fonction du stock (feedback optimal), $y_i\left(S^t\right)\ \forall i$, invariante avec le temps, et qui résulte de la solution du système constitué des N CPO du programme B, lorsque les contraintes ne sont pas saturées (solutions intérieures) :

$$(2.9) \qquad y_m^t\left(S^t\right) = \frac{a - p + l \cdot S^t}{2b + (n+1)z} = \frac{A^t}{D} \qquad \forall t$$

Celle-ci est égale au feedback optimal de la période finale T pour la stratégie rationnelle. De façon générale, l'équation (2.9) peut être obtenue à partir des équations (2.8) pour $\rho = 0$. La trajectoire de prélèvement résultante sera appelée « trajectoire myope ».

A première vue, la comparaison des équations (2.8) et (2.9) indique des prélèvements supérieurs du comportement myope par rapport au rationnel[13]. Néanmoins, cette différence peut être minime selon la longueur de l'horizon temporel, le nombre de préleveurs dans le jeu et la recharge naturelle du stock d'eau souterraine. Plus l'horizon temporel est long, plus la différence de prélèvement entre le comportement myope et le comportement rationnel sera importante, sachant que les préleveurs rationnels prennent en considération l'impact futur de leurs prélèvements courants. Cependant, ils ne considèrent que leurs profits individuels futurs ; en conséquence, si le nombre de préleveurs est trop important, l'effet sur les prélèvements ne sera que marginal. Le comportement stratégique des agents rationnels apporte une explication additionnelle à la similitude des stratégies myope et rationnelle. Le

[13] Pour le comportement myope E, définit par l'équation 2.8.2, est égale à 1 $\forall t$, et pour le comportement rationnel E est inférieur à 1 $\forall t \neq T$.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

préleveur rationnel serait intéressé de stocker l'eau dans la nappe pour en profiter dans le futur. Pourtant, en anticipant le comportement de ses rivaux, il prélève dans la période actuelle pour éviter de partager un stock limité dans le futur tout en encaissant les profits courants. Ce phénomène est connu sous le nom « d'externalité stratégique ». Donc, tout facteur qui viendrait alléger (renforcer) cette externalité contribuera à augmenter (diminuer) les différences entre les stratégies myopes et rationnelles. Ainsi, la présence d'une recharge naturelle, qui garantit une pénurie moindre dans le futur, accroît élargit les différences entre les stratégies résultantes de chaque comportement. Par contre, un grand nombre de préleveurs viendrait renforcer l'externalité stratégique, diminuant ainsi les différences.

2.2.3.3 Comportement Optimum

A chaque période *t*, les préleveurs coopérateurs, en agissant de la même façon qu'un planificateur central, cherchent à maximiser la somme du profit joint, de *t* jusqu'à *T* :

$$\max_{y^t} \sum_{s=t}^{T} \sum_{i=1}^{N} V_i^{*s}(y^s, S^s)$$

$$\text{s.c.} \quad y^t \geq 0 \qquad \text{Problème (C)}$$

$$S^t - Y^t \geq 0$$

où,

$$y^t = (y_1^t, \ldots, y_i^t, \ldots, y_n^t),$$

$$V_i^{*t}(y^t, S^t) = EU_i^t(y^t, S^t) + \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} \cdot EU_i^{*s}(y^{*s}, S^s) \qquad i = 1, \ldots, N$$

$\rho \in [0,1)$ est le facteur d'actualisation, et

$$y^{*t} = \underset{(y_1^t, \ldots, y_i^t, \ldots, y_n^t)}{\arg\max} \sum_{s=t}^{T} \sum_{i=1}^{N} V_i^{*s}(y^{s*}, S^s)$$

Nous sommes intéressés uniquement par les solutions intérieures. Les prélèvements optimaux à chaque période, y_i^{*t}, sont représentés comme pour le cas rationnel (équation 8) par une fonction récursive du stock et du temps. Il suffit donc de remplacer 8.4 par 8.7, 8.6 par 8.9, et 8.3 par :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(2.10) $D = 2b + 2nz$

La trajectoire résultante du comportement optimum ne comporte aucune externalité (ni dynamique, ni statique) ; elle est donc d'une efficience maximale. Désormais, elle sera appelée « trajectoire optimale ».

En observant les lois de commande pour chaque comportement (équations 2.8, 2.9 et 2.10), il est facile de les hiérarchiser selon le niveau des prélèvements à chaque période pour un stock de ressource donné. Comme on pouvait s'y attendre, les prélèvements myopes sont les plus élevés à chaque période, suivi par les prélèvements rationnels. Les prélèvements optimaux sont les plus faibles. Notons, que dans le cas particulier où il n'y a pas d'externalité statique ($z = 0$), les trois lois de commande convergent vers la même fonction à la fin de l'horizon temporel.

Etant donnée la définition du bien-être social adoptée (somme actualisée des profits de tous les préleveurs), les trajectoires de prélèvement les plus proches de l'optimale sont les plus efficientes. Donc, la trajectoire rationnelle est plus efficiente que la myope.

Nous abordons maintenant le cas plus général où, au sein d'une même population, des préleveurs égoïstes ont des préférences temporelles différentes[14].

2.2.4 Population mixte : préleveurs rationnels et myopes

On considère le cas d'une population de préleveurs rationnels mais ayant chacun une préférence temporelle différente ($\rho_i \in [0,1) \forall i \in N$). Nous qualifierons chaque préférence temporelle comme étant le « type » du préleveur.

En information complète[15], la préférence temporelle de chaque préleveur est une information commune, donc, la proportion de préleveurs myopes et prévoyants est connaissance

[14] Nous considérons la préférence temporelle comme exogène. Voir le travail de Becker et Mulligan (1997) pour un modèle de préférence temporelle endogène.
[15] Dans l'Annexe 1, dans la page 220, les cas d'une population mixte sous information incomplète sur le type des joueurs est développé.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

commune. Chaque type de préleveur calcule alors une loi de commande. Nous analysons le cas de deux types, $\mathrm{P}_i = \{0, \tilde{\rho}\}$. Si $\rho_i = 0$ le préleveur est myope, et si $\rho_i = \tilde{\rho} > 0$ il est prévoyant ou rationnel. Soit θ la proportion de préleveurs myopes dans la population.

Le programme des préleveurs rationnels à la période t = 1,…, T, est le suivant :

$$\max_{y_i^t} V_i^t\left(S^t, y_r^t, y_m^t, \theta\right)$$

$$\text{s.c.} \quad y^t \geq 0 \qquad i = 1,\ldots,(1-\theta)\cdot N \qquad \text{Programme (D)}$$

$$S^t - Y^t \geq 0$$

où,

$y^t = (y_1^t,\ldots, y_i^t,\ldots, y_n^t)$; $y_r^t = (y_1^t,\ldots, y_i^t,\ldots, y_{(1-\theta)N}^t)$ et $y_m^t = (y_{(1-\theta)N+1}^t,\ldots, y_j^t,\ldots, y_N^t)$, c'est-à-dire, que les premiers $(1-\theta)\cdot N$ joueurs sont de type rationnel et les derniers $\theta \cdot N$ sont de type myope ;

$$V_i^t\left(S^t, y_r^t, y_m^t, \theta\right) = EU_i^t\left(S^t, y_r^t, y_m^t, \theta\right) + \sum_{s=t+1}^{T} \tilde{\rho}^{s-t} \cdot EU_i^{*s}\left(S^s, y_r^{*s}, y_m^{*s}, \theta\right) \; i = 1,\ldots,(1-\theta)\cdot N.$$

$y_r^{s*}\left(S^s, \theta\right)$ et $y_m^{s*}\left(S^s, \theta\right)$ sont les lois de commande[16] de la période s, pour les types rationnel et myope, respectivement. Elles sont issues de la résolution du système constitué par les $(1-\theta)\cdot N$ conditions de premier ordre (CPO) du programme (D) à la période s, et les $\theta \cdot N$ CPO du programme (E) qui est exposé dans la suite (dans les deux cas nous supposons que les restrictions ne sont pas saturées donc les multiplicateurs de Lagrange sont tous nuls).

Le programme des préleveurs myopes :

$$\max_{y_i^t} \; EU\left(S^t, y_r^t, y_m^t, \theta\right)$$

$$\text{s.c.} \quad y^t \geq 0 \qquad i = \theta \cdot N + 1,\ldots, N \qquad \text{Problème (E)}$$

$$S^t - Y^t \geq 0$$

[16] Les lois de commande ne dépendent de θ que par le nombre de joueurs myopes.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les lois de commande des types rationnel et myope sont, respectivement :

(2.11) $$y_r^t\left(S^t,\theta\right)=C_r^t(\theta)\cdot\left[A^t(\theta)\cdot E_r^t(\theta)+l\cdot r\cdot\left(G_r^t(\theta)+F_r^t(\theta)\right)\right],$$

(2.12) $$y_m^t\left(S^t,\theta\right)=\frac{A^t-z\cdot(1-\theta)\cdot n\cdot y_r^t\left(S^t,\theta\right)}{D_m}\quad\forall \mathrm{t},$$

où,

(2.12a) $$D_r=2b+z\left((1-\theta)n+1\right),$$

(2.12b) $$D_m=2b+z\cdot\left(\theta\cdot n+1\right),$$

(2.12c) $$E_r^t=1+\left(\frac{1}{C_r^t}-D_r+H\right)\frac{\Phi}{l\cdot\phi\cdot n(1-\theta)}-\frac{H}{z\cdot(1-\theta)n},\quad E_r^T=E_m^t=1\ \forall t,$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(2.12d) $$H = z\cdot(1-\theta)n\cdot\frac{z\cdot\theta\cdot n}{D_m},\ \phi=\left(1-\frac{z\cdot\theta\cdot n}{D_m}\right),\ \Phi=\left(1-\frac{l\cdot\theta\cdot n}{D_m}\right),$$

(2.12e) $$C_r^t = 1\Bigg/\Bigg\{D_r-(1-\theta)n\cdot\phi\cdot l\sum_{\tau=t+1}^{T}\rho^{\tau-t}\Bigg[l\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau\Bigg[1+\sum_{s=t+1}^{\tau-1}\prod_{q=s}^{\tau-1}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\cdot\Bigg[2\cdot\Bigg(1-l\sum_{s=t+1}^{\tau-1}E_r^s\cdot C_r^s\cdot\Bigg[1+\sum_{e=t+1}^{\tau-2}\prod_{q=e}^{\tau-2}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\Bigg)$$
$$-D_r\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau\Bigg[1+\sum_{s=t+1}^{\tau-1}\prod_{q=s}^{\tau-1}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\Bigg]\Bigg]-H\Bigg\},\ C_r^T=C_m^T=1/D,$$

(2.12f) $$G_r^t=\left(E_r^t-1\right)-\rho\cdot l\cdot C_r^{t+1}\left(G_r^{t+1}+F_r^{t+1}\right)\cdot\left[E_r^{t+1}\cdot D_r\frac{z\cdot\theta\cdot n}{D_m}\left(1-z(1-\theta)n\right)-1\right],\ G_r^T=G_m^t=0\ \ \forall t,$$

(2.12g) $$F_r^t=-\sum_{\tau=t+2}^{T}\rho^{\tau-t}\Bigg\{l\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau\Bigg[1+\sum_{s=t+1}^{\tau-1}\prod_{q=s}^{\tau-1}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\cdot\Big[[\tau-(t+1)]\cdot\left(1-D_r\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau\right)-D_r\cdot C_r^\tau\left(F_r^\tau+G_r^\tau\right)-$$
$$-\left(1-D_r\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau\right)\cdot\Bigg[(1-\theta)nl\sum_{e=1}^{\tau-1}\Bigg[1+\sum_{s=t+1}^{e-1}\prod_{q=s}^{e-1}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\cdot\left[C_r^e\left(F_r^e+G_r^e\right)+E_r^e\cdot C_r^e\cdot\max[0,e-(t+1)]\right]\Bigg]+$$
$$+l\cdot\theta\cdot n\sum_{e=t+1}^{\tau-1}\Bigg[\sum_{s=1}^{e-t}\left(\frac{-l}{D_m}\right)^s+\frac{z(1-\theta)\theta}{D_m}\sum_{s=t+1}^{e}l\cdot E_r^s\cdot C_r^s\Bigg[1+\sum_{h=t+2}^{s-2}\prod_{q=e}^{s-2}-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\Bigg]\cdot\left(\frac{-l}{D_m}\right)^{e-s}\Bigg]\cdot\left[C_r^e\left(F_r^e+G_r^e\right)+E_r^e\cdot C_r^e\cdot\max[0,e-(t+1)]\right]\Bigg]$$
$$+l\cdot\left(1-l\sum_{h=t+1}^{\tau-1}E_r^h\cdot C_r^h\cdot\Bigg[1+\sum_{k=t+1}^{h-1}\prod_{q=k}^{h-1}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\right)\cdot\Big[[\tau-(t+1)]\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau+C_r^\tau\left(F_r^\tau+G_r^\tau\right)-$$
$$-l\cdot E_r^\tau\cdot C_r^\tau\Bigg[(1-\theta)n\sum_{e=1}^{\tau-1}\Bigg[1+\sum_{s=t+1}^{e-1}\prod_{q=s}^{e-1}\left(-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\right)\Bigg]\cdot\left[C_r^e\left(F_r^e+G_r^e\right)+E_r^e\cdot C_r^e\cdot\max[0,e-(t+1)]\right]$$
$$+l\cdot\theta\cdot n\sum_{e=t+1}^{\tau-1}\Bigg[\sum_{s=1}^{e-t}\left(\frac{-l}{D_m}\right)^s+\frac{z(1-\theta)\theta}{D_m}\sum_{s=t+1}^{e}l\cdot E_r^s\cdot C_r^s\Bigg[1+\sum_{h=t+2}^{s-2}\prod_{q=e}^{s-2}-l\cdot E_r^q\cdot C_r^q\Bigg]\cdot\left(\frac{-l}{D_m}\right)^{e-s}\Bigg]\cdot\left[C_r^e\left(F_r^e+G_r^e\right)+E_r^e\cdot C_r^e\cdot\max[0,e-(t+1)]\right]\Bigg]\ \Big]\Big]\Bigg\},$$
$$F_r^T=F_r^{T-1}=F_m^t=0\ \ \forall t.$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Le jeu défini par les programmes D et E met en évidence que le comportement myope ne peut pas résulter d'une éventuelle rationalité limitée des agents myopes, mais d'une préférence pour le présent.

On pourrait espérer que l'efficacité de l'exploitation de la ressource pour une population mixte soit moindre par rapport à une population composée exclusivement de préleveurs rationnels. La Figure 2.2 expose les résultats de simulations réalisées pour clarifier ce point. Pour une population de préleveurs de 5 individus, les trajectoires de prélèvement pour toutes les combinaisons possibles d'agents myopes et rationnels ont été calculées à partir des équations 2.11 et 2.12 (Figure 2.2a) dans une situation sans externalité statique (z =0). Les trajectoires résultantes des simulations pour le stock de la ressource et les profits de chaque type d'agent, myope et rationnel, sont exposées dans les Figure 2.2b, 2.2c et 2.2d, respectivement. Les couleurs distinguent les différentes populations ; il faut noter que les trajectoires bleu et magenta indiquent des populations homogènes avec la totalité des 5 préleveurs étant rationnels ou myopes, respectivement.

Dans la Figure 2.2a les trajectoires des agents rationnels sont exposées en lignes continues, et celles des agents myopes en lignes discontinues. La ligne grise continue correspond à la trajectoire optimale. Tandis que les trajectoires myopes débutent toutes au même niveau, en la période 1, le prélèvement initial des trajectoires rationnelles augmente à fur et à mesure que la proportion d'agents myopes θ grandit. A la dernière période, les trajectoires des deux types finissent forcement au même niveau de prélèvement. La pente négative des trajectoires pour les deux types d'agent est plus prononcée lorsque θ augmente, en raison de l'évolution du stock résultant des prélèvements ; dans la Figure 2.2b on observe les trajectoires du stock pour chaque population simulée. Pour une population rationnelle, la trajectoire du stock est au-dessus de toutes les autres. Au fur et à mesure que θ augmente les trajectoires s'empilent (Figure 2.2b). Des niveaux de stock plus élevés entraînent des profits plus importants, donc les populations mixtes sont plus efficaces qu'une population 100% myope, et la population rationnelle est la plus efficace. Le bien-être atteint par les différentes populations simulées, de la rationnelle ($\theta = 0$) à la myope ($\theta = 1$) sont également exposés dans la Figure 2.2 (divisés par mille). Il est donc évident que plus il y a d'agents rationnels dans la population, plus l'exploitation sera efficace.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

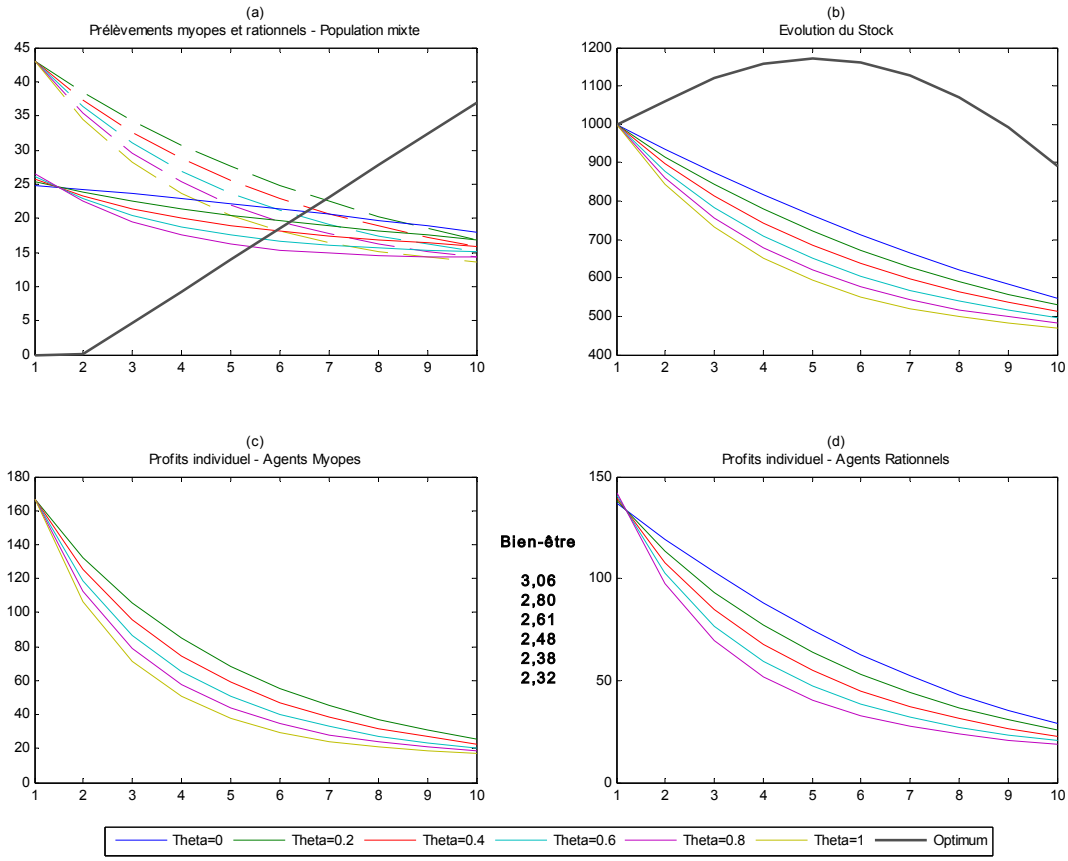


Figure 2.2 : Simulations du modèle à population mixte (N=5 ; T=10 ; a=5,3 ; b=0,09 ; p=7,6 ; l=0,01 ; z=0 ; S(0)=1000 ; r=60). Figure 2.2a : Trajectoires de prélèvement des agents myopes et rationnels pour les différentes proportions d'agents myopes (theta). Figure 2.2b : Trajectoires du stock de la ressource. Figure 2.2c : Trajectoires des profits individuels des agents myopes. Figure 2.2d : Trajectoires des profits individuels des agents rationnels.

La Figure 2.2a suggère que la loi de commande des agents myopes ne change pas face à une modification de la composition de la population, contrairement à la loi de commande rationnelle. La proposition suivante indique quand et comment le feedback des agents myopes est affecté par un changement de θ.

PROPOSITION 1 : Si la variation du prélèvement rationnel face à une augmentation de la proportion de préleveurs myopes à la période t est supérieure à $\left(y^{r,t} - y^{m,t}\right)/(1-\theta)$, les prélèvements myopes diminuent.

Démonstration

Pour faciliter l'exposé nous supposons momentanément que θ est continue.

La proposition se démontre directement à partir de la dérivée de la loi de commande $y^{m,t}$ (équation 2.12) par rapport à θ :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(2.13) $$\frac{\partial y^{m,t}}{\partial \theta} = \frac{z \cdot n}{D_m} \cdot \left[y^{r,t} - y^{m,t} - (1-\theta)\frac{\partial y^{r,t}}{\partial \theta} \right].$$

□

Corollaire 1.1 : En l'absence d'externalité statique ($z = 0$), le feedback myope est invariable face à un changement de la proportion de préleveurs myopes.

Bien que les simulations exposées dans la Figure 2.2 aient été effectuées en l'absence d'externalité statique, elles donnent une indication sur la façon dont pourrait se comporter la loi de commande myope lorsque $z > 0$. On peut s'attendre à ce que les prélèvements myopes diminuent lorsque θ augmente car ils sont supérieurs aux prélèvements rationnels tout le long de l'horizon temporel, sauf dans la dernière période où ils sont égaux (Figure 2.2a). Peut-on espérer, également, que la diminution des prélèvements myopes soit suffisamment importante pour avoir un impact sensible sur l'efficacité de l'exploitation quand $z>0$? Nous avons effectué une simulation pour répondre à cette question : les résultats sont exposés dans la Figure 2.3.

Dans la Figure 2.3a sont exposées, en lignes continues, les trajectoires de prélèvement des deux types d'agent dans le cas d'une population mixte à 80% d'agents myopes. Les Figure 2.3b, 2.3c et 2.3d, correspondent aux trajectoires résultantes pour le stock et les profits des agents myopes et rationnels, respectivement. Pour évaluer l'impact d'un changement de θ sur les lois de commande des deux types d'agents, nous avons calculé les prélèvements myopes et rationnels en utilisant les lois de commande d'une population mixte avec $\theta = 0{,}6$ en utilisant la trajectoire du stock exposée dans la Figure 2.3b. Les trajectoires résultantes apparaissent en lignes discontinues dans la Figure 2.3a. Nous les appelons « prélèvements conditionnels ». Bien que l'effet soit parfois difficilement perceptible, l'augmentation de θ implique des prélèvements rationnels légèrement plus importants (Figure 2.3a). Pour les agents myopes, l'augmentation de θ réduit les prélèvements, cependant le changement est presque imperceptible tout le long de l'horizon temporel (Figure 2.3a). En conclusion, on ne peut pas attendre que la diminution des prélèvements myopes compense l'augmentation de θ et améliore l'efficacité de l'exploitation.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

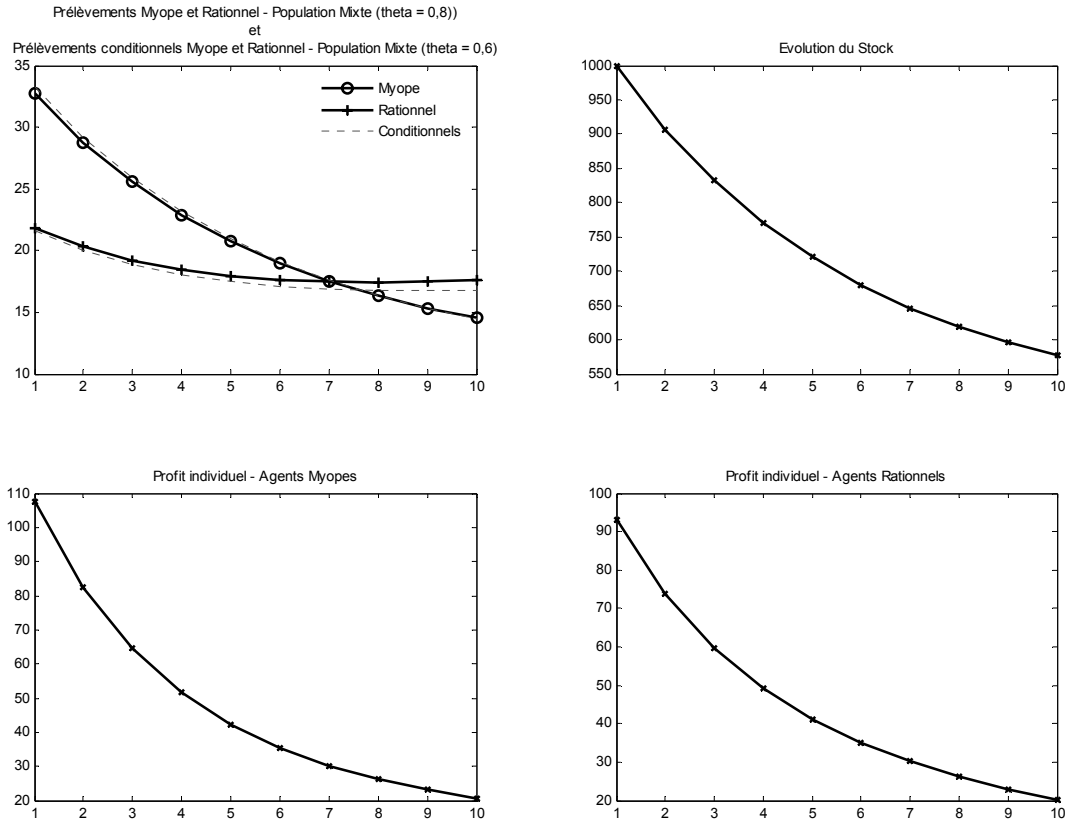


Figure 2.3 : Simulations du modèle à population mixte (N=5 ; T=10 ; a=5,3 ; b=0,09 ; p=7,6 ; l=0,01 ; z=0,015 ; S(0)=1000 ; r=60). Figure (2.3a) : Trajectoires de prélèvement des agents myopes et rationnels pour une proportion d'agents myopes de 0,8 ; et trajectoires conditionnelles des deux types d'agents pour thêta=0,6. Figure (2.3b) : Trajectoire du stock de la ressource (thêta=0,8). Figure (2.3c) : Trajectoire du profit individuel des agents myopes. Figure (2.3d) : Trajectoire du profit individuel des agents rationnels.

L'écart entre la trajectoire optimale et celles des deux types d'agents (Figure 2.2a), met en évidence la nécessité de réguler l'exploitation de la ressource. Dans la section suivante nous présentons les différents instruments incitatifs dont peut disposer le régulateur, et nous développons un cadre simplifié pour étudier son choix parmi ces différents instruments.

2.3 Régulation

Le régulateur est une agence bénévole qui doit choisir parmi différents instruments incitatifs, dans l'objectif de maximiser sous contrainte le bien-être d'une économie composée uniquement par les préleveurs eux-mêmes. Le bien-être de cette économie est défini comme la somme des profits de tous les préleveurs, dès la période présente jusqu'à la fin de l'horizon

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

temporel, actualisés avec un facteur d'actualisation (positif) défini par le régulateur[17]. Deux contraintes sont considérées : une contrainte budgétaire et une contrainte d'acceptabilité. En conséquence, il doit faire des arbitrages qui peuvent éventuellement rendre optimal d'instaurer des instruments de second rang, i.e. à taux fixe[18] (invariant avec le stock et le temps) et uniforme[19] (un taux indépendant de la préférence temporelle des préleveurs).

Appelons Λ l'ensemble, discret et fini, de tous les instruments incitatifs possibles. Afin de maximiser le bien-être, le régulateur doit choisir, une fois et pour l'ensemble des périodes (décision *one shot*), un instrument incitatif $\vartheta \in \Lambda$ à mettre en ouvre. Pour cela faire, il doit connaître l'impact de chaque instrument sur les trajectoires de prélèvement d'équilibre. Formellement, le problème du régulateur est :

$$\max_{\Lambda} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} \rho^{t-1} \cdot EU_i^{*t}\left[y^{t*}(\vartheta), S^t, \vartheta\right]$$

s.c.	$y^{t*}(\vartheta) \geq 0$		F.1	Problème (F)
	$S^t - Y^{t*} \geq 0$		F.2	
	$E\left[U\left(y_i^{t*}(\vartheta), S^{t*}, \vartheta\right)\right] \geq \underline{U}$	$\forall t, i$	F.3	
	$CI(\vartheta) \leq B$		F.4	

où,

$y^{t*}(\vartheta) = (y_1^{t*}(\vartheta), ..., y_i^{t*}(\vartheta), ..., y_n^{t*}(\vartheta))$,

$\rho \in [0,1)$ est le facteur d'actualisation du régulateur, et $y^{t*}(\vartheta)$ est le prélèvement d'équilibre quand l'instrument incitatif ϑ est mis en ouvre par le régulateur. F.1 et F.2 sont les contraintes classiques.

Nous appellerons F.3 contrainte d'acceptabilité. Plusieurs objectifs ou contraintes pourraient être regroupés sur le nom de « contrainte d'acceptabilité » (l'équité, la moralité de la politique parmi d'autres)[20]. Nous faisons ici simplement référence à la viabilité économique de

[17] Ceci peut sembler choquant sachant que nous sommes intéressés à une population mixte dont les préleveurs ont des facteurs d'actualisation divergents. Néanmoins, dans la pratique les organismes chargés des investissements publics affichent un facteur d'actualisation propre dans l'évaluation des différents projets.
[18] Ko et al (1992) compare une taxe pigouvienne de premier rang qui varie continuellement, avec une taxe de deuxième rang qui peut être modifiée une voire deux fois dans tout l'horizon.
[19] Millock et Salanié (2005) montrent l'inefficacité d'une taxe ambiante à taux uniforme quand les pollueurs possèdent des capacités de coopération différentes.
[20] *Cf.* Bohm et Russell (1985).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'activité productive dont l'eau prélevée est un intrant essentiel ou le produit final tout court. De ce fait, le choix de l'instrument ne sera pas affecté par cette contrainte ; c'est seulement une fois l'instrument à instaurer choisi que cette contrainte viendra affecter la calibration des paramètres. Par exemple, elle peut se traduire par une taxe avec un taux moindre que l'optimum pour garantir aux préleveurs un profit net minimum.

La contrainte F.4 est une contrainte budgétaire. L'agence régulatrice possède un budget fixe B par période pour les dépenses liées à l'instauration des politiques onéreuses.

Dans le paragraphe suivant, nous allons décrire les éléments de Λ que nous allons considérer. Puis, dans le paragraphe 2.3.2 (dans la page 72) nous allons, à titre d'exemple, donner une forme précise à la fonction *CI(.)* dans la contrainte F.4, pour analyser quelques cas particuliers.

2.3.1 Les instruments incitatifs

Les instruments incitatifs traditionnels, tel qu'une taxe à la Pigou sur les quantités prélevées, obligent les préleveurs à prendre en compte les externalités imposées sur les autres et sur eux-mêmes. Cependant, la conception optimale de ces instruments, permettant d'obtenir la solution de premier rang, nécessite la connaissance exacte des prélèvements individuels et des dommages induits. Nous supposerons que le régulateur connaît les dommages générés par les prélèvements et le coût d'ajustement des préleveurs mais n'observe pas les prélèvements individuels[21]. Dans ce cas, un mécanisme révélateur peut être définit pour garantir l'efficacité des instruments. Il existe différentes possibilités : (i) un système de contrats, (ii) un système de taxes/subventions sur les prélèvements déclarés assorti de pénalités en cas de fraude détecté, (iii) un mécanisme de pénalité collective adaptée au problème d'exploitation d'une CPR, et (iv) une taxe sur les intrants (si les intrants sont observables ou peuvent être estimés).

[21] Comme les coûts pour ce procurer cette information peuvent s'avérer prohibitifs, Baumol et Oates proposent l'approche price-standard comme une solution de second rang qui permettrait d'amener les prélèvements sur une trajectoire arbitraire (standard) grâce à une taxe pigouvienne (price). Ils montrent qu'une taxe unitaire permet d'atteindre un objectif environnemental donné en minimisant les coûts d'ajustement pour la collectivité (*cf.* Baumol et Oates (1988), Chapitre 11, Section 4 pour la démonstration du théorème de minimisation des coûts).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Malgré la pertinence empirique des contrats et de la taxe sur les intrants (taxe sur l'électricité analysée dans Jourdain (2004)), nous n'étudierons pas ces deux instruments. Le principal objectif du modèle développé dans ce chapitre est de servir de cadre au protocole expérimental conçu pour l'évaluation des instruments incitatifs de gestion des prélèvements de l'eau souterraine. En conséquence, ces deux instruments ont été écartés afin de garantir un protocole d'expérience homogène fondé sur la décision de prélèvement et non sur un choix entre différents contrats proposés, ou sur un intrant nécessaire pour réaliser les prélèvements[22]. Nous étudierons donc, trois instruments incitatifs sous différentes formes : une taxe/subvention sur les quantités déclarées avec audit aléatoire et pénalités en cas de fraude, la taxe ambiante, et un instrument mixte qui combine les des deux précédents.

Dans tous les cas, on suppose que le régulateur connaît la fonction de profit des préleveurs (identique pour tous) ; il peut donc calculer le bien-être de la population de préleveurs et identifier la trajectoire optimale. On suppose également que le régulateur connaît l'ensemble de types présents dans la population. Dans un cadre dynamique à horizon fini, un instrument incitatif efficace exige un taux de taxation différent à chaque période et pour chaque type de préleveur. Mais si le type est une information privée, le régulateur doit engager des coûts pour en avoir connaissance. De même, la modification du taux de la taxe à chaque période peut être coûteuse. Dès lors, la question concernant le choix du taux se pose : est-il préférable d'imposer un taux fixe ou un taux flexible qui change périodiquement ? Un taux uniforme ou des taux spécifiques à chaque type ?

2.3.1.1 Taxes et subventions pigouviennes

Le système de taxe/subvention consiste à appliquer des taxes ou des subventions pigouviennes sur les quantités déclarées pour rapprocher les trajectoires de prélèvement individuelles de la trajectoire cible. Etant donné le cadre dynamique à horizon fini du problème exposé (problèmes A, B et D), le taux de la taxe (ou subvention) doit être flexible pour arriver à une solution de premier rang. Ce taux dépend donc du stock disponible de la ressource, des prélèvements de la période et du temps restant jusqu'à la période finale T. Pour

[22] Dans un protocole expérimental est difficile à marquer une différence entre l'intrant et le produit final car ils sont en général liés par une fonction déterministe. En conséquence, une taxe sur les intrants revient au même qu'une taxe sur les prélèvements dans le cas ci présenté.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

que ce système reste efficace, il faut qu'à chaque période t les prélèvements déclarés coïncident avec les réels. L'audit aléatoire permet, pour des préleveurs neutres vis-à-vis du risque, d'éliminer les fausses déclarations en imposant une pénalité suffisamment élevée aux fraudeurs pour une probabilité d'audit donnée (Polinsky et Shavell, 1979).

- Le taux de la taxe

L'agence régulatrice fixe le taux de la taxe unitaire de façon à inciter les préleveurs à suivre la stratégie optimale à chaque période t. Donc, à chaque période, le taux de la taxe internalise les effets externes des prélèvements de la période en comblant les différences des CPO du régulateur (programme C) et des préleveurs (programmes A ou B selon le type du préleveur) :

$$\tau^t = V'(S^t, y_i^t) - V^{*\prime}(S^t, y_i^t).$$

Bien évidemment, le taux de l'instrument va dépendre du type du préleveur. En supposant rationnels tous les préleveurs de la population, et en travaillent avec les solutions intérieures, le taux de la taxe est :

$$\tau_r^t = \frac{1}{2} z(N-1) y_i^t + \left(S^t - \frac{1}{2} y_i^t - \sum_{j \neq i} y_j^t + r \right) \cdot \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} \left[\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{rat} - \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right] \left(2 - \frac{D}{Nl} \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} + \sum_{q=t+1}^{s-1} \left(\frac{\partial y^{q*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right)$$

$$+ r \cdot \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} C^s \cdot (G^s + F^s) \left[\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{rat} - \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right] \left[\left(D + l \sum_{q=t+1}^{s-1} \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right) + l(N-1) \left(1 + \sum_{q=t+1}^{s-1} \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right) \right]$$

$$+ (a-p) \cdot \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} \left[\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{rat} - \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right] \left(2 - \frac{D}{Nl} \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} + \sum_{q=t+1}^{s-1} \left(\frac{\partial y^{q*}}{\partial y_i^t} \right)^{*} \right). \qquad (2.14)$$

La taxe est calculée en supposant que, pour les périodes au-delà de t, elle permet d'amener les prélèvements individuels à la trajectoire optimale y^*. L'externalité dynamique provient d'une sous évaluation de l'impact futur des prélèvements courants, mesurée par

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$\left[\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{rat} - \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*}\right]$ pour la période s. La première dérivée est celle d'un individu rationnel et la deuxième est celle du régulateur qui prend en compte la totalité des effets.

Si la population est myope, le taux de la taxe est (solutions intérieures) :

$$\tau_m^t = \frac{1}{2} z(N-1) y_i^t - \left(S^t - \frac{1}{2} y_i^t - \sum_{j \neq i} y_j^t + r\right) \cdot \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*} \left(2 - \frac{D}{Nl}\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*} + \sum_{q=t+1}^{s-1}\left(\frac{\partial y^{q*}}{\partial y_i^t}\right)^{*}\right)$$

$$- r \cdot \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} C^s \cdot (G^s + F^s) \cdot \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*} \left[\left(D + l \sum_{q=t+1}^{s-1}\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*}\right) + l \cdot N \cdot \left(1 + \sum_{q=t+1}^{s-1}\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*}\right)\right]$$

$$- (a - p) \cdot \sum_{s=t+1}^{T} \rho^{s-t} \left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*} \left(2 - \frac{D}{Nl}\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*} + \sum_{q=t+1}^{s-1}\left(\frac{\partial y^{s*}}{\partial y_i^t}\right)^{*}\right). \qquad (2.15)$$

A la période T, le taux de la taxe est le même pour les deux types d'agents, et nul s'il n'y a pas d'externalité statique ($z = 0$). Pour les autres périodes, $t \leq T$, le taux est plus élevé pour les préleveurs myopes car ils ne prennent pas en considération l'impact de leurs prélèvements courants sur leurs profits futurs.

Dans le cas d'une population mixte, les équations (2.14) et (2.15) indiquent aussi les taux à appliquer sur des individus rationnels et myopes, respectivement. Pour que la taxe soit efficace, le régulateur doit pouvoir identifier le type de chaque préleveur pour appliquer le taux qui correspond à chacun. Si le régulateur se trompe et un préleveur rationnel (myope) est taxé au niveau des myopes (rationnels), son prélèvement sera réduit excessivement (insuffisamment). L'agence devra établir un bilan coût-efficacité et choisir entre : (*i*) identifier le type de chaque préleveur, soit par des contrôles individuels coûteux, soit en proposant de contrats incitatifs également coûteux ; (*ii*) proposer un taux uniforme appliqué à tous les préleveurs. Dans ce dernier cas, il faut déterminer quel taux utiliser, myope (équation 2.15) ou rationnel (équation 2.14).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Nous envisageons ici le cas où les coûts d'identification du type de chaque agent est prohibitif, de même que la définition et l'implémentation de contrats incitatifs[23]. Dans la proposition suivante, et ses corollaires, nous montrons qu'un instrument avec un taux uniforme peut être adapté pour arriver à la solution de premier rang, et que le régulateur n'est pas indifférent entre un taux uniforme myope et un taux rationnel.

PROPOSITION 2 : Une taxe pigouvienne à taux uniforme $\tau^t \in (0,+\infty)$ permet d'obtenir la solution de premier rang si, à chaque période, une subvention par unité prélevée $\varsigma^t \in [\tau^{t*},+\infty)$ est donnée à tout préleveur *i*, dans les cas où $y_i^t \leq y^{t*}$:

(i) Si le taux de la taxe est supérieur ou égal au taux de premier rang, une subvention égale au montant de la taxe ($-\varsigma_i^t = -\tau_i^t$) suffit à créer la discontinuité nécessaire dans le profit et ainsi atteindre la solution de premier rang.

(ii) Si le taux de la taxe est inférieur au taux de premier rang, le taux de la subvention doit être égal au taux de taxation de premier rang.

Démonstration de la proposition

Une telle subvention permet de créer une discontinuité dans le profit qui devient non différentiable en y^{t*}. Si $y_i^t > y^{t*}$, le profit marginal des préleveurs est diminué du taux de la taxe de façon à ramener les prélèvements vers l'optimum. Par contre, dès que $y_i^t \leq y^{t*}$, la subvention allouée élimine l'effet de la taxe, les préleveurs sont incités à augmenter leurs prélèvements jusqu'à y^{t*}, car pour des valeurs plus élevées, le profit marginal chute de τ^t. Pour mieux caractériser cette discontinuité :

$$\lim_{y^t \to y^{t*}+} CPO - \lim_{y^t \to y^{t*}-} CPO = V^{t\prime}\left(S^t, y_i^t\right) - \tau_i^t - V^{t\prime}\left(S^t, y_i^t\right) + \tau_i^t - \varsigma_i^t = -\varsigma_i^t$$

où, $V^{t\prime}\left(S^t, y_i^t\right) = \dfrac{\partial V}{\partial y_i^t}$

□

[23] Du fait de la nature dynamique du problème étudié, l'agence et les préleveurs seront obligés de se rencontrer à chaque période. Révéler pour une période signifie alors révéler pour toutes les périodes restantes jusqu'à T : la la rente informationnelle doit être ainsi conséquente (Lewis (1996) dans sa revue des applications du *mechanism design* à l'économie de l'environnement remarque aussi ce point).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Corollaire 2.1 : Avec un taux uniforme myope, la solution de premier rang est obtenue avec un taux de subvention égal au taux de la taxe uniforme : $\varsigma^t = \tau_m^t$ si $y_i^t \leq y^{t*}$.

Démonstration du Corollaire 2.1

Avec un taux uniforme myope, les CPO des préleveurs myopes et rationnels sont, respectivement :

$$\begin{cases} V'^t_m\left(S^t, y_i^t\right) > 0 & \text{si } y_i^t \leq y_i^{t*} \\ V'^{t*}\left(S^t, y_i^t\right) < 0 & \text{si } y_i^t > y_i^{t*} \end{cases} \quad \text{(myope)},$$

$$\begin{cases} V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) > 0 & \text{si } y_i^t \leq y_i^{t*} \\ V'^{t*}\left(S^t, y_i^t\right) + V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) - V'^t_m\left(S^t, y_i^t\right) < 0 & \text{si } y_i^t > y_i^{t*} \end{cases} \quad \text{(rationnel)}.$$

Avec une taxe à taux uniforme myope, les préleveurs myopes sont incités à prélever l'optimum si $y_i^t > y_i^{t*}$. Du fait que $V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) - V'^t_m\left(S^t, y_i^t\right) < 0$, les préleveurs rationnels sont incités à prélever moins que l'optimum. Une subvention juste égale au montant de la taxe compense l'effet du taux excessif pour des préleveurs rationnels permettant de retrouver la trajectoire de premier rang.

□

Corollaire 2.2 : Avec un taux uniforme rationnel, la solution de premier rang est obtenue avec une subvention $\varsigma^t = \tau_r^t + V'^t_m\left(S^t, y^{t*}\right)$ si $y_i^t \leq y^{t*}$.

Démonstration du Corollaire 2.2

Avec un taux uniforme rationnel les CPO pour préleveurs myopes et rationnels seront, respectivement :

$$\begin{cases} V'^t_m\left(S^t, y_i^t\right) - \left[V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) - V'^{t*}\left(S^t, y_i^t\right)\right] + \left[V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) - V'^{t*}\left(S^t, y_i^t\right)\right] + V'^t_m\left(S^t, y^{t*}\right) > 0 \\ & \text{si } y_i^t \leq y^{t*} \\ V'^{t*}\left(S^t, y_i^t\right) + V'^t_m\left(S^t, y_i^t\right) - V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) < 0 & \text{si } y_i^t > y_m^{t**} \\ V'^{t*}\left(S^t, y_i^t\right) + V'^t_m\left(S^t, y_i^t\right) - V'^t_r\left(S^t, y_i^t\right) > 0 & \text{si } y^{t*} < y_i^t < y_m^{t**} \end{cases}$$

(myope),

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\begin{cases} V'^{t}_{r}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right) - \left[V'^{t}_{r}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right) - V'^{t*}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right)\right] + \left[V'^{t}_{r}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right) - V'^{t*}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right)\right] + V'^{t}_{m}\left(S^{t}, y^{t*}\right) > 0 & \text{si } y^{t}_{i} \leq y^{t*}_{i} \\ V'^{t*}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right) < 0 & \text{si } y^{t}_{i} > y^{t*}_{i} \end{cases}$$

(rationnel).

Avec une taxe à taux uniforme rationnel, les préleveurs rationnels sont incités à prélever l'optimum. Du fait que $V'^{t}_{m}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right) - V'^{t}_{r}\left(S^{t}, y^{t}_{i}\right) > 0$, les préleveurs myopes sont incités à prélever plus que l'optimum. Une subvention avec un taux juste égal à celui de la taxe ne serait pas suffisante pour compenser l'effet d'un taux de la taxe trop bas pour les préleveurs myopes. Le taux de la subvention doit être augmenté du profit marginal des préleveurs myopes à l'optimum, $V'^{t}_{m}\left(S^{t}, y^{t*}\left(S^{t}\right)\right)$, pour générer une discontinuité suffisante dans le profit marginal et arriver à la solution de premier rang.

□

Corollaire 2.3 : La taxe à taux uniforme myope associée à la subvention de premier rang est plus efficace que la taxe à taux uniforme rationnel et la subvention correspondante de premier rang.

Démonstration du Corollaire 2.3

Les subventions nécessaires pour atteindre la solution de premier rang dans le cas du taux myope (corollaires 2.1), permettent d'équilibrer le budget au niveau de chaque individu ; par contre, avec un taux rationnel, le régulateur réalise un déficit pour chaque préleveur à chaque période *t*, d'un montant égal à :

$$y^{t*}\left(S^{t}\right) \cdot V'^{t}_{m}\left(S^{t}, y^{t*}\left(S^{t}\right)\right).$$

□

L'efficacité de ces instruments suppose que les prélèvements individuels soient parfaitement observables par le régulateur. Lorsque ce n'est pas le cas, la taxe doit s'appliquer sur les quantités déclarées par chaque préleveur. Pour qu'elle reste efficace, il faut qu'il n'y ait pas de différence entre les quantités déclarées et les prélèvements réels, ce qui suppose l'absence de fraude à chaque période *t*.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- Le système d'audit

Nous supposons que le régulateur détermine un nombre fixe de préleveurs à contrôler par période choisis au hasard parmi l'ensemble des préleveurs. Le régulateur peut ainsi limiter sa dépense tout en gardant un audit totalement aléatoire.

Deux types de contrôles peuvent être effectués, un courant et un rétroactif. Pour le premier, seules les déclarations de la période courante peuvent être vérifiées. Avec le contrôle rétroactif, en plus de la période courante, le régulateur peut inspecter les déclarations des périodes passées.

- Les pénalités

Supposons, pour toutes les périodes, une probabilité de contrôle de p et un contrôle limité aux déclarations de la période courante. Un préleveur neutre vis-à-vis du risque sera incité à faire une déclaration honnête si, en cas de fraude avérée, il est obligé de payer sa dette $\left(y_i^t - \hat{y}_i^t\right)\cdot \tau_i^t$ plus une pénalité[24] Ω_i^t égale à :

$$\Omega_i^t = \frac{U\left(S^t, y_i^t\right) - p\cdot\tau_i^t\cdot\left(y_i^t - \hat{y}_i^t\right) - \hat{y}_i^t\cdot\tau_i^t}{p} \tag{2.16}$$

où $\hat{y}_i^t$ représente les prélèvements déclarés pour la période t.

L'équation (2.16) montre bien que la pénalité doit être calculée individuellement, en fonction des prélèvements réels et déclarés de chaque préleveur, du taux de la taxe et de la probabilité d'être contrôlé. Lorsque p est faible, pour que le système soit incitatif, la pénalité doit être élevée. Néanmoins, si des pénalités élevées ne peuvent pas être mises en place du fait de contraintes de responsabilité limitée[25] de la part des agents ou de contraintes institutionnelles,

[24] Cf. Polinsky et Shavell (1979).

[25] Ce type de contraintes appliquent lorsque, par des lois ou par la jurisprudence, la responsabilité d'un individu ne peut être engagé que partiellement. Par exemple, il peut exister une limite aux montants de pénalités, ou il peut que les peines d'imprisonement ne soient pas envisageables même si la pénalité financière dépasse la richesse de l'individu concerné, etc. Dans ces cas, la puissance incitative des pénalités est contrainte aux limites de la responsabilité.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

un système de contrôle des déclarations basé sur l'audit aléatoire à probabilité uniforme est inefficace (Harrington, 1988).

Le contrôle rétroactif permet de réduire le montant de la pénalité optimale pour les périodes $t > 1$:

$$\Omega_i^t = \frac{U\left(S^t, y_i^t\right) - p \cdot \sum_{s=1}^{t} \tau^s \cdot \left(y_i^s - \hat{y}_i^s\right) - \hat{y}_i^t \cdot \tau_i^t}{p} \tag{2.17}$$

La somme dans le deuxième terme du numérateur est la dette accumulée jusqu'à la période t, dont les préleveurs contrôlés devront s'acquitter s'ils sont contrôlés. Dans ce cas, le régulateur doit pouvoir observer la fraude de chaque période passée (un registre doit être tenu). Dans le cas d'une taxe à taux fixe, le registre n'est pas nécessaire pour calculer la dette et la pénalité correspondante, car le taux est le même dans toutes les périodes et pour tous les valeurs du stock et des prélèvements individuels.

S'il existe une technologie capable d'éliminer toute trace des prélèvements réalisés (par exemple, déconnecter le compteur), un mécanisme basé sur l'audit des déclarations est dérisoire. Encore, si les ouvrages eux-mêmes ne sont pas connus du régulateur, car non déclarés, l'audit ne peut pas être appliqué. Dans ces cas, la taxe ambiante offre une alternative efficace si l'observation du stock de la ressource est moins coûteuse que les audits individuels.

2.3.1.2 Taxe ambiante ou Pénalité collective

Sous certaines conditions, la taxe ambiante est aussi un instrument incitatif efficace (Segerson, 1988 ; Hansen, 1997). Pour l'instaurer, le régulateur doit pouvoir observer le niveau du stock de la ressource. Il peut alors se dispenser des déclarations de prélèvement et de leur audit. Ainsi, au début de chaque période, le régulateur fixe le niveau du stock minimum à atteindre en fin de période. Si ce stock s'avère inférieur à l'objectif, tous les préleveurs doivent payer la totalité du dépassement fois le taux de la taxe, c'est-à-dire, les

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

dommages causés (Hansen 1997). Dans le cas contraire, aucun préleveur n'est taxé. La taxe ambiante est définie par :

$$(2.18) \qquad \Gamma_i^t = \kappa_i^t \times \max\left[S^t + \sum_{\forall i} y_i^t - S^{t^*}, 0 \right] \qquad t = 1,...,T,$$

où S^{t^*} est l'objectif pour la fin de la période *t*.

Avec nos hypothèses, les seules victimes possibles sont les préleveurs eux-mêmes, car ils subissent les externalités statiques et dynamiques. Donc, les équations (2.14) et (2.15) indiquent les taux d'une taxe ambiante efficace pour une population rationnelle et myope, respectivement. De la même façon que dans le cas de la taxe pigouvienne, le problème d'identification du type des préleveurs se pose et on trouve la même réponse.

PROPOSITION 3 : Une taxe ambiante à taux uniforme est un instrument de premier rang si $\kappa^t \geq \tau_m^t \ \ \forall t$.

Démonstration : voir la démonstration de la proposition 2.

□

Même si, à l'équilibre, aucun paiement n'a lieu, l'un des problèmes posés par ce mécanisme est la multiplicité des équilibres de Nash : quelques préleveurs peuvent compenser les prélèvements excessifs des passagers clandestins. Un autre problème de cet instrument est la pénalisation des préleveurs honnêtes comme conséquence des prélèvements excessifs de la part des autres. Finalement, des contraintes de responsabilité limitée pourraient réduire le pouvoir incitatif de l'instrument si les dommages générés sont importants.

2.3.1.3 Instrument mixte

La combinaison d'une taxe pigouvienne avec audit aléatoire et d'une pénalité collective peut fournir un mécanisme efficace pour faire coïncider les prélèvements avec l'optimum social, tout en minimisant les handicaps de chaque instrument pris séparément. Kritikos (2004) a montré qu'étant donné une probabilité de contrôle *p*, la trajectoire optimale est un équilibre si,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

à chaque période, une pénalité individuelle égale aux dettes du préleveur $i, \left(y_i^t - \hat{y}_i^t\right) \cdot \tau_i^t$, est combinée à une pénalité collective donnée par :

$$\Gamma_i^t = \tau_i^t \times \min\left[\mathrm{P}, \sum_{\forall i} y_i^t - \sum_{\forall i} \hat{y}_i^t\right], \tag{2.19}$$

où, $\mathrm{P} \leq W^t$, est la limite de responsabilité des préleveurs.

Ce mécanisme implique que tous les préleveurs seront pénalisés si au moins un préleveur triche. En cas de fraude, la seule façon d'échapper à la pénalité collective est que lors du contrôle individuel il s'avère que le préleveur contrôlé a déclaré sans biais ses prélèvements. Dans ce cas, les préleveurs n'ont pas intérêt à faire de fausses déclarations de prélèvement car les fraudeurs devront s'acquitter avec certitude au minimum du double de leur dette et au maximum de leur richesse accumulée. Si $\sum_{\forall i} y_i^t - \sum_{\forall i} \hat{y}_i^t = 0$, le régulateur n'effectue pas des audits individuels, donc à l'équilibre aucun individu n'est contrôlé. Le prélèvement total, $\sum_{\forall i} y_i^t$, est estimé à partir de l'observation de l'état de la ressource. En pratique cette estimation peut être difficilement réalisable, donc ceci s'avère une contrainte supplémentaire par rapport à la taxe ambiante.

Dans le cas d'une population mixte, la proposition 2 est aussi applicable.

2.3.2 Le choix de l'instrument

L'agence régulatrice est considérée comme une entité bénévole capable de mener à bien des politiques publiques pour gérer les prélèvements. Si toute la complexité à l'intérieur d'une telle institution n'est pas abordée, deux contraintes sur l'action du régulateur ont été pris en compte : (i) la contrainte d'acceptabilité (contrainte F.3 du programme F), les politiques mise en place par l'agence devant garantir une rentabilité minimale aux préleveurs et (ii) la contrainte budgétaire, l'agence régulatrice devant respecter un budget fixe pour mener ses politiques (contrainte F.4 du programme F).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Dans ce paragraphe nous allons donner une forme précise à la fonction *CI(.)* dans la contrainte F.4, pour analyser quelques cas particuliers.

2.3.2.1 La contrainte budgétaire

L'agence régulatrice possède un budget fixe *B* par période pour les dépenses liées à l'instauration des politiques onéreuses. A chaque période *t,* l'agence doit fixer les taux de la taxe τ^t et des subventions ς^t ; le coût de modification des taux est constant et égal à α. Le coût de relevé des compteurs individuels est constant et égal à φ. Enfin, l'observation du niveau du stock de la ressource (au début et en fin de période) est aussi coûteuse : constant par période, ce coût est égal à μ.

Pour simplifier, nous supposons que les montants récupérés avec la taxe et les pénalités ne sont pas utilisables par l'agence régulatrice pour financer son fonctionnement, c'est-à-dire, couvrir les coûts des politiques instaurées ; mais le montant payé par un préleveur peut servir à financer les subventions allouées à ce préleveur dans la même période. A chaque période t, l'agence régulatrice doit respecter les contraintes budgétaires suivantes :

$$\text{(2.20)} \qquad \begin{aligned} &\alpha \cdot I_\alpha^t + \varphi \cdot N_a^t + \mu \cdot I_\mu^t \leq B \\ &\varsigma^t \cdot y_i^t \leq \tau^t \cdot y_i^t \end{aligned} \qquad \forall t$$

où I_α^t est une variable indicatrice, égale à 1 si l'agence a modifié le taux par rapport à la période précédente et zéro autrement ; I_μ^t est une variable indicatrice, égale à 1 si l'agence vérifie le niveau de la nappe à la période *t* et zéro autrement ; et N_a^t est le nombre de préleveurs contrôlés à la période *t*.

2.3.2.2 Le choix de l'instrument

Le régulateur doit choisir parmi les trois instruments décrits dans la sous-section 2.3.1 de façon à maximiser le bien-être social. Nous supposons que chaque instrument est calibré pour atteindre la solution de premier rang. Sachant que tous les préleveurs sont homogènes (par

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

rapport au profit) et supposant que la contrainte d'acceptabilité n'est pas saturée, le choix de l'instrument se réduit à sélectionner celui qui minimise le coût de mise en place de la trajectoire optimale pour le régulateur.

Le Tableau 2.1 résume les coûts de mise en place (à l'équilibre) des trois instruments en supposant un taux uniforme. Si un taux spécifique devrait être attribué à chaque type, α est multiplié par le nombre de types. Une hypothèse implicite dans le calcul des coûts exposés dans le Tableau 2.1 est qu'il n'y a pas des déviations par rapport à la trajectoire optimale, à partir de laquelle plusieurs paramètres des instruments sont calculés. Si une déviation a lieu, cette trajectoire doit être recalculée et les instruments modulés à nouveau, entraînant des coûts supplémentaires qui ne sont pas pris en compte dans ce tableau.

	Taux flexible	Taux fixe
Taxe/subvention	$T \cdot (\alpha + \varphi \cdot p \cdot N)$	$\varphi \cdot T \cdot p \cdot N$
Taxe ambiante	$T \cdot (\alpha + \mu)$	$T \cdot \mu$
Instrument mixte	$T \cdot (\alpha + \mu)$	$T \cdot \mu$

Tableau 2.1 : Le coût pour le régulateur de la mise en place des instruments incitatifs à l'équilibre

La taxe ambiante est l'instrument avec le meilleur rapport coût-efficacité pour un taux flexible et fixe si $\mu < \varphi \cdot p \cdot N$. Si la probabilité d'audit est faible et/ou la population de préleveurs n'est pas très grande, le système de taxe/subvention peut être plus efficient que la taxe ambiante[26]. Néanmoins, si le montant de la pénalité ne peut être fixé librement, le système taxe/subvention pourrait ne pas atteindre l'optimum, une probabilité faible impliquant une pénalité forte.

Le coût de mise en place de l'instrument mixte est identique à celui de la taxe ambiante si personne ne triche (comme c'est le cas à l'équilibre). Par contre, il est l'instrument le plus coûteux en cas de fraude. Néanmoins, il constitue la seule option pour atteindre l'optimum s'il n'y a pas des compteurs volumétriques, et s'il existe une contrainte de responsabilité limitée empêchant l'application de pénalités collectives élevées.

[26] Il existe quand même une taille de population à partir de laquelle l'instauration de la taxe ambiante devient difficile, notamment lorsqu'elle concerne une large étendue géographique. En effet, il est alors difficile d'identifier l'impact de chaque préleveur sur l'état de la ressource (Cabe et Herrigues, 1992).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Nous analyserons 4 cas selon les valeurs des paramètres α, φ et μ : (i) α, φ modérés et μ élevé ; (ii) α, μ élevé et φ modéré ; (iii) α, φ élevés et μ modéré ; et (iv) α, μ modéré et φ élevé. Les autres cas ne sont pas analysés car ils n'enrichissent pas l'analyse. Pour le cas particulier où aucune politique ne soit abordable, car trop coûteuse, nous supposerons que la société à d'autres priorités que de financer la régulation de l'exploitation de l'eau souterraine.

i. α, φ modérés et μ élevé $(\mu > \varphi \cdot p \cdot N)$

Dans ce cas, le régulateur peut instaurer une taxe pigouvienne flexible appliquée aux prélèvements individuels. A partir des contraintes budgétaires du régulateur (équation 2.20), même dans le cas d'information complète, une taxe avec un taux uniforme myope associée à une subvention (décrit dans le corollaire 4.1) est plus efficace qu'un système de taxes à taux hétérogènes :

$$(\alpha + \varphi \cdot p \cdot N) < (2\alpha + \varphi \cdot p \cdot N).$$

Si $T \cdot (\alpha + \varphi \cdot p \cdot N) > B$, les coûts de mise en place doivent être réduits. Lorsque la politique d'audit est au moindre coût possible pour être incitative, i.e. une réduction additionnelle de la probabilité d'audit impliquerait une augmentation inacceptable de la pénalité, la réduction des coûts doit s'opérer sur la fréquence d'actualisation du taux de la taxe. Supposons que $\overline{T} < T$ est le nombre maximal de fois où le taux peut être changé tout en respectant la contrainte budgétaire $\overline{T} \cdot \alpha + T \cdot \varphi \cdot p \cdot N = B$.

PROPOSITION 4 : Une taxe à taux uniforme et fixe $\overline{\tau}$, combinée à une subvention égale aux montants payés $\overline{\tau} \cdot y_i^t$ si $y_i^t \leq y^{t*}$, est de premier rang si :

$$\overline{\tau} \geq \max\left[\tau_m^1\left(S^{1*}, y_m^{1*}\right), \tau_m^2\left(S^{2*}, y_m^{2*}\right), \ldots, \tau_m^T\left(S^{T*}, y_m^{T*}\right)\right].$$

Démonstration : Le principe est le même que pour la proposition 2 : il faut produire une discontinuité dans le profit marginal, sauf qu'ici il y a une deuxième source de variation pour le taux de la taxe : le temps. Donc, pour être de premier rang, le taux fixe doit être supérieur au taux myope (équation 2.15) le plus élevé sur la trajectoire optimale.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Cette proposition nous indique qu'une taxe à taux uniforme et fixe sur tout l'horizon temporel permet d'atteindre l'optimum de premier rang si elle est suffisamment élevée et si elle est associée à une subvention.

ii. α , μ élevé et φ modéré $(\mu > \varphi \cdot p \cdot N)$

Dans ce cas, le régulateur peut instaurer une taxe au taux fixe. Par la proposition 4, on sait que ce mécanisme est de premier rang, avec un coût de mise en place égal à $\alpha + T \cdot \varphi \cdot p \cdot N$.
Si $\alpha + T \cdot \varphi \cdot p \cdot N > B$ et si la politique d'audit est à son moindre coût possible pour être incitative, le mécanisme, si instauré, il n'arrivera pas à ramener les prélèvements vers la trajectoire de premier rang.

De même, la contrainte d'acceptabilité (contrainte F.3) pourrait empêcher cet instrument d'être mis en place. Sachant qu'à l'équilibre personne ne paye la taxe (car ils sont automatiquement remboursés par la subvention), le non respect de la contrainte d'acceptabilité implique, en fait, que l'objectif du régulateur est trop ambitieux $\left(EU_i^t(S^{t*}, y_i^{t*}) < \underline{U}\right)$ pour l'état actuel de la technologie. Donc, ce problème n'est pas spécifique à la taxe à taux uniforme et fixe mais concerne tous les instruments de premier rang. Une trajectoire de prélèvement de second rang doit être identifiée, elle est $y_i^{t**} / EU\left(S^{t**}, y_i^{t**}\right) \geq \overline{U}$, $t \leq T$. Pour mettre en place l'instrument de second rang, il suffit donc de modifier le seuil à partir duquel la subvention est allouée $\overline{\tau} \cdot y_i^t$ si $y_i^t \leq y^{t**}$.

Si le régulateur ne peut pas modifier la trajectoire objective de la taxe mais juste son taux, il doit établir ce taux de manière à minimiser les dommages sociaux. Il est donc conduit à résoudre pour $\overline{\tau}$ le système d'équations composé par les $T \times 3$ CPO du programme suivant[27] :

$$\underset{\overline{\tau}}{Min}\, V''_i\left(S^t, y_i^t(\overline{\tau})\right) - V''^*_i\left(S^t, y_i^t(\overline{\tau})\right),$$

$$\text{s.c.} \quad U\left(S^t, y_i^t(\overline{\tau})\right) - y_i^t(\overline{\tau}) \cdot \overline{\tau} \geq \overline{U} \qquad \forall t \leq T \qquad \text{Programme (G)}$$

$$y_i^t(\overline{\tau}) \geq 0$$

[27] Seules les T CPO ont été prises car tous les préleveurs ont la même fonction de profit.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Pour calibrer cet instrument, le régulateur doit simplement fixer le taux de la taxe, la subvention étant égale aux montants payés pour la taxe.

Supposons qu'il existe une solution $\bar{\tau}^*$ au programme G. Si, sous $\bar{\tau}^*$, il y a au moins une période t où $U\left(S^t, y_i^t\right) - y_i^t \cdot \bar{\tau}^* > \overline{U}$, il est efficace d'augmenter le taux de la taxe pour cette période. Mais, sous cette configuration des coûts, une modification supplémentaire du taux ne peut pas être financée.

iii. α, φ élevés et μ modéré $\left(\mu < \varphi \cdot p \cdot N\right)$

Les instruments envisageables sont une taxe ambiante ou l'instrument mixte, tous les deux avec un taux fixe. Par les propositions 2, 3 et 4, une taxe ambiante à taux uniforme et fixe est de premier rang si $\bar{\kappa} \geq \bar{\tau}$ ($\bar{\tau}$ tel qui a été défini dans la proposition 4).
Le même problème d'acceptabilité de l'objectif du régulateur que pour le cas *(ii)* se pose et toute cette discussion est applicable ici.

iv. α, μ modéré et φ élevé $\left(\mu < \varphi \cdot p \cdot N\right)$

Le régulateur peut instaurer une taxe ambiante ou l'instrument mixte, tous les deux avec un taux flexible.

Cas	Coût de la modulation (α)	Coût de la relève (ρ)	Coût d'observation niveau nappe (μ)	Premier rang	Cas particuliers
1	Faible	Faible	Elevé	Taxe pigouvienne flexible	Si $T \cdot \left(\alpha + \varphi \cdot p \cdot N\right) > B$ et $\overline{T} \cdot \alpha + T \cdot \varphi \cdot p \cdot N = B$ Taxe pigouvienne fixe + subvention
2	Elevé	Faible	Elevé	Taxe pigouvienne fixe + subvention	Si $\alpha + T \cdot \varphi \cdot p \cdot N > B$ Taxe pigouvienne fixe non optimale + subvention
3	Elevé	Elevé	Faible	Taxe ambiante ou instrument mixte à taux fixe	Si $T \cdot \mu > B$, réduire la périodicité à $1 \leq \overline{T} < T$
4	Faible	Elevé	Faible	Taxe ambiante ou instrument mixte à taux flexible	Si $T \cdot \mu > B$, réduire la périodicité à $1 \leq \overline{T} < T$

Tableau 2.2 : Récapitulatif du choix de l'instrument de la part du régulateur pour différentes configurations du coût de fonctionnement.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle simple de régulation de l'exploitation de l'eau souterraine. Une ressource commune est exploitée pendant un nombre fini de périodes, par une population mixte de préleveurs neutres vis-à-vis du risque. L'objectif a été de prendre en compte les caractéristiques de la problématique rencontrée dans le terrain d'étude (la plaine du Roussillon) dans le but de tester en laboratoire différents types d'instruments. Nous avons été particulièrement attentifs au risque d'intrusion saline et de pollution de l'aquifère profond par les eaux des nappes superficielles. Nous avons également pris en compte le fait que les prélèvements ne sont que partiellement observables. Cependant, nous avons supposé que les points de captage sont connus, mais la connaissance des volumes prélevés n'est que partielle. Tandis que la connaissance des prélèvements demande l'installation et le relèvement des compteurs volumétriques, la connaissance des points de captage exige que les forages soient recensés. Ce dernier point concerne les facultés du régulateur pour exercer son pouvoir de police, nous supposons donc qu'il l'a exercé en toute liberté.

Conformément à la littérature traditionnelle, la ressource est représentée de la façon la plus simple possible : l'aquifère est modélisé comme une « piscine » (haute conductivité hydraulique). Afin de représenter le phénomène d'intrusion d'eau de mer, nous avons incorporé la notion de qualité des eaux de la nappe et de spatialisation de la ressource. Nous avons également discuté la façon de prendre en compte le phénomène de pollution des eaux des nappes profondes.

Le *laissez faire* conduit, dans ces cas, à une exploitation inefficace de la ressource du fait de la présence d'externalités statiques et dynamiques. Les externalités peuvent être transmises par le coût de pompage ou par la qualité des eaux. Les externalités de coût, statiques et dynamiques, opèrent de la manière suivante : les prélèvements réduisent le niveau de la nappe augmentant ainsi le coût d'extraction de l'eau, dont un premier effet est perceptible au cours de la même période (externalité statique). A la période suivante, le niveau de la nappe s'homogénéise dans toute la surface de l'aquifère (le stock a diminué ou a augmenté moins que ce qu'il aurait dû sans prélèvement) affectant uniformément tous les forages (externalité dynamique), et ceci jusqu'à la fin de l'horizon temporel.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les externalités de qualité, uniquement dynamiques, opèrent de manière identique dans notre représentation, pour le phénomène d'intrusion d'eau de mer que pour le phénomène de pollution de la nappe profonde par les eaux de la nappe superficielle. Nous présentons donc, le cas de l'intrusion d'eau de mer : si les prélèvements réduisent le niveau de la nappe au delà d'une limite donnée, la qualité de l'eau commence à ce dégrader progressivement à cause de l'intrusion d'eau de mer. Cette dégradation peut atteindre différents niveaux selon la localisation des forages ; les forages les plus près de la ligne côtière sont davantage affectés.

On suppose que le régulateur connaît les fonctions de profit des préleveurs qui sont les seuls agents considérés. Le bien-être social à chaque période est dès lors défini comme la somme des profits actualisés des préleveurs sur l'horizon temporel restant. En cas de non observabilité des prélèvements individuels, nous avons présenté trois instruments incitatifs permettant d'arriver à la solution de premier rang pour des populations homogènes : à savoir, la taxe pigouvienne, la taxe ambiante et un instrument mixte combinant les deux premiers.

A notre connaissance le cas d'une population composée d'agents ayant des préférences pour le présent différentes n'a pas été exploré auparavant. Les différences pouvant exister quant à l'efficacité de l'exploitation selon les valeurs du facteur d'actualisation justifient une telle approche. De plus, si l'on considère que la préférence pour le présent est endogène (par exemple si elle est déterminée par l'ensemble des choix d'un individu), la pertinence empirique d'un tel cas légitime son étude. En effet, un préleveur ayant accès uniquement à l'eau souterraine peut être plus attentif au sort futur de la ressource, tandis qu'un préleveur pouvant satisfaire ses besoins également à partir des ressources alternatives ne s'inquiéterait pas[28]. A l'aide des simulations nous avons montré qu'une population mixte composée de préleveurs myopes (avec une préférence pour le présent infinie) et rationnels (avec une préférence pour le présent finie) conduit à une exploitation moins efficace par rapport à une population composée uniquement de préleveurs rationnels. Une intervention publique est donc plus fortement recommandée. Pour qu'elle soit efficace, le régulateur doit pouvoir identifier le type de chaque préleveur (myope ou rationnel). Si l'identification est trop coûteuse, un régulateur ignorant pourrait seulement appliquer des instruments indépendants du type de l'agent. Nous avons montré comment modifier les instruments à taux uniforme

[28] Le cas inverse est également possible, notamment si la ressource n'est pas menacé dans le court terme : le préleveur ayant accès uniquement à l'eau souterraine ne voudrait pas voir des politiques de gestion limiter sa jouissance actuelle de cette ressource, et le contraire pour l'individu ayant le choix parmi plusieurs ressources en eau.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

pour qu'ils soient de premier rang (Propositions 2 et 3). Il a été également montré que le taux myope (taux de premier rang des instruments pour une population d'agents myopes) est plus efficient qu'un taux rationnel (Corollaires 2.1, 2.2 et 2.3). En fixant le taux à un niveau suffisamment élevé pour inciter les agents myopes à suivre la trajectoire optimale, la taxe ambiante est, de premier rang (Proposition 3). Dans le cas de la taxe pigouvienne et de l'instrument mixte, il faut allouer une subvention égale au montant de la taxe aux préleveurs ayant extrait au maximum le volume de premier rang (Proposition 2 et Corollaire 2.1).

A partir d'un cadre simple, nous montrons comment l'arbitrage inhérents au choix de l'instrument, contraint le régulateur vers une situation de second rang. Le régulateur doit choisir parmi les trois instruments cités précédemment avec l'objectif de maximiser le bien-être sous contrainte budgétaire et d'acceptabilité sociale. Toutes les actions du régulateur sont coûteuses : la modification des paramètres des instruments (i.e. les taux des taxes et subventions), le contrôle *in situ* des préleveurs et l'observation de l'état de la ressource. Le régulateur doit donc faire des arbitrages : s'il décide d'investir dans une technologie d'audit, il peut instaurer la taxe pigouvienne ou l'instrument mixte, sinon, la taxe ambiante est sa seule option. Il doit également décider de la fréquence de modification des taux (les instruments optimaux exigent que le taux soit modifié toutes les périodes). Le Tableau 2.2 récapitule les différentes configurations de coût analysées et le choix d'instrument optimal qui en résulte de ce cadre simple. En supposant que le budget du régulateur ne lui permette aucune modification, les conditions pour la solution de premier rang sont données dans la Proposition 4 : le taux doit être suffisamment élevé et une subvention doit être accordée aux individus qui prélèvent moins que le volume optimal. Mais des taux excessivement élevés peuvent ne pas être acceptables ou les profits sous la solution de premier rang peuvent ne pas respecter la contrainte d'acceptabilité dans toutes les périodes. Une trajectoire cible de second rang doit être alors proposée.

Ainsi, un régulateur contraint par un budget de fonctionnement ou par des normes d'acceptabilité sociales doit arbitrer le choix et la calibration des politiques d'intervention. Et il peut alors être optimal d'instaurer des instruments de second rang.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 3

Instruments fixes ou flexibles ? Une étude expérimentale sur l'efficacité et l'efficience des instruments économiques dans la régulation de l'exploitation de l'eau souterraine

3.1 Introduction

Un aquifère côtier est une ressource en propriété commune (CPR) dont l'exploitation produit des externalités négatives dynamiques. En caractérisant l'aquifère à chaque période par un stock limité, les externalités dynamiques peuvent prendre différentes formes. Les prélèvements qui excédent la recharge du stock, réduisent le niveau de l'aquifère rendant l'extraction plus coûteuse dans les périodes futures (externalité par le coût) ; également, les diminutions du stock pourraient générer une détérioration progressive de la qualité des eaux de l'aquifère côtier comme conséquence de l'intrusion d'eau de mer ou par la mise en relation avec d'autres nappes (externalité par la qualité).

Les CPRs sont des biens caractérisés par le non exclusion et la rivalité dans la consommation, elles sont donc à cheval entre les biens publics purs et les biens privés purs. En effet, l'exclusion des préleveurs d'eau souterraine est difficilement réalisable en raison, d'une part par l'asymétrie d'information générée par le coût excessif de l'identification de chaque point d'accès à la ressource (i.e. sources, forages) et, d'un autre part par l'inexistence d'une technologie permettant d'empêcher la réalisation des forages et le prélèvement d'eau. La rivalité dans la consommation d'une CPR permet de comprendre comment la « tragédie des communs » peut avoir lieu (Hardin, 1968). Des études de terrain et des tests en laboratoire indiquent qu'en absence de règles d'exploitation précises et respectées par tous, la ressource finira par être détruite (Clark, 1974 ; Larson and Bromley, 1990 ; E. Ostrom et al., 1994 ; Herr et al., 1997 ; Kopelman et al., 2002). La dépendance temporelle dans l'appropriation de la ressource ne fait qu'aggraver la dissipation des rentes liées à l'exploitation du fait du comportement myope des agents (Herr et al., 1997). D'où l'intérêt d'une intervention publique pour gérer la ressource commune. Néanmoins, cette présomption théorique a été mise en cause par une série de travaux de recherche qui constatent qu'une communauté

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

exploitant une CPR peut éviter la destruction de la ressource sans l'intervention d'une autorité extérieure (E. Ostrom, 1990 ; E. Ostrom et al., 1994 ; Ostrom et Gardner, 1993 ; Cardenas, 2003). Des expériences, en laboratoire et sur le terrain, ont permis de mettre en évidence que plus les communautés sont petites et leurs membres homogènes (quant à leurs intérêts individuels), plus il est facile de trouver une solution à travers des accords négociés pour empêcher la destruction de la ressource. L'égalité dans la distribution de la richesse, dans les moyens d'exploitation et dans la répartition des revenus de l'activité, favorise la construction de relations de confiance entre les individus, permettant ainsi la mise en place de normes de conduite et de systèmes de police effectifs sans intervention d'une autorité extérieure. Par contre, quand la communauté est très grande et les individus fortement hétérogènes, ce type de solution "non-interventionniste" n'est efficace que dans des situations très particulières (E. Ostrom, 1992). L'intervention d'un agent extérieur, le régulateur, est alors nécessaire pour établir des règles d'exploitation de la ressource et pour contrôler leur application.

Supposons qu'il existe un régulateur bienveillant qui doit assurer une exploitation optimale de la CPR à l'aide d'instruments de gestion. Par analogie au système des prix, les économistes ont traditionnellement préconisé des taxes comme l'instrument le mieux adapté pour traiter avec les externalités environnementales et la gestion des ressources naturelles renouvelables (Baumol et Oates, 1988). Contrairement aux instruments basés sur les quantités[1] et aux régulations classiques non incitatives, les taxes unitaires sont vues comme particulièrement avantageuses par leur flexibilité et leur efficacité statique et dynamique (Bohm et Russell, 1985). Néanmoins, dans la pratique, elles sont rarement considérées, notamment à cause de l'incertitude sur leur efficacité. A l'origine de cette incertitude se trouvent : (i) les difficultés techniques à la mise en place d'une taxe unitaire efficace et, (ii) le fait que son efficacité ex-post ne soit pas assurée, le comportement des agents pouvant ne pas être celui attendu. Pour qu'une taxe unitaire soit efficace dans la gestion de l'exploitation d'un CPR, le régulateur doit pouvoir observer les prélèvements individuels des agents. Si cette information n'est pas disponible (prélèvements « diffus »), la taxe unitaire[2] sera généralement inefficace du fait du risque moral associé. Par contre, si le régulateur est en mesure d'évaluer l'état de la ressource à différents pas de temps, les instruments basés sur une information sur l'état de

[1] Une vaste recherche s'est développée autour des permis négociables qui permettent justement la reproduction d'un marché sous certaines conditions. Néanmoins, le bon fonctionnement d'une telle institution demande une certaine culture de marché de la part des agents et du régulateur. Nous n'étudions pas les permis négociables car, dans le cas empirique qui nous motive, nous croyons que ce type d'intervention n'est pas envisageable dans le court terme.

[2] Ainsi que des instruments basés sur les quantités tels que les quotas.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'environnement (taxe ambiante), développés dans la littérature sur la régulation de la pollution diffuse, sont alors applicables et efficaces (Segerson, 1988 ; Xepapadeas, 1991, 1992, 1995 ; Cabe and Herrigues, 1992 ; Hansen, 1997 ; Horan et al., 1998).

L'impossibilité du régulateur d'observer les prélèvements individuels résulte d'une incapacité technologique d'auditer les actions des agents et/ou du coût exorbitant de cette technologie (Millock et al., 2002). Or, si la mise en place de la technologie d'audit est plus coûteuse que celle nécessaire pour observer l'état de la ressource, les instruments basés sur les prélèvements individuels, tels que la taxe pigouvienne, peuvent s'avérer préférables par le régulateur qui cherche à atteindre l'optimum au moindre coût. Mais l'efficacité des instruments incitatifs reste incertaine, en raison de la difficulté de prédire le comportement des agents. L'économie expérimentale offre un cadre pour l'évaluation de l'efficacité des instruments incitatifs avant tout essai pilote sur le terrain, évitant ainsi d'éventuelles pertes de bien-être et des coûts politiques. Dans ce chapitre, nous comparons expérimentalement l'efficacité de divers systèmes de taxation destinés à corriger les externalités dynamiques.

Notre travail s'inscrit dans la lignée du papier expérimental de Herr et al. (1997) qui compare l'efficacité de l'exploitation d'une CPR dans un cadre statique et dynamique. Nous reproduisons le traitement avec externalités dynamiques du protocole d'expérience de Herr et al. (1997) en introduisant trois modifications : (i) la ressource en propriété commune est renouvelable, (ii) nous considérons des externalités dynamiques indépendamment des externalités statiques et (iii) nous évaluons des instruments incitatifs pour corriger l'inefficacité de l'exploitation. Le travail de Herr et al. (1997) a mis en évidence l'inefficience de l'appropriation des CPRs soumises à une dynamique par rapport au cas statique. Mais, dans leur étude expérimentale, ils ont considéré une ressource non renouvelable, ce qui est contraignant car : (i) d'un point de vue empirique, la plupart des ressources naturelles en propriété commune sont renouvelables, (ii) d'un point de vue technique, les prédictions des comportements théoriques évalués ne sont alors pas clairement différentiables. La considération d'un taux de renouvellement incite les agents prévoyants à prendre en compte la disponibilité future accrue de la ressource encourageant la patience, ce qui marque une nette différence avec les agents myopes et ce qui permet ainsi de mieux classifier le comportement observé dans le laboratoire. Le protocole de Herr et al. (1997) considère également que l'appropriation du CPR temporellement dépendante génère à la fois des externalités statiques et dynamiques. Dans le cas de l'eau souterraine, les externalités statiques (effets instantanés)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ne sont pas forcément perceptibles : cela dépend des paramètres hydrogéologiques de l'aquifère. D'où l'intérêt d'étudier de façon séparée l'appropriation d'une CPR qui ne génère que des externalités dynamiques et le cas où les externalités statiques et dynamiques coexistent.

La dernière extension que nous avons introduit –les politiques correctives- peut être considérée également comme une continuation du travail de comparaison d'instruments 'collectifs' (taxe ambiante) versus 'individuels' (taxe pigouvienne) initié par Nalbantian et Schoter (1997) pour étudier les incitations à fournir des efforts au sein des groupes. Lorsque les décisions des agents sont interdépendantes dans le temps, les instruments correctifs doivent être flexibles afin de refléter, à chaque moment du temps, la valeur des externalités et induire ainsi la trajectoire de premier rang. Les instruments à paramètres flexibles sont temporellement cohérents car ils introduisent les incitations correctes pour rester sur le sentier de premier rang à chaque période. Néanmoins, si des contraintes institutionnelles empêchent le régulateur de modifier périodiquement les taux des taxes ou de les fixer au niveau de premier rang, des instruments à paramètres fixes et/ou non optimaux peuvent être envisagés. A partir des expériences en laboratoire, nous allons comparer l'efficacité et l'efficience relative des instruments décrits dans le Chapitre 2 : nous comparons trois instruments, tout d'abord, dans leur version optimale (premier rang) et temporellement cohérente, puis, dans un second temps, leur version non optimale et temporellement incohérente. Les trois instruments sont : (i) la taxe pigouvienne avec contrôle aléatoire des déclarations, (ii) la taxe ambiante, et (iii) un instrument mixte proposé par Kritikos (2004), qui combine les deux précédents.

Comme cela a été expliqué dans le Chapitre 2, dans un cadre dynamique à horizon fini, les trajectoires de prélèvement peuvent résulter des stratégies à boucle fermée ou ouverte ; la différence entre ces deux stratégies réside dans la durée de l'engagement. Nous considérons trois types de comportements théoriques, chacun résultant dans des trajectoires de prélèvement différentes : (*i*) le comportement rationnel, (*ii*) le comportement myope et (*iii*) le comportement optimum. Les comportements rationnel et myope supposent des préleveurs avec une rationalité parfaite, capables de prendre en compte l'impact de leurs décisions actuelles sur leurs profits futurs mais se différencient quant à leur préférence pour le présent : ils accordent des valeurs opposées au taux d'actualisation. Ainsi, les préleveurs myopes maximisent individuellement leur profit courant, les conséquences de leurs décisions actuelles sur le stock de la ressource dans les périodes futures n'étant pas pris en compte. Les

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

préleveurs prévoyants ou rationnels, quant à eux, maximisent la somme des profits actualisés jusqu'à la fin de l'horizon d'optimisation (période *T*). Ces préleveurs rationnels se différencient des préleveurs « optimaux » par le fait qu'ils prennent uniquement en compte dans leur décision de prélèvement les conséquences sur leurs propres profits futurs. Le comportement optimum suppose, à l'inverse, que les préleveurs prennent leurs décisions en vue de maximiser le bien-être collectif, ce dernier étant défini comme la somme, pour toutes les périodes, des profits actualisés de tous les préleveurs. La trajectoire résultant de ce dernier comportement coïncide avec la décision d'un planificateur bienveillant ayant pour objectif la maximisation du bien-être collectif. Dans une situation de laissez-faire, les feedbacks optimaux des trois stratégies tendent vers la même fonction du stock au fur et à mesure que la fin de l'horizon d'optimisation approche : à la période finale *T*, les trois stratégies prédisent les mêmes prélèvements. Donc, « l'intensité du dilemme social » (IDS), selon la définition de Willinger et Ziegelmeyer (2001), diminue au fur et à mesure que l'horizon se rapproche de *T*. Ainsi, plus l'horizon temporel est éloigné, plus les instruments de premier rang seront contraignants. La variation de l'IDS ne devrait pas avoir d'impact significatif dans une situation laissez-faire car des études expérimentales ont montré qu'un « framing négatif » dans les dilemmes sociaux favorise comme solution l'équilibre de Nash (Willinger et Ziegelmeyer, 1996 ; Suleiman et Rapaport, 1992). Néanmoins, la performance des instruments pourrait être affectée car des instruments fortement contraignants encourageraient les agents à les contourner.

La taxe pigouvienne et l'instrument mixte consistent en une taxe unitaire dont la base correspond aux prélèvements déclarés par les agents. Dans la version optimale et temporellement cohérente de la taxe, le taux est uniforme et flexible, et dépend du stock disponible et des périodes restantes jusqu'à la fin de l'horizon temporel. Dans sa version temporellement incohérente, le taux de la taxe est fixe. Mais si les prélèvements déclarés sont inférieurs à un seuil fixe prédéfini pour chaque période, le taux de la taxe est nul. Ce seuil est fixé au niveau des prélèvements de premier rang. En conséquence, même si le taux de la taxe est fixe, s'il est suffisamment élevé, l'instrument est de premier rang (*cf.* Chapitre 2) ; dans le cas contraire, il n'est pas optimal.

Pour garder leur puissance incitative intacte, les deux instruments nécessitent l'existence d'un mécanisme permettant d'assurer l'exactitude des déclarations de prélèvement. C'est dans ce mécanisme que réside la différence entre la taxe pigouvienne et l'instrument mixte. Dans le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

premier, la probabilité d'audit est constante et égal à la probabilité d'être pénalisé : en cas de fraude constatée, le préleveur doit s'acquitter de sa dette et d'une pénalité forfaitaire suffisamment élevée pour décourager la fraude des agents neutres vis-à-vis du risque. Dans le second, la probabilité d'audit est aussi constante, mais la probabilité d'être pénalisé augmente très fortement, en comparaison avec la taxe pigouvienne : le régulateur estime le montant total de la fraude par l'observation de l'état de la ressource et impose une pénalité collective proportionnelle à la fraude totale. Donc, dans le cas de l'instrument mixte, les fraudeurs sont pénalisés avec certitude, le montant de la pénalité dépendant de la gravité de la faute du groupe. En cas de fraude constatée lors des contrôles individuels, le fraudeur doit s'acquitter de sa dette en plus de la pénalité collective ; or, s'il n'a pas eu de fraude, le préleveur est libéré du paiement de la pénalité collective.

D'après la théorie standard sur le respect du paiement des taxes sur le revenu, fondée sur le travail d'Allingham et Sandmo (1972), les déclarations augmentent avec la probabilité de contrôle ou avec le montant de la pénalité. D'un autre côté, l'impact du taux de la taxe et du profit avant taxes sur les déclarations dépend théoriquement de l'attitude vis-à-vis du risque de chaque individu. Par rapport à l'impact du taux de la taxe, Yitzhaki (1974) a montré que si la pénalité est proportionnelle au montant de l'évasion, le modèle prédit que le respect augmente avec le taux de la taxe. Par des tests en laboratoire, Alm et al. (1992) ont observé qu'effectivement les déclarations augmentent avec la probabilité d'audit, mais ils ont trouvé un faible impact de la pénalité. Ils ont également mis en évidence l'effet négatif du taux de la taxe, ce qui contredit le modèle de base (Yitzhaki, 1974), ainsi que l'effet positif du revenu brut sur les déclarations. Ainsi, nous attendons que le taux de respect, relation entre les prélèvements déclarés et ceux réellement prélevés, soit supérieur sous l'instrument mixte car la probabilité d'être pénalisé est au maximum. Les effets du taux de la taxe et du revenu brut sont par contre plus difficiles à anticiper, ces deux facteurs étant, dans notre modèle théorique, négativement corrélés. Plus précisément, le taux des taxes des instruments flexibles (de premier rang) changent pour internaliser correctement les externalités : plus grande est l'IDS, plus haute est l'externalité (en termes absolus) et donc, plus haut doit être le taux de la taxe, et enfin moindre sera le revenu brut car l'agent prélève moins dans ce cas (s'il réagit correctement à l'incitation introduite). Les extensions du modèle de base d'Alligham et Sandmo qui incorporent la décision de travailler témoignent de la complexité de la relation des variables fiscales avec la fraude lorsque la base de la taxe - le revenu dans le cas de la fraude fiscale et les prélèvements dans le nôtre cas - est une variable endogène (Pencavel,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1979 ; Cowell, 1981 ; Sandmo, 1981). Il n'est pas possible d'identifier sans ambiguïté l'impact du taux de la taxe sur les déclarations: d'un côté un taux de la taxe plus élevé induit un agent avec aversion au risque décroissante à déclarer plus, et d'un autre côté, le taux plus élevé réduit le revenu (car moindres prélèvements) ce qui l'induit à déclarer moins (Pencavel, 1979). Dans notre cas particulier il y a un troisième facteur qui rentre dans l'équation, l'IDS.

Contrairement aux instruments basés sur les décisions individuelles, la taxe ambiante ne nécessite pas de déclarations de prélèvement, un indicateur de l'état de la ressource étant la base du mécanisme (Segerson, 1988). Si le régulateur observe que l'état de la ressource n'atteint pas l'objectif défini, une pénalité collective égale aux dommages causés est imposée. Les travaux de Spraggon (2002), Alpizar et al. (2004) et Cochard et al. (2005) ont évalué et comparé expérimentalement la taxe ambiante à d'autres instruments visant à résoudre le dilemme social sans besoin d'observer les actions individuelles. Dans le cadre d'un jeu répété un nombre fini des fois, ils ont montré qu'en général c'est un instrument efficace pour ramener les décisions individuelles vers l'optimum social. Par contre, lorsque les agents sont hétérogènes par rapport à leur capacité d'extraction (ou pollution), la taxe ambiante produit des inefficiences et des inégalités substantielles, tout en restant un instrument efficace (Spraggon, 2004). Une taxe ambiante conçue pour corriger des externalités dynamiques n'exige pas uniquement une variation du taux de la taxe pour refléter ces externalités, mais aussi du prélèvement cible. La version temporellement incohérente de la taxe ambiante, où les cibles sont fixes, pourrait être un instrument extrêmement inefficace et inefficient si les cibles ne sont pas respectées dès la première période. En effet, suite à des déviations prématurées, les cibles des périodes futures peuvent devenir inatteignables (des prélèvements négatifs ne sont pas possibles) avec des conséquences tragiques sur l'efficacité de l'exploitation.

La section 2 détaille le design de l'expérience. Les traitements sont présentés en précisant les valeurs des paramètres et les prédictions. Le protocole et les détails de la mise en place des tests dans le laboratoire sont ensuite exposés. La section 3 présente les résultats. Pour les traitements où les prédictions de chaque stratégie sont différentes (traitements '*laissez faire*' et les instruments non optimaux), l'analyse des résultats consiste d'abord à identifier quel est le comportement théorique qui s'ajuste le mieux aux données observées en laboratoire. Nous regardons ensuite la performance de chaque instrument pour approcher la trajectoire optimale de prélèvement. Les traitements concernant les instruments flexibles sont analysés en premier. Puis la performance des instruments fixes est évaluée. Ultérieurement, nous étudions

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'efficacité des mécanismes testés (audit aléatoire avec pénalité forfaitaire versus la pénalité collective de Kritikos) pour contrôler les fausses déclarations. Finalement, l'ensemble des instruments est comparé et hiérarchisé.

3.2 Le design expérimental

L'expérience a été conçue pour évaluer, dans un cadre dynamique, l'efficacité relative des politiques incitatives pour la régulation des prélèvements dans une ressource commune renouvelable. Nous réalisons plusieurs traitements pour comparer les politiques décrites dans le Chapitre 2 (*cf.* Tableau 3.1). D'abord, le traitement '*laissez faire'* (LF) nous permet d'identifier le comportement théorique (rationnel, myope et optimum) qui s'ajuste le mieux aux observations dans une situation de non intervention. Ainsi, pour minimiser l'inefficacité des politiques, à taux uniforme, les taux sont choisis en fonction du comportement observé dans le traitement LF. Le traitement LF comprend deux sous traitements, LFz et LFz0, selon que l'on considère ou pas (respectivement) une externalité statique. Tous les traitements avec des politiques sont conduits sans externalité statique.

DESIGN EXPERIMENTAL		
Traitement de base		
Laissez Faire sans externalité statique (LFz0)		Laissez Faire avec externalité statique (LFz)
Traitements de politique		
	Degré d'optimalité	
Cohérence Temporelle	Premier Rang	Non optimaux
Cohérents	- Taxe pigouvienne flexible et uniforme (TPFU) - Taxe Ambiante flexible et uniforme (TAFU) - Instrument mixte flexible et uniforme (IMFU)	
Incohérents	- Taxe pigouvienne fixe et uniforme (TPNFUO)	- Taxe pigouvienne fixe et uniforme (TPNFU) - Taxe Ambiante fixe et uniforme (TANFU) - Instrument mixte fixe et uniforme avec subvention (IMNFU)

Tableau 3.1 : Traitements réalisés pour évaluer et comparer les instruments de régulation des prélèvements

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Le protocole a été conçu pour reproduire les conditions du modèle décrit dans le Chapitre 2. Tous les traitements consistent en un jeu dynamique de 10 périodes. Les sujets doivent, à chaque période, prélever des unités d'un compte commun. Ainsi, à partir des valeurs des paramètres exposées dans le Tableau 3.2, les participants gagnent des points expérimentaux en fonction de leur prélèvement individuel et des unités disponibles dans le compte au début de la période. Ensuite, selon les valeurs des paramètres dans chaque traitement, des gains nets de « taxes » sont calculés (*cf.* Tableau 3.3 pour les instruments fixes et le Tableau 3.4 pour les instruments à taux flexible).

Quelques simplifications ont été introduites pour réduire la complexité de l'environnement de décision. Les revenus et les coûts d'extraction ne sont pas distingués, seul le profit net est présenté. Dans les traitements avec instruments, la pénalité individuelle et les taux des taxes ont été simplifiés pour faciliter le déroulement pratique des séances.

Nous avons modifié la fonction de pénalité individuelle pour qu'elle dépende uniquement du stock disponible dans le compte au début de la période. Plus précisément, nous avons remplacé dans l'équation 2.21 les prélèvements de l'individu i (y_i^t) par les prélèvements myopes $\left(y_m^t\left(S^t\right)\right)$ (équation 2.9) et les prélèvements déclarés ($\hat{y}_i^t$) par zéro. Ainsi, à chaque période, la pénalité est forfaitaire, donc indépendante des prélèvements individuels (réels et déclarés). Les traitements concernés sont : TPNFU, TPNFO et TPFU.

Dans les traitements avec instruments à taux flexible (TPFU, TAFU et IMFU), le taux optimal de la taxe pour une population homogène myope (équation 2.18) est représenté par un polynôme sur les variables suivantes : la période (t) et le stock disponible au début de la période $\left(S^t\right)$. Pour réaliser cette linéarisation nous avons remplacé dans l'équation 2.15 (page 65 du Chapitre 2) les prélèvements individuels (y_i^t) par les prélèvements myopes (équation 2.9, page 51 du Chapitre 2) et nous avons régressé les coefficients de la fonction résultante par rapport au temps[3]. Cela nous a permis d'écrire le taux de la taxe flexible comme il est indiqué dans le Tableau 3.4. Ce taux est plus facilement compréhensible par les participants, exige relativement peu de calcul et est facilement programmable en z-Tree[4].

[3] Dans de l'Annexe 5 (page 307) sont exposés les valeurs de coefficients de cette fonction ainsi que les résultats des régressions linéaires effectuées.
[4] Logiciel utilisé pour mettre en place les expériences (Fischbacher, 2007).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

	Tous les Traitements
Taille du groupe (*N*)	5
Fonction de revenu	$u\left(y_i^t\right)=\left(a+\alpha\cdot\Psi_i^t\right)\cdot y_i^t-b\cdot\left(y_i^t\right)^2$ $a=5.3$ $b=0.09$ $\alpha=0$
Fonction de coût	$AC^t=p+\sum_{\forall j} z_{i,j}\cdot y_j^t-f\cdot S^t$ $p=7.55$ $f=0.01$ $z=0$ (pour traitement LFz0) $z=0.05$ (pour traitement LFz)
Evolution du compte	$S^{t+1}=S^t-\sum_{\forall i} y_i^t+r$ $S^1=500$ $r=30$
Intervalle de extraction	$[0,50]$

Tableau 3.2 : Valeurs des paramètres communs à tous les traitements

Instrument	Taxe à taux fixe et uniforme (TPNFU)	Instrument mixte à taux fixe et uniforme (IMNFU)	Taxe ambiante à taux et cibles fixes et uniformes (TANFU)
Taux de la taxe	$\bar{\tau}=1$	$\bar{\tau}=1$	$\bar{\kappa}=0.2$
Probabilité d'audit	$pr=0{,}2$	$pr=0{,}2$	$pr=0{,}2$
Pénalité individuelle	$\Omega_i^t=\frac{U\left(S^t,y_m^t\left(S^t\right)\right)-pr\cdot\bar{\tau}\cdot y_m^t\left(S^t\right)}{pr}$	$\bar{\tau}\times\left(y_i^t-\hat{y}_i^t\right)$	X
Pénalité collective	x	$\bar{\Gamma}_i^t=\bar{\tau}\times max\left[0,Y^t-\hat{Y}^t\right]$	$\bar{\Gamma}_i^t=\bar{\kappa}\times\max\left[S^t+Y^t-S^{t*},0\right]$
Seuils (*)	Prélèvement optimum inconditionnel	Prélèvement optimum inconditionnel	Trajectoire optimale inconditionnelle du stock

(*) Pour les traitements TPNFU et IMNF les seuils correspondent aux prélèvements au dessus lesquels le montant de la taxe n'est plus subventionnée. Pour le traitement TAFU les seuils correspondent au stock cible pour la fin de chaque période.

Tableau 3.3 : Valeurs des paramètres pour les traitements concernant les instruments temporellement incohérents non optimaux

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Instrument	Taxe à taux fixe et uniforme optimale (TPNFUO)	Taxe à taux flexible et uniforme (TPFU)	Instrument mixte à taux flexible et uniforme (IMFU)	Taxe ambiante à taux et cibles flexibles et uniformes (TAFU)
Taux de la taxe	$\bar{\tau} = 2.8$	$\tau^t = \kappa^t = S^t \times (0{,}0098 - t \times 0{,}00076603) + t \times 0{,}004 - 0{,}6342$		
Probabilité d'audit	$Pr = 0{,}2$	$pr = 0{,}2$	$pr = 0{,}2$	X
Pénalité individuelle	$\Omega_i^t = \frac{U(S^t, y_m^t(S^t)) - pr \cdot \bar{\tau} \cdot y_m^t(S^t)}{pr}$		$\tau^t \times (y_i^t - \hat{y}_i^t)$	X
Pénalité collective	x	x	$\Gamma_i^t = \tau^t \times \max[0, Y^t - \hat{Y}^t]$	$\Gamma_i^t = \kappa^t \times \max[S^t + Y^t - S^{t*}(S^t), 0]$
Seuils	Prélèvement inconditionnel optimum	x	X	Trajectoire optimale conditionnelle du stock

Tableau 3.4 : Valeurs des paramètres pour les traitements avec instruments de premier rang (temporellement cohérents et incohérents)

3.2.1 Les prédictions théoriques

Les prédictions théoriques sont les trajectoires issues des lois de commande optimales pour chaque type de comportement théorique (rationnel, myope et optimum). Implicitement elles supposent l'absence de déviations : tous les membres du groupe d'exploitants suivent à chaque période ces lois de commande optimales. Ce sont donc des « prédictions inconditionnelles ». Si des déviations ont lieu, les lois de commande donneront de nouvelles prédictions s'écartant de la trajectoire inconditionnelle ; on les appellera les « prédictions conditionnelles ». Dans tout le chapitre, nous utiliserons le terme 'prédictions' indistinctement pour faire référence aux prédictions inconditionnelles ou conditionnelles. Nous ne marquerons la différence que lorsque cela s'avèrera nécessaire.

Pour présenter les prédictions théoriques, les traitements sont classés en trois groupes : le laissez faire (Tableau 3.1), avec deux traitements (avec et sans externalité statique) ; les instruments temporellement cohérents (Tableau 3.1), avec trois traitements (un pour chaque politique) ; et les instruments temporellement incohérents (Tableau 3.1), avec 4 traitements (un pour chaque traitement plus un pour la taxe pigouvienne avec un taux élevé).

Dans les sous sections qui suivent nous décrirons, dans le cadre de chaque traitement, la forme des trajectoires de prélèvement pour chaque comportement ainsi que l'efficience atteinte par celles-ci. La stratégie optimale étant prise comme base, l'efficience d'une

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

trajectoire de prélèvement (myope ou rationnelle) est définie comme la richesse accumulée jusqu'à la période *T* en pourcentage de l'optimale. Pour le cas des traitements de politique, trois dimensions de l'efficience sont mobilisées, à savoir, l'efficience brute, l'efficience nette des taxes et l'efficience nette des taxes et des pénalités, selon l'on déduit de la richesse accumulée rien, les taxes ou les taxes et les pénalités, respectivement. Tandis que cette première notion, l'efficience brute, indique combien la trajectoire de prélèvement est proche de l'optimale inconditionnelle, les deux dernières notions d'efficience nette donnent une indication sur le coût social des instruments et sa distribution parmi les préleveurs. Les deux notions d'efficience nette pourraient être également utilisées pour évaluer l'acceptabilité des instruments mis en place. En théorie, aucune pénalité n'est prélevée, donc pour l'analyse des prédictions théoriques, nous n'étudions que l'efficience brute et nette des taxes ; l'efficience nette des taxes et pénalités sera mobilisée dans la section des résultats.

3.2.1.1 Laissez faire

Les Figure 3.1 et 3.2 exposent les trajectoires de prélèvement pour chaque stratégie théorique (rationnel, myope et optimum). Chaque prédiction est calculée en supposant que toute la population suit la même stratégie. Dans le traitement LFz0, les prédictions pour chaque comportement sont bien différenciées (Figure 3.1) : tandis que la trajectoire myope est décroissante en raison de l'impatience des agents, la trajectoire rationnelle est plutôt stable. La trajectoire optimum étant croissante, « l'intensité du dilemme social » (IDS), mesurée par la distance euclidienne entre le prélèvement d'une stratégie et l'optimum, est maximale au cours des premières périodes. Ainsi, les stratégies rationnelle et myope parviennent, respectivement, à 74% et 52% d'efficience par rapport à l'optimum (100% d'efficience).

Les prédictions théoriques pour chaque type de comportement ne sont pas clairement différenciées dans le traitement 'laissez faire' avec externalités statiques (LFz). La trajectoire myope est constante et égale à r/N. Les prélèvements rationnel et optimum sont croissants et tendent vers r/N. Les stratégies rationnelle et myope arrivent à 73% et 59% d'efficience par rapport à l'optimum, respectivement. L'introduction d'une externalité statique n'affecte pas l'efficience des stratégies myope et rationnelle, mais la taille du gâteau est divisée par deux.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

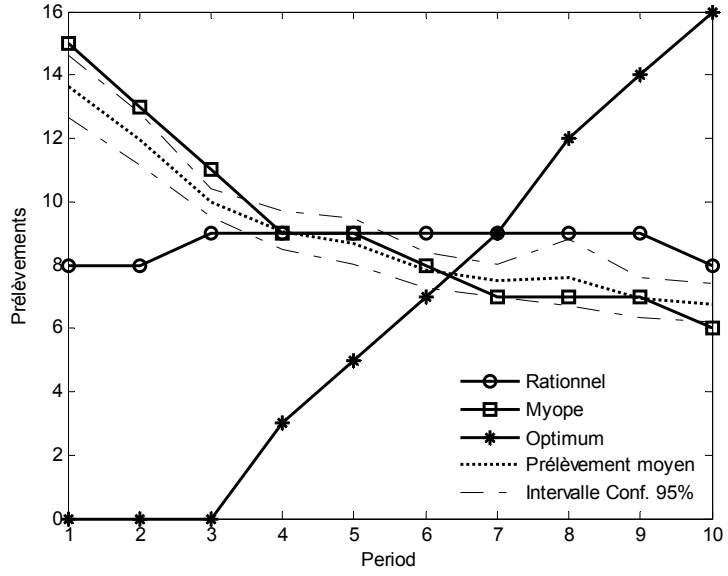


Figure 3.1 : Prédictions théoriques vs prélèvement moyen ; traitement LFz0

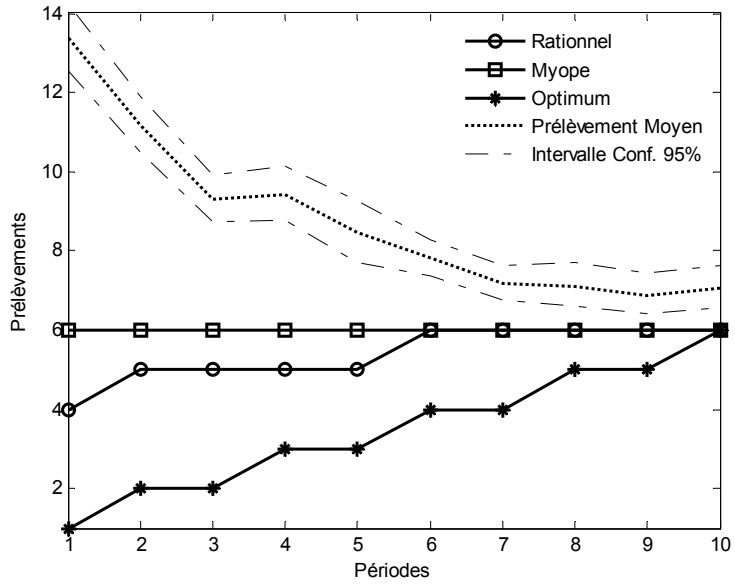


Figure 3.2 : Prédictions théoriques vs prélèvement moyen ; traitement LFz

3.2.1.2 Les instruments flexibles

Les instruments à taux flexible sont tous de premier rang, donc la trajectoire de prélèvement prédite coïncide avec l'optimum[5] (Figure 3.1). Si l'efficience brute est bien de 100%, il y a de grandes différences en terme d'efficience nette des taxes (Tableau 3.5, page 94) : la taxe

[5] Comme conséquence de la transformation opérée sur la taxe optimale, il y a une légère différence avec la trajectoire optimum. Plus précisément, dans les périodes 4, 5, 7, 9 et 10, il y a des différences inférieures à l'unité.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ambiante flexible, en particulier, est la plus efficace en termes nets (avec 100%), aucune taxe n'étant prélevée à l'équilibre ; l'efficience nette est, à contrario, divisée par deux pour la taxe pigouvienne et l'instrument mixte.

			Rationnel	Myope
Traitements - Efficience brute (Efficience nette*)	Laissez faire	LFz0 LFz	74% 73,%	52% 59%
	Instruments temporellement incohérents	TPNFU	92%	79%
		IMNFU	(83%)	(63%)
		TANFU	92% (54%)	82% (-20%)
		TPNFUO	100% (100%)	100% (100%)
	Instruments temporellement cohérents	TPFU	100% (53%)	100% (49%)
		IMFU	100% (53%)	100% (49%)
		TAFU	100% (100%)	100% (100%)

*Aucune pénalité n'est prélevée à l'équilibre, donc Efficience nette = Efficience nette des taxes

Tableau 3.5 : Efficience, brute et nette des taxes, des trajectoires de prélèvement pour tous les traitements mis en place

3.2.1.3 Les instruments fixes

Comme il a été montré dans la Proposition 2 (Chapitre 2, page 66), une taxe à taux fixe et uniforme permet d'obtenir la solution de premier rang si : (*i*) le taux est suffisamment élevé ; et (*ii*) elle est combinée à une subvention unitaire supérieure ou égale au taux de la taxe lorsque les prélèvements sont inférieurs ou égaux à ceux de premier rang. Donc, les prédictions théoriques pour les comportements myope et rationnel du traitement TPNFUO coïncident avec la trajectoire optimum (Figure 3.1, page 93). Ils sont 100% efficient brut et net de taxes (Tableau 3.5, page 94), les prélèvements prédits ne dépassant pas les seuils à partir lesquels les subventions sont éliminées (avec ces dernières égales aux montants des taxes).

La Figure3.3 (page 96) présente les prédictions théoriques des comportements myope et rationnel pour les traitements TPNFU et IMNFU. Etant donné le niveau relativement bas du

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

taux de la taxe (*cf.* Tableau 3.3, page 90), les prédictions ne coïncident pas avec l'optimum. Les différences entre les trajectoires sont importantes au cours des trois premières périodes puis s'estompent à partir de la période 4 jusqu'à la période 8 où les deux prédictions coïncident avec la trajectoire optimum. En termes d'efficience brute, les comportements rationnel et myope arrivent à 92% et 79% respectivement. Néanmoins, l'efficience nette des taxes est sensiblement inférieure, 83% pour le rationnel et 63% pour le myope (Tableau 3.5, page 94).

Dans la Figure 3.4 (page 96), les prédictions du traitement TANFU sont exposées ; les deux stratégies montrent des trajectoires croissantes durant la première moitié des dix périodes ainsi que des prélèvements supérieurs à la solution de collusion (sauf pour la première période de la stratégie rationnelle). La solution de collusion correspond aux prélèvements individuels symétriques qui évitent le paiement de la taxe ambiante. La différence entre la solution de collusion et les prédictions indique que la taxe ambiante aggrave le dilemme social, rendant encore moins efficace, en termes nets, les stratégies rationnelle et myope, mais pas suffisamment pour permettre l'émergence de la solution optimale. L'efficience brute est approximativement similaire aux autres instruments non optimaux, 92% et 82% pour le comportement rationnel et myope, respectivement. Par contre, l'efficience nette est la plus petite avec 54% pour le rationnel et -20%, pour le myope (Tableau 3.5, page 94).

3.2.2 Mise en pratique dans le laboratoire

Toutes les séances d'expérimentation ont été conduites dans les locaux de l'Université de Montpellier 1 en utilisant le logiciel z-Tree. Des participants novices, n'ayant jamais participé à des séances d'expérimentation similaires, ont été recrutés à partir de la base d'étudiants du LEEM[6]. Le recrutement a été effectué principalement par courriel ; les participants étaient invités à participer dans un jeu expérimental d'une durée d'une heure et demie à deux heures, et recevraient un paiement dont le niveau dépendait de leurs décision et de celles prises par l'ensemble du groupe pendant le déroulement du jeu (en plus d'un forfait de participation).

[6] Laboratoire d'Economie Expérimentale de Montpellier.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

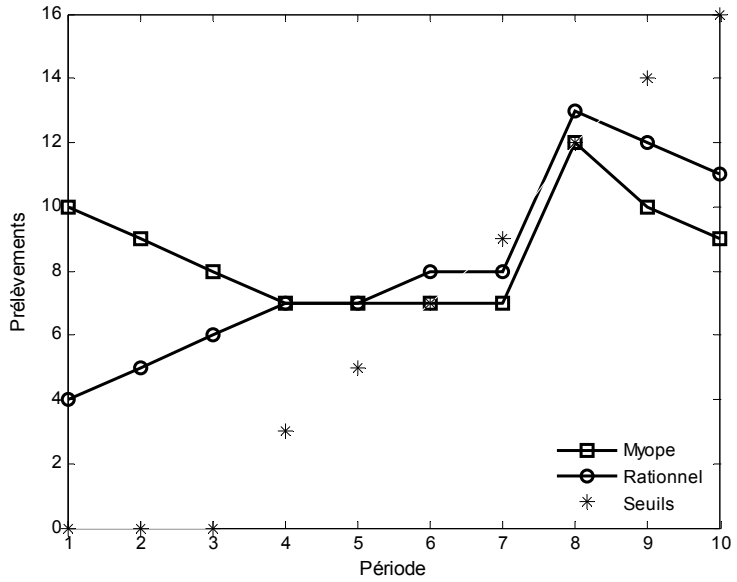


Figure3.3 : Prédictions théoriques des traitements TPNFU et IMNFU

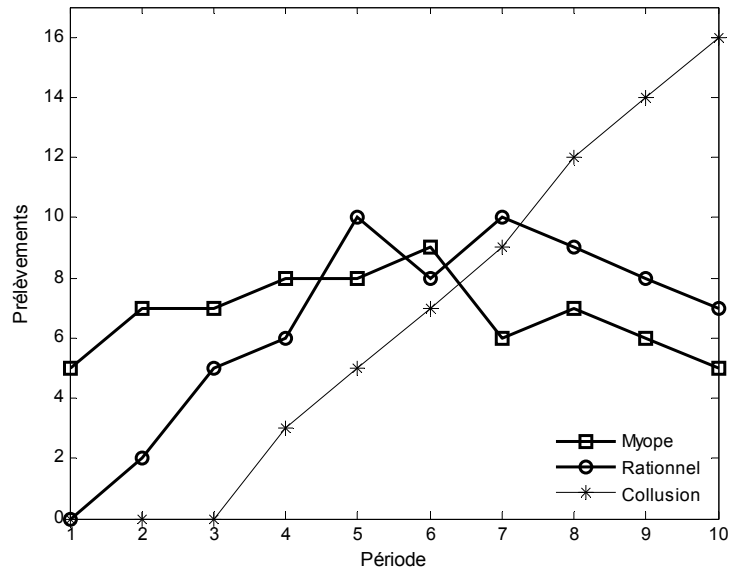


Figure 3.4: Prédictions théoriques du traitement TANFU

Pour garantir l'anonymat, au moins deux groupes ont participé à chaque séance et les sujets étaient distribués aléatoirement dans des boxes séparés (il était interdit de communiquer avec les autres participants et avec l'extérieur). Au début de la séance, les participants devaient lire les instructions[7] sur papier, puis une lecture à haute voix était effectuée. Pour s'assurer de la bonne compréhension des règles du jeu, les sujets devaient ensuite remplir un questionnaire.

[7] Dans l'Annexe 2 se trouvent les instructions de chaque traitement.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A chaque séance, les participants ont répété quatre fois un jeu dynamique comportant dix périodes. Nous appelons les répétitions « série 1, 2, 3 et 4 » (il n'y a pas eu de séries d'entraînement). Les participants ont été assignés à un groupe de 5 personnes, sans connaître l'identité des autres membres. La composition des groupes et le cadre de décision (traitement) restait la même pendant les 4 séries.

3.2.3 Cadre de décision

A chaque période, les individus décident, de façon indépendante et simultanée, du nombre d'unités à prélever. Les prélèvements individuels sont contraints à des valeurs dans l'intervalle $[0,50]$. Ensuite, dans tous les traitements sauf ceux concernant la taxe ambiante et la situation de laissez faire, les prélèvements doivent être déclarés après avoir pris connaissance des gains bruts. Les prélèvements déclarés ne peuvent pas dépasser ceux réellement effectués. Pour faciliter la prise de décision, les individus disposent de deux tableaux : le premier expose les gains bruts pour chaque prélèvement (entier) dans l'intervalle de valeurs autorisées et pour quelques valeurs hypothétiques du stock d'unités disponibles (*cf.* Annexe 2 : Instructions, Tableau des gains). En complément, les individus disposent des formules nécessaires au calcul des gains bruts (*cf.* Annexe 2, Equation A.1). Le second tableau indique les seuils de chaque période (le stock minimum à retrouver en fin de période, le « minimum requis », pour le traitement TANFU ; et les « minimum de paiement »[8] pour les traitements TPNFU, TPNFUO et IMNFU). Dans les traitements concernant la taxe pigouvienne non flexible (TPNFU et TPNFUO), les participants disposent d'un troisième tableau exposant la pénalité forfaitaire pour différentes valeurs du stock disponible et des équations nécessaires au calcul des pénalités (*cf.* Annexe 2). Les gains bruts et nets ainsi que les pénalités sont exprimés en « points expérimentaux » ; le taux de conversion en euros est connaissance commune.

La taille du groupe ainsi que les fonctions de profit, les redevances et les pénalités sont connaissance commune. Au début de chaque période, les participants sont informés des unités restantes dans leur compte et de leur richesse accumulée. Dans les traitements concernant les instruments flexibles (TPFU, IMFU et TAFU), le taux de la taxe est également affiché à

[8] Les « minimum de paiement » correspondent au niveau de prélèvement en dessous lequel le taux de la taxe est nul.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'écran au début de chaque période. En fin de période, les participants sont informés des profits (nets des taxes) qu'ils ont obtenu. Quelques détails supplémentaires sont donnés dans les traitements avec instruments : il est indiqué le montant de la redevance, le fait qu'un contrôle a été réalisé sur l'individu et les montants des pénalités à payer.

Finalement, dans chaque étape de décision, un tableau résumé est disponible en bas de l'écran avec les valeurs pour les périodes passés de : stock disponible dans le compte, taux des redevances, redevance payé, pénalités, et profit.

3.3 Les résultats

Deux séances avec 15 sujets ont été organisées pour chaque traitement (sauf pour une des séances du traitement IMNFU où il n'y a eu que 10 participants). Ce sont ainsi des données sur 54 groupes qui ont été collectées, soit un total de 213 séries[9].

Pour l'ensemble des traitements nous analysons d'abord l'effet de la répétition du jeu : nous définissons l'apprentissage comme le phénomène par lequel les décisions des sujets se rapprochent de celles issues d'une des règles de comportement à force de répéter la décision (même dans des contextes différents). Pour les traitements avec des prédictions différentes pour chaque stratégie (traitements LF, et les instruments non optimaux), l'analyse des résultats consiste d'abord à identifier le comportement théorique qui s'ajuste le mieux aux données relevées dans le laboratoire. Ensuite, nous regardons la performance de chaque instrument pour s'ajuster à la trajectoire de prélèvement optimale. Pour faire ces deux analyses, nous comparons les prélèvements observés avec les prédictions inconditionnelles et conditionnelles à l'aide de la « déviation quadratique moyenne » (DQM) [10] :

(3. 1) $$\sum_t \sum_i \left(y_i^t - y_i^{t^e}\right)^2 \Big/ N$$

[9] Un problème technique au cours d'une des séances du traitement TPNFUO nous a obligé à exclure de l'analyse les données de la série 2. Donc pour trois groupes de ce traitement nous comptons avec des données pour les séries 1, 3 et 4.
[10] Herr et al. (1997) utilisent la même statistique.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

où, y_i^t est le prélèvement de l'individu *i* effectué à la période *t*, et $y_i^{t^e}$ est la prédiction (inconditionnelle ou conditionnelle) pour la période *t*.

Sachant que les prédictions des traitements diffèrent, les DQM ne peuvent pas être utilisées directement pour comparer la performance des instruments pour ajuster la trajectoire de prélèvement optimale. Nous avons donc construit un indicateur d'efficacité qui prend compte des différences de prédiction : l'inverse de la déviation des prélèvements observés par rapport à une trajectoire cible (la trajectoire optimale dans ce cas) est normalisé par la différence entre cette trajectoire cible et la prédiction conditionnelle correspondante. Formellement,

$$\sum_t \sum_i \left(\frac{\left| y^{t^c} - y\left(S^t\right) \right|}{\left| y_i^t - y^{t^c} \right|} \right) \Big/ N \cdot T \tag{3. 2}$$

où, y_i^t est le prélèvement de l'individu *i* effectué à la période *t*, y^{t^c} est le prélèvement à la période *t* de la trajectoire cible (la prédiction optimale inconditionnelle dans notre cas) et $y\left(S^t\right)$ est la prédiction conditionnelle (myope ou rationnelle) pour la période *t*. L'indicateur est égale à l'unité quand le prélèvement est égale à la prédiction, tend vers zéro quand la différence entre le prélèvement et la cible augmente et vers l'infini à fur et à mesure que le prélèvement s'approche de la cible.

Nous analysons d'abord la situation sans intervention, pour déterminer quelle stratégie théorique (rationnelle, myope ou optimum) et quelle type de population (homogène ou mixte) ajuste le mieux les donnés observés. Nous évaluons ensuite la performance des instruments flexibles et fixes. Puis nous étudions l'efficacité des mécanismes pour contrôler la fraude. Finalement, nous comparons l'efficacité des politiques pour ajuster les prélèvements individuels vers une trajectoire cible, et l'efficience pour produire une amélioration du bien-être.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.1 Le laissez faire

Nous commençons par analyser l'effet de la répétition du jeu sur la capacité prédictive des stratégies théoriques.

OBSERVATION 3.1 : De « l'apprentissage » est observé avec la répétition du jeu dans les deux traitements '*laissez faire'* (LFz0 et LFz).

Les DQM des séries 2, 3 et 4 sont significativement inférieures à la MSD inconditionnelle de la série 1. Cependant, la tendance décroissante observée dans les Tableau 3.6 (page 104) n'est pas significative. Nous ne pouvons donc pas affirmer la présence d'apprentissage entre la deuxième et la dernière répétition. En considérant les prédictions conditionnelles, le test ANOVA non paramétrique à deux dimensions (test de Friedman) indique une tendance décroissante significative dans les DQM pour la stratégie myope (valeur-p = 0,0658) mais non significative pour les stratégies rationnelles (valeur-p = 0,2407) et optimum (valeur-p = 0,4936).

A la lumière de cette première observation nous utiliserons les deux dernières séries pour effectuer les analyses que suivent.

OBSERVATION 3.2 : La comparaison des données individuelles aux prédictions pour des populations de préleveurs homogènes, révèle que :

- pour le traitement LFz0, la stratégie Myope est la plus explicative du comportement observé ;
- pour le traitement LFz, aucune des stratégies théoriques n'explique le comportement observé.

La déviation quadratique moyenne (DQM) de la stratégie inconditionnelle optimum est significativement[11] la plus élevée dans toutes les séries (Tableau 3.6, page 104). Par contre, les différences entre les stratégies rationnelle et myope ne sont pas significatives ni au niveau agrégé ni au niveau des séries. Néanmoins, la DQM par rapport à la prédiction conditionnelle

[11] Pour évaluer la significativité statistique des différences dans les DQM, nous avons construit des intervalles de confiance à 95% en utilisant la méthode de bootstrap (Efron et al., 2001). Si les intervalles se superposent, on dit que les différences ne sont pas significatives.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

myope est significativement inférieure à la DQM rationnelle (Tableau 3.8, page 106). Le test de Friedman indique également qu'il y a des différences significatives entre les moyennes des distributions des DQM myope et rationnel (valeur-p = 0,0656). La Figure 3.1 (page 93) montre que le prélèvement moyen (toutes les séries et tous groupes confondus) est proche de la prédiction myope mais significativement inférieur dans les cinq premières périodes (et significativement supérieur à la prédiction rationnelle) ; à partir de la période 6, le prélèvement moyen coïncide avec la prédiction myope et il est significativement inférieur à la rationnelle. La Figure 3.6 (page 109) contraste les prélèvements moyens et les prédictions conditionnelles de chaque comportement théorique par groupe et par série du traitement LFz0. De façon générale, les prélèvements moyens sont significativement similaires à la prédiction conditionnelle myope, mais pas sur l'ensemble de la trajectoire, notamment c'est vers la fin de l'horizon temporel que les deux prédictions se ressemblent. Dans la plupart des groupes, les prélèvements montrent une variance très importante, sauf pour les groupes 2 et 6 qui suivent la stratégie myope rigoureusement et pour les groupes 1 et 5 dans la dernière série.

De la même façon que pour le cas sans externalité statique, dans le traitement LFz, la DQM par rapport à la stratégie inconditionnelle optimale est significativement la plus élevée dans toutes les séries (Tableau 3.7, page 105). Par contre, la différence entre les stratégies rationnelle et myope n'est pas significative ni au niveau agrégé ni au niveau des séries. En comparant les prélèvements moyens avec les prédictions conditionnelles, il est impossible de conclure que la stratégie myope est celle qui s'ajuste le mieux aux données, même si le test de Friedman indique des différences significatives entre les moyennes des distributions des DQM des trois prédictions conditionnelles (valeur-p =0,0009) et aussi entre les prédictions myope et rationnel (valeur-p = 0,0018). Aucune des stratégies théoriques n'explique le comportement observé (Figure 3.7, page 110) : presque toutes les trajectoires de prélèvement sont significativement supérieures aux prédictions conditionnelles dans toutes les périodes. Et les prélèvements de tous les groupes pour l'ensemble des séries montrent une variance très importante mais insuffisante pour rendre non significatif l'écart par rapport aux prédictions.

OBSERVATION 3.3 : La comparaison des prélèvements moyens aux prédictions pour des populations mixtes (préleveurs myopes et rationnels), révèle que :

- pour le traitement LFz0, la prédiction pour une population à 80% de préleveurs myopes est la plus explicative du comportement observé ;

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- pour le traitement LFz, la prédiction pour une population à 40% de préleveurs myopes est la plus explicative du comportement observé.

Dans le Chapitre 4 de cette thèse nous allons classifier le comportement individuel, en attendant et pour pouvoir identifier la proportion d'agents myopes dans la population nous avons comparé les prédictions aux prélèvements moyens (en lieu des individuels). Dans les Tableau 3.10 (page 108) et 3.11 (page 108) sont exposés les DQM des prélèvements moyens par rapport aux prédictions théoriques, pour toutes les populations mixtes possibles d'agents prévoyants et myopes.

A partir du Tableau 3.10, nous observons que quoi qu'il en soit, la moyenne pour toutes les séries ou la moyenne pour la dernière série, il n'est pas possible de discriminer entre une population à 60, 80 ou 100% d'agents myopes pour le traitement LFz0. Contrairement, pour le traitement LFz, la comparaison des prédictions et la moyenne globale discrimine clairement entre les différentes valeurs possibles pour la proportion d'agents myopes car les intervalles bootstrap ne se superposent pas.

OBSERVATION 3.4 : La présence d'externalités statiques n'a pas d'impact significatif sur la trajectoire des prélèvements moyens.

Les trajectoires de prélèvement moyen dans le compte pour les deux traitements LF ne montrent aucune différence significative lors que les quatre séries servent au calcul de la moyenne (Figure 3.5, page 103). De plus, si les trois dernières séries sont seulement considérées, la différence observée (plus importante dans la première période) n'est également pas significative.

Les résultats ici exposés mettent en évidence l'inefficacité de l'exploitation d'une CPR soumise à des externalités dynamiques et l'intérêt de mettre en place des politiques correctives. Dans les sous-sections suivantes nous étudierons la performance des instruments incitatifs flexibles et fixes.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

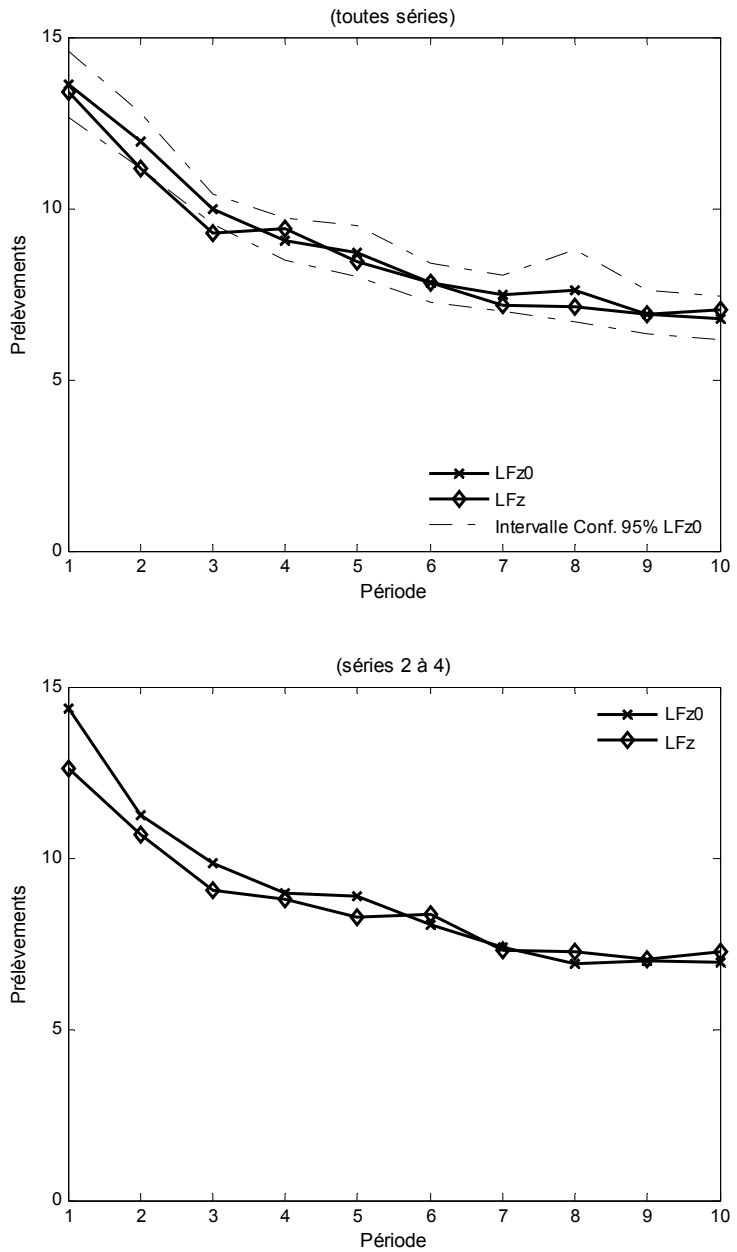


Figure 3.5 : Trajectoires des prélèvements moyens, traitements LFz0 et LFz

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement LFz0				
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	D.Q.M.	D.Q.M.	D.Q.M.
1	1	531	537	1230
	2	58	56	735
	3	1169	1190	1710
	4	305	309	1017
	5	123	128	720
	6	67	78	676
Moyenne [95% intervalle]		375,5 [197,16 586,51]	382,9 [200,59 596,9]	1010 [797,93 1265,6]
2	1	170	184	688
	2	37	31	727
	3	253	296	620
	4	219	209	984
	5	154	170	686
	6	23	12	765
Moyenne [95% intervalle]		142,6 [81,03 215,89]	150,7 [82,44 229,63]	744,9 [686,68 807,49]
3	1	114	121	718
	2	49	48	726
	3	97	115	647
	4	479	485	1109
	5	383	363	1149
	6	12	4	749
Moyenne [95% intervalle]		188,9 [62,15 360,24]	189,5 [65,85 360,81]	849,5 [690,28 1045,1]
4	1	194	173	982
	2	22	10	777
	3	48	56	647
	4	62	69	687
	5	51	56	700
	6	14	16	683
Moyenne [95% intervalle]		65,1 [31,23 119,67]	63,5 [31,08 112,04]	746,1 [668,17 843,21]
Moyenne Globale [95% intervalle]		**193,02** [128,67 264,53]	**196,64** [134,61 268,86]	**837,62** [759,32 926,17]

Tableau 3.6 : Déviation quadratique moyenne des prédictions inconditionnelles ; traitement LFz0

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement LFz				
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	D.Q.M.	D.Q.M.	D.Q.M.
1	7	696	644	904
	8	432	389	644
	9	1245	1161	1529
	10	592	531	807
	11	717	644	954
	12	423	377	615
Moyenne [95% intervalle]		684,5 [460,78 950,06]	624,9 [408,21 883,55]	909,4 [652,3 1222,1]
2	7	180	151	344
	8	258	205	473
	9	238	187	441
	10	279	233	472
	11	208	179	377
	12	254	218	422
Moyenne [95% intervalle]		236,6 [200,09 273,56]	196,0 [165,54 227,61]	421,7 [360,14 484,45]
3	7	185	161	344
	8	225	178	429
	9	226	175	434
	10	219	180	401
	11	200	162	385
	12	268	220	469
Moyenne [95% intervalle]		221,1 [183,97 261,58]	179,7 [147,59 215,62]	410,8 [349,48 472,74]
4	7	169	142	334
	8	231	184	437
	9	204	155	413
	10	254	205	465
	11	195	156	380
	12	269	221	457
Moyenne [95% intervalles]		220,8 [181,22 261,09]	177,6 [143,43 213,18]	414,9 [353,54 472,74]
Moyenne Globale [95% intervalle]		**340,73** [281,58 409,29]	**294,55** [237,65 360,84]	**539,22** [469,81 616,91]

Tableau 3.7 : Déviation quadratique moyenne des prédictions inconditionnelles ; traitement LFz

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement LFz0				
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	D.Q.M.	D.Q.M.	D.Q.M.
1	1	606	515	1264
	2	146	60	732
	3	1162	1167	1739
	4	428	306	1122
	5	181	155	711
	6	123	86	712
Moyenne		440,9	381,4	1046,6
2	1	225	187	800
	2	129	44	694
	3	224	402	627
	4	375	211	1044
	5	186	231	665
	6	144	14	759
Moyenne		213,9	181,4	764,9
3	1	190	124	793
	2	133	53	735
	3	125	151	647
	4	636	502	1335
	5	50	365	1107
	6	125	5	748
Moyenne		286,2	200,2	894,2
4	1	331	167	963
	2	141	13	755
	3	106	71	668
	4	119	97	662
	5	133	57	745
	6	97	20	709
Moyenne		154,4	70,8	750,3
Moyenne Globale		**273,84**	**208,44**	**864,01**

Tableau 3.8 : Déviation quadratique moyenne des prédictions conditionnelles ; traitement LFz0

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement LFz				
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	D.Q.M.	D.Q.M.	D.Q.M.
1	7	859	784	1109
	8	628	561	876
	9	1511	1416	1778
	10	733	657	978
	11	880	793	1135
	12	545	481	775
Moyenne		859,5	781,9	1108,5
2	7	282	234	496
	8	429	357	673
	9	382	312	620
	10	404	340	635
	11	322	272	540
	12	348	294	564
Moyenne		361,2	301,4	588,0
3	7	288	243	500
	8	384	316	624
	9	379	309	619
	10	338	280	564
	11	328	270	555
	12	409	342	644
Moyenne		354,4	293,2	584,6
4	7	274	227	488
	8	394	326	635
	9	370	301	612
	10	425	355	669
	11	317	258	542
	12	383	317	612
Moyenne		360,6	297,6	593,1
Moyenne Globale		**483,91**	**418,52**	**718,54**

Tableau 3.9 : Déviation quadratique moyenne par rapport aux prédictions conditionnelles ; traitement LFz

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement LFz0						
DQM Stratégie Myope		Séries				
Theta	Série	1	2	3	4	
0		63	50	70 [44,23 120,66]	75 [58,33 101,38]	
0,2		37	24	39 [20,85 80,13]	42 [30,00 63,15]	
0,4		23	9	19 [7,60 51,20]	20 [12,47 36,15]	
0,6		**17**	**2**	7 [2,68 34,40]	7 [3,65 19,14]	
0,8		18	3	**4** [2,02 26,07]	**2** [0,94 10,10]	
1		25	9	6 [3,63 27,98]	3 [1,57 10,28]	
Theta	0	0,2	0,4	0,6	**0,8**	1
Moyenne Globale [95% intervalle]	58 [47 73]	30 [22 41]	12 [7,5 19]	3 [1 7,6]	**1** [0,57 5]	5 [2 11]

Tableau 3.10 : Déviation quadratique moyenne des prédiction inconditionnelles pour une population mixte ; traitement LFz0

Traitement LFz						
DQM Stratégie Myope		Séries				
Theta	Série	1	2	3	4	
0		268	145	153 [110 200]	161 [122 205]	
0,2		59	9	**11** [6 24]	12 [5 25]	
0,4		10	13	13 [7 28]	**10** [5 20]	
0,6		13	48	47 [32 72]	41 [28 62]	
0,8		22	67	67 [49 93]	61 [45 83]	
1		208	104	111 [76 152]	117 [85 156]	
Theta	0	0,2	**0,4**	0,6	0,8	1
Moyenne Globale [95% intervalle]	176 [150 208]	17 [11,1 28]	**6** [4 10,5]	32 [24 41]	49 [40 60]	130 [107 158]

Tableau 3.11 : Déviation quadratique moyenne des prédiction inconditionnelles pour une population mixte ; traitement LFz

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

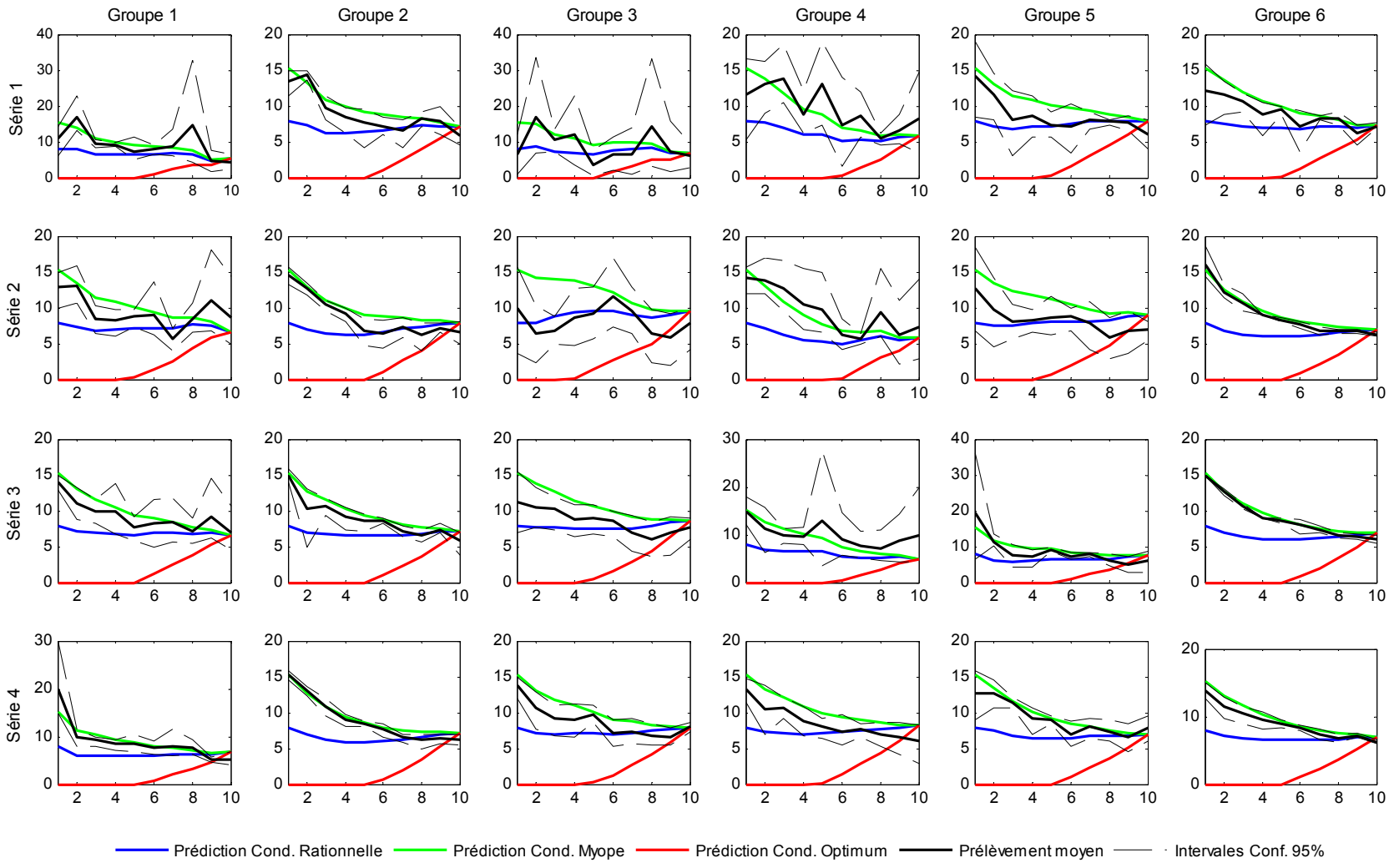


Figure 3.6 : Prédictions conditionnelles vs prélèvements moyens par groupe et par série, traitement LFz0

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

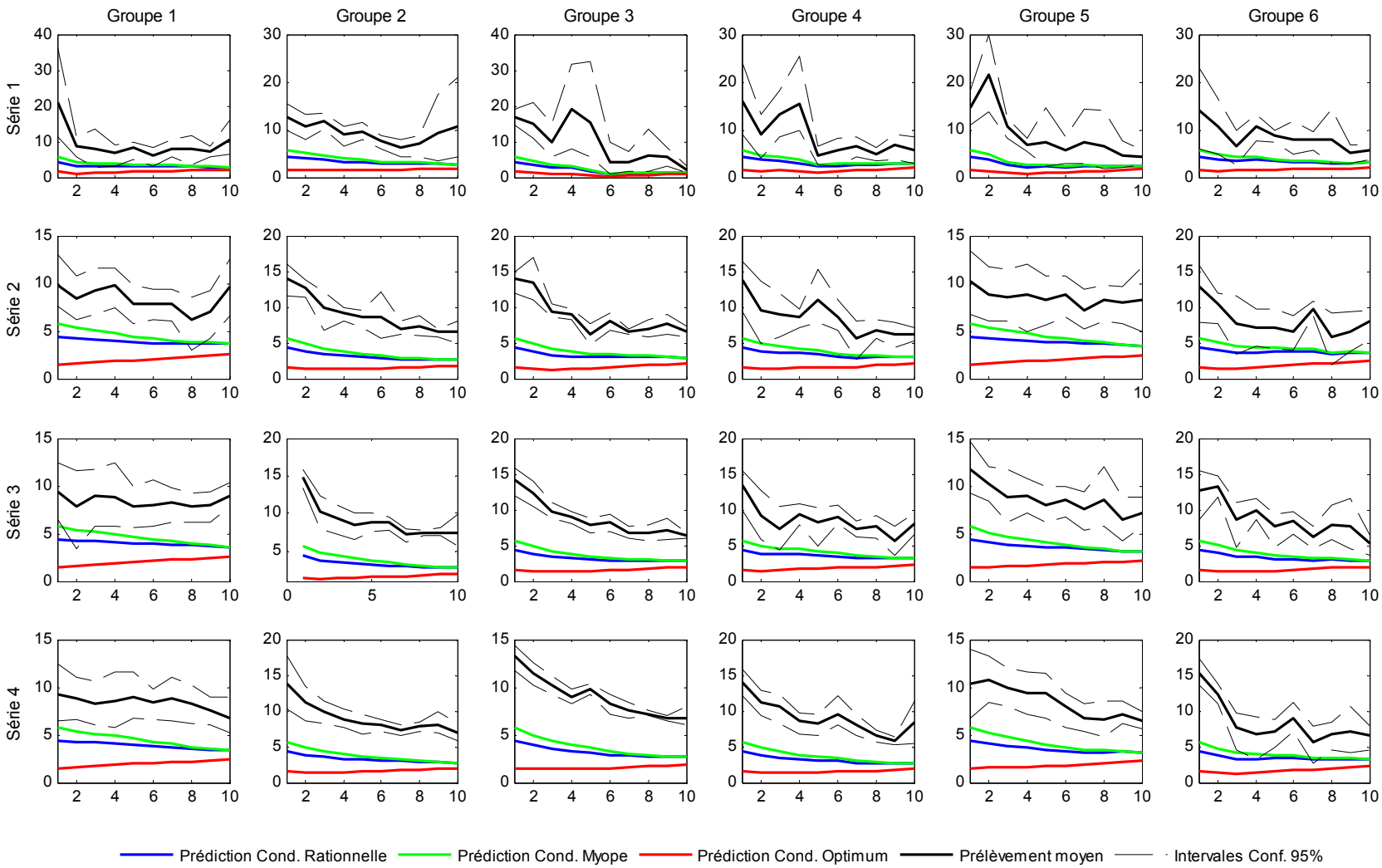


Figure 3.7 : Prédictions conditionnelles vs prélèvements moyens par groupe et par série, traitement LFz

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.2 Les instruments flexibles

Dans cette sous-section, nous analysons les trajectoires des prélèvements moyens observées sous les traitements concernant les politiques de premier rang et temporellement cohérentes. Tous ces traitements sont caractérisés par des instruments flexibles (TPFU, TAFU et IMFU) s'adaptant à l'évolution du compte pour inciter les préleveurs à rester sur une trajectoire optimale à chaque période.

La taxe pigouvienne, mis en place dans le traitement TPFU, consiste appliquer une taxe unitaire sur les prélèvements déclarés. Le taux de la taxe est flexible, c'est-à-dire qu'il s'adapte à l'état de la ressource pour bien refléter la valeur des externalités. Un audit aléatoire des prélèvements déclarés, avec une pénalité forfaitaire en cas de fraude avérée, est en plus instauré pour décourager la fraude. En conséquence, sous les hypothèses du Tableau 3.4 (page 91), des agents neutres vis-à-vis du risque sont totalement découragés de frauder.

Dans la taxe ambiante mise en place dans le traitement TAFU, le régulateur annonce, au début de chaque période, le nombre minimum d'unités disponibles qui doit rester dans le compte en fin de période, ainsi que le taux de la taxe (applicable à tous les membres du groupe) en cas de non respect de la cible. A chaque période, un « prélèvement individuel cible » est facilement calculable en divisant le prélèvement total accordé par le régulateur (la différence entre le nombre d'unités disponibles minimum requis en fin de période et celle disponible au début de période) par la taille du groupe. En plus, comme les déclarations de prélèvement ne sont pas nécessaires, la fraude ne dégrade pas la puissance incitative du mécanisme. Nous projetons une très haute performance de la taxe ambiante ce qui devrait permettre de rapprocher les prélèvements individuels de la trajectoire optimale. Dans ces conditions, la taxe ambiante devrait être très utile pour un régulateur limité dans les moyens disponibles pour combattre la fraude.

L'instrument mixte, mis en place dans le traitement IMFU, est similaire à la taxe pigouvienne (TPFU) sauf dans le calcul de la pénalité en cas de fraude. Comme le régulateur observe le prélèvement total du groupe, il peut savoir, en comparant avec le prélèvement total déclaré, s'il y a eu fraude ou non. Dans ce cas, le régulateur impose une pénalité à chaque membre du groupe (pénalité collective) proportionnelle à l'écart entre le prélèvement total réel et la déclaration.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Nous analyserons, dans un premier temps, si on observe ou non de l'apprentissage avec la répétition du jeu. Ceci va nous permettre de mieux analyser dans quelle mesure, les différents instruments incitatifs, ont réussi à ajuster les trajectoires vers l'optimum.

3.3.2.1 L'effet de la répétition du jeu

Pour étudier l'ajustement vers l'optimum de chaque instrument par rapport à la situation de laissez faire, nous analyserons des trajectoires moyennes de prélèvement, tous les groupes et séries confondus. Néanmoins, si on observe de l'apprentissage, c'est-à-dire que les premières séries ont servi d'entraînement aux sujets, les premières répétitions doivent être écartées de cette analyse.

OBSERVATION 3.5 : On observe de « l'apprentissage » avec la répétition du jeu de manière significative dans le traitement TAFU et IMFU, et de manière non significative dans le traitement TPFU.

Dans le cas de la taxe ambiante, traitement TAFU, la DQM se réduit à fur et à mesure que les séries passent (Tableau 3.14, page 115). La DQM par rapport à la prédiction inconditionnelle dans les séries 3 et 4 est significativement inférieure à celle de la série 1. Le test de Kruskal-Wallis indique également que les DQM conditionnelles des deux dernières séries sont significativement inférieures à celle de la première série (valeur-p = 0,0147). La Figure 3.8 soutient aussi cette affirmation. La Figure A.37 (dans l'Annexe 6, page 308) met en évidence les deux groupes (2 et 5) à l'origine des déviations par rapport à l'optimum. Plus généralement, tous les groupes laissent voir des déviations par rapport à la prédiction conditionnelle (en général non significatives) impliquant une surexploitation.

Dans le cas de l'instrument mixte, traitement IMFU, les DQM par rapport aux prédictions inconditionnelles (Tableau 3.16, page 116) diminuent avec la répétition du jeu de façon non significative. Mais, le test de Kruskal-Wallis indique que les DQM conditionnelles (Tableau 3.17, page 116) diminuent au fur et à mesure que les séries avancent avec un niveau de significativité assez élevé (valeur-p = 0,0749). Ceci est soutenu par la Figure 3.9 (page 113) qui compare les prélèvements moyens par série aux prédictions conditionnelles. La Figure

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A.38 semble montrer que ce sont les groupes 1 et 3 qui réagissent rationnellement aux incitations introduites par le mécanisme.

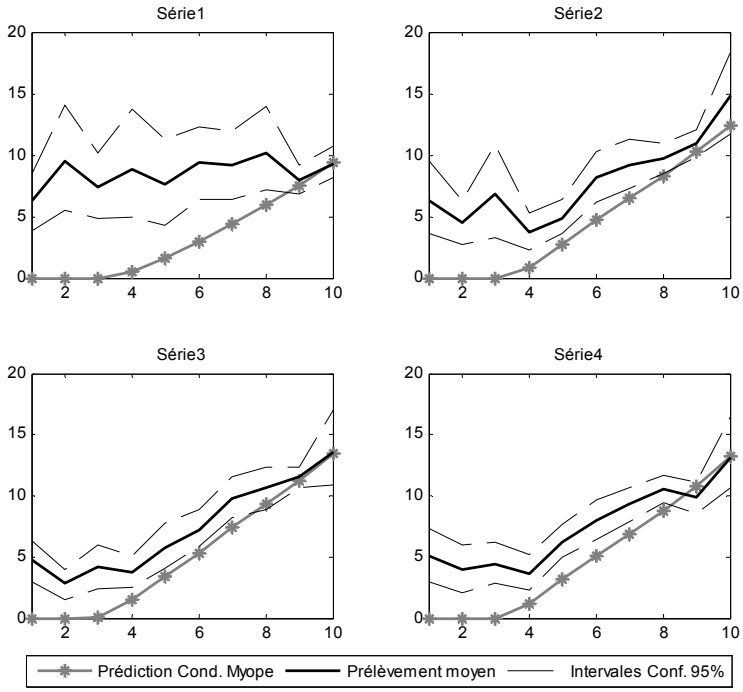


Figure 3.8 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TAFU

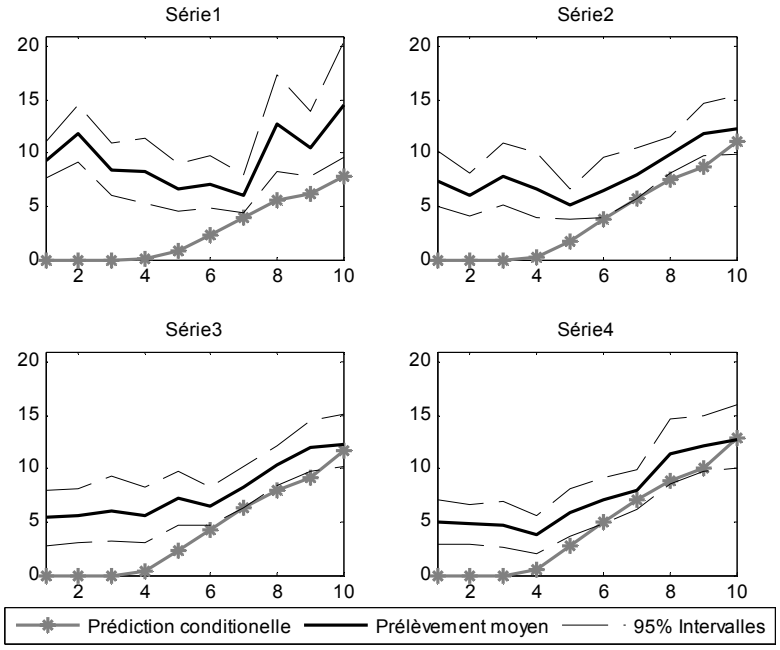


Figure 3.9 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement IMFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Contrairement aux deux instruments précédents, les diminutions observées dans la DQM inconditionnelle (Tableau 3.12, page 115) et conditionnelle (Tableau 3.13, page 115), ne sont pas significatives pour le cas de la taxe pigouvienne (traitement TPFU). Tandis que les intervalles bootstrap calculés pour les DQM inconditionnelle (Tableau 3.12) se superposent, le test de Kruskal-Wallis effectué sur les DQM conditionnelles (Tableau 3.13) n'indique pas des différences significatives entre les séries (même pas entre la première et dernière série, p-valeur = 0,1797). La Figure 3.10 soutient aussi cette affirmation. L'analyse du Tableau 3.13 et de la Figure A.43 (page 311), met en évidence que les groupes 2 et 5 sont à l'origine de ce résultat.

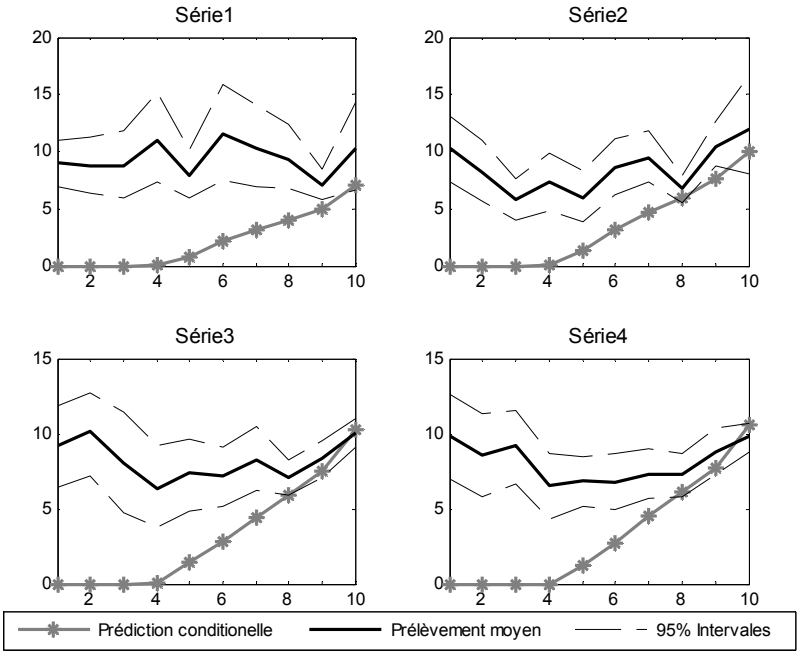


Figure 3.10 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle myope par série ; traitement TPFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement TPFU				
DQM Stratégie Myope	Séries			
Groupe Série	1	2	3	4
1	876	478	501	604
2	1762	1511	1624	1159
3	1456	688	589	558
4	491	588	549	590
5	1288	770	634	648
Moyenne Séries [95% intervalle]	**1174,6** [811,4 1552]	**806,8** [588,5 1025,6]	**779,6** [586,2 981]	**711,7** [558,7 876,3]

Moyenne Globale [95% intervalle]	**868,18** [742,29 994,86]

Tableau 3.12 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement TPFU

Traitement TPFU				
DQM Stratégie Myope	Séries			
Groupe Série	1	2	3	4
1	940	450	497	583
2	2411	1967	1697	1237
3	1505	708	539	508
4	491	562	542	547
5	1423	726	658	606
Moyenne Séries	**1360**	**888**	**790,6**	**700,1**

Moyenne Totale	**934,68**

Tableau 3.13 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement TPFU

Traitement TAFU				
DQM Stratégie Myope				
Groupe Série	1	2	3	4
1	363	92	141	379
2	2623	883	924	562
3	913	416	90	93
4	307	370	246	255
5	1222	1037	272	500
Moyenne Séries [95% Intervalle]	**1085,7** [760,2 1425,1]	**559,5** [314,2 896,3]	**334,6** [207,3 487,8]	**358** [223,6 516,7]
Moyenne Totale [95% Intervalle]			**584,44** [470,03 713,41]	

Tableau 3.14 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement TAFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement TAFU				
DQM Stratégie Myope				
Groupe	Série	1	2	3	4
1		351	91,868	139	401
2		3002	1152,8	1156	636
3		957	387	89	90
4		337	389	242	246
5		1163	1011	246	460
Moyenne Séries		**1161,9**	**606,4**	**375**	**367**
Moyenne Totale				**627,41**	

Tableau 3.15 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement TAFU

Traitement IMFU				
DQM Stratégie Myope				
Groupe	Série	1	2	3	4
1		1448	376	331	367
2		1259	1777	1232	715
3		737	302	242	177
4		1542	605	777	408
5		804	914	947	1247
6		1668	663	709	601
Moyenne Séries **[95% Intervalle]**		**1242,8** [839,2 1697,9]	**772,9** [449,1 1284,3]	**706,4** [404,6 1062]	**586,2** [357,2 858,8]
Moyenne Totale **[95% Intervalle]**				**827,07** [644,49 1028,48]	

Tableau 3.16 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement IMFU

Traitement IMFU				
DQM Stratégie Myope				
Groupe	Série	1	2	3	4
1		1609	383	323	354
2		1293	1858	1260	680
3		784	289	239	189
4		1901	548	742	388
5		887	1045	1184	1487
6		2036	722	706	621
Moyenne Séries		**1418,5**	**807,5**	**742,4**	**619,9**
Moyenne totale				**897,07**	

Tableau 3.17 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement IMFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.2.2 Efficacité des instruments flexibles

Nous utiliserons les deux dernières séries pour calculer les trajectoires de prélèvement moyen, qui serviront à l'étude de l'ajustement vers l'optimum atteint par chaque instrument temporellement cohérent.

OBSERVATION 3.6 : La taxe pigouvienne de premier rang à taux flexible et uniforme du traitement TPFU échoue à faire coïncider les prélèvements individuels aux optimaux, par rapport à la situation de laissez faire.

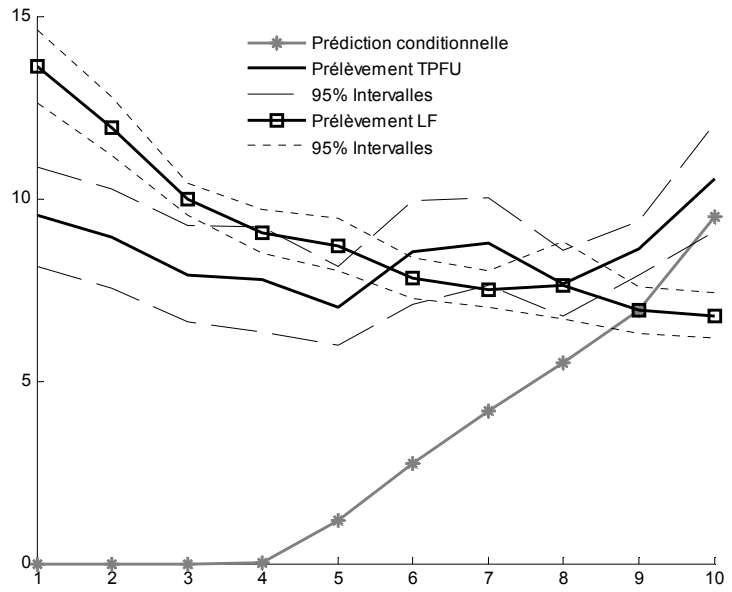


Figure 3.11 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement TPFU

A partir de la DQM par rapport à la prédiction inconditionnelle (Tableau 3.12, page 115), nous ne percevons pas un rapprochement vers la trajectoire optimale. La DQM est très élevée et elle n'est pas significativement différente de celle mesurée pour la stratégie optimum dans la situation de *laissez faire* (Tableau 3.6, page 104). Malgré la diminution significative des quantités prélevées dans les trois premières périodes par rapport au cas du *laissez faire*, en termes généraux la taxe pigouvienne flexible n'arrive pas à compenser l'intensité du dilemme social (IDS) qui est très importante dans les premières périodes (*cf.* dans la Figure 3.11 la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

différence entre la prédiction conditionnelle myope et le prélèvement LF)[12]. D'un autre côté, la DQM mesurée par rapport aux prédictions conditionnelles du traitement TPFU est significativement inférieure à celle du traitement LFz0 (valeur-p = 0,044951 du test de Friedman). Donc, même si les incitations introduites par le mécanisme TPFU se sont avérées insuffisantes pendant les premières périodes, elles arrivent à redresser la trajectoire vers la règle optimale lorsque le dilemme social est moins fort. Ainsi, il peut être observé dans la Figure 3.11 (page 117) que les prélèvements moyens sont significativement supérieurs à la prédiction conditionnelle tout le long de la trajectoire sauf dans la dernière période. C'est également vrai pour les moyennes par série qui sont significativement différentes de la prédiction conditionnelle myope pour toutes les périodes sauf quelques exceptions (Figure 3.10, page 114) ; notamment, la dernière période de la première série et les trois dernières périodes des séries restantes, où les prélèvements observés ne sont pas significativement différents de la prédiction.

OBSERVATION 3.7 : Les instruments flexibles des traitements TAFU et IMFU, réussissent partiellement à faire coïncider les prélèvements individuels aux optimaux, par rapport à la situation de laissez faire.

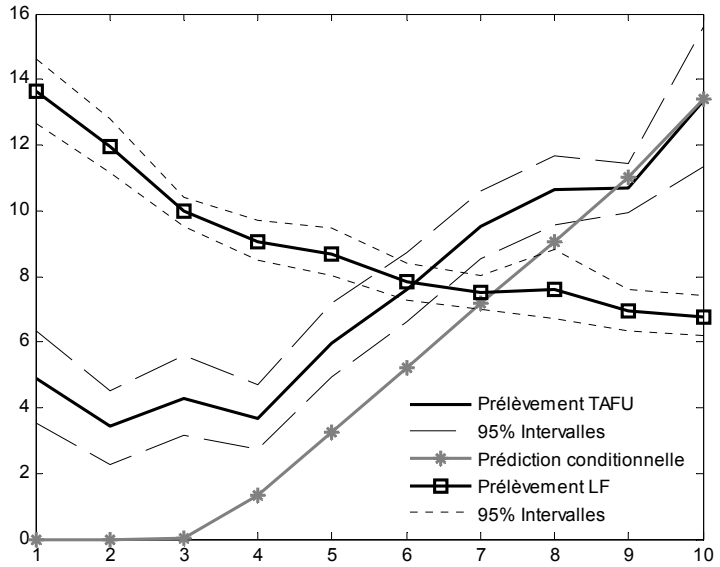


Figure 3.12 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement TAFU

[12] Pour tous les instruments de premier rang, une bonne mesure de l'intensité du dilemme social (IDS) est le taux de la taxe.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Dans le cas de la taxe ambiante, traitement TAFU, la DQM des prélèvements observés par rapport à la prédiction inconditionnelle (Tableau 3.14, page 115) est significativement inférieure de celle mesurée dans le traitement LFz0 (dernière colonne du Tableau 3.6, page 104). Le test de Friedman (avec une valeur-p égale à 0,0006) indique également que la DQM conditionnelle (Tableau 3.15, page 116) est significativement inférieure à celle mesurée dans LFz0 (dernière colonne du Tableau 3.8, page 106) : la Figure 3.12 témoigne d'une réduction significative des prélèvements moyens dans les premières périodes, qui arrivent à se confondre avec la prédiction conditionnelle dans les deux dernières périodes. Aussi, on peut voir que les prélèvements moyens sont significativement différents des prélèvements du laissez faire dans toutes les périodes, sauf dans la période 6 où les trajectoires se croissent.

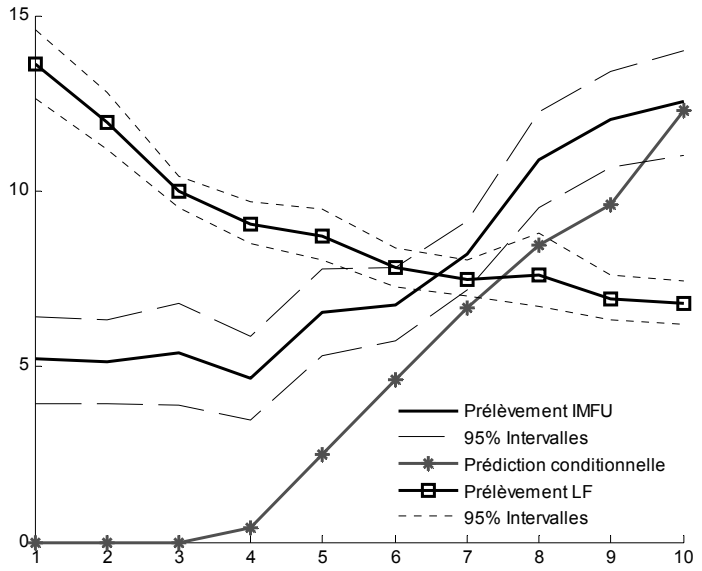


Figure 3.13 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement IMFU

La DQM inconditionnelle pour l'instrument mixte (Tableau 3.16, page 116), traitement IMFU, est très élevée et ne laisse paraître aucune réduction significative par rapport au traitement LFz0 (Tableau 3.6, page 104). Cependant, le test de Friedman (avec une valeur-p égale à 0,089) indique que la DQM conditionnelle (Tableau 3.17, page 116) est significativement inférieure à celle mesurée dans LFz0 (Tableau 3.6). Egalement, dans la Figure 3.13, nous constatons une forte et significative réduction des prélèvements moyens dans les premières périodes par rapport à la situation de laissez faire ; cela permet l'émergence d'une trajectoire avec une pente nettement positive à partir de la période 3 (telle que la prédiction conditionnelle). Néanmoins, cette réduction n'est pas suffisante, car les

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

prélèvements moyens sous le traitement IMFU sont significativement supérieurs à la prédiction conditionnelle sauf dans la dernière période. Ceci concorde avec les mécanismes testés précédemment, TPFU (Figure 3.11, page 117) et TAFU (Figure 3.12, page 118), dont la prédiction théorique explique assez bien le comportement observé dans les dernières périodes.

3.3.2.3 Comparaison de l'efficacité des instruments flexibles

La DQM par rapport à la prédiction conditionnelle n'est pas l'indicateur le plus adapté pour comparer la performance des instruments. En fait, chaque réalisation du jeu possède des prédictions conditionnelles différentes, le stock évoluant de façon distincte. Donc, les incitations pour se rapprocher d'une trajectoire donnée à chaque réalisation du jeu ne sont plus les mêmes une fois qu'il y a eu une déviation. En conséquence, nous allons contraster l'indicateur d'efficacité, défini par l'équation 3.2 (page 99), calculé pour chaque instrument.

OBSERVATION 3.8 : La taxe ambiante (TAFU) est plus efficace que la taxe pigouvienne (TPFU). Mais il n'y a pas des différences significatives entre la taxe ambiante et l'instrument mixte (IMFU), et entre ce dernier et la TPFU.

L'indicateur moyen d'efficacité de l'instrument mixte (IMFU) est égal à 0,1651. Il n'est pas significativement supérieur à celui de la taxe pigouvienne flexible (TPFU), égal à 0,1309 (valeur-p = 0,2623 ; test de Friedman), mais il est significativement inférieur à l'indicateur d'efficacité de la taxe ambiante (TAFU) est égal à 0,2516 (valeur-p = 0,000 ; test de Friedman). Pour éviter des erreurs d'inférence excessives, nous avons appliqué une procédure de comparaison multiple basée sur le critère de différence significative de Tukey[13], nous constatons l'absence de différences significatives dans l'efficacité des mécanismes de premier rang testés (Figure 3.14, page 121). La Figure 3.14a montre que les intervalles de confiance à 95% se superposent pour les trois instruments, indiquant l'absence de différences significatives entre toutes les paires possibles. Cela contraste avec les résultats des comparaisons précédentes effectuées par paire d'instruments pris individuellement. Cependant, à 20% de significativité statistique, nous retrouvons les résultats des comparaisons par couple (Figure 3.14b).

[13] Le test utilisé est mis en place par la fonction *multcompare* du Statistical toolbox de la version 6.5 de Matlab.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

L'efficacité accrue de la taxe ambiante par rapport à la taxe pigouvienne pourrait être expliquée, d'un côté, par l'élimination de la fraude et, d'un autre, par la présence des « prélèvements cibles » tels que nous les avons définis précédemment[14]. Il ne nous est pas possible de distinguer directement ces deux effets de traitement. En termes comportementaux, les prélèvements cibles sont en plus un point focal pour les prélèvements individuels car ils marquent le seuil à partir duquel le montant de la taxe ambiante est nul (si tout le monde les respecte).

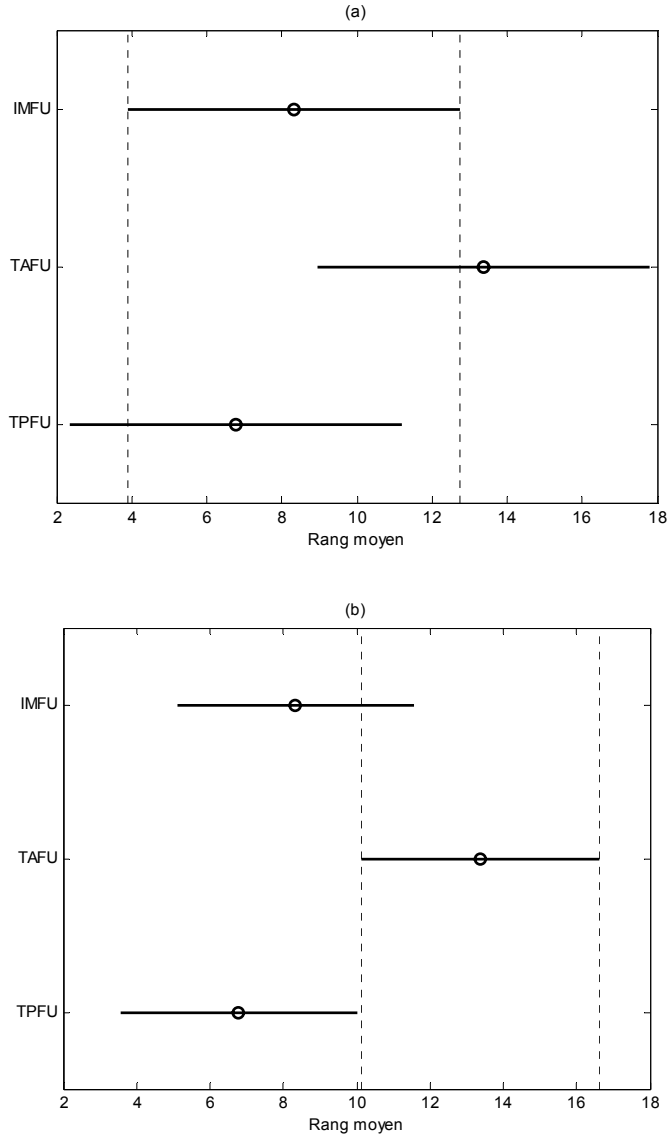


Figure 3.14 : Comparaison multiple d'efficacité (indicateur) ; traitements TPFU, TAFU et IMFU

[14] Cf. troisième paragraphe page 111.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Le principal inconvénient de la taxe ambiante est la multiplicité d'équilibres asymétriques du fait de la possibilité de compenser les prélèvements excessifs des uns par des prélèvements moindres des autres. Mais si la coordination sur un des équilibres fait faillite, les prélèvements dépasseront la cible et la taxe sera prélevée sur tous les membres du groupe. Particulièrement, la Figure A.41 (Annexe 6, page 310) met en évidence une surexploitation significative pour la plupart de groupes et des périodes. Les prélèvements excessifs lorsque la prédiction conditionnelle est nulle (les premières périodes) ne peuvent pas être expliqués par une faille dans la coordination car l'équilibre est unique. La seule explication probable dans ce cas est que la cible était trop contraignante, l'IDS étant très forte dans les premières périodes. Cependant, les problèmes de coordination restent une explication plausible pour les prélèvements excessifs des autres périodes.

L'instrument mixte fait de la compensation une stratégie dominée, donc sur ce point il est supérieur à la taxe ambiante. Néanmoins, l'efficacité de l'instrument mixte est susceptible d'être amoindrie par les fausses déclarations ; ce handicap est partagé avec la taxe pigouvienne. Malgré cela, il est attendu une performance très élevée du mécanisme mis en place pour lutter contre la fraude dans l'instrument mixte, du fait que la probabilité d'être pénalisé est de 100%. En conséquence, les différences dans l'efficacité, significatives entre la taxe pigouvienne et la taxe ambiante, et non significatives entre l'instrument mixte et la taxe pigouvienne, soulignent l'impact des « prélèvements cible » sur l'efficacité des instruments incitatifs.

De façon générale, les instruments flexibles n'arrivent pas à être efficaces les premières périodes de l'horizon temporel lors que la différence entre les trajectoires myope et optimale est maximale. Néanmoins, leur flexibilité permet d'introduire les incitations correctes pour revenir sur une autre trajectoire, désormais optimale. Donc, la flexibilité de l'instrument semble être un atout fondamental.

Dans la sous-section suivante, nous étudierons des instruments similaires (mais non identiques) avec des paramètres fixes.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.3 Les instruments fixes

Dans cette sous-section, nous analysons les données recueillies au laboratoire pour les traitements TPNFUO, TPNFU, TANFU et IMNFU. Les instruments évalués dans ces traitements sont ceux développés dans le Chapitre 2 dans les propositions 2.2 et 2.3 : ils sont caractérisés par des paramètres fixes (taux et seuils de paiement), qui ne s'adaptent pas à l'évolution des unités disponibles dans le compte ni aux périodes restantes jusqu'à la fin de l'horizon temporel. Donc, ils sont incohérents temporellement : face à une déviation quelconque de la trajectoire prédite (prédiction inconditionnelle), ils n'introduisent plus les incitations correctes.

A l'exception de l'instrument testé dans le traitement TPNFUO, les taux des taxes sont, dans les autres traitements, faibles (Tableau 3.3, page 90). En conséquence, une trajectoire moins efficace que l'optimale est prédite. Dans le traitement TPNFUO, le taux de la taxe est fixé à un niveau suffisamment haut pour que la prédiction coïncide avec la trajectoire optimale. Donc, même si ce mécanisme est temporellement incohérent, il est de premier rang ex-ante.

Similairement que dans le cas des instruments flexibles (sous-section 3.3.2 dans la page 111), nous analyserons si l'on observe ou non de l'apprentissage avec la répétition du jeu. Ceci va nous permettre de mieux analyser dans quelle mesure les différents instruments incitatifs ont réussi à ajuster les trajectoires vers l'optimum.

3.3.3.1 L'effet de la répétition du jeu

OBSERVATION 3.9 : On observe de « l'apprentissage » avec la répétition du jeu de manière significative dans les traitements concernant la taxe pigouvienne, TPNFUO et TPNFU, et de manière non significative avec la taxe ambiante (TANFU) et l'instrument mixte (IMNFU).

Dans le cas du traitement TPNFUO, la DQM dans la première série est significativement plus élevée que dans les séries subséquentes, mais il n'y a pas de différences significatives entre les trois dernières (Tableau 3.18, 125). La DQM par rapport à la prédiction inconditionnelle dans les séries 2, 3 et 4 est significativement inférieure à celle de la série 1. Le test de

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Kruskal-Wallis indique également que les DQM conditionnelles des trois dernières séries sont significativement inférieures à celle de la première série à 10% de significativité (valeur-p = 0,0947). La Figure 3.15 (page 126) soutient aussi cette affirmation. La Figure A.39 dans l'annexe 6 (page 309), met en évidence les deux groupes (5 et 6) à l'origine des déviations par rapport à l'optimum.

La DQM par rapport à la prédiction inconditionnelle myope (deuxième colonne du Tableau 3.20, page 127) et la prédiction conditionnelle myope (deuxième colonne du Tableau 3.21, page 128) diminuent à fur et à mesure que les séries avancent. Mais, les différences ne sont significatives que entre la première série et les trois dernières. La Figure 3.16 (page 126) soutient ceci. Et le test de Kruskal-Wallis indique une différence significative dans les DQM par rapport à la prédiction conditionnelle myope (valeur-p = 0,0384).

Dans le cas de la taxe ambiante, traitement TANFU, nous n'observons pas de modifications dans la capacité explicative de la prédiction conditionnelle entre les séries (Figure 3.17, page 129). Même si la DQM inconditionnelle dans la série 4 est significativement inférieure à celle mesurée dans la première série (2éme colonne du Tableau 3.22, page 130), et les DQM conditionnelles diminuent à fur et à mesure que les séries passent (2éme colonne du Tableau 3.23, page 131), le test de Kruskal-Wallis indique l'absence de différence significative, à 10% de significativité dans les DQM par rapport à la prédiction conditionnelle myope (valeur-p = 0,1047).

Le test de Friedman indique qu'il n'y a pas de différence significative dans les DQM par rapport à la prédiction conditionnelle myope (valeur-p = 0,2035) dans le traitement IMNFU, concernant l'instrument mixte. Aucune modification dans la capacité explicative de la prédiction conditionnelle entre les séries n'est ainsi observée (Figure 3.18, page 134).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement TPNFUO				
DQM Stratégie Myope	Séries			
Groupe Série	1	2	3	4
1	649	552	659	396
2	838	524	553	591
3	1670	683	590	677
4	886	-	194	211
5	2413	-	662	600
6	3486	-	1051	758
Moyenne Séries [95% intervalles]	1656,9 [1175,6 2203,3]	586,7 [407,4 758,6]	618 [479,1 774,1]	539 [447 633]

Moyenne Globale [95% intervalles]	850,11 [714,11 999,45]

Tableau 3.18 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement TPNFUO

Traitement TPNFUO				
DQM Stratégie Myope	Séries			
Groupe Série	1	2	3	4
1	521	442	611	359
2	628	437	464	473
3	1521	516	450	521
4	837	-	189	209
5	2075	-	517	456
	4131	-	855	619
Moyenne Séries	**1619**	**465,1**	**514,2**	**439,6**
Moyenne Totale		**759,47**		

Tableau 3.19 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement TPNFUO

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

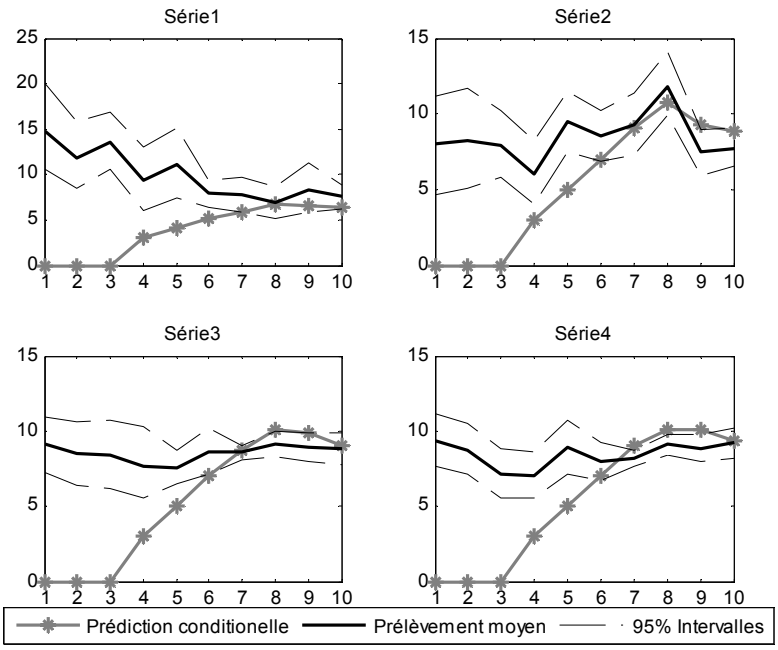


Figure 3.15 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TPNFUO

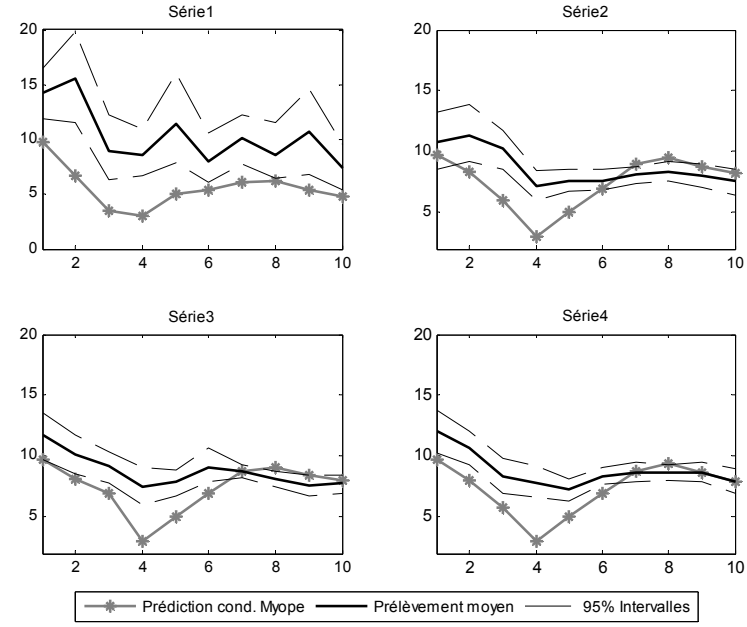


Figure 3.16 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

		Traitement		
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	Total	Total	Total
1	1	1165	936	1624
	2	293	217	598
	3	864	719	1321
	4	192	110	484
	5	2598	2401	2994
	6	1876	1603	2484
Moyenne [95% intervalles]		1164,7 [728,1 1654,7]	997,54 [591,45 1444,53]	1584,28 [1072,53 2167,52]
2	1	257	194	600
	2	258	193	549
	3	352	153	771
	4	207	132	500
	5	681	554	1061
	6	307	134	670
Moyenne [95% intervalles]		343,6 [245,57 475,09]	226,7 [162,88 317,68]	692,1 [539,79 876,73]
3	1	348	237	673
	2	241	182	483
	3	303	121	723
	4	309	226	624
	5	304	181	672
	6	228	114	555
Moyenne [95% intervalles]		288,6 [227,2 362,5]	177,1 [132,67 235,04]	622 [132,67 235,04]
4	1	274	166	581
	2	205	141	458
	3	311	127	733
	4	145	78	424
	5	387	254	756
	6	249	119	585
Moyenne [95% intervalles]		262,0 [225,69 304,35]	147,7 [122,18 177,32]	589,5 [512,41 672,87]
Moyenne Globale [95% intervalles]		**514,74** [405,12 645,54]	**387,28** [285,73 504,38]	**871,95** [734,52 1032,37]

Tableau 3.20 : Déviation quadratique moyenne (prédictions inconditionnelles) ; traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

		Traitement		
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	Total	Total	Total
1	1	1231	1010	1648
	2	319	238	629
	3	976	770	1437
	4	239	126	578
	5	3666	3443	4121
	6	2222	1913	2631
Moyenne [95% intervalles]		1442,1	1249,8	1840,6
2	1	287	218	666
	2	287	206	576
	3	389	247	750
	4	241	137	573
	5	700	552	1062
	6	319	136	626
Moyenne [95% intervalles]		370,7	249,5	708,8
3	1	345	221	684
	2	242	185	496
	3	346	151	737
	4	335	225	708
	5	338	199	748
	6	259	127	599
Moyenne [95% intervalles]		310,7	184,6	662,1
4	1	289	171	610
	2	224	144	500
	3	362	231	754
	4	168	76	467
	5	452	278	875
	6	278	137	625
Moyenne [95% intervalles]		295,5	173,0	638,4
Moyenne Globale [95% intervalles]		604,7	464,2	962,5

Tableau 3.21 : Déviation quadratique moyenne (prédictions conditionnelles) ; traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

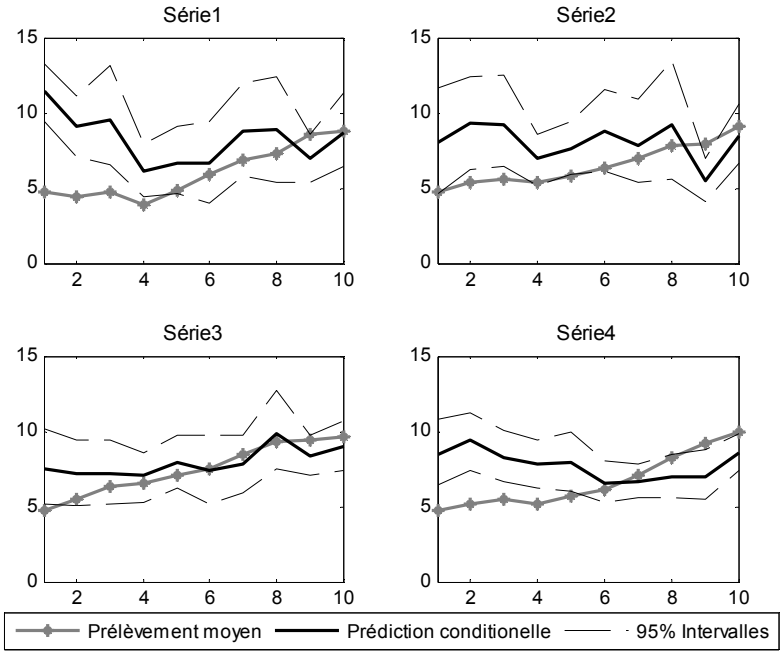


Figure 3.17 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TANFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

		Traitement		
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	Total	Total	Total
1	1	570	600	954
	2	1797	1833	2279
	3	496	540	722
	4	711	740	1164
	5	299	318	644
	6	192	207	732
Moyenne [95% intervalles]		677,6 [487,23 868,23]	706,3 [516,51 902,13]	1082,6 [894,61 1286,27]
2	1	1087	1141	1453
	2	1165	1188	1764
	3	503	593	350
	4	987	961	1781
	5	296	349	602
	6	404	459	655
Moyenne [95% intervalles]		740,2 [503,07 993,97]	781,9 [536,55 1030,21]	1100,8 [807,31 1435,64]
3	1	477	588	180
	2	749	738	1463
	3	509	573	634
	4	281	328	650
	5	406	486	456
	6	437	485	734
Moyenne [95% intervalles]		476,5 [322,09 708,4]	532,9 [375,87 759,56]	686,1 [485,62 970,24]
4	1	326	400	357
	2	313	313	941
	3	394	465	510
	4	248	279	661
	5	279	316	647
	6	157	166	816
Moyenne [95% intervalles]		286,0 [202,2 374,1]	323,2 [232,7 419,88]	655,4 [545,28 780,07]
Moyenne Globale [95% intervalles]		545,1 [453,1 642,1]	586,1 [493,2 681,3]	881,2 [768,24 995,98]

Tableau 3.22 : Déviation quadratique moyenne (prédictions inconditionnelles) ; traitement TANFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

		Traitement		
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	Total	Total	Total
1	1	828	595	867
	2	2946	2504	2862
	3	670	567	650
	4	1171	823	1188
	5	552	385	560
	6	651	353	697
Moyenne		1136,6	870,9	1137,3
2	1	1304	1025	1425
	2	1996	1583	1966
	3	405	535	328
	4	1656	1353	1653
	5	461	248	543
	6	576	357	655
Moyenne		1066,3	850,3	1095,2
3	1	257	486	170
	2	1563	1202	1529
	3	558	439	598
	4	547	275	627
	5	331	252	457
	6	742	464	799
Moyenne		666,5	519,6	696,8
4	1	312	333	317
	2	987	637	973
	3	400	288	490
	4	548	296	593
	5	548	301	589
	6	789	415	783
Moyenne		597,4	378,4	624,0
Moyenne Globale		866,7	654,8	888,3

Tableau 3.23 : Déviation quadratique moyenne (prédictions conditionnelles) ; traitement TANFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement IMNFU				
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	Total	Total	Total
1	1	974	880	1333
	2	644	460	1059
	3	237	153	565
	4	525	389	986
	5	224	194	403
Moyenne [95% intervalles]		520,9 [324,11 729,92]	415,2 [238,16 597,63]	869,3 [640,27 1145,04]
2	1	2017	1999	2215
	2	240	157	527
	3	229	153	533
	4	412	248	815
	5	123	218	185
Moyenne [95% intervalles]		604,1 [333,79 903,32]	554,6 [266,57 872,67]	855,1 [602,49 1133,71]
3	1	615	471	922
	2	647	526	1030
	3	139	105	395
	4	393	223	779
	5	608	613	900
Moyenne [95% intervalles]		480,3 [253,85 739,61]	387,6 [193,31 615,24]	805,3 [527,59 1135,58]
4	1	227	161	498
	2	225	154	478
	3	183	149	437
	4	311	259	600
	5	142	254	209
Moyenne [95% intervalles]		217,8 [170,04 274,76]	195,5 [147,6 246,92]	444,4 [343,34 555,81]
Moyenne Globale [95% intervalles]		455,8 [351,5 579,1]	388,2 [286,76 508,64]	743,5 [626,67 880,84]

Tableau 3.24 : Déviation quadratique moyenne (prédictions inconditionnelles) ; traitement IMNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Traitement IMNFU				
Stratégie		Rationnel	Myope	Optimum
Série	Groupe	Total	Total	Total
1	1	1072	907	1505
	2	659	527	1026
	3	239	162	579
	4	757	540	1290
	5	229	195	412
Moyenne		591,3	466,2	962,4
2	1	2696	2520	3255
	2	267	182	547
	3	261	192	571
	4	547	397	999
	5	135	299	217
Moyenne		781,3	718,0	1117,8
3	1	637	471	976
	2	686	570	1081
	3	165	138	431
	4	428	238	830
	5	709	742	1042
Moyenne		525,1	431,8	872,0
4	1	246	160	564
	2	226	165	474
	3	193	163	460
	4	419	335	820
	5	150	319	278
Moyenne		246,8	228,5	519,3
Moyenne Globale		536,1	461,1	867,9

Tableau 3.25 : Déviation quadratique moyenne (prédictions conditionnelles) ; traitement IMNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

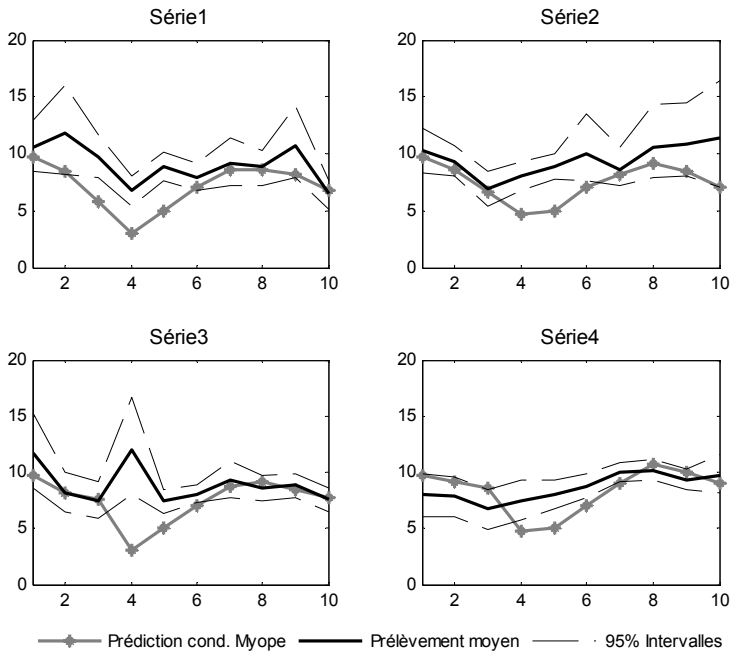


Figure 3.18 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement IMNFU

3.3.3.2 Ajustement aux prédictions théoriques

Comme conséquence des résultats de l'analyse des effets de la répétition du jeu, nous utiliserons les trois dernières séries pour calculer les trajectoires de prélèvement moyen qui serviront à déterminer quelle est la stratégie la plus explicative du comportement (rationnelle, myope ou optimale) et à l'étude de l'ajustement vers l'équilibre atteint par chaque instrument fixe.

OBSERVATION 3.10 : Pour l'ensemble des traitements avec des instruments de second rang, la comparaison des données individuelles aux prédictions conditionnelles révèle que la stratégie Myope est la plus conforme aux décisions des sujets.

La taxe pigouvienne mise en place dans le traitement TPNFUO est de premier rang. A partir de la proposition 2.2 du Chapitre 2 et du niveau du taux de la taxe (Tableau 3.4, page 91), la prédiction du traitement TPNFUO coïncide avec la trajectoire optimale, et ceci indépendamment du type du préleveur. Donc, ce traitement n'est pas concerné par l'observation 3.10.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Pour l'ensemble des instruments de second rang, (traitements TPNFU, TANFU et IMNFU) les DQM par rapport aux prédictions inconditionnelles [Tableau 3.20 (page 127), Tableau 3.22 (page 130) et Tableau 3.24 (page 132), respectivement], indiquent que la prédiction optimum n'explique pas le comportement observé. Mais on ne peut pas discriminer entre la stratégie myope et la stratégie rationnelle car les intervalles se superposent. D'un autre côté, le test de Friedman indique que la DQM par rapport à la prédiction conditionnelle myope est significativement inférieure que celle mesurée pour la prédiction rationnelle dans les traitements TPNFU et TANFU (avec une valeur-p égal à 0,0002 et 0,0163, respectivement). Contrairement, les DQM par rapport aux prédictions conditionnelles du traitement IMNFU ne permettent pas de départager la stratégie la plus explicative (valeur-p = 0,1495 ; test de Friedman). Néanmoins, la Figure 3.22 (page 139) montre que les prélèvements moyens coïncident avec la prédiction conditionnelle myope pendant les premières trois périodes et les quatre dernières ; les trois périodes intermédiaires sont caractérisées par des prélèvements significativement supérieurs à la prédiction. Cela est également vrai pour toutes les séries (Figure 3.18, page 134).

Les résultats suivants nous permettront de discerner dans quelle mesure les instruments fixes ont réussi à ajuster les prélèvements individuels vers la trajectoire cible. La trajectoire cible coïncide avec l'optimale pour le cas du traitement TPNFUO, mais elle est moins contraignante dans les instruments de second rang testés. De ce fait, nous attendons de ces dernières une efficacité accrue par rapport aux instruments flexibles (de premier rang) examinés précédemment.

3.3.3.3 Efficacité des instruments fixes

Nous commençons par analyser le traitement TPNFUO, le seul instrument fixe de premier rang examiné.

OBSERVATION 3.11 : La taxe/subvention de premier rang du traitement TPNFUO échoue à rapprocher les prélèvements individuels vers l'optimum.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

La DQM inconditionnelle (Tableau 3.18, page 125) est très élevée et n'entraîne pas de réduction significative par rapport au traitement LFz0 (Tableau 3.6, page104). La Figure 3.19 présente les prélèvements moyens, la prédiction conditionnelle myope et les seuils de paiement. On observe des différences significatives avec la trajectoire du *laissez faire* pour les quatre premières et trois dernières périodes. Egalement, le test de Friedman indique une DQM mesurée par rapport aux prédictions conditionnelles est significativement inférieure à celle du traitement LFz0 (valeur-p = 0,000576). Néanmoins, le mécanisme TPNFUO n'arrive pas à compenser l'IDS qui est très élevée dans les premières périodes mais il parvient à modifier la trajectoire de prélèvement pendant les dernières périodes, quand le dilemme social est moins fort. En effet, les prélèvements moyens sont significativement supérieurs à la prédiction conditionnelle jusqu'à la période 7. Cela est également vrai pour les moyennes par série (Figure 3.15, page 126) et par groupe (Figure A.39, page 309), même si l'on constate que les groupes 1 et 4 semblent bien régir aux incitations.

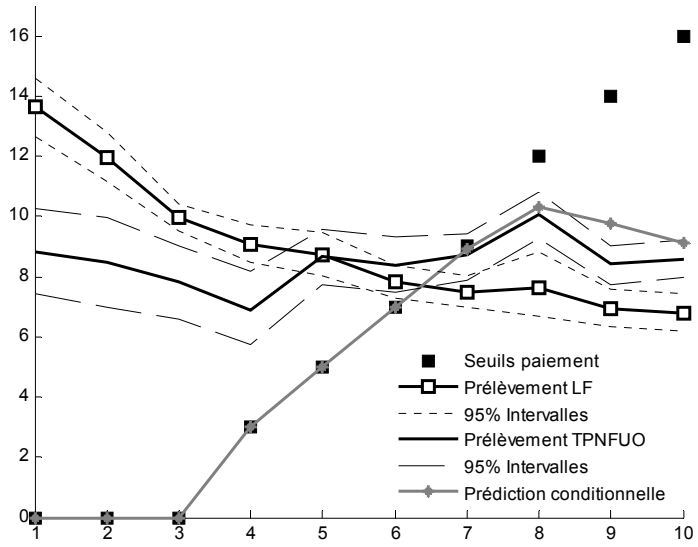


Figure 3.19 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement TPNFUO

Les instruments de premier rang contraignent très fortement le comportement individuel. Donc, l'intérêt d'instaurer des instruments de second rang réside dans la possibilité qu'ils fournissent pour se rapprocher partiellement de l'optimum sans trop forcer, car l'IDS est moins forte. Par exemple, si l'on prend la trajectoire « laissez faire » comme référence dans la Figure 3.20, un instrument de premier rang encourage, à la période 1, à passer de 14 unités de prélèvement à zéro, tandis que l'instrument TPNFU exige une réduction de juste 4 unités par

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

rapport au laissez faire. Donc il est attendu que les instruments de second rang soient plus efficaces pour rapprocher une trajectoire cible car celle-ci contraint moins le comportement individuel.

OBSERVATION 3.12 : Les instruments fixes de second rang des traitements TPNFU et TANFU échouent à rapprocher les prélèvements individuels vers la cible de second rang.

La trajectoire des prélèvements moyens du traitement TPNFU n'est pas différente de la trajectoire « laissez faire » sauf dans la période 4 (Figure 3.20), et elle est significativement supérieure à la prédiction conditionnelle myope jusqu'à la période 7. Dans le cas de la taxe ambiante (traitement TANFU) la trajectoire moyenne de prélèvements est significativement inférieure à la trajectoire du *laissez faire* dans le deux premières périodes mais ensuite (Figure 3.21, page 138), à partir de la période 7 en particulier, la prédiction conditionnelle myope, les prélèvements moyens et les prélèvements LF se confondent. Bien sûr, il n'y a pas un rapprochement vers l'optimum. Les DQM inconditionnelles pour la stratégie optimum des traitements TPNFU et TANFU [Tableau 3.20 (page 127) et Tableau 3.22 (page 130), respectivement] sont très élevées et n'entraîne pas une différence significative par rapport au traitement LFz0 (Tableau 3.6, page 104).

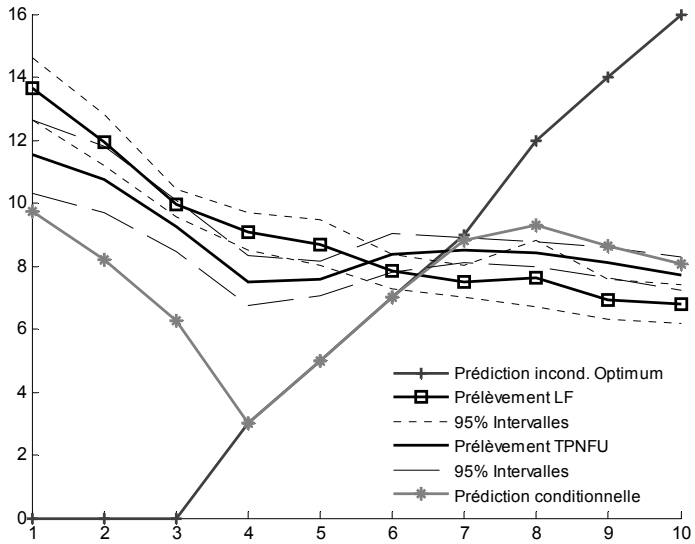


Figure 3.20 : Prédictions conditionnelle myope et inconditionnelle vs prélèvements moyens, traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Nous avons calculé les trajectoires moyennes à partir des trois dernières séries car de l'apprentissage a été observé avec la répétition du jeu (observation 9 dans la page 123). En conséquence, nous écartons une éventuelle mécompréhension de la part des sujets comme une explication plausible de la mauvaise performance de ces deux instruments fixes. Nous concluons donc que les instruments ont été ignorés ou éludés. La Figure A.40 (page 310) indique les groupes (2 et 4) qui réagissent le mieux aux incitations du traitement TPNFU, les autres semblant ignorer complètement l'instrument. Les groupes 2, 4 et 6 seraient à l'origine de la mauvaise performance de la taxe ambiante du traitement TANFU (Figure A.41, page 310).

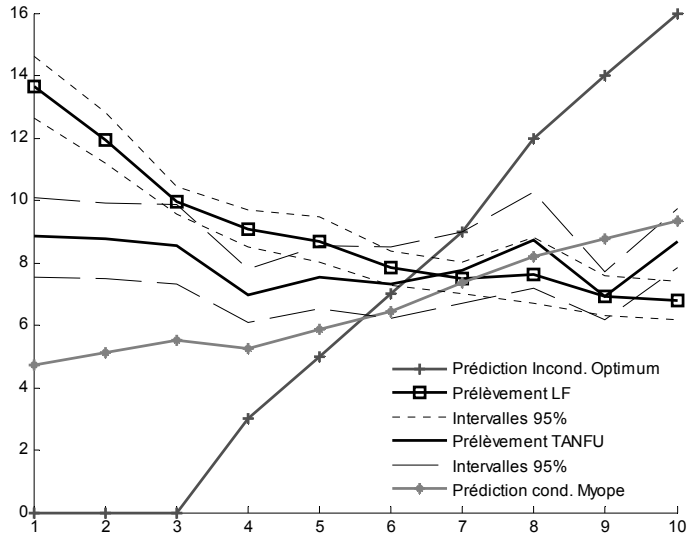


Figure 3.21 : Prédictions conditionnelle myope et inconditionnelle vs prélèvements moyens, traitement TANFU

OBSERVATION 3.13 : L'instrument mixte du traitement IMNFU ne réussit que partiellement à rapprocher les prélèvements individuels vers la cible de second rang.

La trajectoire des prélèvements moyens est significativement différente de la trajectoire du laissez faire et elle est significativement similaire à la prédiction conditionnelle myope, sauf entre les périodes 4 à 6 où elle se superpose à la trajectoire laissez faire et s'éloigne de la prédiction (Figure 3.22, page 139). A partir de la période 4, la prédiction myope coïncide avec l'optimum et s'écarte de la trajectoire laissez faire, remarquant encore que les instruments qui restreindrent trop le comportement sont ignorés ou refusés.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Bien qu'en termes généraux la performance des instruments fixes s'avère très faible, des comparaisons peuvent être réalisées pour déterminer le plus efficace.

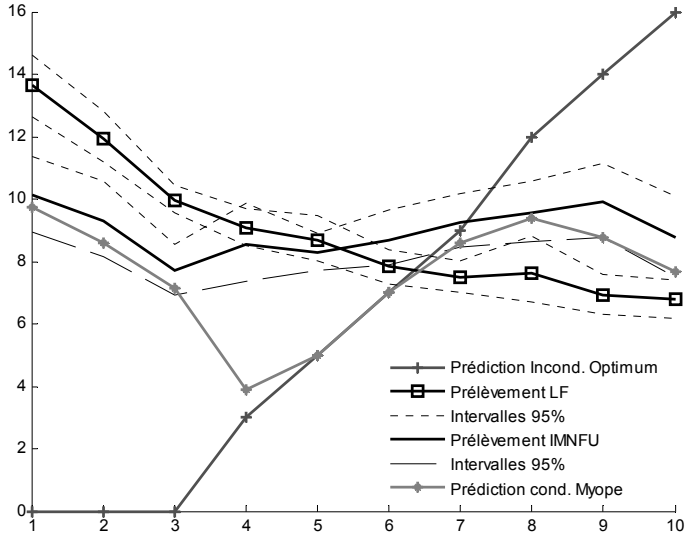


Figure 3.22 : Prédictions conditionnelle myope et inconditionnelle vs prélèvements moyens, traitement IMNFU

3.3.3.4 Comparaison de l'efficacité des instruments fixes

OBSERVATION 3.14 : Les comparaisons de l'efficacité des instruments pour rapprocher les trajectoires des prélèvements individuels vers l'optimum, réalisées par couples d'instruments prises individuellement, résultent dans le classement suivant : (1) TPNFUO, (2) IMNFU, (2) TPNFU et (3) TANFU. La multi comparaison n'indique pas des différences significatives dans l'efficacité des trois premiers instruments des traitements, mais la taxe ambiante du traitement TANFU est significativement moins efficace que les autres.

La comparaison des DQMs par rapport à la prédiction inconditionnelle optimum des traitements TPNFUO (Tableau 3.18, page 125), TPNFU (Tableau 3.20, page 127), IMNFU (Tableau 3.24, page 132) et TANFU (Tableau 3.22, page 130) n'indique pas de différence dans l'efficacité des instruments pour ramener la trajectoire de prélèvement vers l'optimum. Les DQM par rapport aux prédictions conditionnelles ne sont pas directement comparables,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

donc nous utilisons l'indicateur moyen d'efficacité, défini par l'équation 3.2 (page 99), pour comparer la performance des instruments.

Le résultat des comparaisons par couple est exposé dans le Tableau 3.26. L'indicateur moyen d'efficacité de l'instrument mixte (IMNFU) est égal à 0,1642 ; il est significativement supérieur à celui de la taxe ambiante (TANFU) égal à 0,0647 (p-valeur = 0,000 ; test de Friedman). Il est au contraire significativement moins efficace que la taxe/subvention de premier rang (p-valeur = 0,025 ; test de Friedman) dont l'indicateur moyen est égal à 0,2346. Mais, il n'y a pas de différence significative dans l'efficacité avec la taxe/subvention de deuxième rang (TPNFU), dont l'indicateur est égal à 0,1523 (p-valeur = 0,4233 ; test de Friedman).

Instrument (Indicateur d'efficacité) v.p = valeur-p	TPNFUO (0,2346)	TPNFU (0,1523)	TANFU (0,0647)
TPNFU (0,1523)	TPNFUO v.p = 0,0023		
TANFU (0,0647)	TPNFUO v.p = 0,000	TPNFU v.p = 0,000	
IMNFU (0,1642)	TPNFUO v.p = 0,025	x v.p = 0,4233	IMNFU v.p = 0,000

Tableau 3.26 : Comparaison de l'efficacité des instruments fixes, effectuée par couples d'instruments

A partir de la procédure de comparaison multiple à 5% de significativité statistique (Figure 3.23a, page 141), nous constatons que seule la taxe/subvention de premier rang est significativement plus efficace que la taxe ambiante, mais il n'y a pas de différence avec la taxe/subvention de second rang et l'instrument mixte. Les deux derniers mécanismes ne présentent pas une efficacité significativement supérieure à celle de la taxe ambiante à 95% de confiance. Mais, à 25% de significativité (Figure 3.23b, page 141), nous retrouvons partiellement le résultat des comparaisons individuelles (observation 3.14, page 139) : la taxe ambiante est la moins efficace de tous les instruments fixes, mais il n'y a pas de différences significatives entre les instruments restants. Ce résultat peut sembler étonnant mais, même si le mécanisme à taux fixe de deuxième rang n'arrive même pas à réduire significativement les

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

prélèvements par rapport à la trajectoire de laissez faire (Figure 3.20, page 137), sa performance est respectable par rapport à sa prédiction.

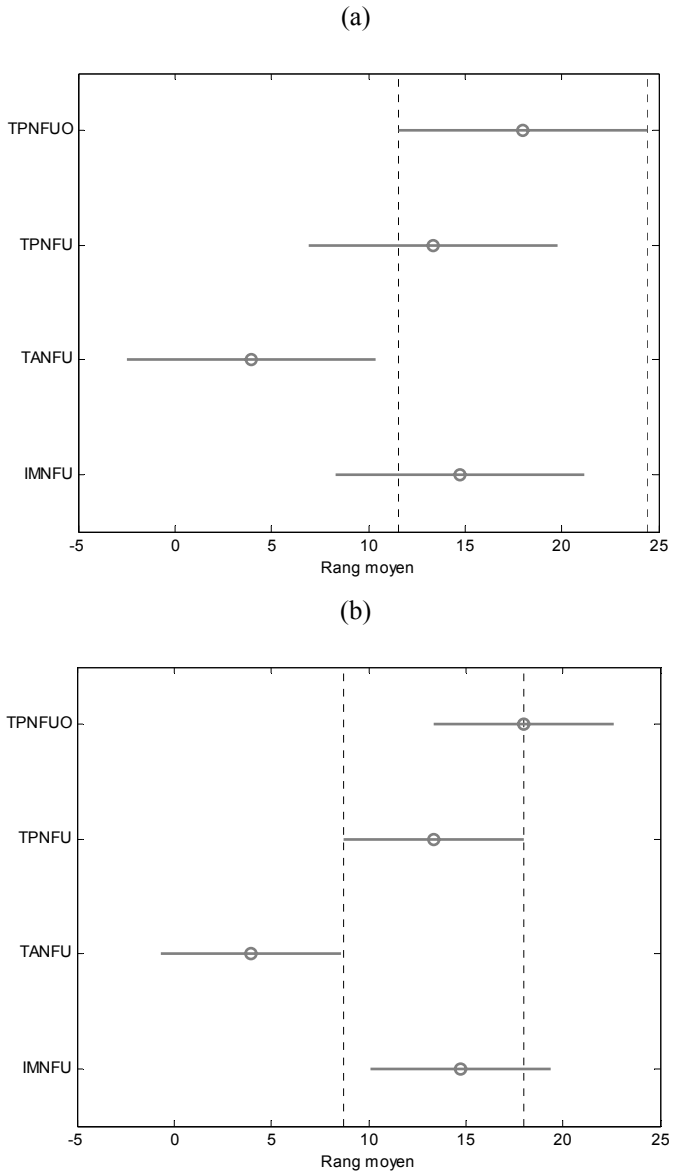


Figure 3.23 : Comparaison multiple d'efficacité ; traitements TPNFUO, TPNFU, IMNFU et TANFU

A la lumière des résultats des instruments flexibles nous attendions une meilleure performance de la taxe ambiante fixe, notamment en raison de l'impossibilité de frauder sous cet instrument et de l'indication sur le prélèvement à réaliser qui représente le stock minimum requis à chaque période. Ceci indique que la possibilité de frauder n'est pas la seule cause possible de la mauvaise performance des instruments incitatifs. Des failles dans la coordination sur l'équilibre et des erreurs doivent être à l'origine de cette mauvaise

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

performance. Le problème de coordination est aggravé par l'inflexibilité des cibles de cet instrument : pour éviter le paiement de la taxe, les prélèvements excessifs du passé doivent être contrebalancés par des réductions des prélèvements futurs qui peuvent être impraticables (car des prélèvements négatifs ne sont pas possibles).

L'absence de différences significatives entre la taxe/subvention de premier rang et les instruments de second rang des traitements TPNFU et IMNFU met en avant le rôle des fausses déclarations dans la dégradation de la performance des instruments très contraignants. Ceci a été également souligné par les résultats des instruments flexibles.

Dans la section suivante nous étudierons l'efficacité des mécanismes mis en place pour lutter contre la fraude et nous analyserons dans quelle mesure les fausses déclarations peuvent expliquer la mauvaise performance de certains instruments.

3.3.4 Les fausses déclarations : leur impact sur la performance des instruments et l'efficacité des mécanismes incitatifs pour la contrôler

La différence entre les traitements TPFU et IMFU dans le cas des instruments flexibles et entre les traitements TPNFU et IMNFU pour les instruments fixes[15] réside dans le mécanisme incitatif pour contrôler la fraude (*cf.* Chapitre 2 pour une explication détaillée). Tandis qu'un audit aléatoire, avec des pénalités forfaitaires en cas de fraude avérée, est utilisé dans les instruments des traitements TPFU, TPNFUO et TPNFU, un système de pénalités collectives est mis en place dans les traitements IMFU et IMNFU. En conséquence, la différence observée dans la performance entre ces couples d'instruments peut être directement attribuée à la fraude.

Nous appelons « taux de respect » à l'indicateur utilisé pour mesurer la fraude. Formellement,

Taux de respet = $\frac{y_{i,d}^{t}}{y_{i}^{t}}$.

[15] L'instrument du traitement TPNFUO incorpore le même mécanisme pour contrôler la fraude que le traitement TPNFU et TPFU.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Où, $y_{i,d}^{t}$ est la déclaration de prélèvement de l'individu i à la période t, et y_{i}^{t} est le prélèvement réellement effectué. Le taux de respect est égal à l'unité quand il n'y a pas de fraude : toutes les unités prélevées ont été déclarées ; et égal à zéro quand la déclaration est nulle.

Premièrement, nous allons comparer l'efficacité de ces deux mécanismes pour lutter contre la fraude. Puis, nous allons déterminer dans quelle mesure la fraude est une explication plausible des mauvaises performances.

OBSERVATION 3.15 : Le taux de respect augmente avec le temps, dans tous les traitements sauf dans IMFU.

Il y a deux facteurs qui peuvent affecter le taux de respect : la taille de la pénalité en cas de fraude et l'IDS. Nous nous attendons à ce que le taux de respect soit inversement corrélé avec l'IDS[16] car frauder est plus attrayant dans ce cas, et directement corrélé avec la taille de la pénalité.

Les Figures 3.24 (page 144), 3.26 (page 145), 3.27 (page 145) et 3.28 (page 146) mettent en évidence ce point. Le taux de respect augmente à fur et à mesure que l'IDS diminue (voir les coefficients de corrélation 'CorrDS') mais il n'atteint jamais la prédiction car cette augmentation n'est pas significative (les intervalles de confiance se superposent). Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le taux de respect est inversement corrélé avec le niveau de la pénalité, indiquant que l'effet de l'IDS fait plus que compenser la possibilité d'être pénalisé[17]. La Figure 3.25 (page 144) montre que l'IDS n'affecte pas le taux de respect dans le traitement IMFU, ce qui était attendu, car le taux de respect est très élevé et reste stable.

A partir de la Figure 3.28 (page 146) nous constatons que dans le traitement IMNFU, le taux de respect tend significativement vers le respect total avec le passage du temps. Ceci contraste avec l'évolution du taux de respect dans le traitement IMFU, que bien qu'il soit très élevé, il

[16] Le taux de la taxe dans les traitements TPFU et IMFU est une mesure de l'IDS.
[17] Des traitements additionnels sont nécessaires pour connaître la relation précise entre la FDS, la probabilité de contrôle et le montant des pénalités. Néanmoins, un modèle économétrique pourrait être estimé à partir des données recueillies pour mieux qualifier l'impact de l'IDS et des pénalités.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

reste significativement en dessus de la prédiction. En comparant les Figures 3.25 et 3.28 nous imputons cette différence à l'IDS. Dans la Figure 3.28 (page 146) on voit que l'IDS est nulle les trois dernières périodes, tandis que dans la Figure 3.25, elle est encore très élevée.

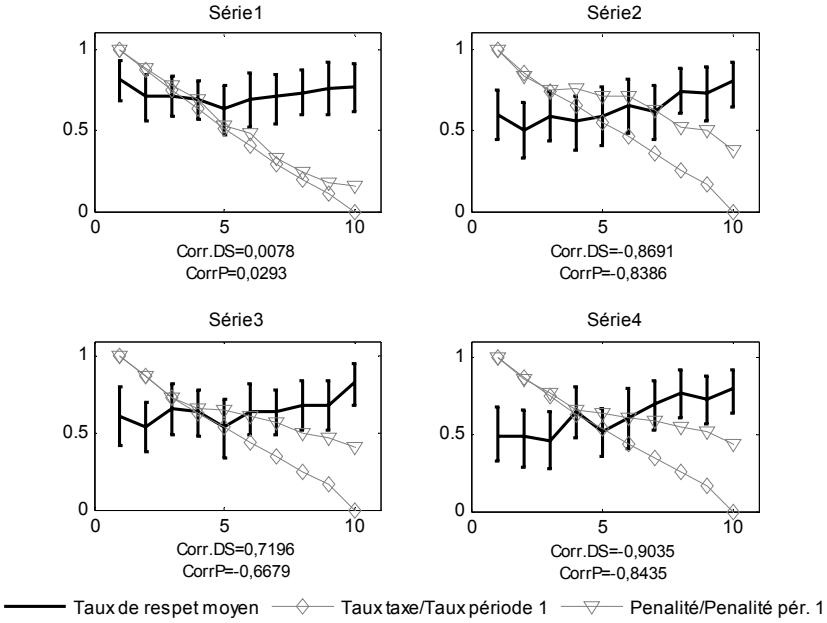


Figure 3.24 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement TPFU

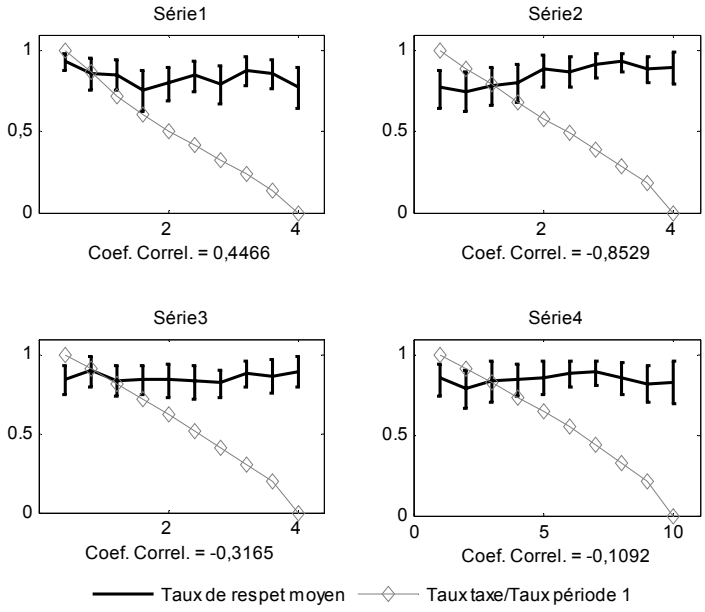


Figure 3.25 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement IMFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

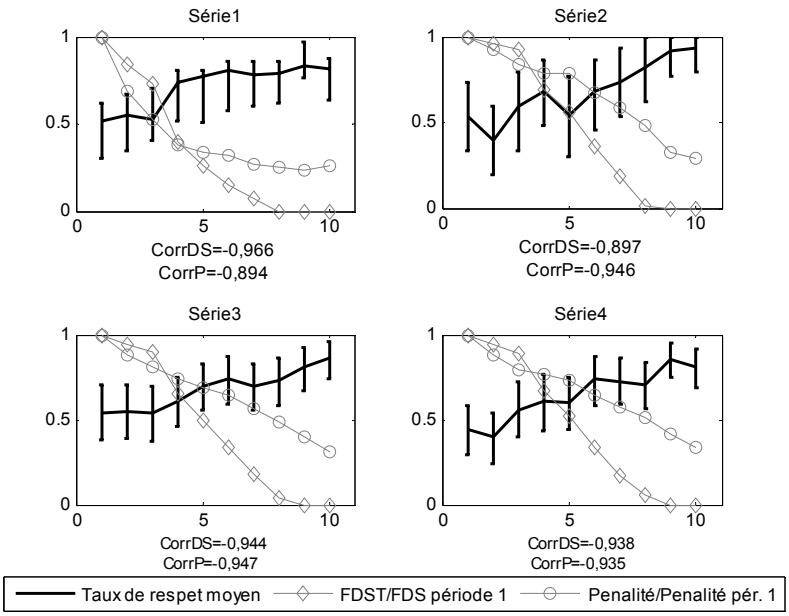


Figure 3.26 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement TPNFUO

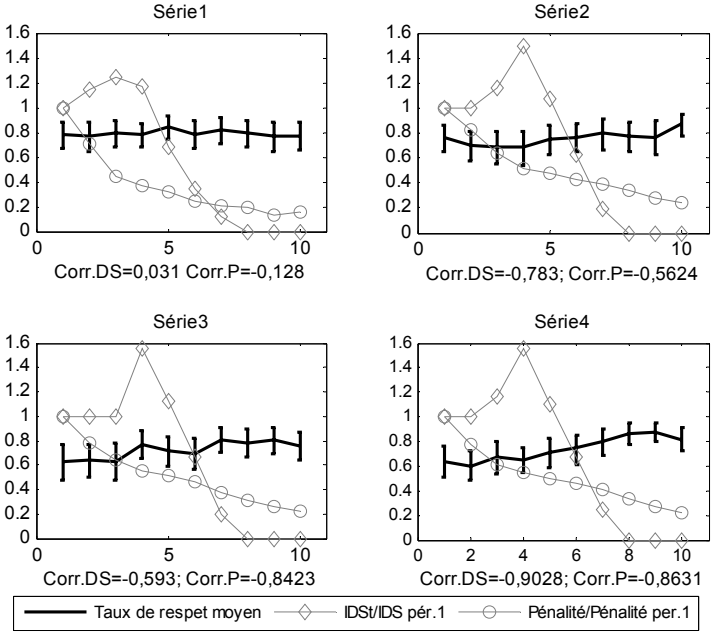


Figure 3.27 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

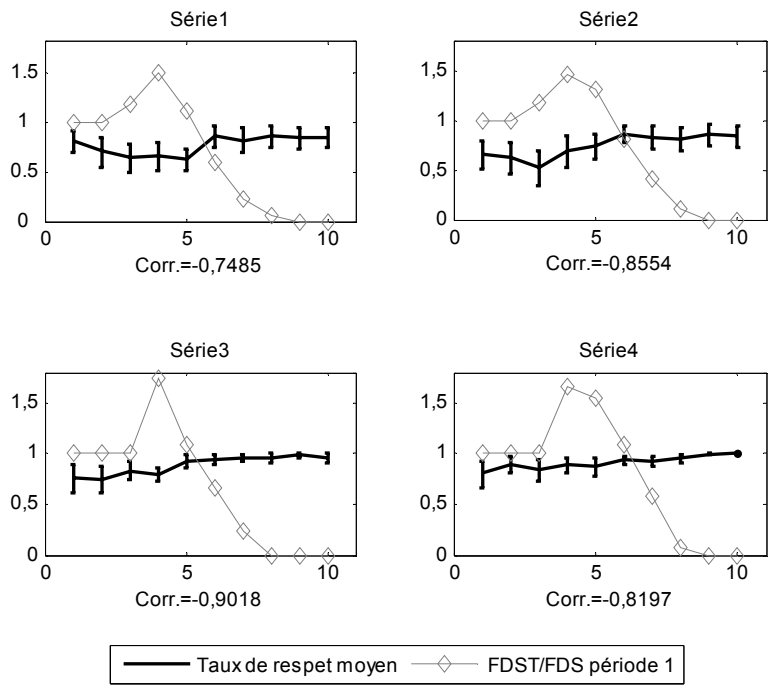


Figure 3.28 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement IMNFU

OBSERVATION 3.16 : La pénalité collective des traitements IMFU et IMNFU est plus efficace pour contrôler la fraude que l'audit aléatoire avec une pénalité forfaitaire des traitements TPFU et TPNFU.

Nous comparons l'efficacité des mécanismes pour contrôler la fraude des instruments flexibles séparément du cas des instruments fixes. Nous effectuons cette séparation à cause des « seuils de paiement » présentes dans les instruments fixes et qui peuvent avoir un impact sur la fraude et ainsi biaiser notre analyse.

Les Figure 3.29a et 3.29b (page 147) montrent les différences significatives dans le taux de respect observé sous chaque mécanisme. Tandis que dans le cas flexible (Figure 3.29a) il n'y a pas de différences significatives les trois dernières périodes, dans le cas fixe (Figure 3.29b) il n'y en a pas juste dans la première période. Nous n'avançons pas davantage dans l'analyse des possibles raisons à cette observation (cf. Note en bas de page numéro 17).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

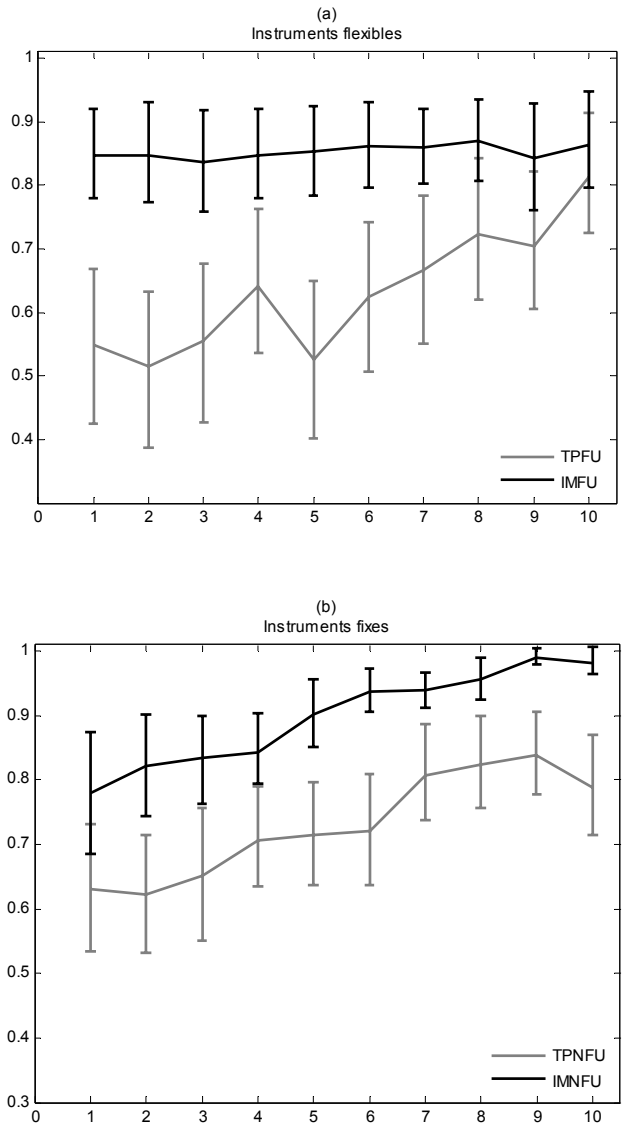


Figure 3.29 : Comparaison des taux de respect moyens : audit aléatoire versus pénalité collective

Suite à l'observation 3.16, nous nous attendons à que la fraude ne soit pas une bonne explication de la mauvaise performance relative des instruments mixtes des traitements IMFU et IMNFU.

Pour évaluer l'impact de la fraude sur la performance des instruments, nous allons comparer les prélèvements moyens avec la « prédiction X », qui se construit de la façon suivante :

(3. 3) $$y_x^t = \gamma^t \cdot y_m^t\left(S^t, \tau_m^t\right) + \left(1-\gamma^t\right) \cdot y_m^t\left(S^t, 0\right)$$

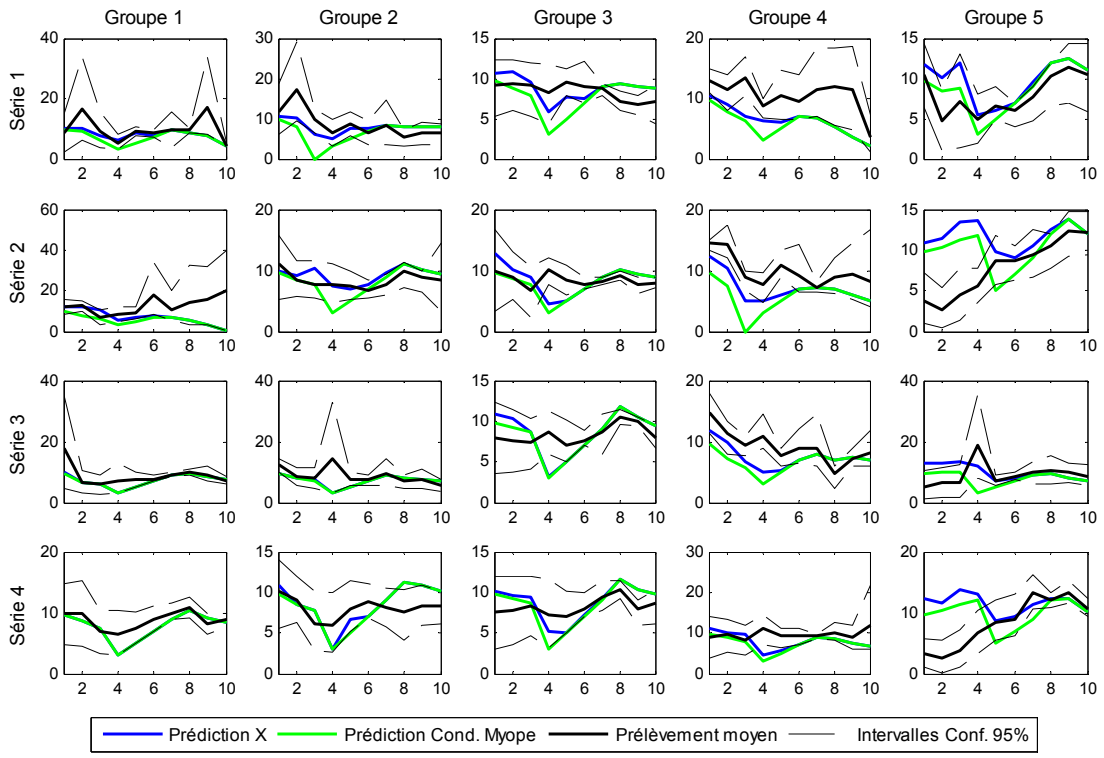
CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Où t indique la période ; γ^t est le taux de respect moyen ; $y_m^t\left(S^t,\tau_m^t\right)$ est le prélèvement individuel pour une population d'agents myopes étant donné le stock d'unités disponibles $\left(S^t\right)$ et le taux de la taxe $\left(\tau_m^t\right)$; $y_m^t\left(S^t,0\right)$ est le prélèvement individuel pour une population d'agents myopes dans une situation de laissez faire étant donné le stock d'unités disponibles $\left(S^t\right)$.

La « prédiction X » suppose l'absence de tricheurs irrationnels : ceux qui trichent déclarent zéro et prélèvent dans le compte de façon myope et comme s'il n'y avait pas de taxes ; ceux qui ne trichent pas suivent la prédiction conditionnelle myope. Ainsi, s'il n'y a pas de fraude, la prédiction X coïncide avec cette dernière.

OBSERVATION 3.17 : La fraude n'explique pas l'inefficacité de l'instrument mixte du traitement IMNFU et elle ne l'explique que partiellement dans le traitement IMFU.

La « prédiction X », en bleu dans la Figure 3.30

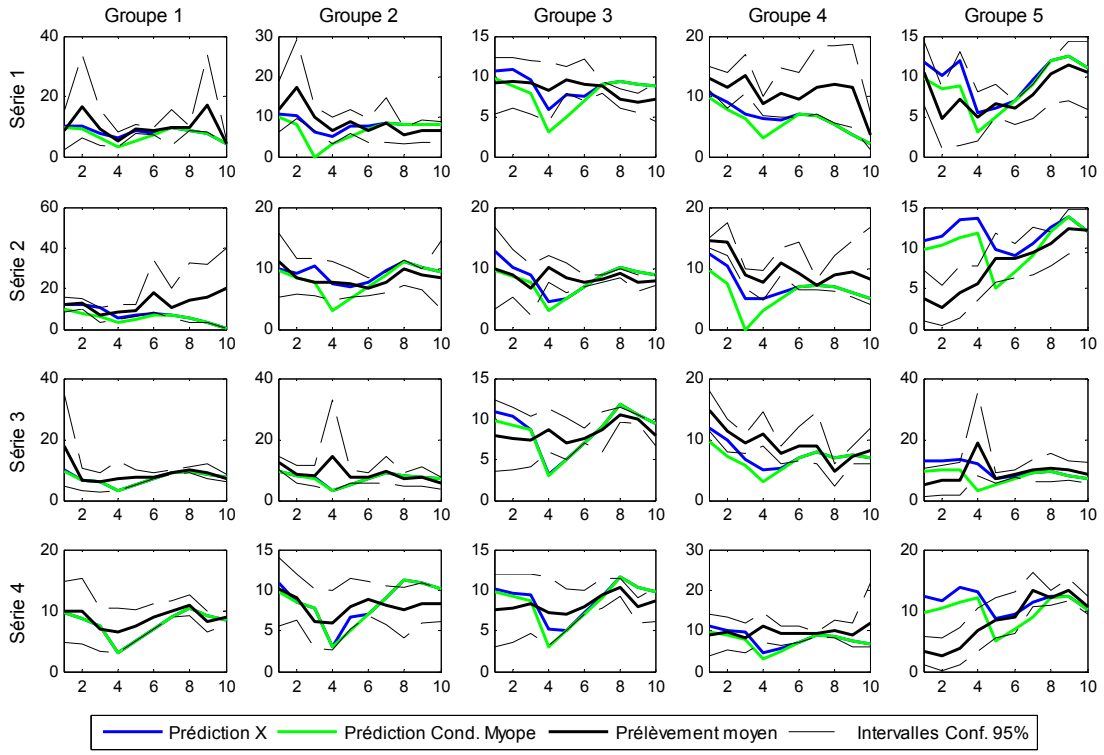


CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 3.30, n'ajuste pas le comportement observé. En général, le taux de respect étant très élevé, la prédiction X se confond avec la prédiction conditionnelle myope (sauf dans la période 4) excepté quelques cas : groupe 2 série 1 et 2, groupe 3 série 1, et groupe 4 toutes séries. Par contre, dans la Figure 3.31, elle ajuste assez bien le comportement observé, elle n'est pas significativement différente des prélèvements moyens sauf pour la première série des groupes 1, 4 et 6. Il faut remarquer que, dans la Figure 3.31, la prédiction X suit de près la prédiction conditionnelle en raison du taux élevé de respect observé. Les principales différences entre ces deux prédictions s'observent dans les premières périodes de l'horizon temporel, ce qui laisse supposer la présence d'autres phénomènes que la fraude pour expliquer les écarts entre les prélèvements moyens et la prédiction.

OBSERVATION 3.18 : La fraude est à la base de l'inefficacité des instruments des traitements TPFU, TPNFUO et TPNFU.

La prédiction X ajuste bien le comportement observé dans les traitements TPFU (Figure 3.32, page 150), TPNFUO (Figure 3.33, page 150) et TPNFU (Figure 3.34, page 151) pour tous les groupes sauf quelques exceptions : le groupe 2 dans le traitement TPFU, le groupe 6 du traitement TPNFUO, et la première série des groupes 1, 5 et 6 du traitement TPNFU.



CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 3.30 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement IMNFU

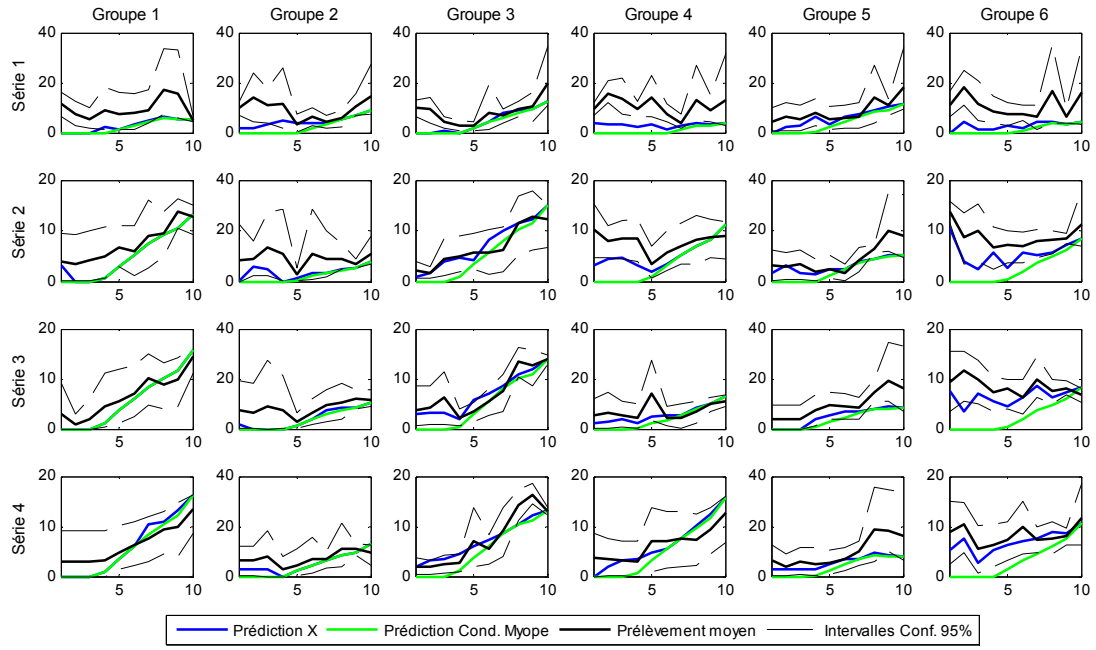


Figure 3.31 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement IMFU

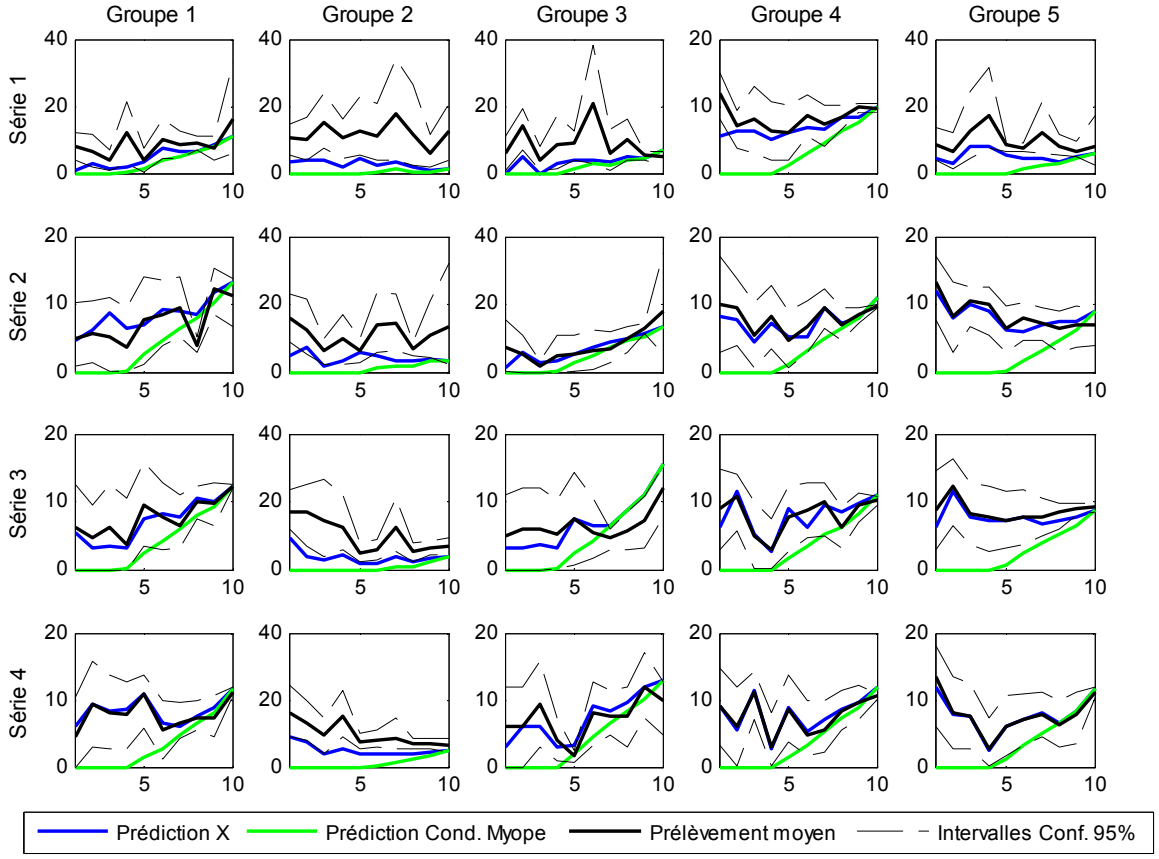


Figure 3.32 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement TPFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

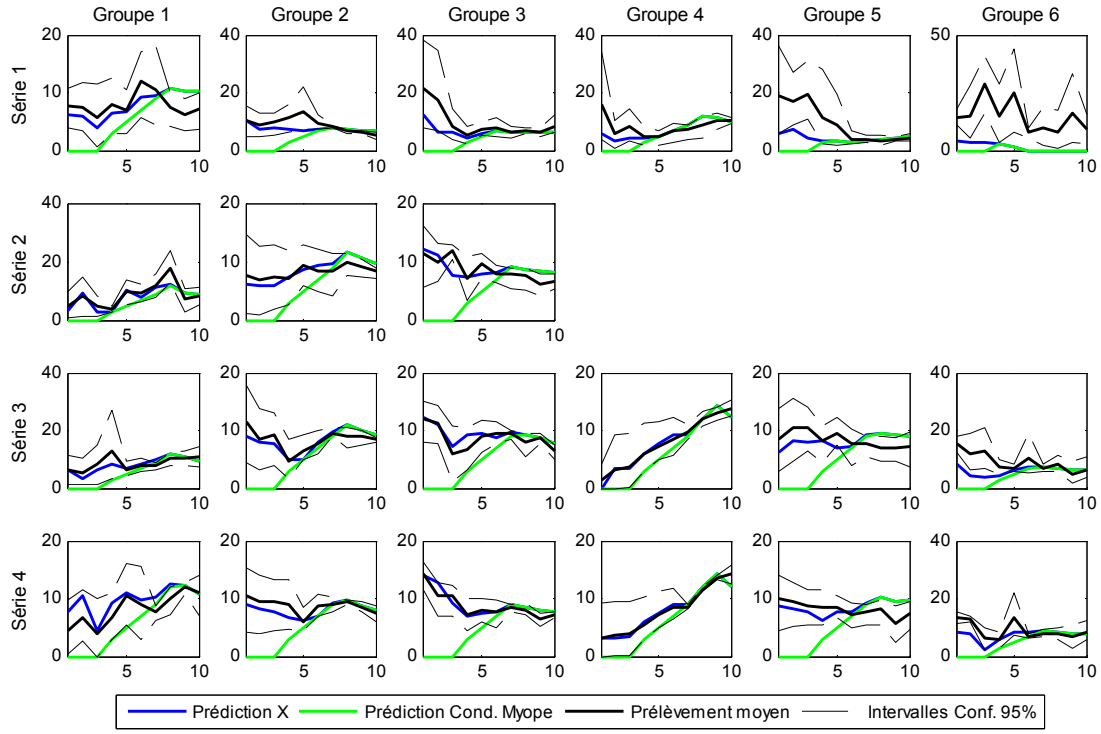


Figure 3.33 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement TPNFUO

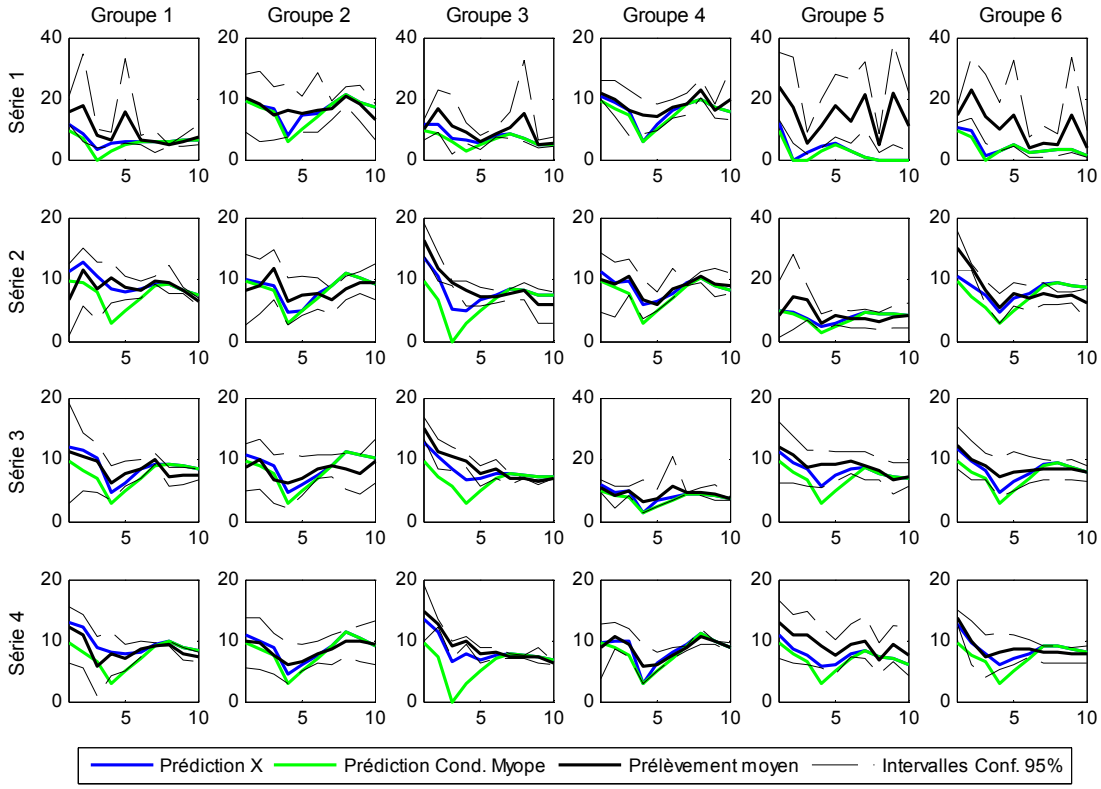


Figure 3.34 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.5 Comparaison de l'efficience et l'efficacité des instruments : cohérence versus incohérence temporelle

Dans cette sous-section, nous allons nous limiter à comparer l'efficacité et l'efficience de l'ensemble instruments évalués, flexibles et fixes, dans un objectif de hiérarchisation. Tandis que l'efficacité indique dans quelle mesure les prélèvements se sont modifiés par rapport à une situation de laissez faire, comme conséquence de la mise en place d'un instrument, l'efficience mesure, telle qu'elle a été définie dans la sous-section 3.2.1 (page 91), le bien-être atteint par la société par rapport à l'optimum. Dans cette sous-section l'efficience nette consiste à l'efficience calculée après la déduction des taxes et pénalités.

OBSERVATION 3.19 : La taxe ambiante flexible du traitement TAFU et la taxe/subvention de premier rang du traitement TPNFUO sont les instruments les plus efficaces pour rapprocher la trajectoire de prélèvement vers l'optimum.

Dans le Tableau 3.27, nous avons classé les instruments selon leur efficacité pour rapprocher la trajectoire optimale et selon la DQM par rapport aux prédictions conditionnelles myope et optimale. A partir des tests de comparaison de moyennes par couples d'instruments, nous pouvons classer les instruments en trois groupes : (i) le groupe 1 avec la taxe ambiante flexible (TAFU) et la taxe/subvention de premier rang (TPNFUO) ; (ii) le deuxième groupe avec les instruments des traitements IMFU, IMNFU, TPNFU et TPFU ; (iii) en dernière position la taxe ambiante fixe (TANFU). Les différences d'efficacité intragroupe ne sont pas significatives, contrairement à la comparaison des efficacités intergroupes. Cependant, l'application d'une procédure de comparaison multiple ne révèle pas des différences significatives entre les groupes au seuil de 95% de significativité, il n'y a des différences qu'entre les deux taxes ambiantes (Figure 3.35a). Par contre, à 10% de significativité (Figure 3.35b), le groupe 1 est significativement plus efficace que le groupe le moins performant, c'est-à-dire, la taxe ambiante fixe.

Le classement selon l'efficacité coïncide, généralement, avec le classement selon la DQM par rapport à la prédiction conditionnelle optimum. Même si la taxe ambiante fixe (TANFU) est au milieu du classement selon la DQM par rapport aux prédictions conditionnelles, elle est la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

moins performante de tous les instruments. Cela est dû au fait que l'indicateur d'efficacité prend en compte l'écart entre les prédictions conditionnelles et la trajectoire optimale.

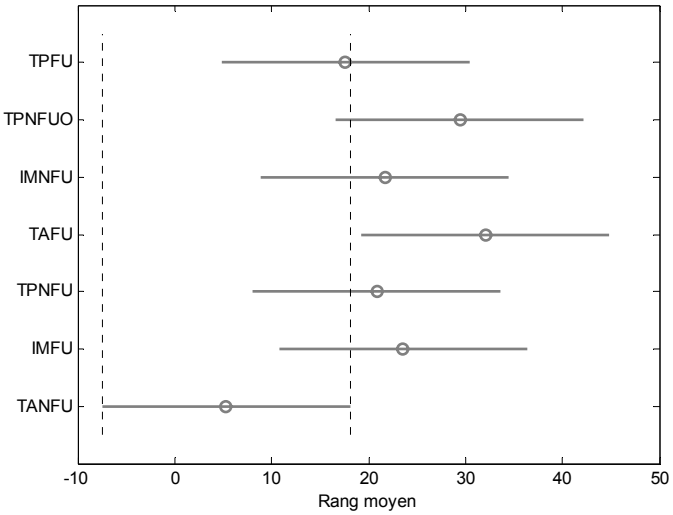
Classement	DQM Myope	DQM Optimum	Efficacité
TAFU	3	1	1
TPNFUO	5	2	
IMFU	6	5	2
IMNFU	1	3	
TPNFU	2	7	
TPFU	7	6	
TANFU	4	4	3

Instruments de premier rang

Instruments de second rang

Tableau 3.27 : Classement des instruments par efficacité et DQM moyennes

(a)



(b)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

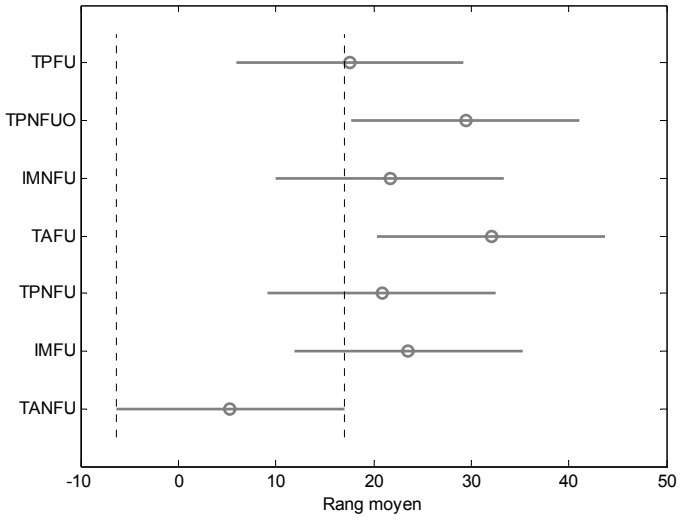


Figure 3.35 : Comparaison multiple d'efficacité ; instruments de Premier Rang vs. Deuxième Rang

OBSERVATION 3.20 : A partir des efficiences brutes et nettes on observe que :

- la taxe ambiante de premier rang est l'instrument le plus efficient en termes bruts et la taxe/subvention de second rang est le plus efficient en termes nets ;
- à exception de la taxe ambiante de premier rang, tous les instruments atteignent un niveau semblable d'efficience brute mais différent en termes de l'efficience nette des taxes et pénalités.

En prenant compte de l'apprentissage observé avec la répétition du jeu, nous avons calculé les efficiences moyennes, brutes et nettes, à partir des données des deux dernières séries (Tableau 3.28). Les tests de comparaison des moyennes permettent de différencier 3 groupes d'instruments en fonction de l'efficience nette (Tableau 3.28). Les différences intergroupes sont significatives, mais il n'y a pas des différences significatives intragroupe. Les instruments fixes sont classés en tête, dans les groupes 1 et 2 (Tableau 3.28), sauf la taxe ambiante de second rang qui se trouve dans le troisième et dernier groupe (ceci n'est pas étonnant d'après son efficience prédite). Dans tous les instruments fixes (hors la taxe ambiante), des taxes sont payées si les prélèvements déclarés dépassent les « seuils de paiement », dans le cas contraire une subvention égale aux montants de la taxe est allouée au préleveur. Ces subventions permettent d'augmenter l'efficience nette des instruments. Ainsi, le coût d'améliorer le bien-être par rapport au laissez faire n'est qu'en partie supporté par les préleveurs.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

		Moyenne Global	Prédiction Myope	Classement Efficience nette
Traitements - Efficience brute (Efficience nette)	LFz0	50%	52%	-
	TPNFU	61% (24%)	79% (63%)	1
	TPNFUO	64% (2%)	100% (100%)	2
	IMNFU	59% (0%)	79% (63%)	
	TPFU	56% (-22%)	100% (49%)	
	TANFU	63% (-79%)	82% (-20%)	3
	IMFU	61% (-108%)	100% (49%)	
	TAFU	78% (-141%)	100% (100%)	

Tableau 3.28 : Efficience moyenne brute et nette normalisées ; tous les traitements

Bien que la taxe ambiante flexible soit la plus efficiente en termes bruts, son efficience nette est la plus faible. Elle augmente le bien-être de 56% par rapport au laissez faire, mais le coût de cette amélioration est extrêmement élevé au point d'être inacceptable (efficience nette négative de -141%). Ceci contraste avec la prédiction théorique qui la désigne comme le seul instrument flexible à décharger les préleveurs du coût de l'amélioration du bien-être (efficience nette de 100%), mais à condition qu'ils se coordonnent sur la trajectoire optimale. Le problème de coordination s'avère donc un handicap très important, perceptible aussi par la performance de la taxe ambiante fixe.

Dans les autres instruments flexibles, selon la prédiction myope le coût de l'amélioration du bien-être est entièrement supporté par les préleveurs ; une fois l'instrument instauré, ils sont dans une situation légèrement pire par rapport au laissez faire (49% d'efficience nette avec la politique contre 50% au laissez faire). Ceci rend ces instruments difficilement acceptables dès le départ. En plus, l'amélioration du bien-être observée sous ces instruments flexibles n'est pas significativement différente (p-valeur = 0,397 ; test de Friedman) à celle des instruments fixes (hors la taxe ambiante fixe), et l'efficience nette est extrêmement basse.

En conclusion, la comparaison des efficiences des instruments des traitements TPFU, IMFU, TPNFUO, TPNFU et IMNFU suggère que les instruments incitatifs sont limités dans leur capacité de façonner les trajectoires de prélèvement pour atteindre à un niveau supérieur du

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

bien-être par rapport à la situation de laissez faire. Par exemple, les instruments fixes des traitements TPNFUO et TPNFU produisent des niveau de bien-être similaires en termes bruts, mais l'efficience nette fortement amoindrie de l'instrument TPNFUO par rapport au TPNFU semble indiquer que les sujets préfèrent soit payer des taxes plus élevées soit frauder et éventuellement être pénalisés plutôt que de modifier fortement leurs trajectoires de prélèvement. Ceci est aussi valable pour les instruments flexibles. L'observation 3.17 (page 148) en indiquant que la fraude n'explique pas le comportement dans les traitements IMFU et IMNFU, soutient aussi notre conclusion. Donc, les différences entre les efficiences nettes des couples TPFU/IMFU et TPNFU/IMNFU doit être attribué à que les préleveurs ont préféré payer plus des taxes à réduire suffisamment leurs prélèvements.

Bref, de cette analyse découle que lorsque l'IDS est trop importante, les instruments incitatifs peinent à modifier les comportements individuels pour atteindre une amélioration du bien-être, et ceci même au péril financier des préleveurs. Cela indique que les instruments trop contraignants sont contestés au point d'être si possible éludés ou ignorés dans d'autres cas.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous étudions la régulation de l'appropriation d'une ressource en propriété commune (CPR) renouvelable. Nous évaluons expérimentalement différents instruments incitatifs qu'un régulateur bienveillant pourrait mettre en place pour corriger les externalités générés dans l'exploitation privée de la CPR. En caractérisant la ressource par un stock disponible, les externalités produites dans l'appropriation ont un caractère dynamique car les effets économiques des prélèvements vont s'étaler dans le futur. Or la dépendance temporelle des décisions exige des instruments correctifs flexibles afin de refléter, à chaque instant, la valeur des externalités et induire ainsi la trajectoire de premier rang. Les instruments à paramètres flexibles sont temporellement cohérents car ils introduisent les incitations correctes pour rester sur le sentier de premier rang à chaque période. Néanmoins, si des contraintes institutionnelles empêchent le régulateur de modifier périodiquement les taux des taxes ou de les fixer au niveau du premier rang, des instruments à paramètres fixes et/ou non optimaux sont envisageables (*cf.* Chapitre 2).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

En reproduisant le protocole d'expérience de Herr et al. (1997), nous avons contrasté l'efficacité et l'efficience relative des instruments décrits dans le *Chapitre* 2 de cette thèse. Nous comparons donc trois types d'instruments dans leur version optimale (premier rang) et temporellement cohérente et dans leur version non optimale et temporellement incohérente : (i) Taxe Pigouvienne avec audit aléatoire des déclarations, (ii) Taxe Ambiante, et (iii) Instrument Mixte (qui peut être interprété comme une combinaison des deux précédents proposé par Kritikos (2004)).

La taxe pigouvienne et l'instrument mixte consistent en une taxe unitaire dont la base correspond aux prélèvements déclarés par les agents. Pour garder leur puissance incitative intacte, les deux instruments nécessitent un mécanisme pour assurer l'exactitude des déclarations de prélèvement ; c'est dans ce mécanisme que réside la différence entre la taxe pigouvienne et l'instrument mixte. Dans la taxe pigouvienne ici évaluée, la probabilité d'audit est constante ; si lors du contrôle il s'avère qu'il y a eu de la fraude, le préleveur doit s'acquitter de sa dette et d'une pénalité forfaitaire suffisamment élevée pour décourager la fraude des agents neutres vis-à-vis du risque. Dans l'instrument mixte, les fraudeurs sont pénalisés avec certitude, le montant de la pénalité collective dépendant de la gravité de la faute du groupe. En cas de fraude constatée lors des contrôles individuels, le fraudeur doit s'acquitter de sa dette en plus d'une pénalité collective ; par contre, s'il n'a pas eu de fraude de sa part, le préleveur est libéré du paiement de la pénalité collective.

Contrairement aux instruments basés sur les décisions individuelles, la taxe ambiante ne nécessite pas de déclaration de prélèvement car un indicateur de l'état de la ressource est la base du mécanisme (Segerson, 1988). Une taxe ambiante conçue pour corriger des externalités dynamiques n'exige pas uniquement que le taux de la taxe varie pour refléter ces externalités, mais la cible doit elle aussi changer dans le temps. La version temporellement incohérente de la taxe ambiante où les cibles sont fixes pourrait être un instrument extrêmement inefficient et inefficace si les cibles ne sont pas respectées dés la première période.

Le design de l'expérience présentée dans ce chapitre permet de comparer l'efficacité et l'efficience de ces instruments incitatifs pour corriger des externalités dynamiques. Il est certes incomplet pour donner évaluer de forme précise l'impact de certains facteurs sur le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

comportement, mais il permet pourtant d'évaluer et tirer des conclusions sur un certain nombre de points :

1- Myopie versus prévoyance dans l'exploitation de la ressource : populations mixte ou homogènes ?
2- Effet des externalités statiques sur l'efficacité de l'exploitation d'une ressource.
3- Efficacité et efficience relative des instruments flexibles.
4- Efficacité et efficience relative des instruments fixes.
5- Combattre la fraude : Pénalités individuelles versus Pénalités collectives.

Dans tous les traitements où les stratégies myope et rationnelle sont clairement différenciées, les données sont mieux ajustées par le comportement myope. Ce résultat n'est pas étonnant car les prélèvements myopes sont, côté technique, les plus faciles à calculer et, côté comportemental, cette stratégie apporte une assurance totale contre les passagers clandestins.

Dans les traitements de laissez faire, en particulier LFz0, la stratégie myope explique très bien les prélèvements observés. Il n'est pas possible de discriminer si la population est constituée à 100% par des préleveurs ou si 40% des préleveurs sont prévoyants. La prise en compte des externalités statiques dans l'appropriation de la ressource implique des prélèvements sensiblement inférieurs pour chaque niveau de stock disponible. Néanmoins, les prélèvements moyens observés dans le traitement LFz sont significativement et systématiquement supérieurs aux prédictions. En plus, ils ne sont pas différents des prélèvements du traitement LFz0, dont uniquement des externalités dynamiques sont générées. Ceci est très inquiétant car cela implique que, même dans le cas où la surexploitation de la ressource génère des coûts économiques immédiats, les préleveurs ne se préoccupent pas d'incorporer cette caractéristique de la ressource dans leur décision, même en ce qui les concerne. D'un autre côté, ce résultat peut être un effet du protocole, la question doit être creusée.

Les instruments flexibles sont attractifs dans un contexte dynamique car ils sont théoriquement les plus efficaces. La taxe ambiante flexible est l'instrument le plus efficace, de tous les instruments évalués, pour rapprocher les prélèvements individuels vers l'optimum. Elle arrive à réduire les prélèvements des premières périodes de l'horizon temporel, beaucoup plus que les deux autres instruments flexibles, mais pas suffisamment pour se confondre avec la prédiction théorique. En conséquence, c'est l'instrument le plus efficient en termes bruts

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

mais le moins efficient lors que le paiement des taxes est déduit de la richesse cumulée, car la pénalité collective a été souvent imposée produisant des pertes généralisées.

Deux facteurs expliquent la meilleure performance de la taxe ambiante flexible par rapport à la taxe pigouvienne : (i) l'élimination de la fraude *de facto* et (ii) le point focal pour les prélèvements individuels fourni par la cible imposée de manière exogène par le régulateur à chaque période. La comparaison des performances de la taxe ambiante flexible (TAFU), la taxe pigouvienne flexible (TPFU) et l'instrument mixte flexible permet de classer l'impact de chacun de ces deux facteurs. La taxe pigouvienne et l'instrument mixte sont des instruments similaires à exception du mécanisme mis en place pour combattre la fraude. La pénalité collective s'avère plus efficace que l'audit aléatoire au point que la fraude ne permet pas d'expliquer le comportement dans le traitement IMFU. Néanmoins, la réduction de la fraude ne se traduit pas dans une amélioration de l'efficacité (par rapport à la taxe pigouvienne) suffisante pour être significative. En plus, la taxe ambiante s'est montrée significativement plus efficace que l'instrument mixte. Par conséquent, pour l'efficacité des instruments, les cibles exogènes jouent un rôle crucial étant un point focal des prélèvements individuels.

L'attractivité des instruments aux paramètres fixes demeure du fait de pouvoir améliorer, au moins partiellement, l'efficacité de l'exploitation de la ressource avec de coûts d'administration et de mise en place réduits pour l'agence régulatrice. En plus, avec l'incorporation d'une subvention pour des prélèvements inférieurs ou égaux à une cible donnée, la taxe pigouvienne et l'instrument mixte fixes peuvent être de premier rang (*cf.* Chapitre 2), si le taux de la taxe unitaire est suffisamment élevé, et réduire l'impact de la politique sur le bien-être des préleveurs. Mais l'inconvénient des instruments fixes réside dans leur impossibilité à s'adapter aux déviations.

La taxe/subvention fixe de premier rang du traitement TPNFUO est l'instrument fixe le plus efficace pour approcher les prélèvements individuels vers l'optimum. Néanmoins, l'amélioration du bien-être mesurée par l'efficience brute n'est pas significativement supérieure aux autres instruments fixes (l'efficience sont toutes similaires). La taxe/subvention de second rang du traitement TPNFU est la plus efficiente en termes nets et la taxe ambiante fixe la moins efficiente. A la lumière des résultats des instruments flexibles, nous attendions une meilleure performance de la taxe ambiante fixe. Des failles dans la coordination sur l'équilibre et des erreurs doivent être à l'origine de cette mauvaise

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

performance. Le problème de coordination est aggravé par l'inflexibilité des cibles de cet instrument car les prélèvements excessifs du passé doivent être contrebalancés avec des réductions des prélèvements futurs qui peuvent être impraticables (car des prélèvements négatifs ne sont pas possibles).

L'absence de différences significatives entre la taxe/subvention fixe de premier rang et les instruments fixes de second rang des traitements TPNFU et IMNFU met en avant le rôle des fausses déclarations dans la dégradation de la performance des instruments très contraignants. Ceci a été également souligné par les résultats des instruments flexibles. Pour les trois instruments flexibles, les déviations plus importantes s'observent pendant les premières périodes de l'horizon temporel, lorsque « l'intensité du dilemme social » (IDS) est au plus haut. Tandis que l'effet du passager clandestin peut expliquer les déviations observées sous la taxe ambiante dans la deuxième moitié de l'horizon temporel, ce n'est que l'IDS qui peut le faire pour les trois premières périodes quand les prélèvements prédits sont nuls. En plus, dans l'instrument mixte où le passager clandestin n'est pas possible et la fraude une stratégie irrationnelle, les mêmes déviations sont observables.

En réduisant le taux de la taxe unitaire dans le traitement TPNFU et IMNFU, nous avons voulu évaluer la puissance prédictive de la stratégie myope lorsque l'IDS est atténuée. La distance entre la prédiction myope sous l'instrument et en laissez-faire a été réduite significativement dans les traitements TPNFU et IMNFU. La taxe pigouvienne à paramètres fixes non optimale mise en place dans le traitement TPNFU a été complètement ignorée par les sujets : les prélèvements moyens ne sont pas significativement différents de ceux observés dans le traitement *laissez faire*. L'explication serait la fraude, car pour l'instrument mixte à paramètres fixes du traitement IMNFU, les prélèvements moyens suivent la stratégie myope sauf pour les périodes 4 et 5 quand l'IDS augmente fortement (la stratégie myope se confond avec la prédiction inconditionnelle optimale). Donc des instruments incitatifs (armés contre la fraude) réussissent à modifier les prélèvements individuels vers des cibles moins contraignantes. Mais tout semble indiquer que dès que l'IDS dépasse un certain niveau, les instruments sont éludés (par la fraude) ou ignorés/réfutés (au péril financier des préleveurs).

Nos résultats ne mettent pas en évidence une supériorité des instruments flexibles ni en termes d'efficience ni en termes d'efficacité, sauf pour la taxe ambiante flexible. Cela s'explique par un rejet de la part des sujets des instruments trop contraignants. Donc nous ne pouvons pas, à

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

partir de notre design expérimental, conclure sur des avantages éventuels de la flexibilité : il aurait fallu évaluer des instruments flexibles non optimaux. Les instruments les plus efficaces sont la taxe ambiante flexible (TAFU) et la taxe pigouvienne fixe premier rang (TPNFUO). Ceci semble indiquer l'importance des cibles exogènes comme point focal.

En conclusion nos résultats permettent de donner quelques recommandations pour le design d'instruments incitatifs destinés à gérer les prélèvements. Premièrement, quand les prélèvements produisent de graves externalités et quand les comportements doivent être modifiés de façon assez importante comme cela pourrait être le cas dans des situations critiques (épisode d'intrusion généralisée d'eau de mer dans un aquifère), les instruments incitatifs évalués ne se sont pas montrés totalement efficaces. Lorsque les instruments sont trop contraignants ils sont si possible éludés (par la fraude) ou sinon ignorés (les préleveurs préfèrent payer des taxes ou être pénalisé à modifier leur comportement). Deuxièmement, l'indication aux préleveurs des « cibles de prélèvement » (accompagnés d'une subvention) pour chaque période a un effet fortement positif sur l'efficacité des instruments incitatifs mais aussi sur l'efficience nette, notamment pour les instruments basés sur les prélèvements individuels (taxe/subvention pigouvienne et instrument mixte fixes). Troisièmement, les instruments basés uniquement sur les prélèvements totaux ne sont pas acceptables car les problèmes de coordination produisent de pertes très importantes (la taxe ambiante). Finalement, la flexibilité des instruments s'avère un atout non indispensable.

En bref, à partir de nos résultats, nous recommandons un instrument incitatif « non optimal » combinant une taxe/subvention pigouvienne, fixe ou flexible, secondée par un mécanisme de prévention de la fraude avec une probabilité de détection très élevée. Notons toutefois que cet instrument ne peut pas être la seule politique mise en place pour gérer les prélèvements, notamment si des événements catastrophiques sont à craindre.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 4

Classification du comportement individuel à partir des données expérimentales et simulations pour la construction des scénarios de gestion des nappes

4.1 Introduction

Afin de caractériser le comportement des sujets et d'en déduire leurs « règles de décision », nous consacrons ce chapitre à l'analyse statistique des données du traitement laissez faire (LFz0). Nous adoptons dans ce chapitre une démarche exploratoire pour essayer de modéliser (économétriquement) le comportement observé. Le premier objectif de ce chapitre est d'explorer l'hypothèse de rationalité limitée dans la prise de décision, dans le cadre du jeu dynamique étudié. Dans les chapitres 2 et 3, nous avons mis en avant un paramètre de préférence, *la préférence pour le présent*, afin d'expliquer l'existence possible d'une population mixte : des préleveurs myopes et des préleveurs rationnels qui interagissent au sein de la même communauté. Ici l'accent sera mis sur la rationalité limitée des agents au sens où ils appliquent des « règles de décision simplificatrices[1] » parmi un ensemble de règles possibles qui se distinguent éventuellement les lois de commande décrites dans le chapitre 2. Ces règles de décision doivent prendre en compte tous les facteurs pertinents qui affectent le comportement des agents. Le deuxième objectif du chapitre est de s'interroger sur l'exploitation des données expérimentales pour calibrer des modèles d'aide à la décision. De la même façon que Harrison et al (1996) pour le cas des enquêtes d'évaluation contingente, nous pensons que les observations générées en laboratoire peuvent être exportées vers des contextes plus généraux grâce à des traitements économétriques adaptés.

La modélisation du comportement des agents économiques dans le cadre du paradigme dominant considère que ces derniers sont dotés de capacités illimitées de perception et de traitement de l'information. Ce postulat de rationalité illimitée a dominé la modélisation économique pendant des décennies, mais cette dominance tend à se relâcher. Quatre raisons fondamentales sont données par Conlisk (1996) pour incorporer la rationalité limitée dans les

[1] En anglais *« rules of thumb »*.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

modèles de comportement économique : *(i)* il existe une abondante littérature empirique sur la pertinence d'une telle hypothèse ; *(ii)* les modèles de rationalité limitée se sont montrés très performants dans plusieurs applications ; *(iii)* les justifications standard pour supposer une rationalité illimitée des agents ne sont pas convaincantes ; *(iv)* la réflexion nécessaire à la prise de décision économique est une activité coûteuse et une bonne pratique de l'économie demande de considérer tous les coûts. Les prédictions du comportement individuel et du marché peuvent différer de façon radicale entre les modèles selon que les agents jouissent d'une rationalité illimitée, limitée ou soient complètement irrationnels. Ceci est d'une importance majeure, notamment si les modèles sont conçus pour aider à la prise de décisions.

Les phénomènes non expliqués par les théories adhérant au paradigme néoclassique signalent que la considération des facteurs comme le coût de la réflexion et l'expérience est très importante. Ces problèmes trouvés dans la théorie standard donnent aussi une piste pour les résoudre. Ainsi, plusieurs modèles ont été développés à ce propos, avec différentes « formes de rationalité limitée ». Il y a des modèles qui supposent que les agents avec une rationalité incomplète réalisent des recherches sur toutes les décisions possibles d'une façon moins exhaustive par rapport au cas de rationalité complète. D'autres modèles, préconisés notamment par les psychologues et les scientifiques cognitifs, supposent que les agents prennent leurs décisions économiques en suivant des « règles de décision simplificatrices » (désormais RDS) choisies parmi un pool prédéfini. Les modèles évolutionnistes, avec la « dynamique de réplication », vont encore plus loin dans l'irrationalité des individus, en supposant qu'ils sont génétiquement constitués pour ne jouer qu'une seule stratégie face à une décision (*cf.* Conlisk (1996) pour une revue de la littérature citée dans ce paragraphe).

Récemment une nouvelle littérature s'est développée dans l'objectif d'identifier le nombre et la nature des règles réellement utilisées par les sujets (Houser et al, 2004 ; El-Gamal et Grether, 1995). L'approche d'El-Gamal et Grether (1995) exige que le nombre maximal de règles présentes dans une population et la forme exacte de chaque règle (avec les valeurs des paramètres) soient indiqués ex-ante par le chercheur. Ceci peut s'avérer très contraignant selon le type de décision étudiée. Ils développent une procédure statistique qui permet de choisir un sous-ensemble de règles parmi l'ensemble de toutes les règles candidates. L'approche de Housser et al (2004) (désormais HKM) est moins contraignante car ils proposent un algorithme bayésien de classification du comportement individuel, capable de faire des inférences sur la nature et le nombre des règles de décision présentes dans une

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

population. Ici, le chercheur n'a qu'à spécifier l'ensemble des variables d'état qui rentreront dans les règles de décision représentées par des fonctions flexibles (polynômes). Ainsi, des variables d'état théoriquement non pertinentes peuvent être considérées dans l'estimation et ce sera à l'information véhiculée par les données utilisées de déterminer l'impact et la pertinence de chaque variable pour expliquer le comportement.

Nous allons adapter l'algorithme de HKM pour l'appliquer à notre problème de décision. Pour cela, il faut modifier le modèle structurel original sur deux points :

(i) incorporer l'interaction stratégique entre les agents. Cette interaction est prise en compte d'une façon très simpliste : nous avons supposé que la rationalité des agents est limitée, donc ils supposent que leurs rivaux vont agir de la même façon qu'eux mêmes.

(ii) adapter l'algorithme aux caractéristiques de l'ensemble de choix de notre protocole expérimental, notamment la continuité des prélèvements $(\in [0,50])$. Nous nous sommes finalement limités au cas de base de l'algorithme, des choix discrets, car les prélèvements choisis par les sujets dans le laboratoire sont des entiers. Donc chaque agent doit choisir à chaque période un prélèvement $j \in \{0,1,....,50\}$.

L'application de cette procédure bayésienne nous permettra de fournir une meilleure description du comportement des agents exploitant une ressource renouvelable en propriété commune. A partir de celle-ci, nous pourrons, premièrement, accéder à des nouvelles pistes pour mieux analyser et comprendre les résultats exposés dans le chapitre 3 de cette thèse. Cette description, qui est par construction validée empiriquement, peut être également utilisée pour réaliser des simulations afin d'apprendre les effets des modifications du contexte. Par exemple, les effets des modifications dans les caractéristiques de la ressource (e.g. la recharge, le stock initial), de l'exploitation (e.g. l'horizon temporel, les externalités dynamiques et statiques) ou de la population de préleveurs (e.g. nombre d'agents, types) peuvent être quantifiés. Egalement, l'impact de différentes politiques publiques (e.g. taxes sur les prélèvements, impôt sur le revenu, le profit ou la richesse) pourrait être évalué. La validité de ces simulations suppose implicitement que le modèle positif fourni demeure inchangé face à la modification de la valeur des paramètres qui ont servi à établir les relations entre observables et inobservables.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les estimations économétriques du comportement observé dans le laboratoire permettent d'élargir l'utilisation des données expérimentales à des contextes plus généraux. Il suffit de réaliser tous les traitements expérimentaux nécessaires à l'identification de l'effet des variables ou des paramètres d'intérêt et ensuite de quantifier l'impact. Cette quantification pourrait être réalisée par l'économétrie traditionnelle dans certains cas (pas dans le nôtre). Néanmoins, la statistique bayésienne apporte une cohérence profonde à la modélisation économétrique. Elle facilite de ce fait la communication des résultats et leur exploitation par les utilisateurs (Paap et Geweke, 2005).

Dans la section 4.2, l'algorithme de classification HKM (Houser, Keane et McCabe, 2004) est présenté : le modèle structurel est développé puis le problème d'inférence statistique est exposé. La section 4.3 est consacrée à la spécification empirique du modèle structurel et de l'algorithme de classification bayésienne utilisé pour notre étude. Dans la section 4.4 le résultat de l'application de l'algorithme de classification est dévoilé et les règles de décision estimées sont caractérisées en termes comportementaux. La section 4.5 est consacrée à l'analyse des résultats de simulations effectuées dans le but d'apprendre les effets de certaines variables de contexte. Ils seront analysés les effets de : la recharge naturelle (sous-section 4.5.1), de la richesse et sa distribution entre les types d'agents (sous-section 4.5.2), et des politiques fiscales (sous-section 4.5.3.2) . L'efficience de différentes taxes unitaires pour gérer les prélèvements est aussi évaluée (Paragraphe 4.5.3.1). La section 4.5 conclut.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.2 Un algorithme de classification de type bayésien : l'algorithme HKM

L'algorithme HKM permet de faire des inférences sur le nombre et la nature des règles de décision présentes dans une population d'individus et sur la probabilité avec laquelle chaque individu utilise ces règles. Chaque règle de décision est modélisée comme une fonction paramétrique flexible (polynôme) sur un ensemble donné de variables d'état considérées comme pertinentes. Le nombre de règles de décision utilisées dans une population est déterminé en appliquant la théorie bayésienne de la décision (*cf.* Geweke, 2003). Même si l'algorithme HKM est applicable dans de nombreux cas, nous limiterons l'analyse au cas de base, celui des choix discrets markoviens en temps discret. La raison principale à ce choix (non simplificateur) est que les prélèvements choisis par les sujets dans le laboratoire sont des entiers. Cela semble indiquer que les sujets ont perçu l'ensemble de choix comme discret et

non continu comme nous l'avons montré dans le chapitre 3. En conséquence, nous adapterons l'algorithme HKM à des décisions individuelles discrètes prises dans le cadre d'un jeu dynamique à temps discret et fini.

4.2.1 Le modèle

La règle de décision optimale est obtenue en appliquant le principe d'optimalité de Bellman (1957). A chaque période *t* du jeu de durée *T,* l'individu $i \in N$ doit choisir un prélèvement y_i^t dans l'ensemble $\{1,...,J\}$. La valeur pour l'individu *i* de choisir l'alternative *j* étant donnée, les variables d'état et les décisions de ses rivaux sont :

$$V_{ij}^t\left(S^t, I_i^t\right) = w_{ij}^t\left(S^t\right) + EV\left(S^{t+1}, I_i^{t+1} \middle| S^t, I_i^t, j, y_{-i}^t\right) \qquad t = 1,...,T \tag{4.1}$$

où, $I_i^{t+1} = h\left(S^t, I_i^t, j, y_{-i}^t\right)$ et $S^{t+1} = g\left(S^t, y^t\right)$ sont les lois markoviennes (éventuellement stochastiques) pour les variables d'état, y_{-i}^t est le vecteur des décisions de la période *t* de tous les joueurs sauf *i*. Le profit de la période courante *t* de l'individu *i* pour le choix *j* est donné par $w_{ij}^t\left(S^t\right)$. Ce profit peut dépendre ou non des décisions courantes prises par les autres joueurs. L'état individuel du sujet *i* pour la période *t*, I_i^t, représente l'ensemble d'information du sujet *i*. Cet ensemble pourrait inclure, par exemple, les décisions et rémunérations passées de l'individu qui dépendent des décisions prises par les autres joueurs, $y_{-i}^\tau \quad \tau = 0,...,t$. Pour faciliter l'exposé, nous distinguons l'état individuel *I* de l'état de l'environnement de décision *S*, qui est commun à tous les joueurs et correspond au stock de ressource disponible. Bien que l'état de l'environnement de décision affecte de manière objective et homogène tous les joueurs, il peut affecter différemment l'état individuel d'un joueur. Le deuxième terme du membre de droite de l'équation (4.1), $EV\left(S^{t+1}, I_i^{t+1} \middle| S^t, I_i^t, j, y_{-i}^t\right)$, est la « composante future » de la fonction de valeur : elle représente la valeur espérée de l'état individuel et de l'état de l'environnement à la période suivante, conditionnellement à l'état actuel et au choix des individus.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Si les lois *h* et *g* sont déterministes et si l'individu *i* peut observer les décisions des autres joueurs à la période *t*, la composante future, *EV(.)*, a une valeur certaine. Au contraire, si les individus ne peuvent pas observer les décisions prises par leurs rivaux, la composante future est incertaine. Dans ce cas, si les individus sont rationnels et connaissent *h(.)* et *g(.)*, $EV\left(S^{t+1}, I_i^{t+1} \middle| S^t, I_i^t, j, y_{-i}^t\right)$ peut être obtenu par programmation dynamique pour chaque état possible. La règle de sélection résultante est que l'agent *i* choisit l'alternative *j** si et seulement si :

$$V_{ij*}^t\left(S^t, I_i^t\right) > V_{ij}^t\left(S^t, I_i^t\right) \quad \forall j \neq j*.$$

Au lieu de supposer que *E*, dans l'équation (4.1), est l'opérateur espérance, la composante future est modélisée comme une fonction paramétrique flexible (polynôme) sur les éléments de l'ensemble d'information des agents I_i^t et sur l'état de l'environnement S^t. A chaque type de préleveur correspond une règle de décision : les paramètres de cette fonction varient entre les différents types notés par *k*. Cette spécification est plus générale car elle incorpore la possibilité que les agents utilisent des règles de décision différentes de la règle rationnelle. Egalement, la possibilité d'une erreur d'optimisation est prise en compte. La composante future pour le type *k* est :

(4.2) $$EV\left(S^{t+1}, I_i^{t+1} \middle| S^t, I_i^t, j, y_{-i}^t\right) = F\left(S^t, I_i^t, j \middle| \pi_k\right) + \upsilon_{ij}^t \qquad k = 1,\ldots,K$$

Notons *F(.)* le polynôme représentant la composante future de la fonction de valeur et π_k le vecteur (fini) des paramètres spécifiques au type *k*. La variable aléatoire υ_{ij}^t représente les erreurs idiosyncrasiques commises en essayant de mettre en application la règle de décision *k*. La distribution des erreurs idiosyncrasiques peut varier entre les types, de sorte que l'erreur d'optimisation peut être plus ou moins importante selon le type considéré. L'écart type des erreurs d'optimisation pour le type *k* est noté par σ_k.

A partir des équations (4.1) et (4.2), la valeur que le sujet *i* du type *k* alloue à l'alternative *j* à la période *t*, est :

(4.3) $$V_{ij}^t\left(S^t, I_i^t \middle| k\right) = w_{ij}^t + F\left(S^t, I_i^t, j \middle| \pi_k\right) + \upsilon_{ij}^t$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

La partie déterministe de la fonction de valeur est écrite de la manière suivante : $\overline{V}_{ij}^{t}\left(S^{t}, I_{i}^{t}|k\right) = w_{ij}^{t} + F\left(S^{t}, I_{i}^{t}, j|\pi_{k}\right)$. En conséquence, la probabilité que l'alternative j soit choisie est croissante en $\overline{V}_{ij}^{t}$.

Ce modèle comporte plusieurs avantages en termes comportementaux. Premièrement, considérer l'erreur d'optimisation comme un bruit implique que la probabilité d'une erreur dans l'application d'une règle de décision est petite quand une alternative est clairement dominante en termes de $\overline{V}_{ij}^{t}$; ceci est très intuitif. En plus, comme le notent HKM (2004), la spécification de l'équation (4.3) est très flexible et par le théorème d'approximation de Weierstrass, elle peut englober un nombre important de cas particuliers. Par exemple, si F est suffisamment flexible, si les π_k sont choisis de façon à ce que $F\left(S^{t}, I_{i}^{t}, j|\pi_{k}\right) \approx EV\left(S^{t+1}, I_{i}^{t+1}|S^{t}, I_{i}^{t}, j, y_{-i}^{t}\right)$ et si $\sigma_k \approx 0$, il est possible d'obtenir une bonne approximation de la fonction de valeur « optimale » (la règle rationnelle). D'autres exemples à remarquer sont : (i) le comportement myope, si les π_k sont égales à zéro et $\sigma_k \approx 0$; (ii) un comportement aléatoire, si les π_k sont égaux à zéro et σ_k est infini. Un dernier avantage de la spécification donnée par l'équation (4.3) est qu'elle n'exige pas que les sujets comprennent quelles sont les variables d'état pertinentes pour prédire la valeur des états futurs. Ainsi, des variables autres que celles mises en avant par la théorie peuvent rentrer dans les règles de décision des agents. Nous avons séparé l'état de l'environnement de décision S^t et de l'individu I_i^t pour expliciter ceci.

4.2.2 L'inférence statistique

Le choix effectué par le sujet i à la période t est noté $y_i^t \in \{0,...J\}$. Les choix effectués par les sujets ainsi que les paiements sont observables par l'économètre, $\{\{\{y_i^t, \{w_{ij}^t\}_{j=1,...,J}\}_{t=1,...,T}\}_{i=1,...,N}\}$. L'objectif est de faire des inférences sur :

(i) l'ordre G du polynôme F et déterminer l'ensemble des variables d'état prises en compte dans le polynôme ;

(ii) le nombre K de règles de décision (types) présentes dans la population ;

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(iii) le vecteur de paramètres π_k, σ_k pour chaque type $k = 1,\ldots, K$;

(iv) les proportions θ_k de sujets de chaque type ;

(v) la probabilité a posteriori $\tau_{i,k}$ que le sujet i soit de type k.

Le problème d'inférence statistique est décomposé en deux étapes. L'étape 1 consiste à réaliser des inférences sur les paramètres $\{\pi_k, \sigma_k, \theta_k\}$ pour $k = 1,\ldots,K$, étant donné K, l'ordre G du polynôme F, l'ensemble des variables d'état retenues et une hypothèse sur la distribution des erreurs d'optimisation, υ_{ij}^t. Bien que le problème d'inférence soit très complexe, les méthodes de simulation[2] développées récemment le rendent facilement accessible (*c.f.* chapitre 3 de Paap et Geweke, 2005). Dans la seconde étape, il faut faire des inférences sur le nombre de types K et l'ordre G du polynôme F. L'approche standard de la théorie de la décision bayésienne est de proposer un éventail de modèles avec différentes valeurs de K et G, et de sélectionner le meilleur modèle sur la base de la vraisemblance marginale. La vraisemblance marginale est une mesure d'ajustement du modèle : elle est basée sur la vraisemblance et favorise la parcimonie des paramètres. Dans un problème de choix discrets, son calcul implique la solution des intégrales de très haute dimension ; ce problème est encore aggravé par la présence de types latents. Les méthodes de simulation récemment développées permettent de faciliter ce calcul.

Si les comparaisons de la vraisemblance marginale facilitent le choix du nombre de types et l'ordre du polynôme, l'utilisation de ce critère pour déterminer les variables d'état à retenir dans le polynôme n'est pas évidente : il n'est pas possible de savoir si une variable d'état occultée est effectivement utilisée ou non par les agents pour prendre leur décision. Des hypothèses d'identification sont dès lors nécessaires. La méthode HKM exige également une hypothèse sur la distribution des erreurs d'optimisation.

Dans la section suivante, nous détaillerons comment ce cadre général est adapté aux données issues de l'expérience présentée dans le chapitre 3.

[2] Markov Chain Monte Carlo (MCMC).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.3 Spécification empirique

Un modèle établit une certaine relation entre des observables et des inobservables. Cette relation peut être ou non déterministe, donc un modèle peut être représenté par $p(y|\omega)$, où, ω est un vecteur d'inobservables et y un vecteur d'observables. En général, on a une certaine connaissance sur ω, représentée par $p(\omega)$, la *distribution a priori*. Formellement, on combine l'a priori, $p(\omega)$, avec la *distribution des observables*, $p(y|\omega)$, pour générer de l'information sur les observables : $p(y) = \int p(\omega)p(y|\omega)d\omega$.

La question de la manière dont l'information sur ω se modifie lorsque y est observé est centrale pour la statistique bayésienne. Ce processus est représenté par la distribution de ω conditionnée à l'observation y^0, usuellement appelée *densité a posteriori,* elle a la forme suivante :

$$p(\omega|y^0) = \frac{p(\omega)p(y^0|\omega)}{p(y^0)}$$

Ceci n'est qu'une représentation formelle, et représenter la densité a posteriori de façon pratique est tout un défi, car les solutions analytiques sont, sauf pour quelques cas, impraticables. Vers la fin des années 1980, avec le développement des méthodes de simulation, cette modélisation a commencé à être utilisée pour l'inférence statistique. Ces algorithmes de simulation s'appellent « méthodes de simulation a posteriori ».

L'algorithme HKM fait appel à « l'échantillonnage à la Gibbs », méthode de simulation basée sur la construction d'une chaine de Markov $\{\omega^{(m)}\}$ dans l'espace $\widetilde{\Omega} \supseteq \Omega$ et avec une densité unique et invariante $p(\omega)$. Après une phase initiale de *burn-in*, la distribution de $\omega^{(m)}$ est, sous certaines conditions, approximativement $p(\omega)$.

Dans cette section, nous décrivons la fonction de vraisemblance, les distributions a priori et la distribution jointe a posteriori des paramètres du modèle, sur laquelle nos inférences se fondent. La spécification de l'algorithme d'échantillonage à la Gibbs est aussi présentée.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.3.1 Les formes fonctionnelles pour les règles de décision

Dans le traitement LFz0, w_{ij}^t est égal au profit $U\left(S^t, y_i^t\right)$ que le sujet *i* obtient après avoir prélevé[3] $y_i^t = j \in \{0,...,50\}$ des S^t unités disponibles dans le compte. Le profit dépend du choix de l'individu et de l'état de l'environnement de décision, c'est-à-dire, le nombre d'unités disponibles dans le compte. A chaque période *t*, en supposant que ses rivaux sont rationnels, autrement dit qu'ils ne prennent en compte aucune variable d'état superflue dans leurs décisions, la seule variable d'état pertinente pour le sujet *i* est le stock d'unités disponibles. Le choix d'une période affecte les paiements futurs en réduisant le stock (qui affecte positivement les profits). La richesse accumulée par un individu jusqu'à la période *t* fait partie de son ensemble d'information I_i^t, mais elle ne devrait pas agir sur son comportement. Néanmoins, nous avons incorporé la richesse accumulée jusqu'à *t*, dans le polynôme représentant la composante future (équation (4.2)) de la fonction de valeur. Désormais, $I_i^t \equiv W_i^t \ \ \forall i$, où W_i^t est la richesse accumulée par l'individu *i* jusqu'à la période *t*.

La procédure de sélection bayésienne nous a permis de choisir un modèle avec un polynôme de deuxième degré, donc la composante future pour les individus du type *k* a la forme suivante :

$$F\left(S^t, I_i^t, j|\pi_k\right) = \pi_0 + \pi_1 \cdot S^t + \pi_2 \cdot \left(S^t\right)^2 + \pi_3 \cdot S^t \cdot W^t + \pi_4 \cdot W^t + \pi_5 \cdot \left(W^t\right)^2 \tag{4.4}$$

Sachant que les choix réalisés dépendent de la valeur latente relative de chaque alternative, la composante future n'est pas identifiée en niveaux. Nous identifions le modèle de la façon usuelle (Geweke et al., 1994) avec le système en différence suivant :

$$z_{ij}^t\left(S^t, W_i^t, j|\pi_k\right) = \widetilde{V}_{ij}^t\left(S^t, W_i^t, j|\pi_k\right) - \widetilde{V}_{i0}^t\left(S^t, W_i^t, 0|\pi_k\right) \qquad j \in \{1,...,50\}$$

Où $\widetilde{V}_{ij}^t\left(S^t, W_i^t, j|\pi_k\right) = V_{ij}^t\left(S^t, W_i^t, 0|\pi_k\right) / \left(\sigma_k(1,1) + \sigma_k(50,50) - \sigma_k(1,50)\right)^{1/2}$

[3] Même si le protocole d'expérience n'imposait pas des choix discrets, $y \in [0,50]$, il n'y eu que des prélèvements entiers lors de l'expérience.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$f\left(S^t, W_i^t, j|\pi_k\right) \equiv F\left(S^t, W_i^t, j|\pi_k\right) - F\left(S^t, W_i^t, 0|\pi_k\right) / \left(\sigma_k(1,1) + \sigma_k(50,50) - \sigma_k(1,50)\right)^{1/2} \quad j = 1,...,50$$
$$= \pi_0^* + \pi_1^* \cdot S^t + \pi_2^* \cdot \left(S^t\right)^2 + \pi_3^* \cdot S^t \cdot W^t + \pi_4^* \cdot W^t + \pi_5^* \cdot \left(W^t\right)^2$$

La règle de décision pour le sujet *i* de type *k* à la période *t* s'écrit :

Choisir 'j' ssi

$$z_{ij}^t\left(S^t, W_i^t|k\right) \equiv \widetilde{V}_{ij}^t\left(S^t, W_i^t|k\right) - \widetilde{V}_{i0}^t\left(S^t, W_i^t|k\right) = \widetilde{w}_{ij}^t + f\left(S^t, I_i^t, j|\pi_k\right) + \eta_{ij}^t > z_{il}^t\left(S^t, W_i^t|k\right) \ \forall l \neq j$$

Où $\eta_{ij}^t \equiv \upsilon_{ij}^t - \upsilon_{i0}^t$.

4.3.2 La fonction de vraisemblance, les distributions a priori et la distribution a posteriori des paramètres

L'économètre observe la trajectoire des choix des individus, ainsi que celle de la variable d'état *S*. Il peut donc calculer la richesse accumulée par chaque individu à chaque période W_i^t. Pour un type *k* donné et étant données les valeurs des autres paramètres et des variables, nous représentons les valeurs latentes *z* par un *modèle normal linéaire* à plusieurs régressions, plus couramment appelé « modèle à régressions apparemment non liées »[4] (modèle SUE). En conséquence, il est supposé que $\eta_i^t \equiv iid\ N\left(0, \Sigma_k\right)$ pour le type *k*. La probabilité d'un tirage de valeurs latentes en différences pour le type *k* est donc :

(4.5)

$$p\left(\left\{z_{ij}^t\right\}_{j=1,...,50}|\pi_k^*\right) \propto \prod_{n,t} |H_k|^{0.5} \exp\left\{-\frac{1}{2}\begin{pmatrix}\left\{z_{i1}^t - Q_{i1}^t{}'\pi_k^*\right\} \\ . \\ . \\ . \\ \left\{z_{i50}^t - Q_{i50}^t{}'\pi_k^*\right\}\end{pmatrix}' H_k \begin{pmatrix}\left\{z_{i1}^t - Q_{i1}^t{}'\pi_k^*\right\} \\ . \\ . \\ . \\ \left\{z_{i50}^t - Q_{i50}^t{}'\pi_k^*\right\}\end{pmatrix}\right\} \times I\left(\left\{z_{ij}^t, d_{ij}^t\right\}_{j=1,...,50}\right),$$

où,

$H_k = \dfrac{1}{\Sigma_k}$ est la matrice de précision, $Q_{ij}^t{}'$ est le vecteur transposé des variables d'état (pour un *G* donné),

[4] De l'anglais *« seemingly unrelated regressions model »*.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(4.6)
$$I\left(\left\{z_{ij}^{t}, d_{ij}^{t}\right\}_{j=1,\ldots,50}\right)=\left\{\begin{array}{c}1 \text{ si } d_{ij}^{t}=1 \,\&\, (z_{ij}^{t}>z_{il}^{t})(j\neq l) \\ \text{ou} \\ 1 \text{ si } (\forall j)(d_{ij}^{t}=0 \,\&\, z_{ij}^{t}\leq 0) \\ \text{ou} \\ 0 \text{ dans un autre cas}\end{array}\right\}.$$

et $d_{i,j}^{t}$ sera l'indicateur des choix,

$$d_{ij}^{t}=\begin{pmatrix}1 \text{ si j est choisit par i à la période t} \\ 0 \text{ dans les autres cas}\end{pmatrix}.$$

La fonction indicatrice I est égale à zéro si les valeurs de z ne sont pas cohérentes avec les choix observés.

L'inférence par l'échantillonnage à la Gibbs démarre par la spécification de la vraisemblance complète des données, qui est la vraisemblance hypothétique que l'on peut former si les valeurs latentes et les types latents sont observables. Donc, pour un nombre de types K et un ordre G du polynôme f donnés :

(4.7)

$$L\left(\left\{z_{i}^{t}\right\}_{i=1,\ldots,N,t=1,\ldots,T}\left\{\tau_{n}\right\}_{n=1,N}\middle|\left\{\theta_{k},\pi_{k}^{*},\sigma_{k}^{-2}\right\}_{k=1,K}\right)\propto$$

$$\prod_{k=1,K}\prod_{n:\tau_n=k}\left[\theta_{k}\prod_{t=1,T}\left|H_{k}\right|^{0.5}\exp\left\{-\frac{1}{2}\begin{pmatrix}\left\{z_{i1}^{t}-Q_{i1}^{t}{}'\pi_{k}^{*}\right\} \\ . \\ . \\ . \\ \left\{z_{i50}^{t}-Q_{i50}^{t}{}'\pi_{k}^{*}\right\}\end{pmatrix}'H_{k}\begin{pmatrix}\left\{z_{i1}^{t}-Q_{i1}^{t}{}'\pi_{k}^{*}\right\} \\ . \\ . \\ . \\ \left\{z_{i50}^{t}-Q_{i50}^{t}{}'\pi_{k}^{*}\right\}\end{pmatrix}\right\}\times I\left(\left\{z_{ij}^{t},d_{ij}^{t}\right\}_{j=1,\ldots,50}\right)\right]$$

Nous présentons maintenant les distributions a priori des paramètres du modèle. Le modèle SUE[5] suppose que le vecteur de paramètres π suit une loi normale multi-variée : $\pi_k \sim N(0,\Lambda)$, où Λ est une matrice diagonale g x g avec des éléments tous égaux à 1^{e+20} (où g est égal à la taille du vecteur π_k).

[5] Les a prioris du modèle SUE sont propres.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Le modèle SUE suppose également que la matrice de précision H_k suit une loi de Wishart : $H_k \sim Wi\left(A^{-1}, \underline{v}\right)$, où A^{-1} est une matrice définie positive de paramètres d'échelle et $\underline{v} = (50-1)/2$ est le degré de liberté de la précision.

La distribution a priori de θ_k (la probabilité de trouver le type *k* dans la population) est une loi de Dirichlet ou Beta multivariée : $\{\theta_k\}_{k,\ldots,K} \sim Di(\{2\}_K)$.

D'après le théorème de Bayes, la distribution jointe a posteriori des paramètres du modèle, les valeurs latentes *z* et les types latents τ , sont proportionnelles à la vraisemblance complète des données fois les densités a priori $p(\pi_k^*)$, $p(H_k)$, et $p(\theta_k)$. Sachant que les a priori sont propres et la fonction de vraisemblance est bornée, la distribution jointe a posteriori existe (Geweke, 2003).

La moyenne a priori du vecteur π est nulle : la distribution est donc centrée sur la myopie, les individus considérant, dans ce cas, uniquement les paiements actuels. Néanmoins, les éléments de la matrice de variance-covariance étant très élevés, la distribution a priori n'est pas informative car il y a peu de densité a priori sur la règle myope. Nous contraignons les éléments de la diagonale à être égaux. Ceci peut être désavantageux : en particulier, le fait qu'ils soient égaux conduit à imposer un poids trop important a priori sur des modèles où les termes d'ordre élevé du polynôme dominent les décisions.

4.3.3 L'algorithme d'échantillonnage à la Gibbs

Dans cette sous-section, nous décrivons l'algorithme d'échantillonnage à la Gibbs, utilisé pour approximer les valeurs a posteriori des paramètres du modèle[6]. La méthode d'échantillonnage est constituée de cinq blocs :

i. Tirage des valeurs latentes *z* : étant données les valeurs des autres paramètres et des variables, la distribution conditionnelle a posteriori des z_{ij}^t j = 1,…,50 est la suivante :

[6] Le code Matlab est disponible sur demande.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$p\left(\left\{z_{ij}^{t}\right\}_{j=1,\ldots,50}\middle|\pi_k^*\right)\propto\prod_{n,t}\left|H_k\right|^{0.5}\exp\left\{-\frac{1}{2}\begin{pmatrix}\left\{z_{i1}^{t}-Q_{i1}^{t}{}'\pi_k^*\right\}\\ \cdot\\ \cdot\\ \cdot\\ \left\{z_{i50}^{t}-Q_{i50}^{t}{}'\pi_k^*\right\}\end{pmatrix}'H_k\begin{pmatrix}\left\{z_{i1}^{t}-Q_{i1}^{t}{}'\pi_k^*\right\}\\ \cdot\\ \cdot\\ \cdot\\ \left\{z_{i50}^{t}-Q_{i50}^{t}{}'\pi_k^*\right\}\end{pmatrix}\right\}\times I\left(\left\{z_{ij}^{t},d_{ij}^{t}\right\}_{j=1,\ldots,50}\right)$$

En suivant Geweke (1991), les valeurs latentes z sont tirées une par une d'une distribution Gaussienne multi-variée tronquée.

ii. Tirage des coefficients des règles de décision π_k^*, $k = 1,\ldots, K$. Ce bloc de l'algorithme ainsi que le suivant (iii. Tirage de la matrice de variances et covariances) constituent les deux blocs de l'échantillonnage à la Gibbs nécessaires pour estimer le modèle SUE. Cet échantillonnage génère des échantillons de la distribution a posteriori de $\pi_k^*, H_k \middle| z_k, Q_k$ à partir de la distribution conditionnelle a posteriori de π_k^* et de H_k (cette dernière sera présentée dans le point suivant) :

$$\pi_k^* \middle| H_k, z_k, Q_k \sim N\left(\left[\underline{\Lambda}^{-1}+Q_k{}'(H_k\otimes I_T)z_k\right]\cdot\left[\underline{\Lambda}^{-1}\cdot\underline{\pi_k^*}+Q_k{}'(H_k\otimes I_T)z_k\right],\underline{\Lambda}+Q_k{}'(H_k\otimes I_T)z_k\right)$$

où, $\underline{\Lambda}$ et $\underline{\pi_k^*}$ sont, respectivement, la matrice de variance-covariance et le vecteur de paramètres du polynôme précédemment tirés des distributions conditionnelles à posteriori correspondantes.

iii. Tirage de la matrice de variance-covariance de l'erreur d'optimisation H_k^{-1}, $k = 1,\ldots, K$. Les tirages se font à partir de la distribution conditionnelle a posteriori suivante :

$$H_k \middle| \pi_k^*, z_k, Q_k \sim Wi\left(\left[\underline{A}+\left(z_i^t-Q_k\pi_k^*\right)'\left(z_i^t-Q_k\pi_k^*\right)\right],\underline{v}+T\right),$$

où, $\underline{A}$ est une matrice définie positive de paramètres d'échelle calculée précédemment. H_k est ensuite inversée pour obtenir Σ_k.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

iv. Tirage des proportions de chaque type dans la population θ_k, k = 1,…, K. La distribution conditionnelle a posteriori de θ_k est Di({2+N_k}k = 1,…,K). Les tirages à partir de cette distribution sont effectués utilisant des procédures classiques.

v. Tirage du type $\tau_i \in \{1,...,K\}$ de l'individu i, i = 1,…, N. Nous appelons $L_k(i)$ la contribution de l'individu i à la vraisemblance, étant données les valeurs des autres paramètres et variables et qu'il utilise la règle k. Donc, nous faisons des tirages à partir de la distribution suivante :

$$\Pr(\tau_i = k') = \frac{L_{k'}(i)}{\sum_{k=1,K} L_k(i)}.$$

Finalement, pour choisir le nombre de types K et l'ordre G du polynôme f, nous estimons plusieurs modèles avec des valeurs différentes de K et G. Nous les départageons en utilisant la théorie de la décision bayésienne, ce qui demande le calcul de la vraisemblance marginale pour chaque modèle. La procédure utilisée pour ce calcul est décrite de l'Annexe 3 (page 234).

4.4 Résultats de l'algorithme de classification

Dans cette section nous présentons le résultat de l'application de la procédure décrite dans la section précédente, sur les donnés produites par le traitement LFz0. Nous avons estimé 12 modèles avec différents nombres K de type et d'ordre G du polynôme f. Néanmoins, nous n'avons pas évalué différentes variables d'état ; nous avons uniquement pris en compte le stock de la ressource (S) et la richesse accumulée (W) pour expliquer la composante future des valeurs latentes. Cette dernière variable n'est pertinente dans aucune des stratégies théoriques développées dans les chapitres précédents, à savoir la stratégie rationnelle, myope et optimum. La richesse accumulée pourrait être une variable d'état utilisée par les sujets, car elle pourrait indiquer un point de référence marquant une transition du comportement myope vers des comportements plus ou moins conservateurs de la ressource. Après la sélection du modèle et l'évaluation de l'ajustement des données expérimentales, les règles de décision estimées seront caractérisées.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.4.1 Sélection du modèle et évaluation de l'ajustement

Avant de comparer les modèles avec la vraisemblance marginale, nous devons déterminer si l'algorithme a convergé. Nous procédons d'abord par une évaluation visuelle des suites des paramètres de la composante future π_k puis nous pratiquons divers tests de convergence (Annexe 4). Etant donné la dimension élevée de l'ensemble de choix, l'algorithme est assez lent sur un PC standard. Par conséquent, les inférences présentées dans ce chapitre sont basées sur un nombre fixe de tours de l'algorithme[7]. Si les tests de convergence révèlent un problème, nous donnons le niveau de précision des estimations que ce nombre fixe de tours a permis d'atteindre.

Dans l'Annexe 4 (page 233), les statistiques et tests[8] pour diagnostiquer la convergence sont exposés et analysés : les estimations de l'auto-corrélation, le diagnostic des MCMC de Raftery-Lewis (1995), les NSE (erreurs standards numériques) et RNE (efficacité numérique relative) de Geweke (1992) et le test du Chi-2 de Geweke pour comparer les moyennes des 20% premières itérations de l'échantillon contre la dernière moitié.

L'auto-corrélation des séries temporelles donne une indication du degré d'indépendance existant dans la séquence des π_k. A partir de l'analyse des séries temporelles, on sait que si π_k $m = 1,\ldots, n$ est un processus corrélé stationnaire alors $\bar{\pi}_k = (1/n)\sum_{i=1}^{n} \pi_k^i$ est un estimateur consistant de $E(\pi_k)$ si $n \to \infty$. Il est donc acceptable de simuler des tirages corrélés à partir de la distribution a posteriori pour résumer ses caractéristiques, si le nombre de tirage est suffisamment important. Le degré d'auto-corrélation joue un rôle clé dans la détermination du nombre de tirages nécessaires. Une auto-corrélation élevée indique la nécessité d'effectuer plus de tirages pour obtenir l'échantillon de taille nécessaire au degré de précision souhaité pour l'estimation de la distribution a posteriori.

Raftery et Lewis (1992, 1995) ont proposé une série de diagnostics pour la convergence des MCMC. Selon le niveau d'exactitude désiré pour les paramètres de la distribution a posteriori, la longueur de la séquence de tirages est indiquée. L'échantillon est dichotomisé en utilisant

[7] Ce nombre fixe peut être différent selon le modèle.
[8] Mis en place par la fonction « coda » en Matlab, cette fonction est disponible gratuitement dans la *« Econometrics Toolbox »* fournie LeSage (1999).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

une série temporelle binaire, égale à l'unité si π_k^i appartient au quantile recherché de la fonction de densité a posteriori. Cette séquence binaire doit être approximativement markovienne, donc les résultats standard pour les chaînes de Markov à deux états sont applicables et peuvent être utilisés pour estimer la longueur de la chaîne.

La déviation standard numérique (NSE) et l'efficacité numérique relative (RNE) proposées par Geweke (1992) sont également estimées. En utilisant l'analyse spectrale issue des méthodes pour les séries temporelles, il est possible de produire une estimation de la variance des paramètres d'intérêt en utilisant les valeurs de l'échantillon :

$$\mathrm{var}(\hat{\pi}_k) = S(0)/n$$

Où $S(0)$ est la densité spectrale de π_k évalué à $\omega = 0$. Pour approximer $S(0)$, différentes tailles pour la fenêtre spectrale sont considérées (4%, 8% et 15%). Deux ensembles d'estimations sont reportés : le premier est basé sur l'hypothèse que les tirages proviennent d'un processus i.i.d. et le deuxième suppose que les tirages sont non i.i.d.. S'il existe des différences importantes entre ces deux ensembles d'estimations il faut utiliser le second. La RNE donne une indication sur le nombre de tirages à effectuer pour atteindre la même précision numérique qu'un échantillon tiré directement de la distribution a posteriori.

Finalement, un dernier diagnostic de convergence est analysé qui évalue si l'échantillon a atteint un équilibre en comparant la moyenne du premier 20% des tirages versus le dernier 50%.

	Ordre du polynôme			
Nombre de types	G = 2	G = 3	G = 4	G = 5
2	**-3725**	-4180	-4085	-4274
3	-5649	-5580	-5592	-5248
4	-4681	-6381	-7726	-9116

Tableau 4.1 : Valeurs de la vraisemblance marginale pour les différents modèles estimés

La comparaison des vraisemblances marginales indique que le modèle à 2 types et G = 2 (ordre du polynôme) est celui qui ajuste le mieux les données (Tableau 4.1). L'algorithme a

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

bien identifié deux types d'agents que nous appellerons les 'Quasi Myopes' (QM) et les 'Prévoyants Perturbés' (PP). Les valeurs des coefficients de la composante future sont exposées dans le Tableau 4.2. L'interprétation de ces coefficients est complexe, nous passons donc directement à l'évaluation de l'ajustement du modèle choisi.

	Prior Distribution		Type 1 : N = « Quasi Myope »		Type 2 : N = « Prévoyant perturbé »	
	Moyenne	Déviation Standard	Moyenne	Déviation Standard	Moyenne	Déviation Standard
π_0 : Cte	0	1*e10	-149,71688	28,94230	-495,58605	23,11397
π_1 : St	0	1*e10	-0,10001	0,02218	-0,27049	0,01594
π_2 : St^2	0	1*e10	0,00006	0,00002	0,00009	0,00001
π_3 : St*W	0	1*e10	-0,87175	0,02171	-0,69733	0,01582
π_4 : W	0	1*e10	-0,00017	0,00005	-0,00015	0,00003
π_5 : W^2	0	1*e10	0,00011	0,00005	0,00009	0,00003
σ_η	-	-				
θ_k	0.5	0.27	0,8417		0.1583	

Tableau 4.2 : Moyennes à priori et à posteriori et déviations standards des paramètres du composant futur

Nous attribuons à chaque sujet un type selon leur probabilité a posteriori d'être QM ou PP. Nous obtenons cette probabilité à partir du calcul pour chaque sujet de la vraisemblance en utilisant les moyennes a posteriori des paramètres d'intérêt. Le 84% des sujets sont de type 'quasi myope', et seulement 5% sont de type 'prévoyant perturbé' ; les 11% restant ne peuvent pas être identifiés.

La (b)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

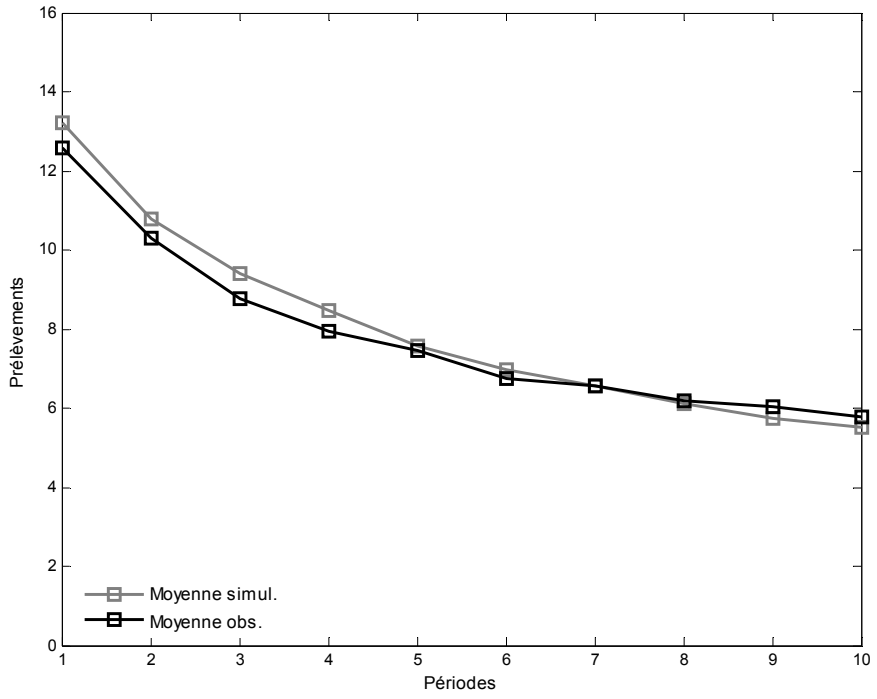


Figure 4.1a (page 181) retrace les prélèvements moyens correspondants à chacun des types ainsi que des individus non identifiés par l'algorithme. Les prélèvements individuels simulés à partir des règles de décision estimées sont également reportés dans la (b)

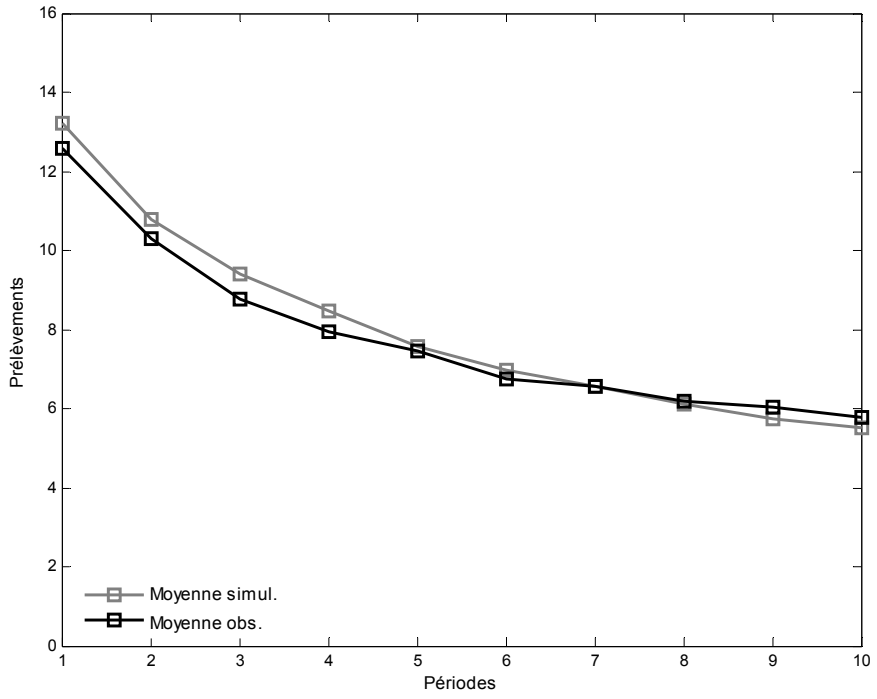


Figure 4.1a, ainsi que les prédictions théoriques conditionnelles pour les stratégies myope et rationnelle. La règle de décision QM surévalue les prélèvements individuels des premières quatre périodes, mais ensuite ils ajustent parfaitement le comportement observé dans presque toutes les périodes. L'appellation « Quasi Myope » de cette règle de décision s'explique par la proximité des prélèvements simulés sous la règle et ceux résultants de la prédiction théorique conditionnelle pour la stratégie myope. La trajectoire de prélèvement pour les agents de type PP est également surévaluée par la règle estimée entre les périodes 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

et 5 ; en particulier pour les périodes 3 et 4, les différences sont assez marquées. On observe une non stationnarité des prélèvements moyens de ces sujets : à partir de la période 7 jusqu'à la période 9, les prélèvements moyens des sujets PP sont sous-évalués parce qu'ils se rapprochent clairement de la trajectoire QM (observée et simulée car elles sont similaires). La (b)

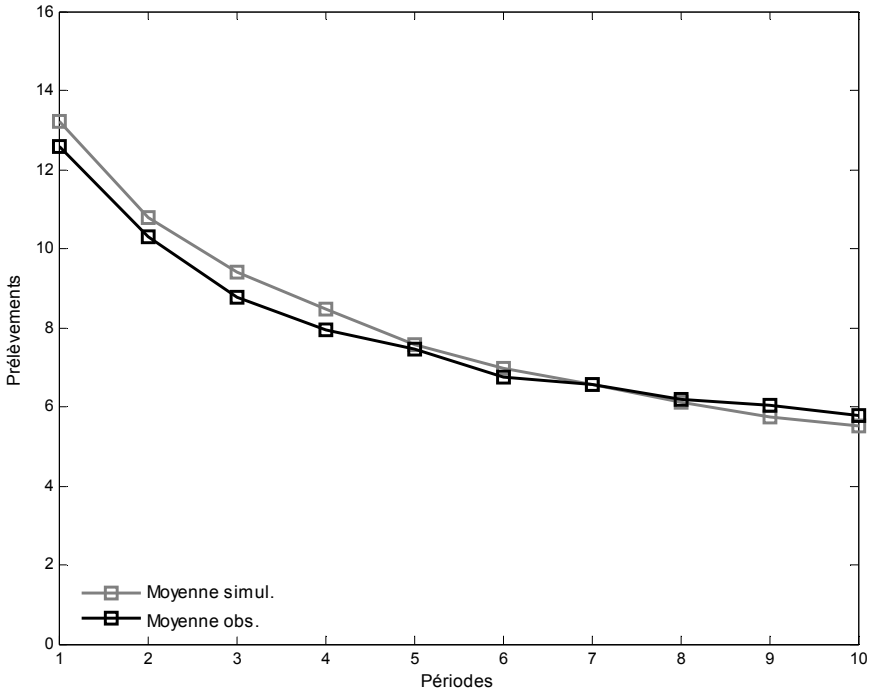


Figure 4.1a montre clairement que les principaux aspects du comportement observé des sujets PP sont captés par la règle de décision estimée, c'est-à-dire, les prélèvements sont inférieurs à ceux des sujets QM sur presque la totalité de l'horizon temporel (ce qui explique l'appellation « prévoyants »), et notamment dans la dernière période. Le prélèvement trop faible au cours de la dernière période indique le caractère « perturbé » de ces agents : ils persistent à valoriser le futur alors qu'il n'y en a plus. Même si la capacité prédictive de cette règle semble satisfaisante, la (b)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

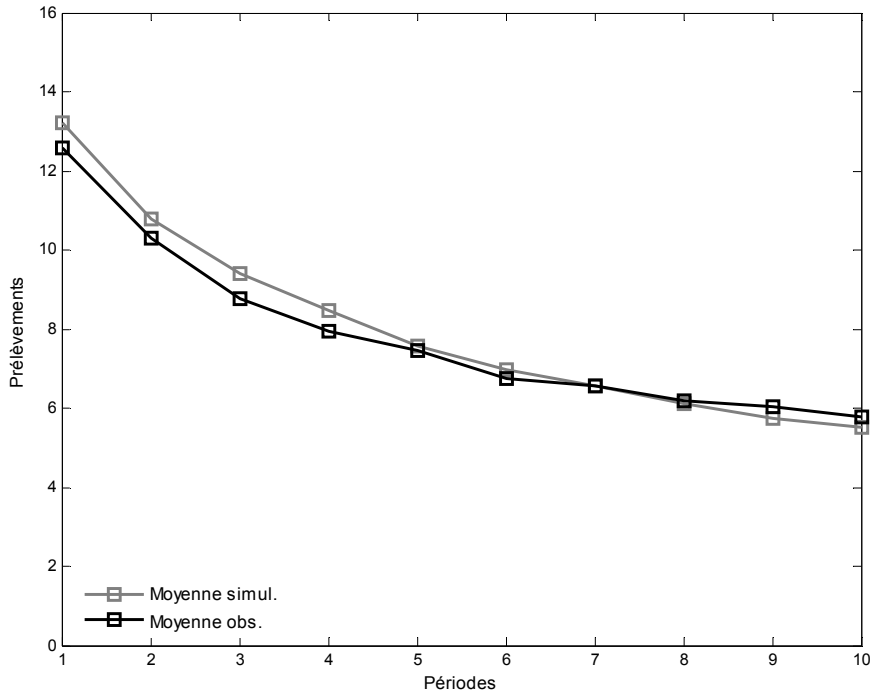


Figure 4.1a indiquerait l'intérêt de prendre en considération d'autres variables d'état pour expliquer la composante future.

Les prélèvements moyens des agents non identifiés ne montrent aucune tendance particulière. Ils sont très variables avec des pics relativement distants. L'incapacité d'identifier ces comportements ne semble pas donc révéler un défaut de performance de l'algorithme.

On observe dans la (b)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

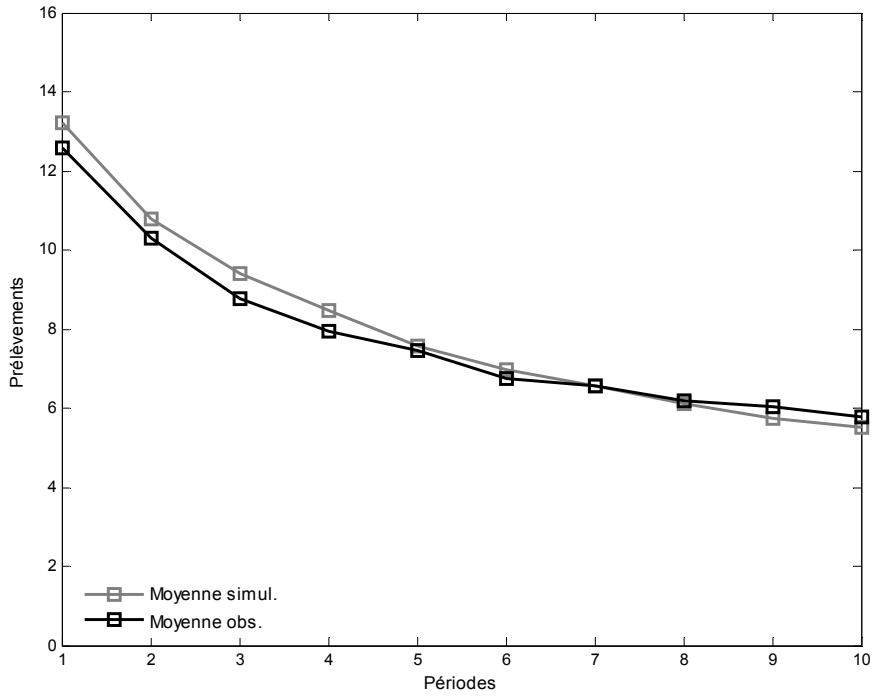
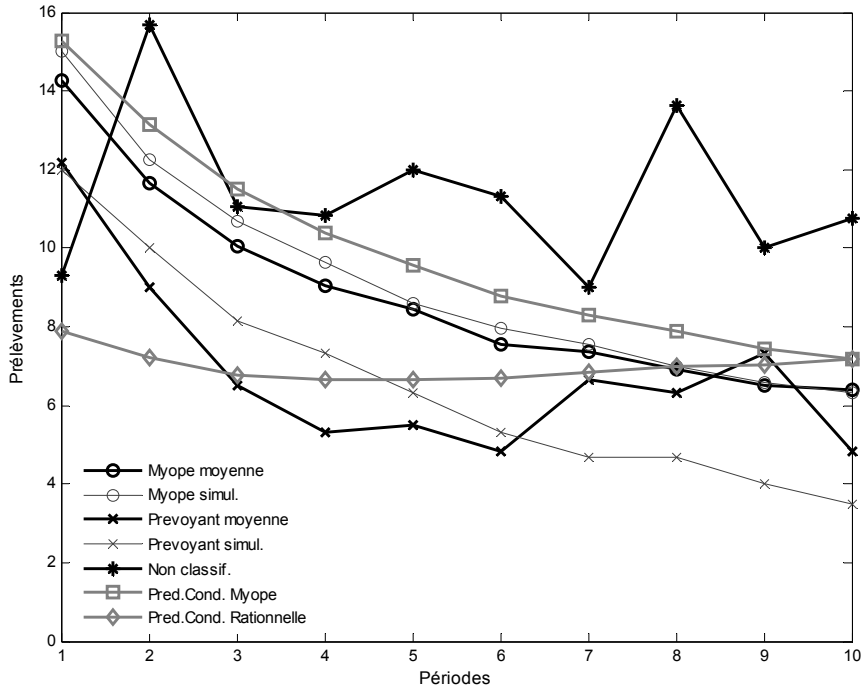


Figure 4.1b (page 181) un très bon ajustement des règles estimées à la trajectoire de prélèvement moyen des types identifiés (les sujets non identifiés ne sont pas considérés dans le calcul).

La Figure 4.2 (page 182) présente les prélèvements moyens des types identifiés, pour chaque groupe et chaque série. Cette figure montre également les prélèvements individuels simulés à partir des règles de décision estimées, ainsi que la prédiction conditionnelle myope (calculé en supposant que tous les membres du groupe sont myopes). Les prélèvements simulés à partir de la règle de décision quasi myope suivent de très près la prédiction conditionnelle myope. Dans la majorité des cas, la règle QM estimée s'ajuste mieux aux observations que la prédiction théorique pour la stratégie myope ; ce résultat valide d'une certaine façon la bonne performance de la procédure statistique. L'ajustement de la règle de décision estimée pour les agents PP est plus difficile à évaluer car les prélèvements moyens de ces agents sont très variables.

(a)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(b)

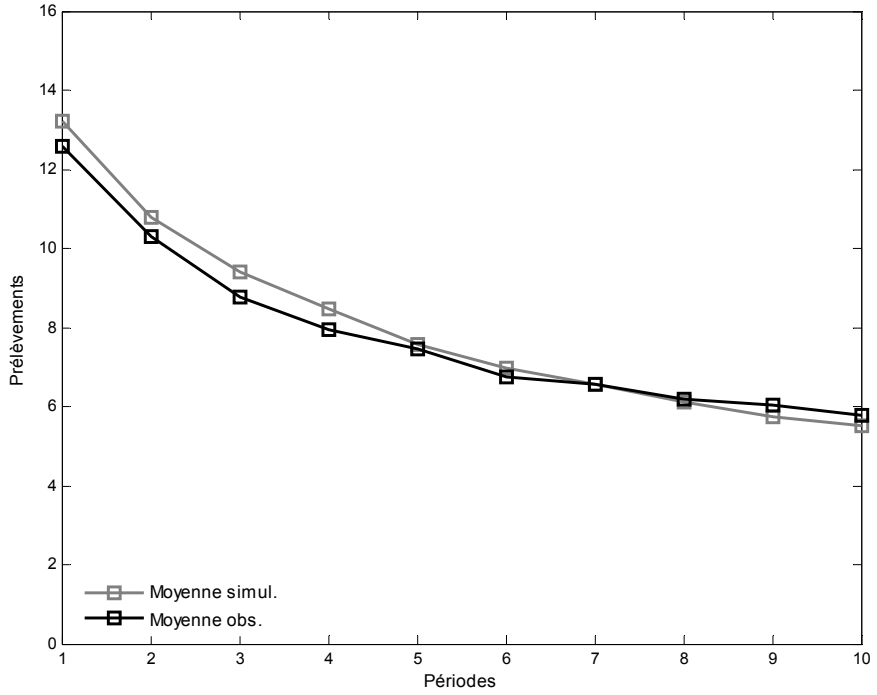


Figure 4.1 : Prélèvements moyens observés par type versus prélèvements moyens simulés

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

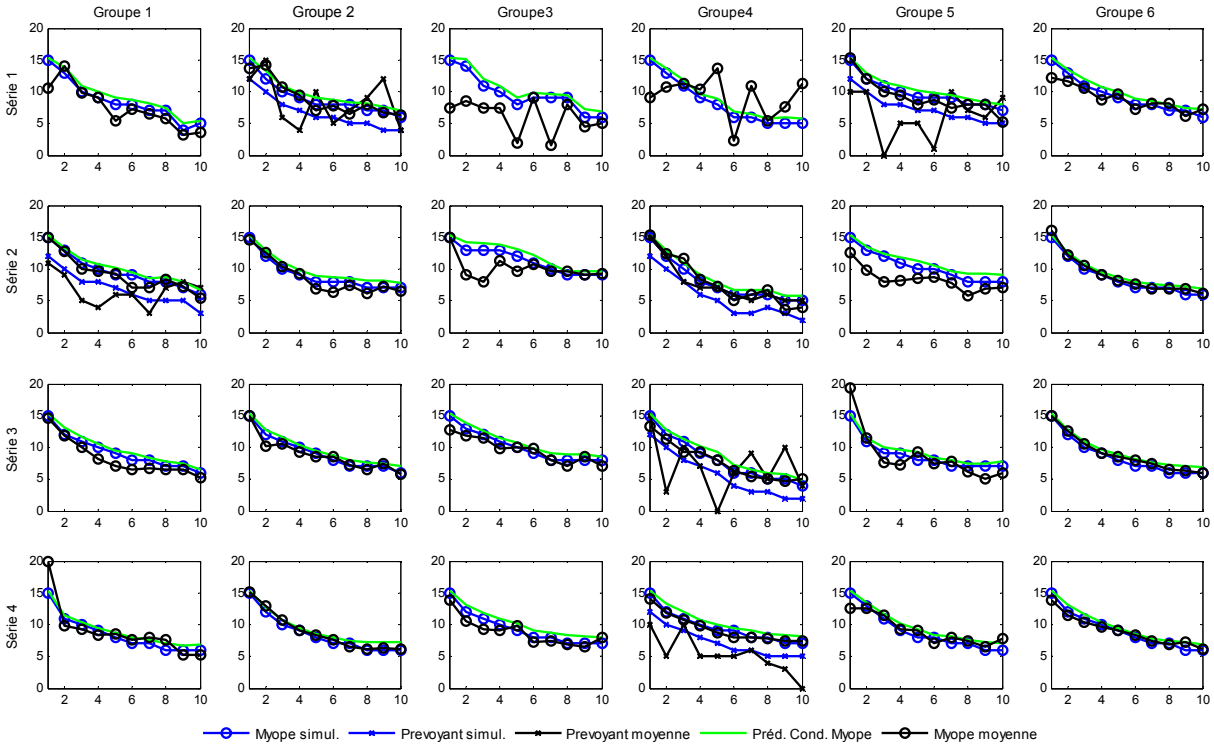


Figure 4.2 : Prélèvements moyens observés par type versus les prélèvements moyens simulés et la prédiction théorique conditionnelle myope ; donnés par groupe et série

La classification d'un individu peut dépendre du type dominant dans son groupe, c'est-à-dire qu'un individu pourrait devenir quasi myope si la plupart de ses rivaux le sont. La Figure 4.2 montre une certaine instabilité de la classification lorsqu'on passe d'une série à l'autre. Toutefois cela ne rend pas en question la performance de l'algorithme de classification, car pour réaliser les inférences un même sujet a été considéré comme un individu différent d'une série à l'autre. En effet, la répétition du jeu génère des individus intrinsèquement différents, car elle pourrait se traduire dans un apprentissage de l'utilisation d'une règle ou elle pourrait permettre aux sujets d'identifier la règle la plus avantageuse. Le fait que l'algorithme identifie ces changements de comportement d'une répétition à l'autre est plutôt positif. Sachant que cette procédure statistique a pour but de générer une description positive des comportements dans le laboratoire, la performance de l'algorithme dans l'identification du nombre de types et de leurs paramètres est très satisfaisante. Néanmoins, pour conforter le résultat, une simulation de Monte Carlo devrait être réalisée.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.4.2 Caractérisation des règles de décision

Afin de décrire les caractéristiques des trajectoires de prélèvement résultant de chacune des règles de décision estimées, nous effectuons des simulations en utilisant le même paramétrage que dans le traitement LFz0. Nous comparons l'efficience des différents cas selon l'ensemble de la population de préleveurs suit une des règles de décision estimées ou une des trois stratégies théoriques étudiées (i.e. myope, rationnelle et optimum). Néanmoins, ces trajectoires de prélèvement ne sont pas tout à fait comparables, car elles résultent dans des sentiers différents pour les variables d'état (i.e. le stock de la ressource et la richesse). En conséquence, nous comparons également les trajectoires conditionnées aux sentiers des variables d'état générés sous les règles de décision estimées (i.e. Quasi Myope et Prévoyant Perturbé).

La Figure 4.3 (page 184) montre que la trajectoire de prélèvement individuel dans une population QM (trajectoire QM) est similaire à la trajectoire myope : elles démarrent et finissent au même niveau, mais on observe des différences d'une unité pour les périodes 2, 3, 5 et 9. Par conséquent, la stratégie myope engendre une trajectoire de prélèvement légèrement moins efficiente[9] que la règle de décision QM : 52% versus 56%, respectivement. La Figure 4.3 montre également que la trajectoire PP reste en dessous des trajectoires myopes et QM sauf pour les périodes 7 et 10, où les trois trajectoires coïncident. L'efficience de la règle de décision PP est de 67%, nettement supérieure à l'efficience de la règle QM et à la stratégie myope, mais encore inférieure à l'efficience de la stratégie rationnelle (égal à 74%).

La Figure 4.4 (page 185) reporte les prélèvements QM, les prélèvements prédits correspondants aux trois hypothèses de comportement, et les prélèvements de la règle PP, conditionnés aux sentiers des variables d'état générés par une population QM. Tandis que les prédictions théoriques conditionnelles convergent vers le même niveau de prélèvement à la période finale, les règles de décision estimées prédisent des prélèvements inférieurs tout le long de l'horizon temporel et particulièrement pour la dernière période. Ceci met en évidence un « effet richesse » négatif, c'est-à-dire, que la richesse accumulée, qui a été prise en compte dans l'estimation des règles de décision, génère une réduction des prélèvements QM par rapport à la prédiction myope. Bien que les prélèvements myopes et QM soient identiques à la

[9] Nous utilison la même définition de l'efficience que dans le chapitre 3 de cette thèse, à savoir, le rapport de la richesse accumulée dans le traitement considéré et l'optimum (prédiction inconditionnelle).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

période initiale, au fur et à mesure que la richesse s'accumule la règle QM s'éloigne de la prédiction théorique myope. La trajectoire de prélèvement PP évolue de façon parallèle et au-dessous de la trajectoire QM. Il faut noter que la trajectoire des prélèvements individuels QM convergent, vers la période 9, à une répartition égalitaire de la recharge (30/5=6) ; c'est-à-dire, la règle QM conduit à un « pseudo état stationnaire » où le stock de la ressource n'augmente pas ni diminue. Néanmoins, la richesse accumulée, l'autre variable d'état prise en compte dans les règles estimées, continue à augmenter. Nous ne pouvons pas nous prononcer sur les caractéristiques de cet état.

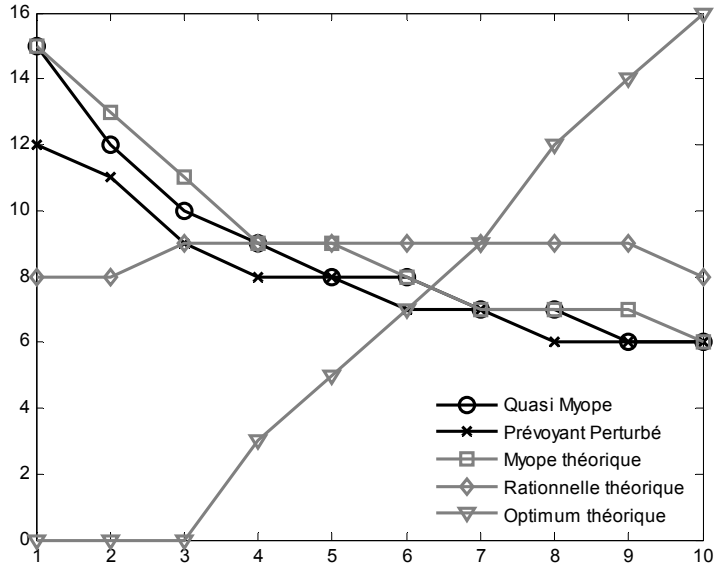


Figure 4.3 : Prélèvements individuelles sous les règles de décision estimées et les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

La Figure 4.5 (page 185) reporte les prélèvements PP, les trajectoires de prélèvement correspondant aux trois hypothèses de comportement et les prélèvements individuels QM, conditionnés aux sentiers des variables d'état générés par une population PP. La trajectoire de prélèvement PP est en dessous de la QM pour l'ensemble des périodes. La trajectoire du stock de la ressource qui en résulte est donc supérieure à chaque période par rapport à une population suivant la règle QM. Ainsi, la trajectoire de prélèvement converge plus rapidement vers un « pseudo état stationnaire » plus élevé que le QM. En conséquence, la richesse évolue également de façon différente selon le type de la population : tandis que la règle PP prédit des agents (relativement) pauvres au début de l'horizon temporel et riches à la fin, sous la règle QM, la prédiction s'inverse. La comparaison des trajectoires QM dans les figures 4.4 et 4.5,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

permet de mieux caractériser l'effet de la richesse accumulée et son interaction avec le stock disponible de la ressource.

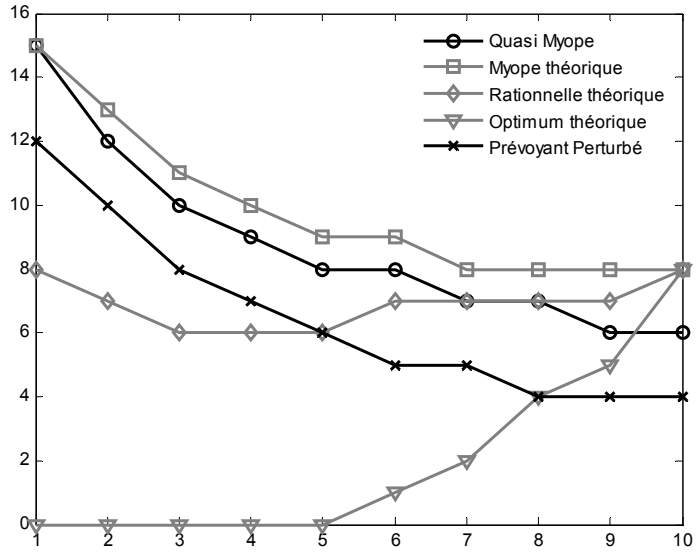


Figure 4.4 : Prélèvements sous la règle 'Quasi Myope' versus les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

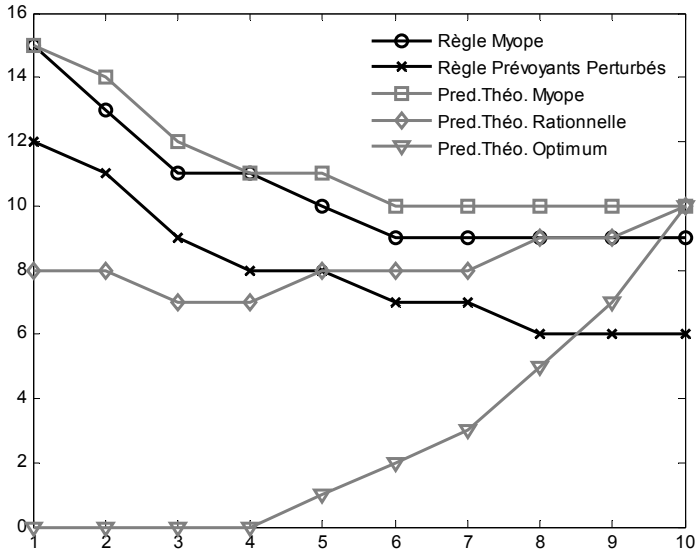


Figure 4.5 : Prélèvements sous la règle 'Prévoyants Perturbés' versus les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

Dans la Figure 4.5, la trajectoire QM est encore plus proche de celle issue de la prédiction conditionnelle myope par rapport à la Figure 4.4. Ceci s'explique par le fait que, sous la règle PP, les préleveurs sont relativement pauvres pendant les premières périodes de l'horizon temporel, donc l'effet de la richesse n'est pas suffisamment fort. Dans la Figure 4.4, la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

différence entre les prélèvements myopes et les QM tend à se creuser dans les deux dernières périodes. Au contraire, dans la Figure 4.5, la différence (1 point) reste constante dès la période 5 jusqu'à la fin. Il semblerait donc que l'effet d'un stock de la ressource élevé, résultant de la règle PP, absorbe l'effet richesse observé dans la Figure 4.4.

Le même effet d'éviction entre le stock et la richesse observé dans la règle QM, semble apparaître dans la règle PP. La trajectoire PP dans la Figure 4.5 (population PP) est au dessus de la trajectoire résultant de la même règle mais conditionnée à l'évolution des variables d'état générée par une population QM (Figure 4.4). Dans la première moitié de l'horizon les différences sont limitées à une unité, mais l'effet richesse et l'effet stock vont dans le même sens. Par contre, dans les cinq dernières périodes la différence augmente à deux unités, et ceci malgré que la richesse soit plus élevée par rapport à la règle QM. L'effet d'un stock plus élevé, sous la règle PP, expliquerait donc ce creusement dans la distance entre les deux trajectoires PP.

A partir des règles estimées, des simulations peuvent être effectuées pour évaluer l'effet des variables du contexte telles que les caractéristiques de la ressource (e.g. stock initial, recharge), les caractéristiques de l'exploitation (e.g. horizon temporel, taille des externalités statiques et dynamiques) et de la population (e.g. nombre de agents, proportions de chaque type d'agent). Dans la section suivante nous effectuons des simulations pour étudier l'impact sur les trajectoires de prélèvement et leur efficience de certaines variables de contexte.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.5 Simulations pour la construction des scénarios de gestion

Les estimations économétriques du comportement dans le laboratoire permettent d'élargir l'utilisation des données expérimentales à des contextes plus généraux. Dans cette section, nous fournissons des simulations dans l'objectif d'illustrer l'utilisation des données expérimentales pour alimenter des modèles susceptibles d'être utilisés dans l'évaluation des scénarios de gestion des ressources.

Nous étudierons l'impact, sur les prélèvements individuels et l'efficience de l'exploitation, de certaines variables de contexte : (i) la recharge naturelle de la ressource, (ii) la richesse et sa distribution et, (iii) les politiques fiscales : un impôt sur les profits et un impôt sur la richesse.

Les résultats exposés dans la section précédente rendent intéressant l'étude des effets de la richesse, sa distribution et des politiques l'affectant, sur les trajectoires de prélèvement et l'efficience de l'exploitation. Puis, nous étudierons l'effet de la richesse sur l'efficience[10] des instruments incitatifs conçus pour gérer les prélèvements, en particulier, sur deux types de taxes sur les prélèvements : (i) à taux constant et (ii) à taux flexible.

Le paramétrage utilisé pour les simulations présentées dans cette section est exposé dans le Tableau 4.3. La plupart des paramètres « économiques » et « physiques » du modèle sont restés inchangés par rapport à ceux utilisés pour les expériences. Nous avons cependant allongé l'horizon temporel de 10 à 15 périodes, le nombre de préleveurs de 5 à 10 individus et modifié les caractéristiques de la ressource : le stock initial de la ressource a été incrémenté, passant de 500 unités à 1000, et la recharge de 30 à 60 unités par période. Nous supposons, que la mise en place de traitements expérimentaux avec le paramétrage exposé dans le Tableau 4.3 aurait permis d'estimer les mêmes règles de décision.

Taille de la population (N)	Composition de la population	Fonction de profit	Fonction de coût	Evolution du compte	Ensemble de choix
10	50% 'Quasi Myopes' 50% 'Prévoyants Perturbés'	$a = 5{,}3$ $b = 0{,}09$	$p = 7{,}55$ $f = 0{,}01$ $z = 0{,}001$	$S(0) = 1000$ $r = 60$	{0,50}

Tableau 4.3 : Valeurs des paramètres communs à toutes les simulations

4.5.1 L'impact de la recharge naturelle

A partir du paramétrage exposé dans le Tableau 4.3, nous avons simulé les prélèvements individuels d'une population mixte. Nous avons calculé les trajectoires pour les deux règles en considérant des valeurs pour la recharge naturelle de la ressource qui vont de 0 à 500 unités avec un pas de 2 unités, soit 251 trajectoires pour chaque règle. Ces trajectoires sont exposées dans la Figure 4.6 (page 190) : Quasi Myope (Figure 4.6a) et Prévoyant Perturbé (Figure 4.6b). L'échelle de couleurs indique le dépassement (en valeur absolu) des prélèvements individuels par rapport à la répartition égalitaire de la recharge naturelle : plus foncé est le rouge (bleu) plus surexploité (sous-exploité) est le stock.

[10] Nous utilisons la même définition de l'efficience que dans le chapitre 3, à savoir le rapport de la richesse accumulée dans le traitement considéré et l'optimum (prédiction inconditionnelle).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

OBSERVATION 4.1 : La recharge naturelle n'affecte pas significativement les prélèvements individuels de la période initiale pour aucun des deux types.

Comme on peut observer d'après les Figure 4.6a et Figure 4.6b, le prélèvement initial est quasiment insensible face aux modifications de la recharge (une variation de 2 points est discernée). Aucun des deux types de préleveurs n'incorpore de façon significative dans la décision courante l'effet de la recharge sur les stocks futurs de la ressource. Ceci correspond au comportement théorique myope ; il faut remarquer cependant que les légers changements observés dans les prélèvements initiaux des deux types vont dans le sens contraire de la prédiction théorique rationnelle. En effet, quand la recharge augmente, des préleveurs rationnels, en anticipant des stocks futurs plus élevés, vont extraire moins au début pour profiter pleinement de l'abondance future de la ressource.

OBSERVATION 4.2 : Pour une recharge naturelle inférieure à 380 unités, les prélèvements individuels pour les deux règles diminuent jusqu'à la répartition égalitaire de la recharge et restent stables à ce niveau jusqu'à la fin de l'horizon temporel. Si la recharge excède 380 unités, les prélèvements individuels augmentent jusqu'à la répartition égalitaire de la recharge mais décroissent ensuite.

La Figure 4.6 (page 190) montre que lorsque la recharge est faible, les prélèvements décroissent fortement au cours des premières périodes, pour se stabiliser autour de la répartition égalitaire de la recharge (avec de légères variations) par la suite. Au fur et à mesure que la recharge augmente, les trajectoires de prélèvement s'approchent d'une ligne droite. Mais, quand la recharge est très élevée la trajectoire suit une courbe en U inversée.

Pour étudier l'impact de la distribution de la richesse sur l'efficience de l'exploitation et des politiques publiques, nous effectuons des simulations à partir du paramétrage exposé dans le Tableau 4.3 (page 187) et une recharge naturelle égale à 60 unités par période. Nous avons choisi cette valeur pour la recharge pour deux raisons. Premièrement, ce choix précise la rareté relative de la ressource comparativement aux paramètres utilisés dans les expériences : nous avons doublé le stock initial, le nombre de préleveurs, et la recharge. Deuxièmement, cette valeur est relativement faible, impliquant une surexploitation de la ressource dans les premières périodes pour converger vers un pseudo état stationnaire dans la suite et jusqu'à la fin de l'horizon temporel (Figure 4.6).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

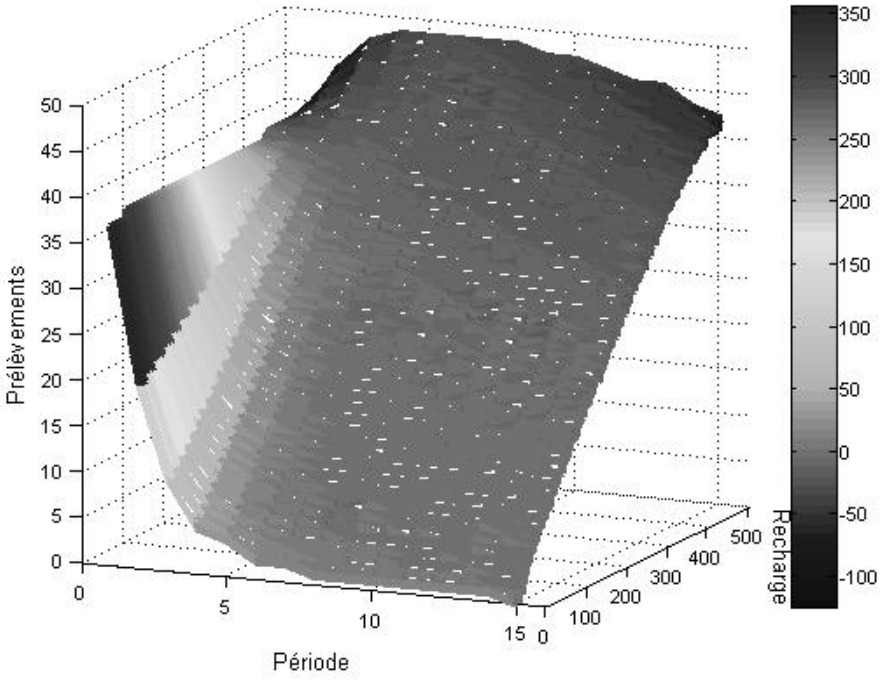
La Figure 4.7 (page 191) montre les prélèvements individuels pour chaque type de la population, ainsi que les trajectoires théoriques issues des stratégies myope, rationnelle et optimum. Les trajectoires QM, PP, myope et rationnelle se ressemblent beaucoup : elles démarrent très haut et tendent vers une répartition de la recharge telle que le stock demeure inchangé. La trajectoire optimale est toujours croissante. Dès la période 7, les prélèvements myopes sont égaux à la répartition égalitaire de la recharge entre tous les préleveurs. La trajectoire rationnelle converge plus lentement, ainsi à la fin de l'horizon les prélèvements individuels sont égaux à 7 unités, une unité au-dessus de la répartition égalitaire de la recharge. La population mixte (50% de préleveurs QM et 50% de PP) aboutit à un pseudo état stationnaire vers la période 6, c'est-à-dire que le stock de la ressource demeure constant. Bien que la recharge soit totalement consommée, elle n'est pas répartie de façon égalitaire entre les deux types de préleveurs : les QM prélèvent 8 unités chacun et les PP seulement 4 unités.

En terme d'efficience (richesse accumulée à la fin de l'horizon par rapport à la stratégie optimum), la population mixte réalise 45% en moyenne (48% pour les préleveurs QM et 42% pour les PP), presque aussi bien que la stratégie rationnelle (49%). La stratégie myope reste toujours la moins efficiente avec 34%.

Dans la Figure 4.8 (page 191), les trajectoires de prélèvement QM et PP sont comparées avec les prédictions conditionnelles des comportements théoriques myope, rationnel et optimum. Sauf pour les deux dernières périodes, les prélèvements des deux types sont supérieurs à la prédiction conditionnelle optimum. Cependant, l'exploitation par la population mixte résulte dans une trajectoire pour le stock de la ressource qui permet aux stratégies myope et rationnelle de prélever plus.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)

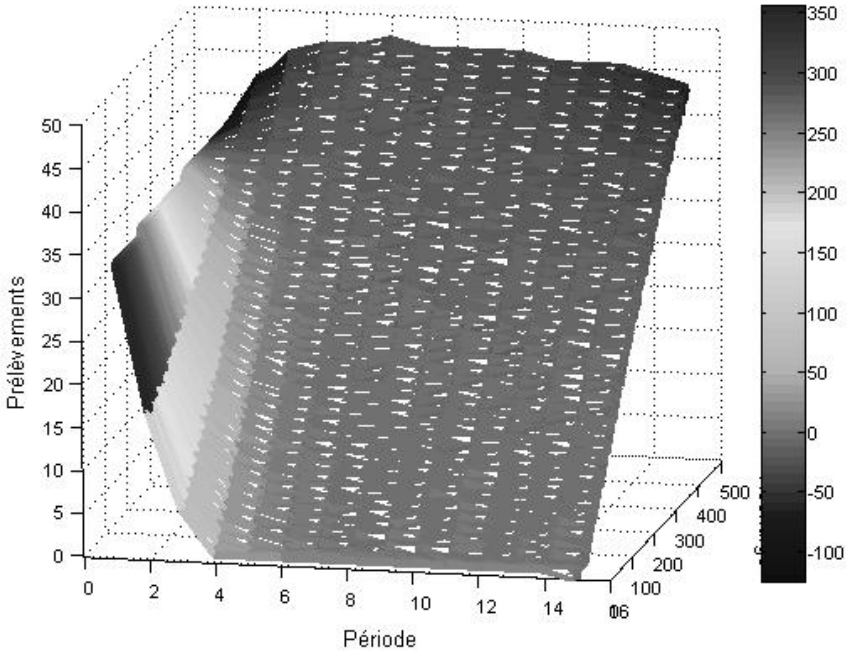


Figure 4.6 : Prélèvements individuels versus la recharge naturelle. Figure 4.6a règle Quasi Myope et Figure 4.6b règle Prévoyant Perturbé

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

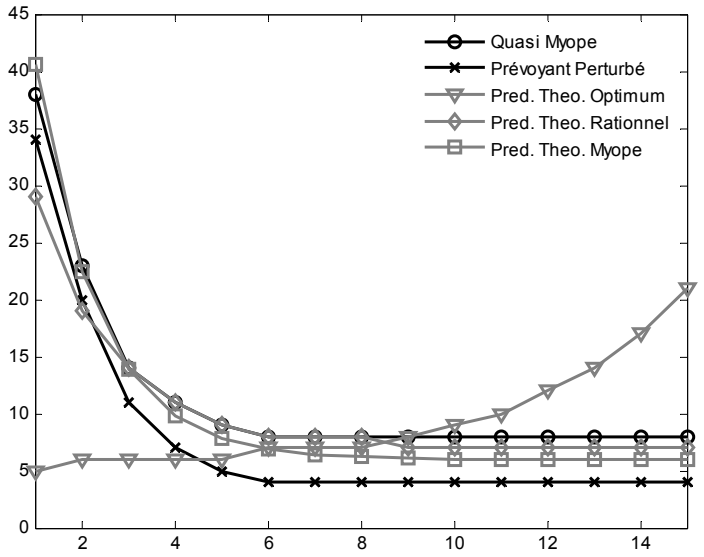


Figure 4.7 : Prélèvements individuels d'une population mixte, 50% de préleveurs 'Quasi Myopes' et 50% 'Prévoyants Perturbés', versus les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

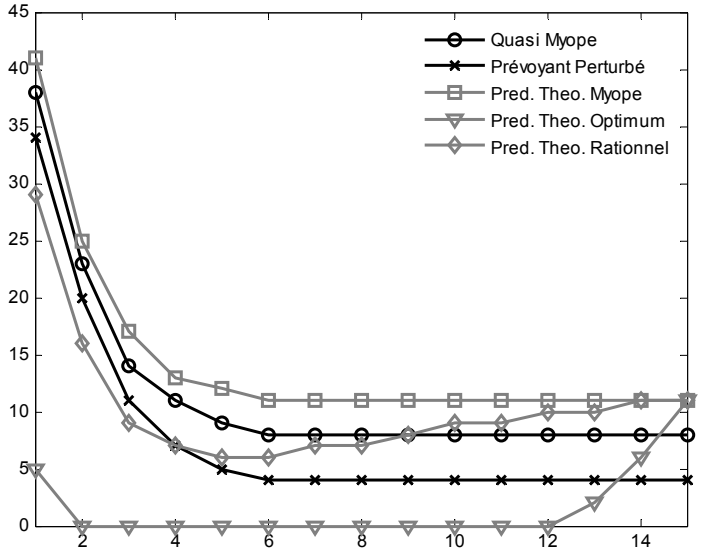


Figure 4.8 : Prélèvements individuels d'une population mixte, 50% de préleveurs 'Quasi Myopes' et 50% 'Prévoyants Perturbés', versus les prédictions théoriques « conditionnelles » Myope, Rationnelle et Optimum

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.5.2 L'impact de la richesse et de sa distribution

Avant d'analyser l'effet de la distribution de la richesse entre les types sur l'efficience de l'exploitation, nous décrivons le résultat des simulations de prélèvement avec différents niveaux de richesse initiale.

Nous avons calculé les trajectoires pour les deux types de préleveurs en considérant des valeurs pour la richesse initiale de chaque individu entre 0 et 5000 unités, avec un pas de 100 unités, soit 51 trajectoires pour chaque règle. Ces trajectoires sont représentées dans la Figure 4.9 (page 193) : QM (Figure 4.9a) et PP (Figure 4.9b). La gradation dans les gris indique le dépassement (en valeur absolue) des prélèvements individuels du niveau qui garantit un stock de ressource constant.

OBSERVATION 4.3 : Une richesse initiale plus élevée réduit fortement les prélèvements initiaux.

Les

Figure 4.9a et

Figure 4.9b mettent en évidence le fort impact de la richesse initiale sur la trajectoire de prélèvement des deux types. Contrairement à ce qui a été observé pour l'effet de la recharge naturelle (Figure 4.6, page 190), les prélèvements initiaux sont ici fortement affectés et les finaux dans une moindre mesure. Les prélèvements initiaux sont fortement réduits par un accroissement de la richesse initiale, arrivant même à des trajectoires constantes et croissantes lorsque la richesse est très élevée.

OBSERVATION 4.4 : Jusqu'un certain niveau, les trajectoires de prélèvement convergent vers une répartition de la recharge de plus en plus égalitaire lorsque la richesse initiale augmente. Au-delà de ce niveau, la répartition de la recharge devient à nouveau inégalitaire.

Le phénomène de convergence vers des prélèvements qui permettent au stock de la ressource de rester constant n'est pas altéré. Néanmoins, nous observons qu'au fur et à mesure de l'augmentation de la richesse initiale, la répartition de la recharge devient de plus en plus égalitaire. Dans un premier temps, les prélèvements QM convergent vers une valeur inférieure

(

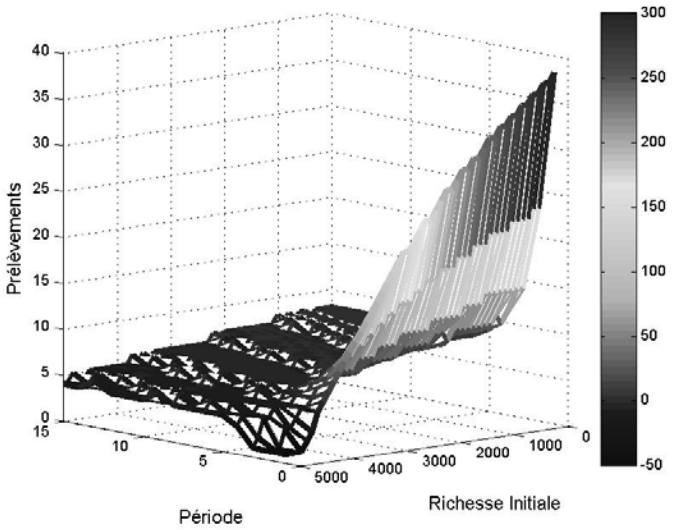
CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 4.9a) et les prélèvements PP vers une valeur supérieure (

Figure 4.9b). Au-delà d'un certain niveau de richesse, les prélèvements PP deviennent supérieurs aux QM et, en plus, la convergence est moins nette, les trajectoires montrant une légère variabilité.

Comme conséquence directe des observations 4.3 et 4.4, nous trouvons que l'efficience moyenne de l'exploitation augmente avec la richesse initiale, atteignant un maximum pour 4100 points (Figure 4.10, page 194). Dans la phase où l'efficience est croissante, les trajectoires QM sont les plus efficaces en raison des prélèvements relativement faibles des PP. Dans la phase de décroissance, c'est le contraire qui est observé.

(a)



(b)

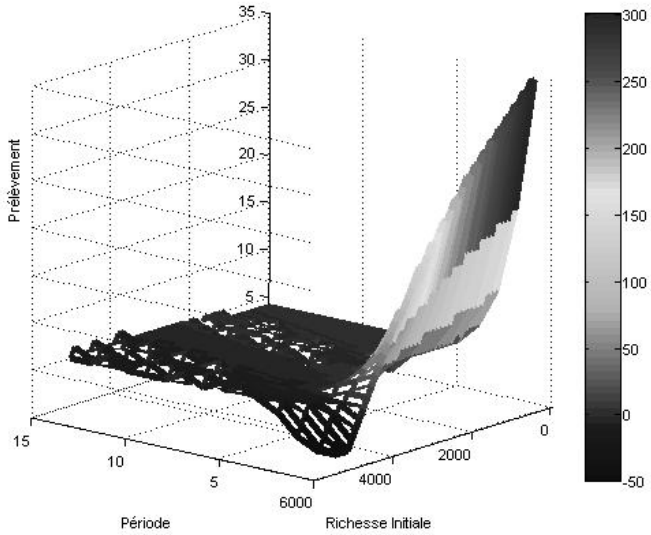


Figure 4.9 : Prélèvements individuels versus la richesse initiale. (a) QM et (b) PP

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

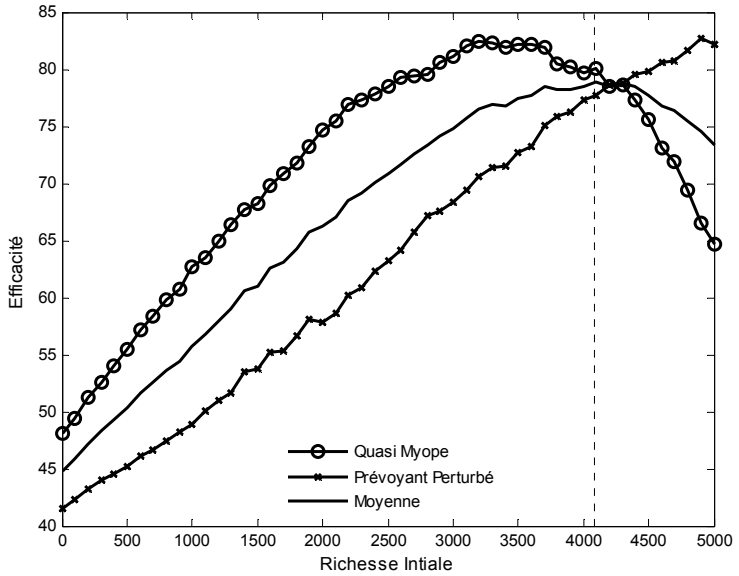


Figure 4.10 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents valeurs de la richesse initiale

Supposons qu'au début de l'horizon temporel, une richesse égale à W est répartie (de façon égalitaire ou inégalitaire) entre les types de joueurs. Comme nous nous intéressons à l'impact de la distribution de la richesse initiale entre les types de préleveurs et non pas entre les individus, à l'intérieur d'un groupe de préleveurs du même type on suppose que la richesse est répartie de façon égalitaire.

La Figure 4.11 (page 195) compare les trajectoires de prélèvement de chaque type appartenant à une population mixte dans deux cas. Dans le premier, la richesse initiale est nulle : les trajectoires sont donc les mêmes que celles exposées dans les Figure 4.7 (page 191) et Figure 4.8 (page 191). Dans le deuxième cas, la richesse initiale de 20 000 points est répartie de façon égalitaire entre les types (2 000 points par individu) ; les trajectoires de prélèvement peuvent être retrouvées dans la
Figure *4.9*. La Figure 4.11 illustre les résultats exposés dans les observations 4.3 et 4.4. Dans la Figure 4.10, on peut voir également l'amélioration en termes d'efficience produite par le choc de richesse initiale.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

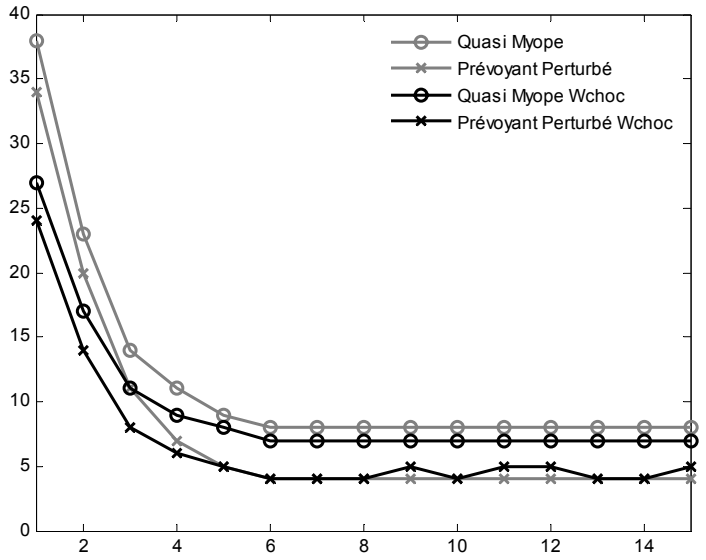


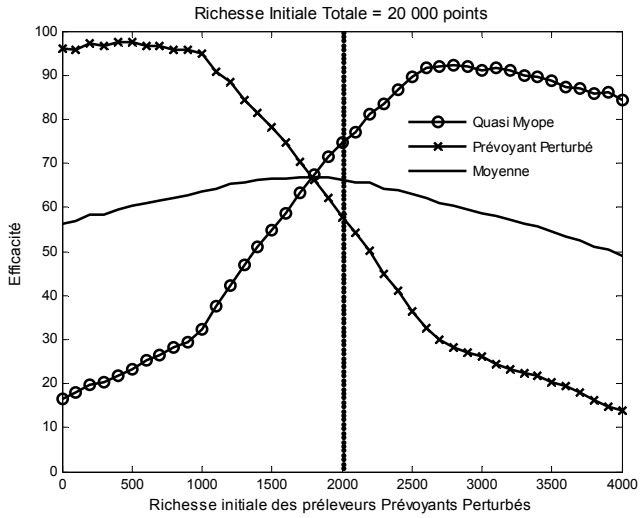
Figure 4.11 : Comparaison des prélèvements individuels d'une population mixte de préleveurs Quasi Myopes et Prévoyants Perturbés : richesse initiale nulle et de 2000 points par individu

OBSERVATION 4.5 : Au fur et mesure que la richesse initiale totale augmente, la répartition de la richesse initiale qui maximise l'efficience de l'exploitation est de plus en plus égalitaire. Néanmoins, les distributions de richesse initiale résultant des préleveurs PP relativement pauvres dominent celles où ils sont relativement riches.

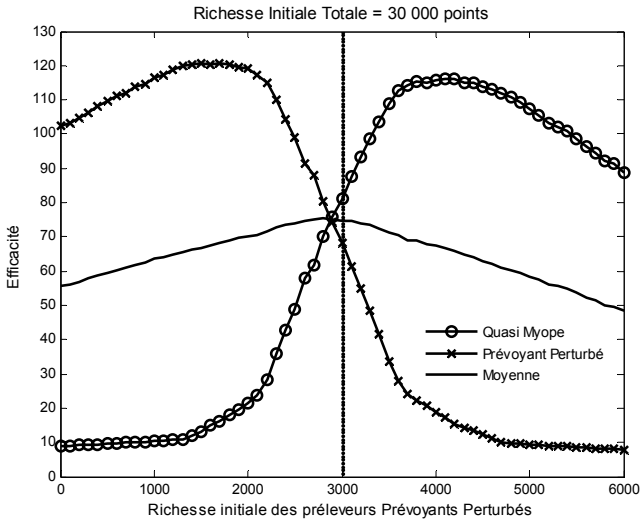
La Figure 4.12 (page 196) met en évidence les résultats énoncés dans l'observation 4.5. Elle indique l'efficience des trajectoires de prélèvement de chaque type ainsi que l'efficience moyenne pour différentes distributions de la richesse initiale entre les types. Dans la Figure 4.12c, la richesse initiale totale correspond à celle qui maximise l'efficience pouvant être atteinte par la population mixte (voir Figure 4.10, page 194). En comparant les trois figures, on observe que des distributions, entre les types, de plus en plus égalitaires maximisent l'efficience quand la richesse initiale totale passe de 20 000 à 41 000 points. On constate également que, pour un même niveau d'inégalité dans la distribution, il est préférable du point de vue de l'efficience moyenne, que les préleveurs PP soient relativement pauvres.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)



(c)

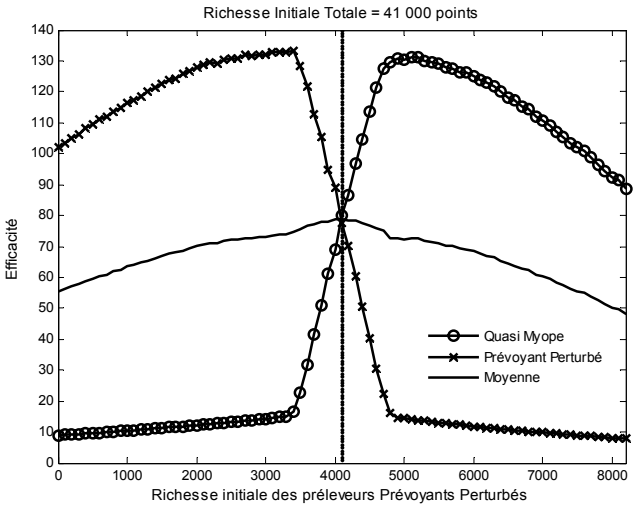


Figure 4.12 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents distributions d'une richesse initiale de 20 000, 30 000 et 41 000 points

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.5.3 Les politiques publiques

La prise en compte de la richesse accumulée dans les règles de décision estimées permet de considérer les effets indirects des politiques fiscales sur l'efficience de l'exploitation de la ressource. La quantification de l'effet de la richesse sur les prélèvements permet d'analyser l'impact, à l'aide des simulations, d'un nombre de facteurs non considérés auparavant. Par exemple, la montée des prix des terres ou des produits agricoles peut avoir un effet richesse et, par ce biais, affecter les trajectoires de prélèvement. Egalement, toutes les politiques qui visent la distribution des revenus et de la richesse auront un impact indirect sur l'exploitation de la ressource. Nous évaluons les effets indirects des politiques fiscales, telles que l'impôt sur le revenu et sur la richesse, sur l'efficience de l'exploitation de la ressource. Puis nous utiliserons ce cadre pour comparer l'efficience des taxes pigouviennes conçues pour influencer directement les prélèvements. L'objectif de cet exercice n'est pas d'évaluer la possibilité de remplacer les taxes unitaires sur les prélèvements par des politiques fiscales mais d'identifier des éventuelles interactions.

4.5.3.1 La taxe unitaire

Nous évaluons l'impact d'une taxe uniforme par unité prélevée sur l'efficience des trajectoires de prélèvement pour une population mixte de préleveurs QM et PP. La taxe est uniforme car les deux types sont taxés avec le même taux. Nous considérons deux cas. Dans le premier, le taux de la taxe unitaire est constant pour l'ensemble de l'horizon temporel. Nous évaluerons l'effet sur l'efficience moyenne des trajectoires de prélèvement résultantes pour différents niveaux du taux, ainsi que pour trois niveaux de richesse initiale (distribuée de façon égalitaire dans la population). Dans le deuxième cas, le taux de la taxe est flexible, il s'adapte à l'évolution du stock de la ressource et donc, par l'internalisation des externalités négatives, il permet à une population homogène de préleveurs myopes ou rationnels de suivre la trajectoire de premier rang (nous l'appellerons taxe pigouvienne). Nous allons ainsi, pour trois niveaux de richesse initiale différente, évaluer l'efficience de deux taxes à taux flexible appliquées de façon uniforme : une taxe conçue pour une population de préleveurs myopes et une autre conçue pour population de préleveurs rationnels.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- *Taxe à taux fixe*

Nous avons simulé les trajectoires de prélèvement de chaque type de préleveur, pour des taxes unitaires à taux uniforme et constant dans l'intervalle $[0,10]$; soit une centaine de trajectoires que sont exposées dans la Figure 4.13 : QM (Figure 4.13a) et PP (Figure 4.13b). L'échelle de couleurs indique le dépassement (en valeur absolu) des prélèvements individuels du niveau qui garantit un stock de ressource constant.

OBSERVATION 4.6 : Lorsque la richesse initiale est nulle, la taxe unitaire à taux fixe réduit fortement les prélèvements initiaux au point de générer des trajectoires croissantes dans le temps. Mais ces trajectoires convergent vers des niveaux de prélèvement qui épuisent la recharge.

Dans la Figure 4.13 (page 199), nous observons que les prélèvements initiaux des deux types sont diminués par la taxe, au point de générer des trajectoires initialement croissantes. Mais la rigidité du taux empêche les prélèvements des périodes suivantes de continuer à croître, ainsi les trajectoires des deux types convergent vers des prélèvements constants qui épuisent la recharge du stock. Bien que ces prélèvements divergent entre les types, ils se rapprochent pour des taux de la taxe supérieurs à cinq. Malgré tout, les gains d'efficience générés par la taxe constante sont assez importants.

La Figure 4.14 (page 201) expose l'efficience atteinte par les trajectoires de prélèvement de chaque type et l'efficience moyenne, simulées pour les différents taux de la taxe et les trois niveaux de richesse initiale.

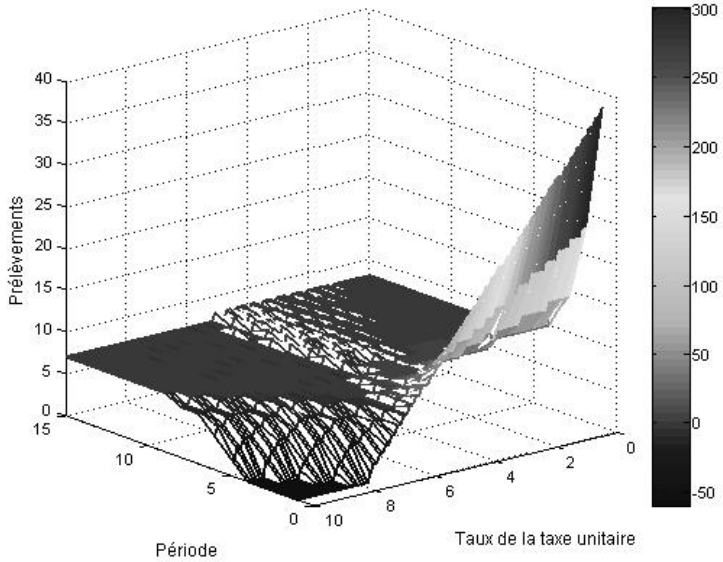
OBSERVATION 4.7 : Le taux de la taxe fixe qui maximise l'efficience est d'autant plus faible que la richesse initiale est élevée.

Autrement dit, il y a un effet d'éviction entre la richesse que le taux de la taxe fixe qui atteigne le maximum d'efficience. L'efficience des trajectoires de prélèvement de chaque type, simulées pour différents taux de la taxe et pour une richesse initiale nulle, est exposée dans la Figure 4.14a. Nous observons qu'un taux de 7,2 points par unité prélevée maximise l'efficience moyenne, permettant d'atteindre 83% d'efficience. Lorsque la richesse initiale passe à 2 000 points par préleveur, nous observons dans la Figure 4.14b que le taux qui

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

maximise l'efficience moyenne a diminué à 5,1 points par unité prélevée, aboutissant à 82% d'efficience. Pour une richesse initiale de 4 100 points par préleveur (Figure 4.14c), correspondant à l'efficience maximale pour une population mixte de préleveurs QM et PP, le taux nul permet d'accéder au maximum d'efficience (78%). Ainsi la non intervention est préférable pour ce niveau de richesse initiale distribuée de façon égalitaire entre les préleveurs.

(a)



(b)

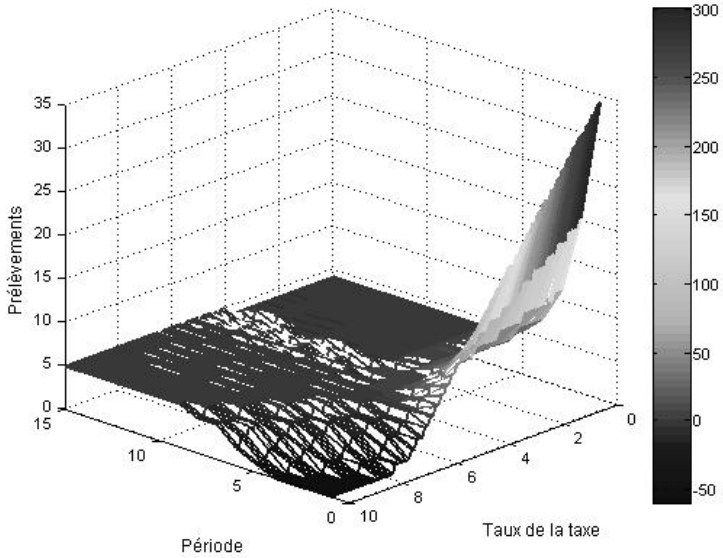


Figure 4.13 : Trajectoires de prélèvement individuel Quasi Myope (a) et Prévoyant Perturbé (b) pour différents taux de la taxe unitaire constante (richesse initiale nulle)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Corollaire de l'Observation 4.7 : La taxe unitaire à taux constant et uniforme permet d'atteindre une efficience d'environ 80% pour n'importe quel niveau de richesse initiale totale répartie de façon égalitaire.

Dans Figure 4.14 (page 201), on voit que la taxe unitaire avec un taux constant correctement calibré permet d'atteindre une efficience autour de 80%. Néanmoins, on observe un effet d'éviction de la richesse initiale sur les gains d'efficience de la taxe à taux fixe. En effet, pour un même taux, les gains en terme d'efficience de l'introduction de la taxe sont plus importants lorsque que la richesse initiale est moins importante. Ainsi, en comparant les Figure 4.14a et Figure 4.14b, nous observons qu'un taux égal à 1 entraine un gain d'efficience de 10% lorsque la richesse initiale est nulle (passant de 45% à 55% d'efficience), mais seulement de 4% lorsque la richesse initiale est de 2 000 points par préleveur.

- *Taxe à taux flexible*

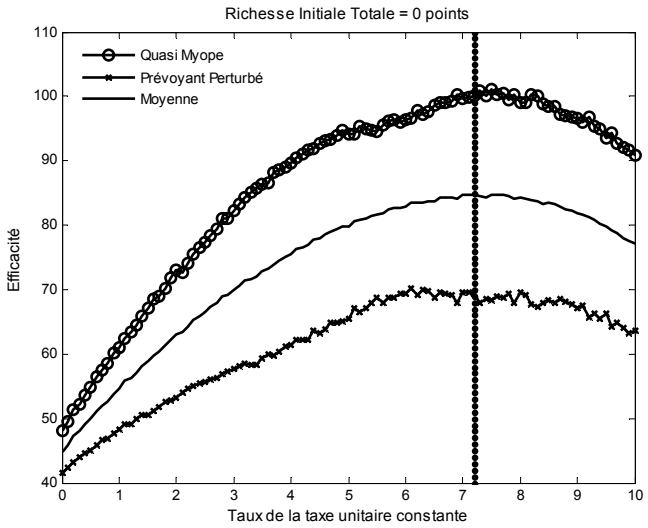
Les Figure 4.15 (page 203), 4.16 (page 204) et 4.17 (page 205) retracent les trajectoires de prélèvements des types QM et PP résultant de l'introduction de taxes flexibles : myope et rationnelle. Trois niveaux de richesse initiale totale sont considérés : nulle, de 20 000 et 41 000 points, respectivement.

OBSERVATION 4.8 : La richesse initiale amplifie l'impact des taxes flexibles sur les trajectoires de prélèvement.

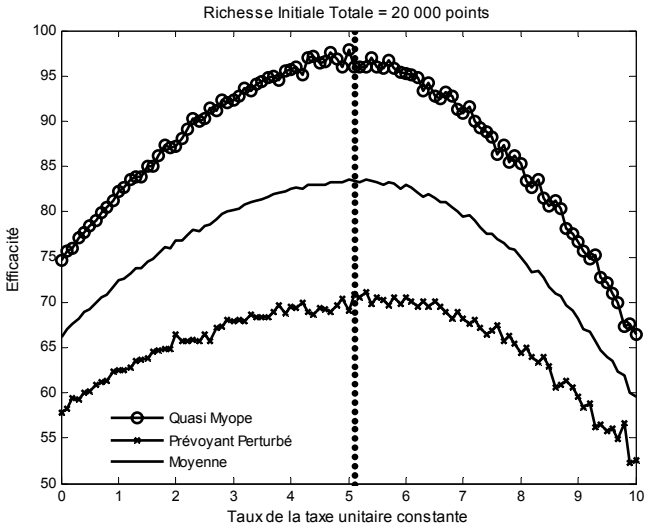
La Figure 4.15 met en évidence que, lorsque la richesse initiale est nulle, les deux taxes réduisent fortement les prélèvements initiaux par rapport à une situation sans intervention (voir Figure 4.7, page 191), mais elles n'arrivent pas à générer des trajectoires croissantes dès le début (telle que la stratégie optimum dans la Figure 4.7) pour aucun des deux types. Pour les deux taxes flexibles, myope et rationnel, les différences les plus marquées avec la prédiction conditionnelle optimum sont observées dans la première moitié de l'horizon temporel, ensuite les trois trajectoires sont plus proches les unes des autres.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)



(c)

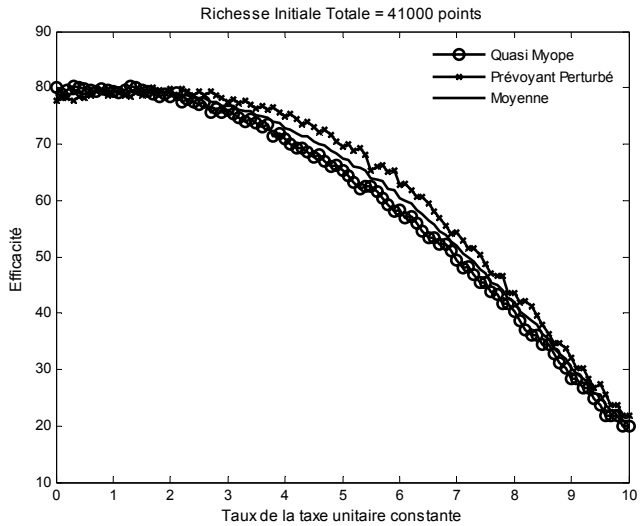


Figure 4.14 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents taux de la taxe unitaire fixe et différentes richesses initiales totales (réparties de façon égalitaire)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

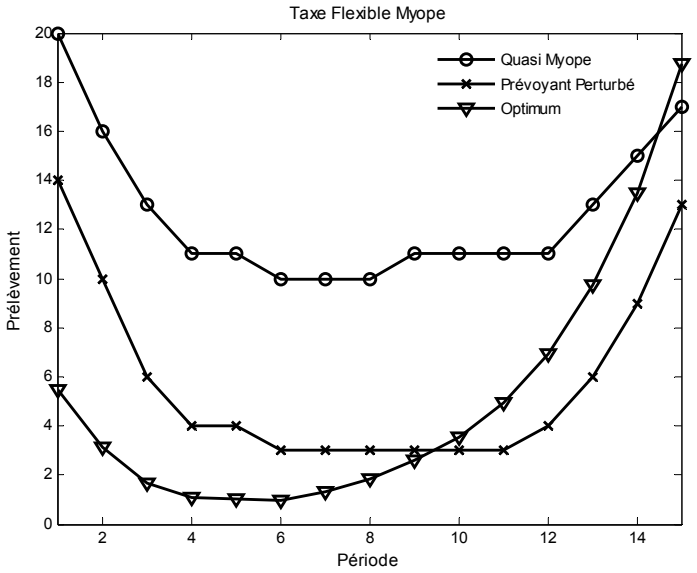
Du fait de taux initiaux plus élevés, la taxe myope (Figure 4.15a) entraine une réduction plus importante des prélèvements du début, générant des trajectoires quasi myopes et prévoyants perturbés dont l'efficience atteint les 101% et 54%, respectivement, avec une efficience moyenne de 77% (voir dans le Tableau 4.4, dans la page 206, un récapitulatif de l'efficience atteinte par les différentes taxes unitaires évaluées). Le type QM accumule plus de richesse que ne le prédit l'optimum non conditionnel (voir Figure 4.7), cela est dû au fait que la trajectoire PP est en dessous de l'optimum à partir du période 10. Ceci permet aux préleveurs QM d'encaisser les gains laissés de côté par les PP, accumulant des profits très importants à la fin.

La taxe flexible rationnelle échoue à réduire les prélèvements initiaux de façon aussi importante que la taxe myope. En conséquence, l'efficience des trajectoires est moindre, notamment pour le type QM. Tandis que la trajectoire de prélèvement PP est aussi efficiente que dans le cas de la taxe myope (54%), la quasi myope atteint seulement 73% d'efficience (efficience moyenne de 63%).

Lorsque la richesse initiale est de 2 000 points par préleveur (Figure 4.16, page 204), les taxes myopes et rationnelles réduisent plus efficacement les prélèvements initiaux des deux types, produisant des trajectoires croissantes dès le début de l'horizon temporel. Néanmoins, les prélèvements sont excessivement réduits, au point que les trajectoires se placent en dessous de la prédiction conditionnelle optimum, pour l'ensemble des périodes dans le cas de la taxe myope (Figure 4.16a) et pour les six dernières dans le cas de la taxe rationnelle. Ceci a pour conséquence une amélioration dans l'efficience moyenne des trajectoires. La taxe rationnelle arrive à 78% d'efficience moyenne, dont la trajectoire QM atteint les 87% et la PP les 69%. La taxe myope produit des trajectoires quasi myopes et prévoyants perturbés dont l'efficience est de 131% et 89%, respectivement (110% d'efficience moyenne). Cette situation asymétrique, où chaque type réagit de façon différente aux incitations introduites par les taxes, domine l'équilibre qui résulte de la stratégie optimum pour une population homogène (de préleveurs myopes ou rationnels).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)

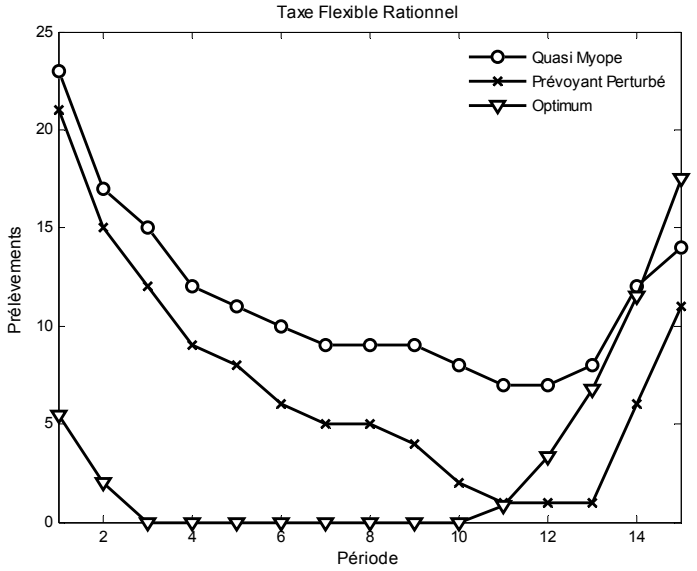
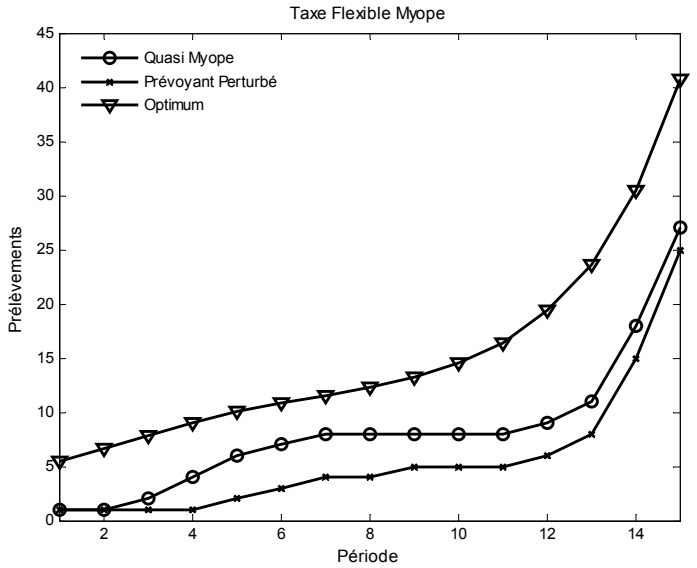


Figure 4.15 : Trajectoires de prélèvement Quasi Myope, Prévoyant Perturbé et Optimum pour des taux Myope et Rationnel de la taxe unitaire flexible et une richesse initiale totale nulle

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)

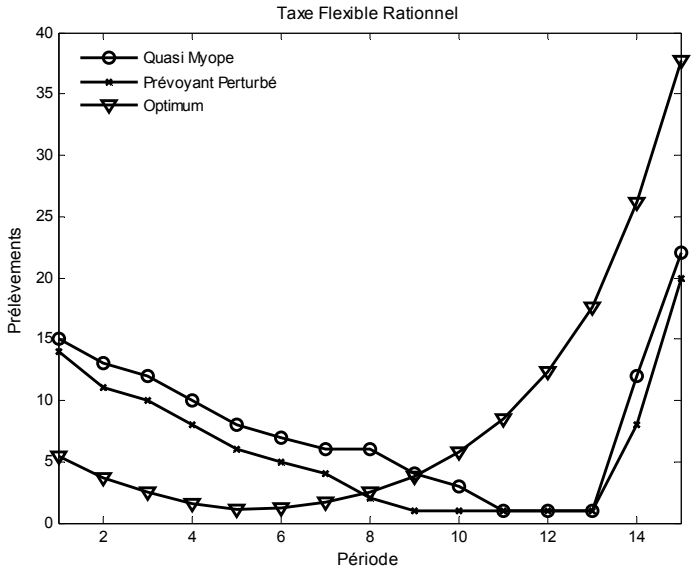
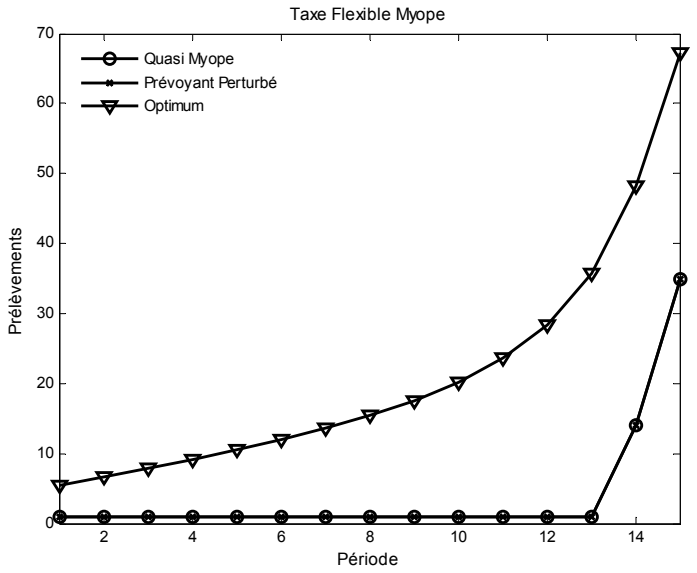


Figure 4.16 : Trajectoires de prélèvement Quasi Myope, Prévoyant Perturbé et Optimum pour des taux Myope et Rationnel de la taxe unitaire flexible, et une richesse initiale totale égale à 20 000 points (répartie de façon égalitaire)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)

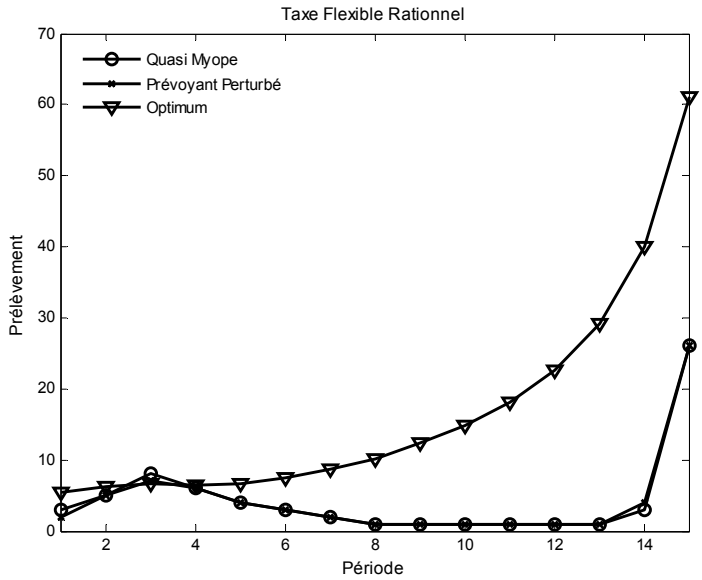


Figure 4.17 : Trajectoires de prélèvement Quasi Myope, Prévoyant Perturbé et Optimum pour des taux Myope et Rationnel de la taxe unitaire flexible, et une richesse initiale totale égale à 41 000 points (répartie de façon égalitaire)

Les Figure 4.17a et Figure 4.17b retracent les trajectoires de prélèvement de chaque type lorsqu'une taxe flexible (myope et rationnelle, respectivement) est introduite et la richesse initiale est de 41 000 par préleveur. Les trajectoires de prélèvement coïncident pour les deux types, avec des prélèvements inférieurs à l'optimum. Une comparaison avec la Figure 4.9 (page 193) révèle une réduction très importante des prélèvements. La taxe myope génère néanmoins une efficience égale à 87%, supérieure à la situation de laissez faire (78% d'efficience). Par contre, la taxe rationnelle détériore l'efficience des trajectoires atteignant 76% d'efficience (voir Tableau 4.4, page 206).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

OBSERVATION 4.9 : La taxe flexible myope est plus efficiente que la taxe flexible rationnelle et que la taxe à taux constant pour tous les niveaux de richesse initiale.

Le Tableau 4.4 reporte l'efficience brute et nette (entre parenthèses) pour chaque type de taxe en fonction du niveau de richesse initiale. La taxe flexible myope est la plus efficace en termes bruts et nets. Lorsque la richesse initiale est nulle, la taxe à taux constant atteint un niveau d'efficience brute supérieur à la taxe flexible myope mais, en termes nets, c'est la taxe flexible qui domine légèrement.

	Types								
	Quasi Myope			Prévoyant perturbé			**Moyenne**		
Richesse initiale	Nulle	2 mille	4,1 mille	Nulle	2 mille	4,1 mille	**Nulle**	**2 mille**	**4,1 mille**
Laissez faire	48%	75%	79%	42%	58%	77%	**45%**	**67%**	**78%**
Taxes									
Taux constant	98% (8%)	97% (34%)	-	68% (7%)	67% (26%)	-	**83% (7%)**	**82% (30%)**	**-**
Taux flexible myope	101% (11%)	131% (38%)	87% (46%)	54% (6%)	89% (27%)	87% (47%)	**77% (8%)**	**110% (32%)**	**87% (46%)**
Taux flexible rationnel	73% (8%)	87% (20%)	76% (37%)	54% (5%)	69% (9%)	76% (36%)	**63% (7%)**	**78% (15%)**	**76% (37%)**

Tableau 4.4 : Efficience maximale des trajectoires sous les différentes taxes unitaires, exposée par type et en moyenne, et en termes bruts et (nette)

4.5.3.2 Les politiques fiscales : impôt sur les profits et sur la richesse

- *L'impôt sur les profits*

Comment un impôt sur les profits agit-il sur les trajectoires de prélèvement et sur l'efficience de ces dernières ? Etant donné la forme fonctionnelle des règles de décision de chaque type de préleveur, une taxe sur les profits peut avoir deux types d'effets : (i) un effet direct sur les profits générés par chaque niveau de prélèvement et (ii) un effet indirect sur l'accumulation de richesse. D'après les observations 4.7 (page 198) et 4.8 (page 200), l'effet sur l'efficience

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

des trajectoires de prélèvement sera d'autant moins fort que la taxe sur les profits réduit l'accumulation de la richesse.

OBSERVATION 4.10 : L'impôt sur les profits impacte différemment selon le type : les préleveurs PP cessent leur activité d'exploitation lorsque le taux de l'impôt sur les profits atteint un certain niveau. Les trajectoires de prélèvement des agents QM révèlent une réduction dans les prélèvements initiaux pour converger ensuite des prélèvements de plus en plus importants.

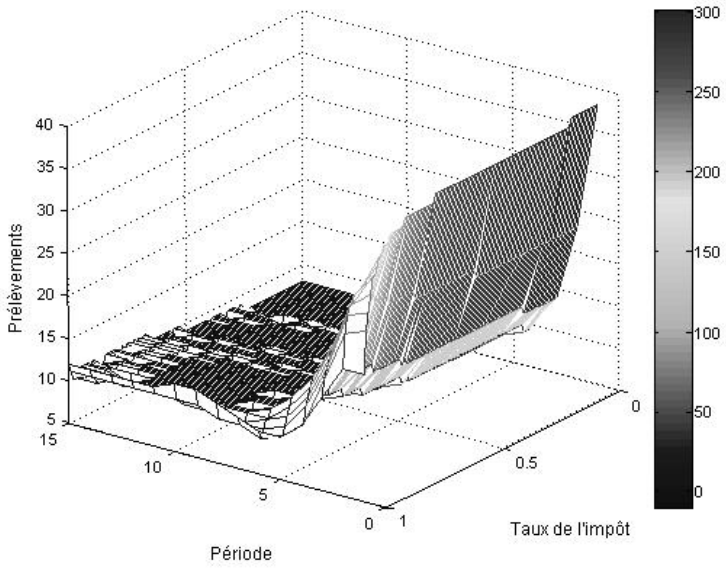
Dans la Figure 4.18b (page 208), les prélèvements initiaux des préleveurs PP sont progressivement réduits au fur et à mesure que le taux de l'impôt sur les profits augmente. Les trajectoires convergent vers un niveau de prélèvement constant de plus en plus faible lorsque le taux augmente, conduisant à l'arrêt de l'exploitation pour les préleveurs PP lorsque le taux tend vers l'unité. Ainsi, les préleveurs QM se substituent aux préleveurs PP lorsque le taux augmente (Figure 4.18a). En conséquence, même si leurs prélèvements initiaux se trouvent réduits par l'impôt, les trajectoires QM convergent vers un niveau de prélèvement constant de plus en plus élevé lorsque le taux de l'impôt sur le profit augmente. La recharge naturelle est totalement absorbée par les préleveurs QM (le niveau de stock demeure constant).

OBSERVATION 4.11 : Le taux optimal de l'impôt sur les profits diminue avec la richesse initiale.

La Figure 4.19 (page 209) montre l'efficience des trajectoires de prélèvement de chaque type, ainsi que l'efficience moyenne pour différents taux de l'impôt sur les profits, en considerant trois niveaux de richesse intiale différents. L'efficience atteint son maximum, 62%, avec un taux de 0,92 quand la richesse initiale totale est nulle (Figure 4.19a). Pour une richesse initiale totale de 20 000 points (Figure 4.19b), l'efficience moyenne atteint 81% pour un taux de l'impôt égal à 0,68. Finalement, quand la richesse initiale totale est de 41 000 points, l'efficience est maximale pour un taux d'imposition nul.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)

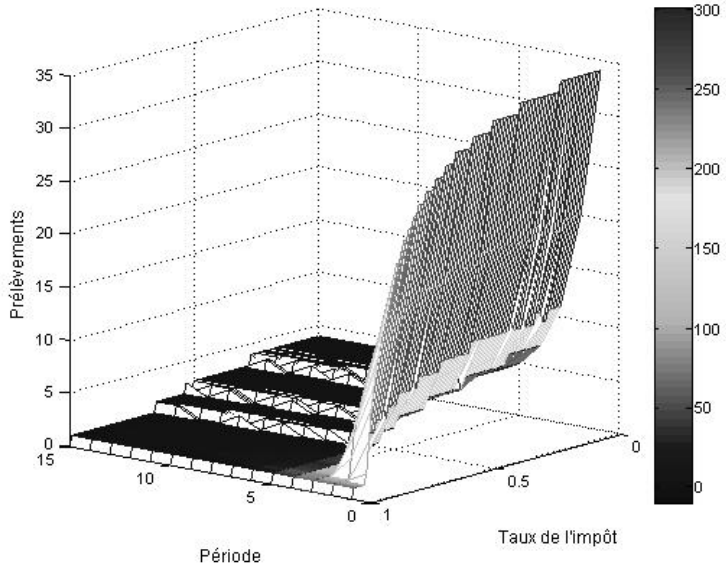
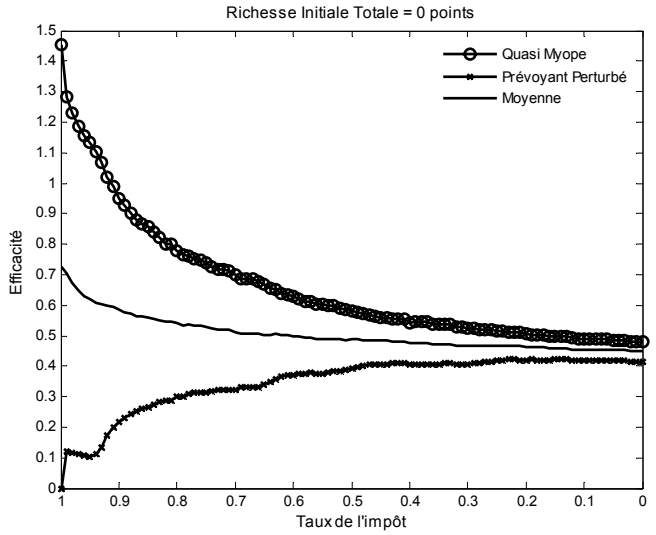


Figure 4.18 : Trajectoires de prélèvement individuel Quasi Myope (a) et Prévoyant Perturbé (b) pour différents taux de l'impôt sur les profits (richesse initiale nulle)

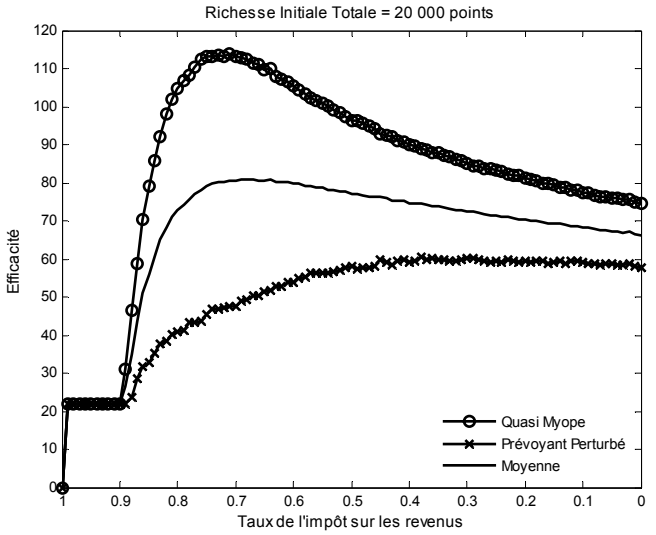
Nous remarquons à partir des Figure 4.19a et 4.19b, que le maximum d'efficience est atteint lorsque l'écart d'efficience des deux types de préleveurs est maximal. Pour des richesses initiales de 20 000 et 41 000 points (Figure 4.19a et Figure 4.19b), au fur et à mesure que le taux de l'impôt augmente, l'efficience des deux types se stabilise autour de 22% puis tombe brusquement à 0% pour un taux égal à 1. L'intervalle des valeurs du taux de l'impôt sur les profits pour lequel l'efficience des deux types est de 22%, s'allonge quand la richesse initiale totale (répartie de façon égalitaire) augmente.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)



(c)

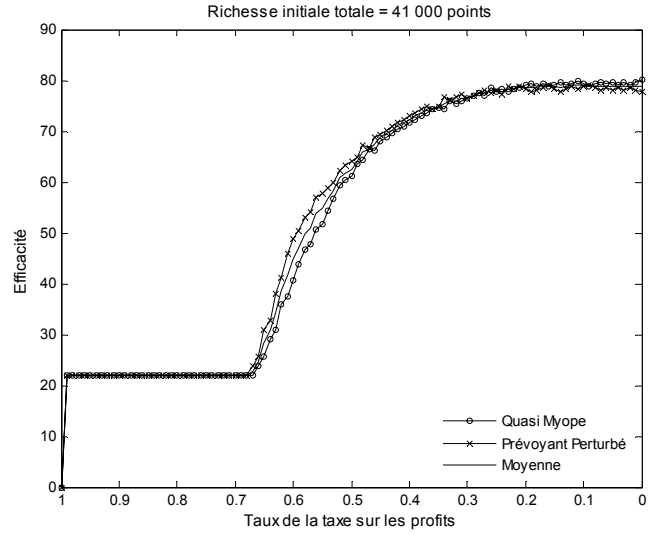


Figure 4.19 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents taux de l'impôt sur les profits et différentes richesses initiales totales (répartition égalitaire)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

OBSERVATION 4.12 : Pour tous les niveaux de richesse initiale, lorsque le taux de l'impôt sur les profits augmente, l'efficience des trajectoires prévoyants perturbés se détériore par rapport au *laissez faire*.

Les Figure 4.19a et Figure 4.19b montrent que l'efficience des trajectoires de prélèvement PP est inférieure à la situation de laissez faire, quelles que soient les valeurs du taux de l'impôt sur les profits.

- *L'impôt sur la richesse*

Comment un impôt sur la richesse accumulée affecte-t-il les trajectoires de prélèvement et l'efficience de ces dernières ?

OBSERVATION 4.13 : L'impôt, à taux uniforme et constant, sur la richesse accumulée dégrade l'efficience des trajectoires de chaque type pour tous les niveaux de richesse initiale totale.

La Figure 4.20 (page 212) illustre ce résultat. L'efficience moyenne décroît pour atteindre 43%, quand le taux est égal à l'unité, quelle que soit la richesse initiale (totale) considérée. Néanmoins, lorsque la richesse initiale est de 4 100 points par préleveur, un taux de l'impôt faible (de 4%) améliore l'efficience moyenne atteignant 82%. A partir de ce point, l'efficience moyenne décroît en gardant, de la même façon que dans les Figures 4.20a et 4.20b, les écarts dans l'efficience des trajectoires de chaque type constants.

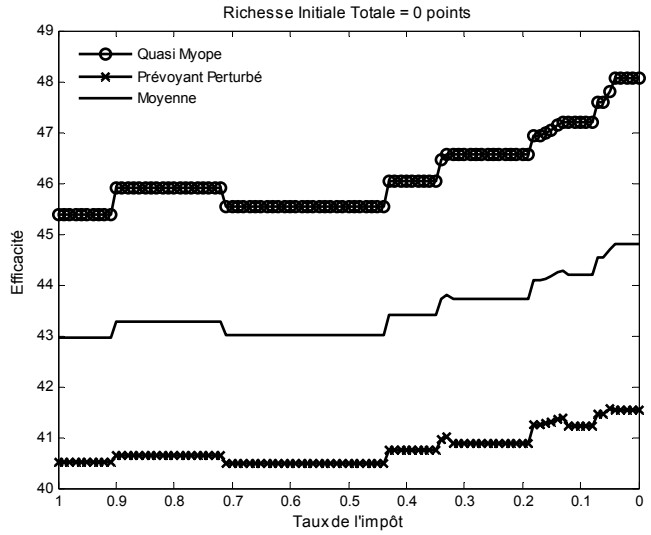
Les implications empiriques des résultats des simulations sont importantes. A partir des données validées par le laboratoire nous sommes en mesure de « prédire » les trajectoires de prélèvement et leur efficience dans différents scénarios. Par exemple, dans un scénario de changement climatique avec une recharge de la ressource considérablement diminuée, on sait qu'il n'y aura aucun effet sur les prélèvements autres que par le biais du stock de la ressource, car l'effet de la recharge sur les stocks futurs de la ressource n'est pas prise en compte par les sujets. Egalement, les effets de richesse et sa distribution ont été identifiés. Par exemple, pour le cas de l'exploitation agricole de l'eau souterraine, les effets indirects (opérés à travers la richesse) sur l'efficience de l'exploitation des scénarios dont les prix de matières premières

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

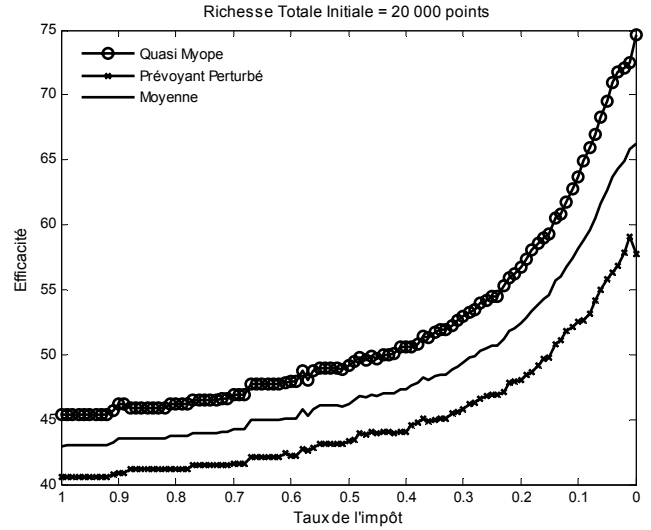
sont en augmentation, ou la PAC est modifiée, ou des évolutions du marché immobilier s'opèrent, peuvent être évalués. Les scénarios peuvent avoir un impact direct sur l'efficience de l'exploitation par les choix techniques qui entraîneront (surface irrigué, technique d'irrigation utilisée, culture, etc.), mais ils peuvent générer un effet richesse et, par ce biais, améliorer l'efficience de l'exploitation. Encore, des scénarios de modifications des politiques fiscales peuvent être aussi évalués. Aussi, pour une situation donnée, l'efficience des instruments incitatifs pour gérer les prélèvements peut être mise à l'épreuve.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(a)



(b)



(c)

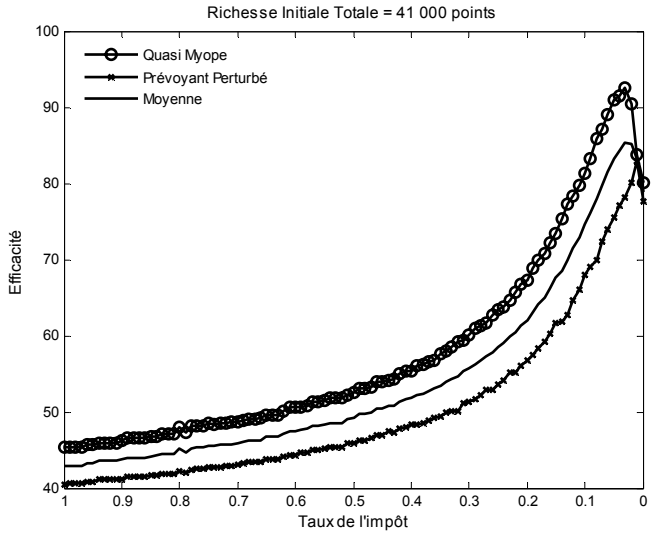


Figure 4.20 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents taux de l'impôt sur la richesse accumulée et différentes richesses initiales totales (réparties de façon égalitaire)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.6 Conclusion

L'algorithme bayésien de classification de Houser et al (2004) nous a permis de donner une description de l'hétérogénéité des comportements observés dans le laboratoire, lorsque les agents exploitent une ressource renouvelable en propriété commune. Cette procédure a permis d'identifier et d'estimer les règles de décision de deux types de préleveurs : les préleveurs Quasi Myopes et les préleveurs Prévoyants Perturbés. Cette méthode nous a également permis d'identifier l'impact sur le comportement d'une variable d'état théoriquement non pertinente, la richesse accumulée. A partir de simulations, nous avons pu évaluer l'impact de la richesse et de sa distribution, ainsi que l'effet de la recharge naturelle et de différents politiques publiques, sur l'efficience des trajectoires de prélèvement dans une population mixte. La validité de ces simulations repose sur la stabilité du modèle par rapport à une modification de la valeur des variables ayant servi à établir les relations entre observables et inobservables.

La richesse initiale a un impact positif sur l'efficience de l'exploitation de la ressource, et ceci malgré l'effet d'éviction constaté entre la richesse et l'effet d'un stock plus élevé. L'efficience augmente jusqu'au point où la richesse initiale (répartie de façon égalitaire) atteigne un certain niveau[11], ensuite elle décline. Egalement, la distribution de cette richesse parmi les types a un effet sensible sur l'efficience de l'exploitation : pour tous les niveaux de richesse initiale totale considérés, c'est une distribution égalitaire qui garantit la maximisation de l'efficience. Nous avons aussi exploré l'effet de la richesse (répartie de façon égalitaire) sur l'efficience des taxes sur les prélèvements et l'interaction avec deux politiques fiscales évaluées, i.e. des impôts à taux constant et uniforme sur les profits et sur la richesse. Nous avons trouvé, à partir des simulations, que la richesse initiale n'affecte pas le niveau maximum d'efficience (80%) atteint par une taxe à taux constant sur les prélèvements. Mais le taux de la taxe qui permet d'arriver au maximum d'efficience diminue au fur et à mesure que la richesse augmente. Cet effet d'éviction pourrait expliquer aussi le fait que l'efficience atteinte par les taxes à taux flexible décline lorsque la richesse initiale augmente au-dela d'un certain niveau[12]. En effet, les taux flexibles s'avèrent trop élevés résultant dans une sous-exploitation de la ressource.

[11] 41 000 points dans notre cas.
[12] 20 000 points dans notre cas.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les résultats exposés dans ce chapitre avaient pour but de montrer comment les données expérimentales peuvent être utilisées pour calibrer des modèles nécessaires pour la construction et l'évaluation de scénarios de gestion de la ressource. En prolongeant ainsi l'approche traditionnelle en économie expérimentale, à savoir tester le pouvoir prédictif d'une théorie, nous avons pu construire une description du comportement qui, par construction, est validée empiriquement et ainsi évaluer les trajectoires de prélèvement et leur efficience dans différents scénarios. Par exemple, une recharge de la ressource fortement réduite dans un scénario de changement climatique n'aura aucun effet sur les prélèvements autres que celui constaté par le biais du stock de la ressource, l'effet de la recharge sur les stocks futurs de la ressource n'étant pas prise en compte par les sujets. Egalement, les effets de richesse et sa distribution ont été identifiés. Par exemple, pour le cas de l'exploitation agricole de l'eau souterraine, les effets indirects (opérés à travers la richesse) sur l'efficience de l'exploitation des scénarios (augmentation des prix de matières premières, modification de la PAC, évolutions du marché immobilier) peuvent être évalués. Les scénarios peuvent avoir un impact direct sur l'efficience de l'exploitation par les choix techniques qu'ils induiront (surface irriguée, technique d'irrigation utilisée, culture, etc.), mais ils peuvent également générer un effet richesse et donc, par ce biais, affecter l'exploitation de la ressource. Des scénarios de modifications des politiques fiscales peuvent être aussi évalués et, pour une situation donnée, l'efficience des instruments incitatifs pour gérer les prélèvements peut être mise à l'épreuve.

Les résultats de ce chapitre ne sont pas directement applicables au cas de la plaine du Roussillon. Néanmoins, nous pensons avoir mis en évidence comment les estimations économétriques du comportement dans le laboratoire permettent d'élargir l'utilisation des données expérimentales à des contextes plus généraux. A partir d'un protocole représentatif de la réalité étudiée, il suffit de réaliser tous les traitements expérimentaux nécessaires à l'identification de l'effet des variables ou des paramètres d'intérêt, et ensuite de quantifier l'impact dans le cadre d'un modèle structurel. Par exemple, les effets des caractéristiques démographiques des agents ou l'impact des facteurs objectifs du contexte sur le comportement pourraient être quantifiés.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Conclusion Générale

Inspirée de la problématique présente dans la plaine du Roussillon (Département des Pyrénées Orientales, France) et afin d'aider à la conception de politiques publiques pour la gestion de l'eau souterraine dans les zones côtières, l'objectif de cette thèse était d'évaluer l'efficacité de divers types de taxes à partir d'expériences en laboratoire puis à l'aide de simulations d'un modèle descriptif construit à partir des données expérimentales.

La plaine du Roussillon est un cas représentatif de la problématique de gestion des aquifères côtiers dans le pourtour méditerranéen et d'autres régions à caractéristiques similaires. Cette plaine est richement dotée en eaux souterraines, organisées dans un aquifère multicouche s'étendant sur 850 km², ce dernier pouvant être caractérisé par deux ensembles de nappes : le réservoir plio-quaternaire profond et les aquifère alluviaux superficielles. Très abondante et de bonne qualité, l'eau souterraine dans cette zone littorale souffre d'un abaissement des niveaux piézométriques, conséquence d'une exploitation de plus en plus généralisée (pour des différents usages : alimentation d'eau potable, irrigation et usage domestiques) et modestement contrôlée. Pour le cas de la nappe profonde, cette baisse à caractère chronique est susceptible d'entraîner, notamment en bord de mer, deux sortes de problèmes :

(i) Risques de pollution localisée comme conséquence d'une inversion de la drainance (des flux de l'aquifère superficiel vers le profond se produisent propageant des polluants dans celle-ci). Ce risque est d'autant plus important lorsqu'il y a des forages de mauvaise qualité, car ils peuvent mettre en communication les deux nappes.

(ii) Risques d'intrusion d'eaux saumâtres ou marines si le niveau piézométrique descend en dessous du niveau de la mer.

En dépit de la législation en vigueur, le nombre de captages et le volume prélevé sont très mal connus à exception des prélèvements pour l'alimentation en eau potable et de l'industrie. Ceci pose une contrainte très forte sur les éventuels instruments à utiliser pour gérer les quantités prélevées. Les décideurs publics s'interrogent alors sur les mesures à mettre en œuvre pour assurer une gestion durable des eaux souterraines dans la plaine du Roussillon et en particulier sur celles à instaurer pour réguler les prélèvements d'origine agricole.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Un instrument à vocation incitative pour agir sur la demande agricole d'eau souterraine est la redevance ressource. Instaurée par la loi sur l'Eau de 1964 et généralisée par la loi de 1992, cette redevance peut s'avérer utile pour la gestion de la demande par son potentiel incitatif à l'économie d'eau. Une tarification correcte des prélèvements en eau souterraine permet d'envoyer les bons signaux à la prise de décision concernant l'investissement en technologie d'irrigation et le choix de la ressource à exploiter, deux décisions intimement liées. Le taux de la redevance est fortement différencié selon la rareté de l'eau ; il est applicable sur les volumes prélevés dont le niveau est connu grâce à un relevé de compteurs ou estimé forfaitairement en leur absence. Actuellement, le taux de la redevance est trop faible et parfois ne couvre même pas les coûts supportés pour son recouvrement, expliquant ainsi que certains agriculteurs ne soient pas soumis à paiement. Il s'avère donc intéressant d'évaluer différentes modifications de cet instrument dans l'objectif d'évaluer son potentiel pour réguler les prélèvements en eau souterraine.

Nous avons proposé une démarche expérimentale pour évaluer la performance de différents types de taxes pour gérer la demande en eau souterraine. Afin d'établir des prédictions testables dans le laboratoire tout en prenant compte des caractéristiques essentielles du terrain d'étude dans notre protocole expérimental, nous avons développé un modèle conceptuel de régulation de l'exploitation de l'eau souterraine. Dans un cadre simplifié, nous montrons comment les arbitrages inhérents au choix parmi différents instruments, par le régulateur, peuvent résulter dans une situation de second rang.

Dans le cadre d'un jeu dynamique à temps discret et fini, une population mixte de préleveurs neutres vis-à-vis du risque exploite une ressource renouvelable sous un régime de propriété commune (CPR renouvelable). Nous avons montré qu'une population mixte, composée de préleveurs myopes (avec une préférence pour le présent infinie) et rationnels (avec une préférence pour le présent finie), conduit à une exploitation moins efficace par rapport à une population composée uniquement de préleveurs rationnels. Une intervention publique est donc plus fortement recommandée dans un tel cas.

En cas de non observabilité des prélèvements individuels, nous avons présenté trois instruments incitatifs permettant d'arriver à la solution de premier rang pour des populations homogènes : à savoir, une taxe pigouvienne avec audit aléatoire des déclarations, une taxe

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ambiante et un instrument mixte (qui peut être interprété comme une combinaison des deux précédents proposé par Kritikos (2004)). Pour que ces politiques soient efficaces, le régulateur doit pouvoir identifier le type de chaque préleveur (myope ou rationnel). L'identification via un mécanisme révélateur est écartée car les rentes informationnelles des agents sont supposées trop élevées du fait de la nature dynamique du problème. Un régulateur ignorant ne peut donc qu'instaurer des instruments avec des taux uniformes (indépendantes du type). Nous avons montré comment modifier les instruments à taux uniforme pour qu'ils soient de premier rang (Propositions 2 et 3 et ses corollaires).

Après avoir introduit deux modifications au protocole d'expérience de Herr et al (1997), à savoir, une ressource renouvelable et l'indépendance des externalités dynamiques et statiques, nous avons testé dans le laboratoire la performance des trois instruments proposés sous ses différentes formes. Les instruments à taux flexibles de premier rang ont été comparés aux instruments à taux fixe de premier et de second rang. Les instruments ont été évalués sur deux critères : (i) « l'efficacité » pour rapprocher une trajectoire cible par rapport à leur prédiction théorique et (ii) « l'efficience », définie comme le rapport des profits accumulés sous l'instrument par rapport à l'optimum.

Dans le traitement de base de l'expérience, représentant une situation de « laissez faire », les prédictions des stratégies myope et rationnelle sont clairement différenciées. Les données sont mieux ajustées par le comportement myope, ce qui laisse espérer des gains potentiels importants, dans notre expérience, de la mise en place d'instruments correctifs.

Les résultats des tests expérimentaux réalisés dans cette thèse permettent de donner quelques recommandations pour la conception d'instruments incitatifs destinés à gérer les prélèvements :

(i) Lorsque les prélèvements produisent des externalités importantes et les comportements doivent être modifiés de façon significative, comme cela pourrait être le cas dans des situations critiques (épisode d'intrusion généralisée d'eau de mer dans un aquifère), les instruments incitatifs évalués ne s'avèrent pas pleinement efficaces. Les instruments trop contraignants sont éludés (par la fraude) ou ignorés (les préleveurs préfèrent payer des taxes ou être pénalisés que modifier leur comportement).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

(ii) L'incorporation de subventions pour des prélèvements inférieurs à des « cibles de prélèvement » prédéfinies pour chaque période, a un effet positif sur l'efficacité des instruments incitatifs mais aussi sur l'efficience (nette de taxes), notamment pour les instruments basés sur les prélèvements individuels (taxe/subvention pigouvienne et instrument mixte fixes).

(iii) Les instruments basés uniquement sur les prélèvements totaux (la taxe ambiante) ne sont pas acceptables, car les défauts de coordination produisent de pertes très importantes.

(iv) La flexibilité des instruments n'est pas indispensable.

L'application de l'algorithme bayésien de classification de Houser et al. (2004) nous a permis de donner une description de l'hétérogénéité des comportements observés dans le laboratoire, lorsque les agents exploitent une ressource renouvelable en propriété commune. A partir de cette procédure, nous avons identifié les règles de décision de deux types de préleveurs : les préleveurs Quasi Myopes et les préleveurs Prévoyants Perturbés. Cette méthode nous a également permis d'identifier l'impact sur le comportement d'une variable d'état théoriquement non pertinente : la richesse accumulée. A partir des simulations du modèle estimé, nous avons exploré l'effet de la richesse (répartie de façon égalitaire) sur l'efficience des différentes taxes sur les prélèvements et l'interaction avec deux politiques fiscales évaluées, i.e. des impôts à taux constant et uniforme sur les profits et sur la richesse. Nous avons mis en évidence un effet d'éviction entre la richesse accumulé (individuellement) et l'efficacité des taxes sur les prélèvements. Par exemple, nous avons trouvé, à partir des simulations, que la richesse initiale n'affecte pas le niveau maximum d'efficience (80%) atteint par un taxe à taux constant sur les prélèvements. Mais, le taux de la taxe qui permet d'arriver au maximum d'efficience diminue à fur et à mesure que la richesse augmente.

Les résultats des simulations exposés dans le dernier chapitre de cette thèse avaient pour but de montrer comment les données expérimentales peuvent être utilisées pour calibrer des modèles d'aide à la décision dans la gestion des ressources naturelles. En prolongeant ainsi l'approche traditionnelle en économie expérimentale, à savoir tester le pouvoir prédictif d'une théorie, nous avons pu construire une description du comportement qui, par construction, est

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

validée empiriquement. Ceci ouvre la possibilité d'évaluer les trajectoires de prélèvement et leur efficience dans différents scénarios. Par exemple, dans un scénario de changement climatique où la recharge de la ressource est considérablement diminuée, nos résultats montrent qu'il n'y aura aucun effet sur les prélèvements autre que par le stock de la ressource, car l'effet de la recharge sur les stocks futurs n'est pas pris en compte par les sujets. Plusieurs scénarios intéressants pour l'exploitation agricole de l'eau souterraine pourraient également être évalués : on peut estimer les effets indirects (opérés à travers la richesse) sur l'efficience de l'exploitation si les prix de matières premières sont en augmentent, ou si la Politique Agricole Commune est modifiée, ou si le marché foncier évolue. Les scénarios peuvent avoir un impact direct sur l'efficience de l'exploitation par les choix technologiques induits (surface irrigué, technique d'irrigation utilisée, culture, etc.), mais ils peuvent aussi agir indirectement via un effet richesse. Des scénarios de modifications des politiques fiscales peuvent être aussi évalués et, pour une situation donnée, l'efficience des instruments incitatifs pour gérer les prélèvements peut être mise à l'épreuve.

Les résultats de cette thèse nous ont permis de classer les instruments évalués selon des critères d'efficacité et d'efficience. Ils nous ont également permis d'identifier, avec une certaine robustesse dans nos conclusions, les facteurs déterminants de leurs performances. Cette thèse apporte des éléments pouvant guider le choix et la conception des instruments incitatifs pour la gestion des prélèvements. Enfin, nous avons montré comment les estimations économétriques du comportement dans le laboratoire permettent d'élargir l'utilisation des données expérimentales à des contextes plus généraux.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Annexes

1. Population mixte : le cas d'information incomplète

Abordons le cas plus intéressant et plus réaliste où la préférence temporelle est une information privée de chaque préleveur, révélée individuellement à chaque joueur en début du jeu. L'ensemble des types possibles pour chaque préleveur i, $\mathrm{P}_i = \{0, \tilde{\rho}\}$, est connaissance commune.

Le jeu se résoudrait en deux étapes. Dans la première étape, chaque type calcule un feedback optimal en prenant le feedback et la proportion de l'autre type dans la population comme donné. Dans la seconde étape, la distribution de probabilité à posteriori doit être calculée.

Les équations 2.11 et 2.12 fournissent la première étape de la solution. La deuxième étape demande quelques concepts, hypothèses et notations additionnelles (nous reprenons la notation du chapitre 8 du Fudenberg et Tirole (1991)).

Les croyances des préleveurs sur le type des rivaux peuvent être actualisées à la lumière de l'évolution du jeu. Soit $\rho \equiv (\rho_1, ..., \rho_N)$ le vecteur des types, on suppose les types indépendants, donc la distribution à priori p est le produit des distributions marginales :

$$p(\rho) = \prod_{i=1}^{N} p_i(\rho_i),$$

Où $p_i(\rho_i)$ est la probabilité que le type du préleveur i soit ρ_i. Sachant que les préleveurs du même type sont tous égaux, la variable d'intérêt est la proportion de préleveurs du type myope (θ) ou rationnel ($1-\theta$) dans la population. Il y a $N+1$ valeurs possibles pour $\theta \in \Theta = \{0, 1, 1/2, ..., 1/(N-1), 1/N\}$. Chaque type a une distribution de probabilité, $g(\theta)$, différente sur Θ ; tandis qu'un préleveur myope donne une probabilité nulle à l'événement $\theta = 0$, un préleveur rationnel fait pareil pour l'événement $\theta = 1$. Les stratégies de comportement σ_i donnent la probabilité d'un prélèvement y_i^t pour une histoire du jeu donnée,

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

que dans le cas présent elle est résumée par le stock de la ressource au début de la période S^t, le type du préleveur, ρ_i, et la proportion de préleveurs myopes, θ. Nous supposons des stratégies dégénérées dans le sens que : $\sigma_i\left(y_i^t \middle| S^t, \rho_i, \theta\right) = 0$ si $y_i^t \neq y_i^t\left(S^t, \theta \middle| \rho_i\right)$ (les feedbacks définis dans les équations 2.11 et 2.12).

La structure informationnelle du jeu permet d'arriver à un équilibre bayesien parfait en sous jeu. Au début de chaque période, avant de prendre leur décision de prélèvement, les préleveurs observent uniquement le stock disponible dans la nappe. En conséquence, la proportion de préleveurs myopes de la période précédente peut être actualisée.

A la première période, chaque type calcule la proportion de préleveurs myopes espérée :

(A.1a) $$\theta_m^1 = E\left(\theta \middle| \rho_i = 0\right) = \frac{1 + \sum_{s=1}^{N-1} s \Big/ N}{N} \quad \forall i \text{ myope, et}$$

(A.1b) $$\theta_r^1 = E\left(\theta \middle| \rho_j = \tilde{\rho}\right) = \frac{\sum_{s=1}^{N-1} s \Big/ N}{N} \quad \forall j \text{ rationnel.}$$

A partir de l'équation (2.1) :

$$S^{t+1} = S^t - \theta \cdot N \cdot y_m^t\left(\theta_m^t\right) - \left(1 - \theta\right) \cdot N \cdot y_r^t\left(\theta_r^t\right) + r \,.$$

Donc, dès la deuxième période la proportion θ est connue avec certitude :

(A.2) $$\theta = \frac{S^2 - S^1 - r + N \cdot y_r^1\left(\theta_r^1\right)}{N \cdot \left[y_r^t\left(\theta_r^1\right) - y_m^t\left(\theta_m^1\right)\right]} \,.$$

Les trajectoires de prélèvement à l'équilibre sont données par les équations (2.11) et (2.12) évaluées sur θ_j^1 ($j = r, m$) à la première période et ensuite sur θ.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2. Instructions des expériences

Toutes les instructions ont la structure suivante :

1. Message de bienvenue
2. Cadre général de l'expérience
3. Les décisions
4. Le calcul de gains

Dans les instructions des traitements mettant en place des politiques il faut ajouter les sections suivantes :

5. Le calcul de la redevance
6. Le contrôle des déclarations (les traitements mettant en place de taxes ambiantes TAFU et TANFU ne sont pas concernés par cette section).

Dans les pages qui suivent se trouvent les instructions du traitement LFz0, illustrant les quatre premières sections qui restent inchangées dans tous les traitements. Puis, dans la suite de l'annexe les sections 3, 5 et 6 sont exposées pour chacun des traitements de politique.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

INSTRUCTIONS

Bienvenue

L'expérience à laquelle vous allez participer est destinée à l'étude de la prise de décision. **Avant de commencer veuillez lire attentivement les instructions**. Si vous les suivez scrupuleusement et que vous prenez de bonnes décisions, vous pourrez gagner une somme d'argent non négligeable. Toutes vos réponses seront traitées de façon anonyme et seront recueillies au travers d'un réseau informatique. Vous indiquerez vos choix à l'ordinateur devant lequel vous êtes assis et celui-ci vous communiquera vos gains réalisés au fur et à mesure du déroulement de l'expérience.

La somme totale d'argent gagnée pendant l'expérience vous sera versée, en liquide, à la fin de celle-ci.

CADRE GENERAL DE L'EXPERIENCE

15 personnes participent à cette expérience. Vous êtes membre d'un groupe constitué de 5 personnes choisies au hasard parmi les 15 personnes présentes dans la salle. La composition de votre groupe restera la même tout au long de l'expérience. Vous ne pouvez pas connaître l'identité des personnes faisant partie de votre groupe parmi celles présentes dans la salle.

L'expérience comporte 4 séries de 10 périodes chacune. Au début de l'expérience, vous disposerez d'une dotation de 300 points. A chaque période vous pourrez accumuler des points supplémentaires ou en perdre. Le nombre de points que vous gagnerez dépendra à la fois de vos propres décisions et des décisions prises par les 4 autres membres de votre groupe. Le nombre total de points que vous aurez à la fin de l'expérience sera converti en Euros. La procédure de conversion des points en euros est détaillée à la fin des instructions.

La suite des instructions va vous permettre de comprendre de quelle manière vos gains sont calculés.

LES DECISIONS

L'expérience comporte 4 séries de 10 périodes chacune. Chaque série se déroulera selon les mêmes règles. A chaque période pour gagner des points, vous, ainsi que les 4 autres membres de votre groupe, devrez décider le nombre d'unités que vous voulez retirer d'un Compte. Au maximum, vous pouvez retirer 50 unités au cours d'une période. Les gains que vous obtiendrez à chaque période s'accumulent constituant votre « gain accumulé ».

A la période 1, il y a 500 unités disponibles dans le Compte. A chaque période le nombre d'unités disponibles sera automatiquement augmenté de 30 unités, et diminué du nombre d'unités retirées au cours de la période. Ainsi, à la période 2 le nombre d'unités disponibles

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

dans le Compte sera égal à :

500 + 30 – nombre total d'unités retirées par tous les membres du groupe à la période 1

La même règle s'appliquera à chaque période.
Illustrons cela au moyen d'un exemple :

Exemple

Dans la période 1 vous retirez 15 unités du Compte, et les 4 autres membres retirent 10 unités chacun. Le nombre d'unités disponibles au début de la période 2 est donc égal à :

= 500 + 30 - (15+10+10+10+10) = 475.

A la période 2 vous retirez 20 unités, deux membres de votre groupe retirent 10 unités chacun, et les deux membres restants retirent chacun 0 unités. Le nombre d'unités disponibles au début de la période 3 sera égal à :

= 475 + 30 - (20+10+10+0+0) = 465.

Et ainsi de suite pour le reste des périodes.

Au moment de prendre votre décision sur le nombre d'unités que vous voulez retirer, vous n'aurez aucune information sur les décisions prises par les autres membres de votre groupe pour la période. Vous serez informé au début de chaque période sur le nombre d'unités disponibles dans le compte. Vous aurez à votre disposition en bas de l'écran, un historique de vos décisions pour les périodes précédentes.

LE CALCUL DES GAINS

Vos gains au cours d'une période dépendent du nombre d'unités que vous et les 4 autres membres de votre groupe retirent dans cette période, et du nombre d'unités disponibles pour cette période. Les unités retirées par les autres membres de votre groupe au cours d'une période réduisent votre gain de la période. De même, les unités que vous retirez réduisent le gain des autres membres de votre groupe au cours de cette période. A la fin des instructions vous trouverez un tableau indiquant votre gain. En colonne figure le nombre d'unités disponibles dans le compte et en ligne, le nombre d'unités que vous retirez.

Illustrons cela avec un exemple :

Exemple

Vous retirez 10 unités et le nombre d'unités disponibles au début de la période est égal à 500. Votre gain brut est égal à : **18.5 points.** Supposons que les 4 autres membres de votre groupe ont demandé, 40 unités chacun. La somme des unités retirées dans la période est 170 (= 40x4 + 10). Donc, votre gain net est :

= 18.5 – 0.005x170 = **17.65 points**

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Donc, le gain net des autres membres du groupe est de -34.85 points dans cette période. Vous pouvez vérifier le résultat dans le Tableau, en cherchant la cellule qui correspond à l'intersection de la ligne de 10 unités (et celle de 40 unités), avec la colonne qui correspond au nombre d'unités disponibles égale à 500 et en déduisant 0.85 (le demi pourcent de 170)

Pour calculer

Toutes les situations possibles ne figurent pas dans le tableau. Vous pouvez cependant calculer le gain brut à l'aide de la formule suivante :

$$\left(\frac{1}{100}\times \text{Unités disponibles} - \frac{9}{100}\times \text{Unités que vous retirez} - 2{,}25\right)\times \text{Unités que vous retirez}$$

(A2.1)

Cette formule peut se comprendre de la façon suivante :

Pour chaque unité retirée du Compte, votre gain par unité :

- augmente à raison de 1% avec le nombre d'unités disponibles
- diminue à raison de 9% avec le nombre d'unités que vous retirez

Le nombre d'unités retirées par les autres membres du groupe au cours de la période, affecte votre gain de la période.

Si au début d'une période, le nombre d'unités disponibles dans le Compte ne permettrait plus la réalisation de gains positifs, la série sera arrêtée, même si les dix périodes de la série ne se sont pas achevées.

***TAUX DE CONVERSION DES POINTS EN EUROS* :** 40 points = 1 euro

Taxe Pigouviene Flexible (traitement TPFU)

LES DECISIONS

L'expérience comporte 4 séries de 10 périodes chacune. Chaque série se déroulera selon les mêmes règles. A chaque période, pour gagner des points, vous, ainsi que les 4 autres membres de votre groupe, aurez deux décisions à prendre. D'abord vous devrez décider du nombre d'unités que vous voulez retirer d'un Compte. Ensuite, l'ordinateur vous demandera d'effectuer une déclaration du nombre d'unités que vous avez retiré du Compte. Vous êtes libre de déclarer n'importe quel nombre d'unités compris entre 0 et le nombre d'unités effectivement retirées. Au maximum, vous pouvez retirer 50 unités au cours d'une période. Les gains que vous obtiendrez à chaque période s'accumulent constituant votre « gain accumulé ». A partir de votre déclaration de la période, une redevance est calculée et automatiquement déduite de votre gain accumulé. Votre déclaration est susceptible d'être

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

contrôlée, et en cas de fraude avérée vous serez pénalisé.

LE CALCUL DES REDEVANCES

Après avoir décidé du nombre d'unités que vous voulez retirer vous devrez faire une déclaration de votre prélèvement. Vous pouvez déclarer la quantité que vous souhaitez (entre 0 et le nombre d'unités effectivement retirées). Une redevance est alors calculée à partir du nombre d'unités que vous déclarez avoir retiré. Le montant de la redevance se calcule de la façon suivante :

Redevance de la période = TAUX x Unités que vous déclarez (A2.2)

Le TAUX change de période en période. Au début de chaque période, avant que vous décidiez du nombre d'unités à retirer, le TAUX de la période sera affiché sur l'écran de l'ordinateur.

LE CONTRÔLE DES DECLARATIONS

Votre déclaration est susceptible d'être contrôlée. Le contrôle consiste à vérifier que les unités que vous déclarez avoir retiré dans la période correspondent bien aux unités réellement retirées au cours de cette période.

Le contrôle n'a lieu que si le prélèvement total de votre groupe est supérieur à la quantité totale déclarée par votre groupe. Si c'est le cas, une personne choisie au hasard parmi les membres de votre groupe sera contrôlée (chaque membre du groupe a la même chance d'être contrôlé). Si le prélèvement total de votre groupe est égal à la quantité totale déclarée par votre groupe, il n'y aura pas de contrôle.

En cas de fraude avérée, la personne contrôlée devra s'acquitter de la redevance impayée pour la période où le contrôle a été effectué, et d'une pénalité forfaitaire que sera automatiquement déduite de votre gain accumulé. La pénalité forfaitaire dépend du nombre d'unités disponibles au début de la période où la fraude a été commise. A la fin des instructions, vous trouverez un tableau (Tableau Pénalités) indiquant les pénalités pour différentes quantités d'unités disponibles dans le Compte. Dans la première ligne figure le nombre d'unités disponibles dans le compte au début de la période et, dans la deuxième ligne, le montant des pénalités.

Illustrons cela avec un exemple :

A la période 5, vous retirez 10 unités du compte et le nombre d'unités disponibles au début de cette période est égal à 500 (le gain est égal à **18,5 points**). Vous déclarez avoir retiré 5 unités. Supposons que les 4 autres membres de votre groupe ont demandé 5 unités chacun, et ils ont déclaré la même quantité. Donc, le prélèvement

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

total de votre groupe est de 30 unités (10+5+5+5+5) et la quantité totale déclarée est de 25 unités. De ce fait, un membre (choisi au hasard) de votre groupe sera contrôlé. Supposons que vous soyez contrôlé. Dans ce cas, vous devrez payer une pénalité forfaitaire égale à **90 points** (voir Tableau Pénalité à la fin des instructions).

Toutes vos décisions sont individuelles et anonymes. Aucune personne dans la salle ne peut identifier qui a fraudé ou non.

Taxe Pigouviene Fixe (traitement TPNFU et TPNFUO)

Pour le cas de la taxe pigouvienne fixe la seule section qui change, par rapport à la flexible, c'est la section sur le calcul des redevances.

LE CALCUL DES REDEVANCES

Après avoir décidé du nombre d'unités que vous voulez retirer vous devrez faire une déclaration de votre prélèvement. Vous pouvez déclarer la quantité que vous souhaitez (entre 0 et le nombre d'unités effectivement retirées). Une redevance est alors calculée à partir du nombre d'unités que vous déclarez avoir retiré. Pour chaque période, il y a un « seuil de paiement » prédéfini pour la période en cours. Si le montant de la redevance dépasse le « seuil de paiement », il sera automatiquement prélevé sur votre gain accumulé. Dans le cas contraire, si le montant de la redevance est inférieur au « seuil de paiement » de la période, vous n'avez pas de redevance à payer. Le montant de la redevance se calcule de la façon suivante :

$$\text{Redevance} = 1 \times \text{Unités que vous déclarez avoir retiré} \qquad \text{(A2.3)}$$

A la fin des instructions vous trouverez un tableau avec les « seuils de paiement » prédéfinis pour chaque période.

Illustrons cela avec un exemple :

A la période 6, vous retirez 10 unités du compte et le nombre d'unités disponibles au début de cette période est égal à 500. Votre gain est égal à : **18.5 points.** Vous déclarez avoir retiré 10 unités. Le montant de la redevance est donc de **10 points**. Le « seuil de paiement » pour la période 6 est **7 points.** Comme le montant de votre redevance est de 10 points et qu'il dépasse le seuil, il sera intégralement déduit de votre gain accumulé. Vous pouvez vérifier la valeur du « seuil de paiement » en vous

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

referant au Tableau Seuils de Paiement, à la colonne correspondant à la période 5.

Instrument Mixte Flexible et Fixe (traitements IMFU et IMNFU)

Pour l'instrument mixte flexible et fixe la seule modification dans les instructions par rapport à celles de la taxe pigouvienne flexible et fixe respectivement, s'opère dans la section du contrôle des déclarations et calcul des pénalités.

LE CONTRÔLE DES DECLARATIONS ET PENALITES

Votre déclaration est susceptible d'être contrôlée. Le contrôle consiste à vérifier que les unités que vous déclarez avoir retiré dans la période, correspondent bien aux unités réellement retirées au cours de cette période.

Si la quantité totale retirée par votre groupe (somme des unités retirées du Compte par chaque membre de votre groupe) est supérieure à la quantité totale déclarée par votre groupe (somme des unités déclarées par chaque membre de votre groupe), tous les membres de votre groupe devront s'acquitter d'une pénalité collective égal à :

$$\text{Pénalité Collective} = \text{TAUX} \times (\text{Quantité totale retirée par le groupe - Quantité totale declarée par le groupe}) \quad \text{(A2.4)}$$

Le TAUX est le même que celui de la redevance pour la période courante.

Egalement, dans ce cas, une personne choisie au hasard parmi les membres de votre groupe sera contrôlée (chaque membre du groupe a la même chance d'être contrôlé). En cas de fraude avérée, la personne contrôlée devra s'acquitter de la redevance impayée pour la période contrôlée (en plus de la pénalité collective). Si la personne contrôlée n'a pas fraudé, elle sera déchargée du paiement de la pénalité collective.

Si le prélèvement total de votre groupe est égale à la quantité totale déclarée par votre groupe, il n'y aura pas de contrôle ni de pénalité collective à payer.

Illustrons cela avec deux exemples :

Exemple 1

A la période 5, le nombre d'unités disponibles est égal à 600, vous retirez 5 unités du compte (le gain est égal à 16,5 points) et le TAUX de la redevance annoncé est de 2,65. Vous déclarez avoir retiré 0 unités. Supposons que les 4 autres membres de votre groupe ont aussi demandé 5 unités chacun, et ils ont déclaré juste. Donc, le prélèvement total de votre groupe est de 25 unités (5+5+5+5+5) et la quantité totale

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

déclarée est de 0 unités (0+0+0+0+0). Ce fait a deux conséquences, premièrement, une pénalité collective [égal à $2{,}65 \times (25-0) = 66{,}25$ points] est imposée à tous les membres du groupe, et deuxièmement, un membre choisi au hasard de votre groupe sera contrôlé. Supposons que vous soyez contrôlé. Dans ce cas, le montant impayé de la redevance qui est de $2{,}65 \times 5 = 13{,}25$ points sera déduit de votre gain accumulé, ainsi que la pénalité collective. Dans cette période, votre gain net de la redevance et la pénalité collective est une perte de 79,5 points : $16{,}5 - 5 \times 2{,}65 - 2{,}65 \times (25-0) = -79{,}5$.

Supposons maintenant que vous ne soyez pas contrôlé. Dans ce cas, vous ne serez pas amenez à payer le montant impayé de la redevance, mais vous devrez toujours payer la pénalité collective. Dans ce cas, votre gain net pour cette période est une perte de 49,75 points : $16{,}5 - 2{,}65 \times (25-0) = -49{,}75$.

Exemple 2

Sous les mêmes conditions que dans l'exemple 1, supposons maintenant que vous ainsi que les 4 autres membres de votre groupe déclarent tous la quantité réellement prélevée (5 unités chacun). Donc, le prélèvement total de votre groupe est toujours 25 unités (5+5+5+5+5) mais la quantité totale déclarée est 25 unités (votre déclaration). De ce fait, la pénalité collective est nulle [$2{,}65 \times (25-25) = 0$ points] et personne n'est contrôlée. Dans ce cas, votre gain net de la redevance est de 3,25 points : $16{,}5 - 5 \times 2{,}65 = 3{,}25$.

Toutes vos décisions sont individuelles et anonymes. Aucune personne dans la salle ne peut identifier qui a fraudé ou non.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Taxe ambiante fixe (traitement TANFU)

Pour le cas de la taxe ambiante fixe les modifications introduites dans les instructions par rapport au traitement de laissez faire sont les suivantes.

LES DECISIONS

L'expérience comporte 4 séries de 10 périodes chacune. Chaque série se déroulera selon les mêmes règles. A chaque période pour gagner des points, vous, ainsi que les 4 autres membres de votre groupe, devrez décider du nombre d'unités que vous voulez retirer d'un Compte. Au maximum, vous pouvez retirer 50 unités au cours d'une période. Les gains que vous obtiendrez à chaque période s'accumulent constituant ainsi votre « gain accumulé ».

Ensuite, en fonction du nombre d'unités retirées par votre groupe, une redevance sera éventuellement calculée et déduite de votre gain accumulé ainsi que des gains accumulés de chacun des 4 autres membres qui composent votre groupe. Le montant de la redevance est le même pour tous les membres du groupe.

LE CALCUL DES REDEVANCES

Lorsque vous et les quatre autres membres de votre groupe aurez décidé du nombre d'unités à retirer, une redevance est calculée à partir des unités restantes dans le Compte. Pour chaque période, l'expérimentateur a fixé un nombre « minimum requis » d'unités disponibles dans le Compte (voir Tableau 2). Si à la fin d'une période, le nombre d'unités disponibles dans le Compte est inférieur au « minimum requis » pour cette période, une redevance sera automatiquement déduite des gains de chaque membre du groupe. Si le nombre d'unités disponibles en fin de période est supérieur au « minimum requis » de la période, vous n'avez pas de redevance à payer. A chaque période, vous, serez informé si la redevance est prélevée ou non. Le montant de la redevance est calculé comme suit :

Si en fin de période,

« Minimum requis » > Unités disponibles

Redevance = TAUXx(minimum requis – Unités disponibles)

« Minimum requis » $\leq$ Unités disponibles Redevance = 0 (A2.5)

En résumé, la redevance est égale à 20% de l'écart entre les unités requises et les unités disponibles dans le compte en fin de période, dans le cas où le nombre d'unités disponibles en fin de période est inférieur au « minimum requis ».

A la fin des instructions vous trouverez un tableau avec les valeurs des « minimum requis » pour chaque période.

TABLEAU : « minimum requis »

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Minimum requis	500	530	560	575	580	575	560	530	490	440

Taxe ambiante flexible (traitement TAFU)

LE CALCUL DES REDEVANCES

Lorsque vous et les quatre autres membres de votre groupe aurez décidé du nombre d'unités à retirer, une redevance est calculée à partir des unités restantes dans le Compte. A chaque période, avant que vous décidiez les unités que voulez retirer, un nombre « minimum

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

requis » d'unités disponibles dans le Compte est annoncé. Si à la fin d'une période, le nombre d'unités disponibles dans le Compte est inférieur au « minimum requis » pour cette période, une redevance sera automatiquement déduite des gains de chaque membre du groupe. Si le nombre d'unités disponibles en fin de période est supérieur au « minimum requis » de la période, vous n'avez pas de redevance à payer. A chaque période, vous, serez informé si la redevance est prélevée ou non. Le montant de la redevance est calculé comme suit :

Si en fin de période, « minimum requis » > Unités disponibles :

$$\text{Redevance} = \text{TAUX} \times (\text{minimum requis} - \text{Unités disponibles}) \tag{A2.6}$$

Si en fin de période, « minimum requis » $\leq$ Unités disponibles :

$$\text{Redevance} = 0$$

Le TAUX et le « minimum requis » changent de période en période. Au début de chaque période, avant que vous décidiez du nombre d'unités à retirer, le TAUX ainsi que le « minimum requis » qui correspondent à cette période seront affichés sur l'écran de l'ordinateur

En résumé, la redevance est égale au TAUX de la période fois l'écart entre les unités requises et les unités disponibles dans le compte en fin de période, dans le cas où le nombre d'unités disponibles en fin de période soit inférieur au « minimum requis ».

Illustrons cela avec un exemple :
A la période 5, supposons que le nombre d'unités disponibles est égal à 600, il est annoncé un TAUX pour la période égal à 2.97 et un « minimum requis » de 575 unités. Vous retirez 20 unités du compte, et les 4 autres membres retirent 15 unités chacun. Votre gain est égal à : **39 points.** Le prélèvement total est égal à 80 (= 20+15+15+15+15). En fin de période, le nombre d'unités disponibles est égal à 520 (600 – 80). Du fait que 520 est inférieur à 575 (le « minimum requis » pour la période), le montant de la redevance est de 178.2 points [2.97x(580-520)]. Ce montant sera intégralement déduit de votre gain accumulé ainsi que des gains des 4 autres membres de votre groupe. Vous réalisez une perte de 139.2 points. Supposons maintenant que vous ainsi que les 4 autres membres de votre groupe retirent 5 unités chacun. Dans ce cas le prélèvement total est égal à 25 (=5+5+5+5+5). En fin de période, le nombre d'unités disponibles est égal à 575 (600 – 25). Du fait que 575 n'est pas

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

inférieur au « minimum requis » pour la période il n'y a pas de redevance à payer.

Si au début d'une période, le nombre d'unités disponibles dans le Compte ne permettrait plus la réalisation de gains positifs, la série sera arrêtée, même si les dix périodes de la série ne se sont pas achevées.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

TABLEAU DE GAIN BRUT

Retrait \ U. Disponibles	500	450	400	350	300	250	200	150	100
1	2,7	2,2	1,7	1,2	0,7	0,2	-0,3	-0,8	-1,3
2	5,1	4,1	3,1	2,1	1,1	0,1	-0,9	-1,9	-2,9
3	7,4	5,9	4,4	2,9	1,4	-0,1	-1,6	-3,1	-4,6
4	9,6	7,6	5,6	3,6	1,6	-0,4	-2,4	-4,4	-6,4
5	11,5	9,0	6,5	4,0	1,5	-1,0	-3,5	-6,0	-8,5
6	13,3	10,3	7,3	4,3	1,3	-1,7	-4,7	-7,7	-10,7
7	14,8	11,3	7,8	4,3	0,8	-2,7	-6,2	-9,7	-13,2
8	16,2	12,2	8,2	4,2	0,2	-3,8	-7,8	-11,8	-15,8
9	17,5	13,0	8,5	4,0	-0,5	-5,0	-9,5	-14,0	-18,5
10	18,5	13,5	8,5	3,5	-1,5	-6,5	-11,5	-16,5	-21,5
11	19,4	13,9	8,4	2,9	-2,6	-8,1	-13,6	-19,1	-24,6
12	20,0	14,0	8,0	2,0	-4,0	-10,0	-16,0	-22,0	-28,0
13	20,5	14,0	7,5	1,0	-5,5	-12,0	-18,5	-25,0	-31,5
14	20,9	13,9	6,9	-0,1	-7,1	-14,1	-21,1	-28,1	-35,1
15	21,0	13,5	6,0	-1,5	-9,0	-16,5	-24,0	-31,5	-39,0
16	21,0	13,0	5,0	-3,0	-11,0	-19,0	-27,0	-35,0	-43,0
17	20,7	12,2	3,7	-4,8	-13,3	-21,8	-30,3	-38,8	-47,3
18	20,3	11,3	2,3	-6,7	-15,7	-24,7	-33,7	-42,7	-51,7
19	19,8	10,3	0,8	-8,7	-18,2	-27,7	-37,2	-46,7	-56,2
20	19,0	9,0	-1,0	-11,0	-21,0	-31,0	-41,0	-51,0	-61,0
21	18,1	7,6	-2,9	-13,4	-23,9	-34,4	-44,9	-55,4	-65,9
22	16,9	5,9	-5,1	-16,1	-27,1	-38,1	-49,1	-60,1	-71,1
23	15,6	4,1	-7,4	-18,9	-30,4	-41,9	-53,4	-64,9	-76,4
24	14,2	2,2	-9,8	-21,8	-33,8	-45,8	-57,8	-69,8	-81,8
25	12,5	0,0	-12,5	-25,0	-37,5	-50,0	-62,5	-75,0	-87,5
26	10,7	-2,3	-15,3	-28,3	-41,3	-54,3	-67,3	-80,3	-93,3
27	8,6	-4,9	-18,4	-31,9	-45,4	-58,9	-72,4	-85,9	-99,4
28	6,4	-7,6	-21,6	-35,6	-49,6	-63,6	-77,6	-91,6	-105,6
29	4,1	-10,4	-24,9	-39,4	-53,9	-68,4	-82,9	-97,4	-111,9
30	1,5	-13,5	-28,5	-43,5	-58,5	-73,5	-88,5	-103,5	-118,5
31	-1,2	-16,7	-32,2	-47,7	-63,2	-78,7	-94,2	-109,7	-125,2
32	-4,2	-20,2	-36,2	-52,2	-68,2	-84,2	-100,2	-116,2	-132,2
33	-7,3	-23,8	-40,3	-56,8	-73,3	-89,8	-106,3	-122,8	-139,3
34	-10,5	-27,5	-44,5	-61,5	-78,5	-95,5	-112,5	-129,5	-146,5
35	-14,0	-31,5	-49,0	-66,5	-84,0	-101,5	-119,0	-136,5	-154,0
36	-17,6	-35,6	-53,6	-71,6	-89,6	-107,6	-125,6	-143,6	-161,6
37	-21,5	-40,0	-58,5	-77,0	-95,5	-114,0	-132,5	-151,0	-169,5
38	-25,5	-44,5	-63,5	-82,5	-101,5	-120,5	-139,5	-158,5	-177,5
39	-29,6	-49,1	-68,6	-88,1	-107,6	-127,1	-146,6	-166,1	-185,6
40	-34,0	-54,0	-74,0	-94,0	-114,0	-134,0	-154,0	-174,0	-194,0
41	-38,5	-59,0	-79,5	-100,0	-120,5	-141,0	-161,5	-182,0	-202,5
42	-43,3	-64,3	-85,3	-106,3	-127,3	-148,3	-169,3	-190,3	-211,3
43	-48,2	-69,7	-91,2	-112,7	-134,2	-155,7	-177,2	-198,7	-220,2
44	-53,2	-75,2	-97,2	-119,2	-141,2	-163,2	-185,2	-207,2	-229,2
45	-58,5	-81,0	-103,5	-126,0	-148,5	-171,0	-193,5	-216,0	-238,5
46	-63,9	-86,9	-109,9	-132,9	-155,9	-178,9	-201,9	-224,9	-247,9
47	-69,6	-93,1	-116,6	-140,1	-163,6	-187,1	-210,6	-234,1	-257,6
48	-75,4	-99,4	-123,4	-147,4	-171,4	-195,4	-219,4	-243,4	-267,4
49	-81,3	-105,8	-130,3	-154,8	-179,3	-203,8	-228,3	-252,8	-277,3
50	-87,5	-112,5	-137,5	-162,5	-187,5	-212,5	-237,5	-262,5	-287,5

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3. Procédure numérique pour le calcul de la vraisemblance marginale

Nous construisons la vraisemblance marginale pour chaque modèle en utilisant la procédure développée par Lewis et Raftery (1997). Leur algorithme combine les simulations de l'a posteriori avec l'estimateur de Laplace –Metropolis.

La valeur marginale de vraisemblance pour un modèle, noté $g(.)$, est l'intégrale de la fonction de vraisemblance du modèle par rapport à l'a priori. Pour le modèle présenté dans la sous-section 4.2.1, la vraisemblance marginale est :

$$g\left(\left\{\left\{d_{nt}\right\}_{t=1,T}\right\}_{n=1,N}\middle|M_{KP}\right)=\int L\left[\left\{\left\{d_{nt}\right\}_{t=1,T}\right\}_{n=1,N}\middle|\left(\pi_k,\sigma_k^{-2},\theta_k\right)_{k\in K}\right] \times p\left(\left(\pi_k,\sigma_k^{-2},\theta_k\right)_{k\in K}\middle|M_{KP}\right)d\left(\left(\pi_k,\sigma_k^{-2},\theta_k\right)_{k\in K}\right),$$

Où M_{KP} indique un modèle à K types, dans lequel P est l'ordre du polynôme F, et l'a priori est $p\left(.\middle|M_{KP}\right)$. Soit ξ le vecteur des paramètres et D le vecteur de décisions observés, la vraisemblance marginale peut être écrite de la manière suivante :

$$g(D)=\int L\left[D\middle|\xi\right]p(\xi)d(\xi).$$

La méthode de Laplace génère l'approximation suivante pour la vraisemblance marginale :

$$g(D)\approx(2\pi)^{\lambda/2}\left|H^*\right|^{1/2}p\left(\xi^*\right)L\left(D\middle|\xi^*\right),$$

Où ξ^* est vecteur des paramètres a posteriori, H^* est moins l'inverse de l'Hessien de h évalué en ξ^*, et λ est la dimension de l'espace paramétrique. En appliquant le logarithme, la vraisemblance marginale peut être écrite comme :

$$log\{g(D)\}\approx\frac{\lambda}{2}log\{2\pi\}+\frac{1}{2}log\left\{\left|H^*\right|\right\}+log\left\{p\left(\xi^*\right)\right\}+log\left\{L\left(D\middle|\xi^*\right)\right\}. \qquad \text{(A3.1)}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Lewis et Raftery (1997) appellent cette dernière équation l'estimateur Laplace-Metropolis. Il est attractif puisque les quantités ξ^* et H^* peuvent être facilement dérivés du résultat de l'échantillonnage à la Gibbs. Bien qu'il y ait des autres possibilités plus robustes, dans notre cas, ξ^* et H^* résultent directement de l'échantillonnage à la Gibbs (Lewis et Raftery, 1997).

4. Test de convergence de l'échantillonnage à la Gibbs

Les tests ont été programmés pour Matlab et sont disponibles gratuitement dans la *« Econometrics Toolbox »* fournie par LeSage (1999).

Modèle 1 : 2éme dégrée – 2 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.1 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 14.300 tours. Les coefficients d'auto corrélation sont très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 172.106 tours et d'amincir l'échantillon par 2, l'I-stat est également très élevé (une valeur majeur à cinq indique des problèmes dans la convergence), et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 1220 tirages. A l'aide des Figure A.1 et 2 nous avons choisit de laissez les premiers 2500 tirages. Ainsi, en réduisant la précision souhaitée (q=0.0125, r=0.015), ce même diagnostic indique maintenant une convergence (Tableau A.2), or elle n'est pas parfaite.

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accomplie à partir de l'échantillon raccourci (des premières 2500 tirages) et aminci (par 5).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 14300

Modèle 1 : 2éme dégrée – 2 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.997	0.985	0.970	0.870
St	0.877	0.691	0.659	0.568
St^2	0.657	0.093	0.105	0.024
W	0.963	0.904	0.896	0.799
W*St	0.684	0.329	0.287	0.171
W^2	0.572	0.137	0.069	0.046

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	2	1220	172106	937	183.678
St	2	1220	172106	937	183.678
St^2	2	1220	172106	937	183.678
W	2	1220	172106	937	183.678
W*St	2	1220	172106	937	183.678
W^2	2	1220	172106	937	183.678

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-181.109471	129.259556	1.080923	1.000000
St	-0.111639	0.059410	0.000497	1.000000
St^2	0.000061	0.000048	0.000000	1.000000
W	-0.856031	0.066610	0.000557	1.000000
W*St	-0.000171	0.000071	0.000001	1.000000
W^2	0.000108	0.000055	0.000000	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	20.240169	0.002852	23.940014	0.002039	26.956126	0.001608
St	0.007200	0.004761	0.008682	0.003274	0.009887	0.002525
St^2	0.000002	0.040371	0.000002	0.030301	0.000003	0.023825
W	0.010045	0.003075	0.011847	0.002211	0.013378	0.001734
W*St	0.000004	0.023465	0.000004	0.023023	0.000004	0.025659
W^2	0.000001	0.094775	0.000002	0.084645	0.000002	0.083480

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample
Variable Cte

TYPE 2

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.996	0.978	0.956	0.797
St	0.993	0.954	0.914	0.729
St^2	0.845	0.438	0.339	0.438
W	0.995	0.980	0.967	0.827
W*St	0.846	0.542	0.428	0.375
W^2	0.678	0.110	-0.026	0.430

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	2	1220	172106	937	183.678
St	2	1220	172106	937	183.678
St^2	2	1220	172106	937	183.678
W	2	1220	172106	937	183.678
W*St	2	1220	172106	937	183.678
W^2	2	1220	172106	937	183.678

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-530.486212	180.811408	1.512021	1.000000
St	-0.284996	0.077292	0.000646	1.000000
St^2	0.000094	0.000025	0.000000	1.000000
W	-0.680510	0.084792	0.000709	1.000000
W*St	-0.000144	0.000043	0.000000	1.000000
W^2	0.000086	0.000027	0.000000	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	26.363849	0.003289	30.075825	0.002527	32.245549	0.002199
St	0.010626	0.003700	0.012343	0.002742	0.013347	0.002345
St^2	0.000002	0.008496	0.000003	0.006360	0.000003	0.005494
W	0.012566	0.003184	0.014431	0.002414	0.015513	0.002089
W*St	0.000003	0.011520	0.000004	0.009568	0.000004	0.008505
W^2	0.000001	0.027329	0.000001	0.022637	0.000002	0.019788

Variable Cte

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-144.373029	0.331570	0.000000	i.i.d.	-506.923889	0.236538	0.000000
4% taper	-145.198575	4.676970	0.000320	4% taper	-507.141692	3.415591	0.016731
8% taper	-144.884369	5.633327	0.006977	8% taper	-507.103752	4.247440	0.067016
15% taper	-144.618897	6.223391	0.028121	15% taper	-507.058945	4.838084	0.131943
Variable	St			Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.097298	0.000258	0.000000	i.i.d.	-0.276264	0.000179	0.000000
4% taper	-0.097695	0.002403	0.000134	4% taper	-0.276290	0.001737	0.013706
8% taper	-0.097422	0.002740	0.002781	8% taper	-0.276259	0.002129	0.058425
15% taper	-0.097195	0.002883	0.011680	15% taper	-0.276219	0.002369	0.120543
Variable	St^2			Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000057	0.000000	0.000000	i.i.d.	0.000093	0.000000	0.000000
4% taper	0.000058	0.000001	0.000704	4% taper	0.000092	0.000000	0.015011
8% taper	0.000058	0.000001	0.005839	8% taper	0.000092	0.000000	0.058940
15% taper	0.000057	0.000001	0.017423	15% taper	0.000092	0.000000	0.121312
Variable	W			Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.874869	0.000252	0.000000	i.i.d.	-0.691394	0.000174	0.000000
4% taper	-0.874706	0.002648	0.000199	4% taper	-0.691368	0.001828	0.014323
8% taper	-0.875029	0.003008	0.005388	8% taper	-0.691401	0.002237	0.062009
15% taper	-0.875266	0.003140	0.024081	15% taper	-0.691438	0.002493	0.126730
Variable	W*St			Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000172	0.000001	0.000000	i.i.d.	-0.000147	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000173	0.000002	0.287405	4% taper	-0.000147	0.000001	0.035961
8% taper	-0.000173	0.000002	0.362994	8% taper	-0.000147	0.000001	0.078470
15% taper	-0.000173	0.000001	0.386389	15% taper	-0.000148	0.000001	0.129007
Variable	W^2			Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000107	0.000001	0.000014	i.i.d.	0.000086	0.000000	0.000000
4% taper	0.000108	0.000002	0.079681	4% taper	0.000087	0.000001	0.006544
8% taper	0.000107	0.000002	0.078051	8% taper	0.000088	0.000001	0.035210
15% taper	0.000107	0.000001	0.101609	15% taper	0.000088	0.000000	0.084125

Tableau A.1 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k.}$; modèle 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

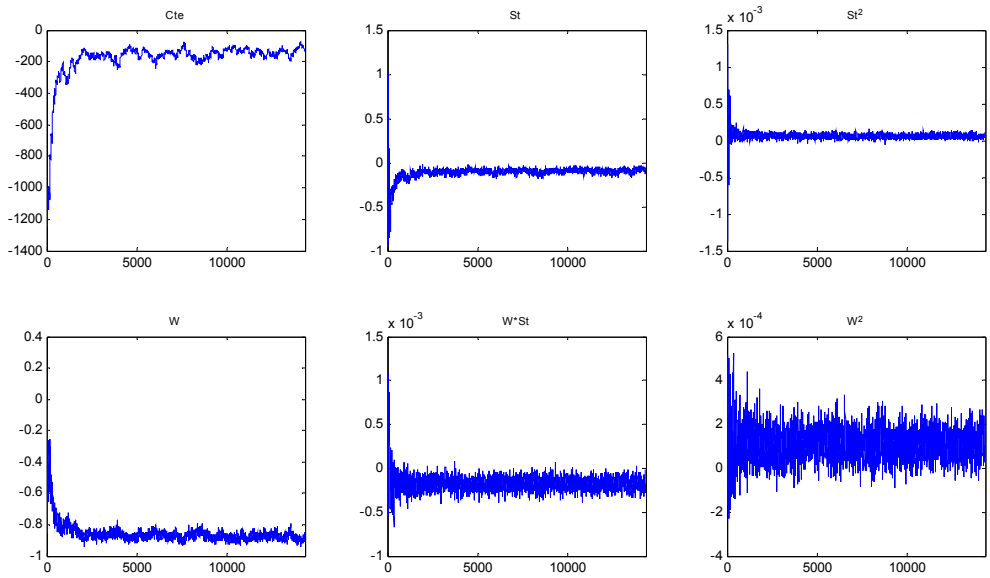


Figure A.1 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 1 ; type 1

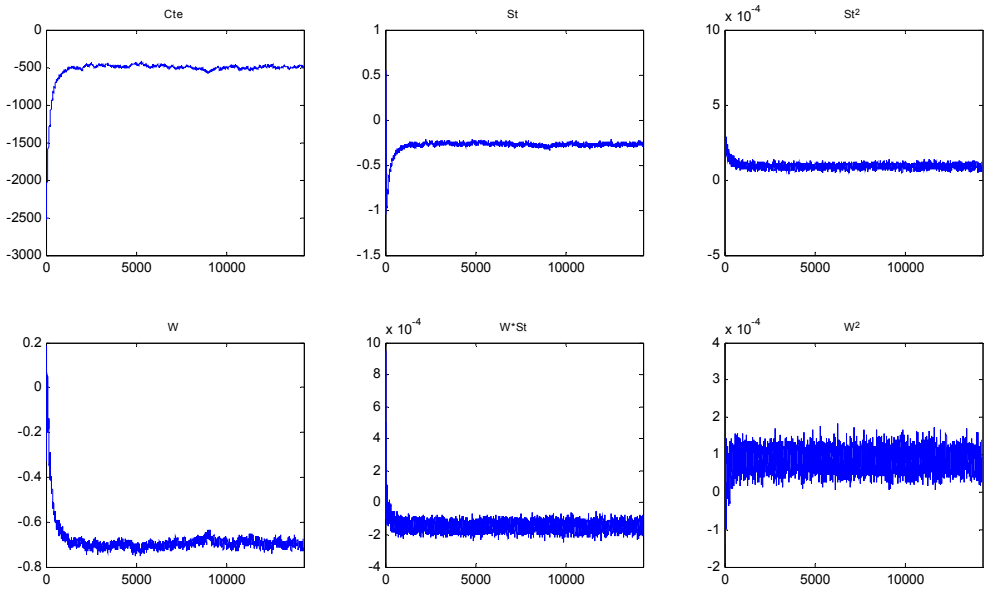


Figure A.2 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 1 ; type 2

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.01500, s=0.950000). Based on sample size = 11800					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	3	98	6290	211	29.8
2	5	157	9667	211	45.8

Tableau A.2 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.025, r=0.01, s=0.95). Based on sample size = 4100											
Type 1						Type 2					
Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat	Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
variable 1	1	2	951	937	1.015	variable 1	1	2	951	937	1.015
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
variable 50	1	2	951	937	1.015	variable 50	1	2	951	937	1.015

Tableau A.3 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de σ_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 1

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.025, r=0.01, s=0.95). Based on sample size = 4100											
Type 1						Type 2					
Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat	Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
theta1	1	2	970	937	1.035	theta2	1	2	914	937	0.975

Tableau A.4 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de θ_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 1

Modèle 2 : 2éme dégrée – 3 Mixe

Tous les tests exposés dans le Tableau A.5 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 11.450 tours. Les coefficients d'auto corrélation sont très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 100.133 tours et d'amincir l'échantillon par 2, l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 481 tirages (Tableau A.5). A l'aide des Figure A.3, 4 et 5 nous avons choisit de laisser les premiers 4000 tirages. Ainsi, en réduisant la précision souhaitée (q=0.0125, r=0.0125), ce même diagnostic indique maintenant une convergence pour les types 1 et 3 mais non pour le type 2 (Tableau A.6). Après avoir aminci l'échantillon complet par 2 comme il est suggéré (Tableau A.6), le diagnostic de RL indique une convergence, or elle n'est pas parfaite pour les types 1 et 2 car l'I-stat est trop élevé (Tableau A.7).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accomplie à partir de l'échantillon raccourci (des premiers 4 mille tirages) et aminci (par 2).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 11450

Modèle 2 : 2éme dégrée – 3 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.992	0.981	0.968	0.857
St	0.849	0.661	0.680	0.604
St^2	0.614	0.185	0.242	0.092
W	0.925	0.852	0.820	0.701
W*St	0.623	0.229	0.204	0.108
W^2	0.559	0.062	0.049	0.049

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	2	481	100133	937	106.866
St	2	481	100133	937	106.866
St^2	2	481	100133	937	106.866
W	2	481	100133	937	106.866
W*St	2	481	100133	937	106.866
W^2	2	481	100133	937	106.866

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-200.706660	99.360809	0.930599	1.000000
St	-0.125131	0.055403	0.000519	1.000000
St^2	0.000065	0.000048	0.000000	1.000000
W	-0.843777	0.056212	0.000526	1.000000
W*St	-0.000172	0.000081	0.000001	1.000000
W^2	0.000109	0.000068	0.000001	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	16.584036	0.003149	20.370178	0.002087	22.746096	0.001674
St	0.007754	0.004478	0.009627	0.002905	0.010777	0.002318
St^2	0.000002	0.034309	0.000003	0.022938	0.000003	0.018674
W	0.008621	0.003729	0.010691	0.002425	0.011997	0.001926
W*St	0.000004	0.043720	0.000004	0.046725	0.000003	0.057634

TYPE 2

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.988	0.977	0.963	0.857
St	0.884	0.746	0.741	0.674
St^2	0.636	0.158	0.173	0.066
W	0.952	0.896	0.885	0.812
W*St	0.677	0.343	0.304	0.146
W^2	0.587	0.126	0.064	0.062

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	2	481	100133	937	106.866
St	2	481	100133	937	106.866
St^2	2	481	100133	937	106.866
W	2	481	100133	937	106.866
W*St	2	481	100133	937	106.866
W^2	2	481	100133	937	106.866

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-195.168897	162.546802	1.522390	1.000000
St	-0.116630	0.066826	0.000626	1.000000
St^2	0.000059	0.000051	0.000000	1.000000
W	-0.853571	0.072825	0.000682	1.000000
W*St	-0.000162	0.000090	0.000001	1.000000
W^2	0.000099	0.000070	0.000001	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	26.245387	0.003365	30.677953	0.002463	33.942603	0.002012
St	0.009504	0.004337	0.011310	0.003063	0.012772	0.002402
St^2	0.000002	0.053208	0.000002	0.046013	0.000002	0.036573
W	0.011436	0.003557	0.013516	0.002547	0.015226	0.002007
W*St	0.000005	0.027537	0.000005	0.027694	0.000005	0.031666

TYPE 3

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.954	0.940	0.922	0.809
St	0.981	0.936	0.910	0.802
St^2	0.747	0.347	0.263	0.422
W	0.987	0.954	0.927	0.818
W*St	0.686	0.227	0.027	0.510
W^2	0.709	0.139	-0.060	0.510

Cte	2	481	100133	937	106.866
St	2	481	100133	937	106.866
St^2	2	481	100133	937	106.866
W	2	481	100133	937	106.866
W*St	2	481	100133	937	106.866
W^2	2	481	100133	937	106.866

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-576.656626	122.278589	1.145244	1.000000
St	-0.316233	0.061338	0.000574	1.000000
St^2	0.000101	0.000022	0.000000	1.000000
W	-0.649512	0.061934	0.000580	1.000000
W*St	-0.000131	0.000037	0.000000	1.000000
W^2	0.000073	0.000035	0.000000	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	20.145509	0.003232	24.808580	0.002131	28.575977	0.001606
St	0.010023	0.003286	0.012377	0.002154	0.014305	0.001613
St^2	0.000002	0.009870	0.000003	0.006605	0.000003	0.004954
W	0.010202	0.003233	0.012616	0.002114	0.014597	0.001579
W*St	0.000002	0.034006	0.000002	0.023253	0.000003	0.017709

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W^2 0.000001 0.193688 0.000001 0.189266 0.000001 0.184911	W^2 0.000002 0.118143 0.000002 0.115578 0.000002 0.107968	W^2 0.000001 0.082417 0.000001 0.059104 0.000002 0.046146
Geweke Chi-squared test for each parameter chain First 20% versus Last 50% of the sample Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -164.122084 0.656605 0.000000 4% taper -173.386561 8.731261 0.000000 8% taper -173.170798 11.551475 0.000091 15% taper -171.671834 13.678854 0.001528	Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -141.211497 0.399712 0.000000 4% taper -141.886710 4.991557 0.000688 8% taper -141.566967 5.906293 0.011718 15% taper -141.369936 6.718328 0.045123	Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -538.072162 0.383738 0.000000 4% taper -539.985613 5.220127 0.000003 8% taper -539.707058 6.698257 0.000492 15% taper -539.188311 7.677776 0.005725
Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.108097 0.000430 0.000000 4% taper -0.117221 0.004387 0.000000 8% taper -0.116856 0.005775 0.000006 15% taper -0.115270 0.006858 0.000284	Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.094113 0.000332 0.000000 4% taper -0.094199 0.002687 0.000195 8% taper -0.093787 0.003009 0.005768 15% taper -0.093567 0.003266 0.026793	Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.297699 0.000271 0.000000 4% taper -0.298287 0.002834 0.000002 8% taper -0.298070 0.003593 0.000380 15% taper -0.297733 0.004077 0.004775
Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000059 0.000000 0.000000 4% taper 0.000060 0.000002 0.000291 8% taper 0.000061 0.000002 0.000514 15% taper 0.000061 0.000002 0.002170	Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000054 0.000000 0.000155 4% taper 0.000054 0.000001 0.288402 8% taper 0.000054 0.000001 0.319882 15% taper 0.000054 0.000001 0.283150	Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000098 0.000000 0.000000 4% taper 0.000097 0.000001 0.000006 8% taper 0.000097 0.000001 0.000516 15% taper 0.000097 0.000001 0.005354
Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.862585 0.000415 0.000000 4% taper -0.856959 0.004694 0.000000 8% taper -0.857116 0.006187 0.000032 15% taper -0.858240 0.007318 0.000808	Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.879740 0.000333 0.000000 4% taper -0.879628 0.003043 0.000211 8% taper -0.880109 0.003343 0.006352 15% taper -0.880420 0.003407 0.030128	Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.668358 0.000271 0.000000 4% taper -0.667728 0.002892 0.000002 8% taper -0.667926 0.003686 0.000333 15% taper -0.668225 0.004255 0.004367
Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000172 0.000001 0.000001 4% taper -0.000173 0.000002 0.318132 8% taper -0.000173 0.000002 0.392910 15% taper -0.000173 0.000002 0.420258	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000163 0.000001 0.000001 4% taper -0.000163 0.000002 0.373449 8% taper -0.000163 0.000002 0.439956 15% taper -0.000164 0.000002 0.479247	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000131 0.000000 0.000000 4% taper -0.000134 0.000001 0.000022 8% taper -0.000134 0.000001 0.001063 15% taper -0.000134 0.000001 0.008415
Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000107 0.000001 0.000808 4% taper 0.000107 0.000002 0.148699 8% taper 0.000107 0.000002 0.148929 15% taper 0.000107 0.000001 0.071240	Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000098 0.000001 0.028900 4% taper 0.000098 0.000002 0.335849 8% taper 0.000098 0.000002 0.338158 15% taper 0.000098 0.000002 0.293845	Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000073 0.000000 0.000000 4% taper 0.000074 0.000001 0.000257 8% taper 0.000075 0.000001 0.003593 15% taper 0.000075 0.000000 0.016408

Tableau A.5 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k\cdot}$; modèle 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

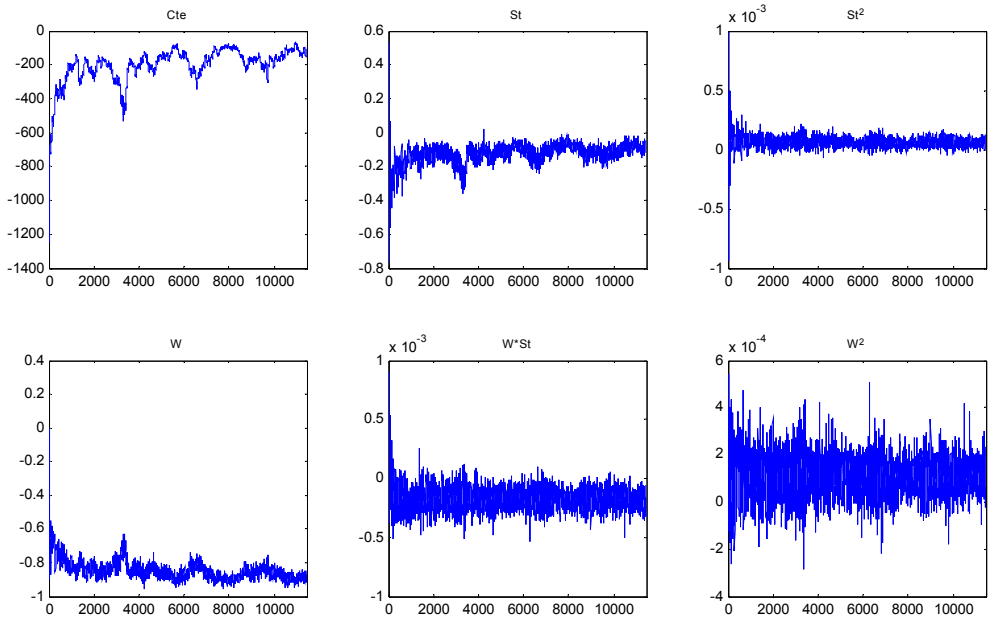


Figure A.3 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 2 ; type 1

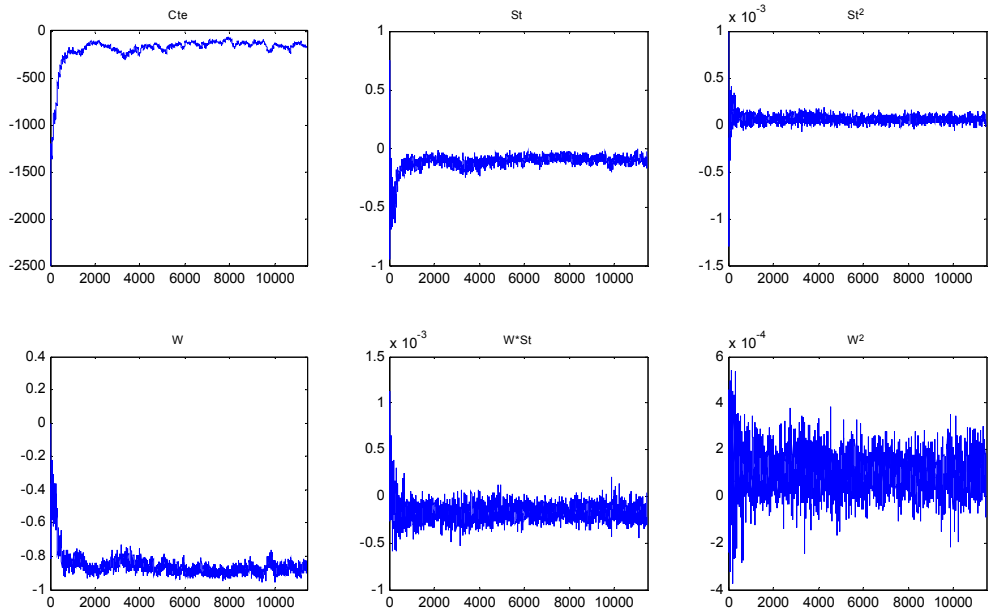


Figure A.4 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 2 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

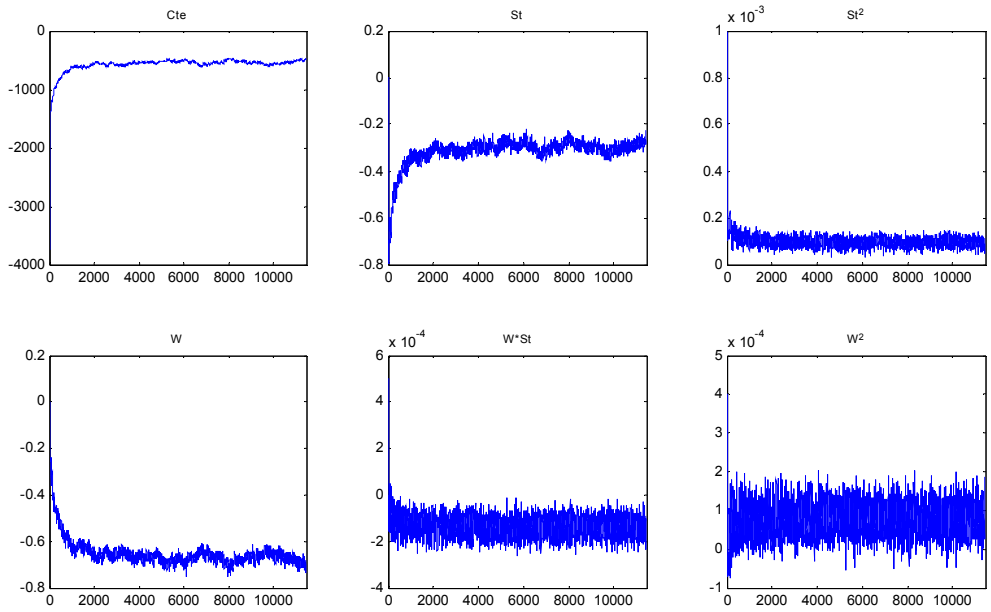


Figure A.5 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 2 ; type 3

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.0125, s=0.95). Based on sample size = 8450																		
Type 1						Type 2						Type 3						
Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat	Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat	Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
Cte	2	94	7950	304	26.15	Cte	8	387	38363	304	126.19	Cte	2	94	7950	304	26.15
St	.	.	.	.	.	St	.	.	.	.	.	St	.	.	.	.	.
St^2	.	.	.	.	.	St^2	.	.	.	.	.	St^2	.	.	.	.	.
W	.	.	.	.	.	W	.	.	.	.	.	W	.	.	.	.	.
W*St	.	.	.	.	.	W*St	.	.	.	.	.	W*St	.	.	.	.	.
W^2	.	.	.	.	.	W^2	.	.	.	.	.	W^2	.	.	.	.	.

Tableau A.6 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 2

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.015, s=0.95). Based on sample size = 5725																		
Type 1						Type 2						Type 3						
Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat	Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat	Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
Cte	1	161	6804	211	32.25	Cte	1	120	5668	211	26.9	Cte	1	506	508	211	2.4
St	.	.	.	.	.	St	.	.	.	.	.	St	.	.	.	.	.
St^2	.	.	.	.	.	St^2	.	.	.	.	.	St^2	.	.	.	.	.
W	.	.	.	.	.	W	.	.	.	.	.	W	.	.	.	.	.
W*St	.	.	.	.	.	W*St	.	.	.	.	.	W*St	.	.	.	.	.
W^2	.	.	.	.	.	W^2	.	.	.	.	.	W^2	.	.	.	.	.

Tableau A.7 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modèle 3 : 2éme dégrée – 4 Mixe

Tous les tests exposés dans le Tableau A.8 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 4900 tours. Les coefficients auto corrélation sont très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 37201 tours et d'amincir l'échantillon par 3, l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 190 tirages (Tableau A.8). A l'aide des Figure A.6, A.7, A.8 et A.9 nous avons choisit de laisser les premiers 500 tirages. Ainsi, en réduisant la précision souhaitée (q=0.0125, r=0.0125), ce même diagnostic indique maintenant une convergence pour les types 1 et 4 mais non pour les types 2 et 3 (Tableau A.9). Après avoir aminci l'échantillon complet par 2 comme il est suggéré (Tableau A.9), le diagnostic de RL indique une meilleure convergence, or elle n'est pas parfaite pour les types 2 et 3 (Tableau A.10).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accomplie à partir de l'échantillon raccourci (des premiers 4 mille tirages) et aminci (par 2).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 4900

Modèle 3 : 2éme dégrée – 4 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.997	0.986	0.973	0.879
St	0.875	0.783	0.756	0.694
St^2	0.721	0.489	0.333	0.087
W	0.967	0.927	0.898	0.755
W*St	0.660	0.266	0.265	0.156
W^2	0.520	0.125	0.082	0.075

Raftery-Lewis Diagnostics fo each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Var.	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	3	190	37201	937	39.702
St	3	190	37201	937	39.702
St^2	3	190	37201	937	39.702
W	3	190	37201	937	39.702
W*St	3	190	37201	937	39.702
W^2	3	190	37201	937	39.702

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-210.0617	224.161461	3.202307	1
St	-0.123267	0.119973	0.001714	1
St^2	0.000065	0.000107	0.000002	1
W	-0.844521	0.127404	0.001820	1
W*St	-0.000155	0.000112	0.000002	1
W^2	0.000102	0.000082	0.000001	1

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	41.631472	0.005917	54.212987	0.003489	66.027575	0.002352
St	0.019708	0.007563	0.025957	0.004360	0.031859	0.002894
St^2	0.000009	0.026838	0.000011	0.019519	0.000013	0.014432
W	0.022357	0.006627	0.028997	0.003940	0.035263	0.002664
W*St	0.000008	0.036123	0.000009	0.032261	0.000009	0.031376

TYPE 2

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.995	0.975	0.950	0.808
St	0.867	0.718	0.720	0.632
St^2	0.557	0.132	0.170	0.137
W	0.969	0.939	0.933	0.860
W*St	0.784	0.511	0.460	0.226
W^2	0.567	0.065	0.009	0.028

Idem Type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-255.3692	345.978193	4.942546	1
St	-0.137333	0.150858	0.002155	1
St^2	0.000066	0.000114	0.000002	1
W	-0.824478	0.156507	0.002236	1
W*St	-0.000144	0.000163	0.000002	1
W^2	0.000102	0.000100	0.000001	1

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	61.896159	0.006376	79.918920	0.003825	93.708897	0.002782
St	0.023320	0.008540	0.029730	0.005255	0.034463	0.003911
St^2	0.000007	0.060206	0.000008	0.040945	0.000009	0.032533
W	0.028560	0.006129	0.037258	0.003601	0.043938	0.002589
W*St	0.000017	0.019425	0.000019	0.015602	0.000020	0.013800

TYPE 3

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.996	0.982	0.964	0.815
St	0.849	0.527	0.659	0.555
St^2	0.671	-0.012	0.300	0.032
W	0.956	0.867	0.894	0.817
W*St	0.812	0.603	0.623	0.249
W^2	0.570	0.168	0.101	-0.001

Idem Type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-442.9226	623.5172	8.907389	1
St	-0.195317	0.213914	0.003056	1
St^2	0.000062	0.000207	0.000003	1
W	-0.754813	0.218437	0.003121	1
W*St	-0.000120	0.000284	0.000004	1
W^2	0.000091	0.000134	0.000002	1

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	112.208042	0.006302	142.130952	0.003928	164.837959	0.002920
St	0.030605	0.009970	0.038355	0.006348	0.044812	0.004650
St^2	0.000011	0.071711	0.000010	0.082526	0.000009	0.101665
W	0.039047	0.006387	0.050479	0.003822	0.059426	0.002757
W*St	0.000033	0.015388	0.000037	0.012333	0.000039	0.010846

TYPE 4

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.997	0.987	0.974	0.876
St	0.997	0.986	0.973	0.909
St^2	0.925	0.711	0.626	0.675
W	0.998	0.994	0.990	0.940
W*St	0.918	0.783	0.719	0.569
W^2	0.869	0.560	0.494	0.613

Idem Type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-911.552	891.147405	12.730677	1
St	-0.399606	0.223350	0.003191	1
St^2	0.000127	0.000064	0.000001	1
W	-0.529681	0.289606	0.004137	1
W*St	-0.000105	0.000102	0.000001	1
W^2	0.000060	0.000063	0.000001	1

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	166.540831	0.005843	216.469120	0.003459	256.554936	0.002462
St	0.041171	0.006006	0.052574	0.003683	0.061490	0.002693
St^2	0.000010	0.008563	0.000013	0.004856	0.000016	0.003313
W	0.055676	0.005522	0.073765	0.003146	0.088872	0.002167
W*St	0.000015	0.009063	0.000020	0.005505	0.000023	0.003952

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W^2	0.000004	0.093437	0.000004	W^2	0.000003	0.273728	0.000003	W^2	0.000006	0.095328	0.000007	W^2	0.000008	0.011562	0.000011
0.089513	0.000003	0.116906		0.248244	0.000003	0.274031		0.072395	0.000008	0.058081		0.006847	0.000013	0.004795	
Geweke Chi-squared test for each parameter chain															
First 20% versus Last 50% of the sample															
Variable	Cte			Variable	Cte			Variable	Cte			Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-115.758714	0.672280	0.000000	i.i.d.	-133.291124	0.766267	0.000000	i.i.d.	-196.20355	1.099867	0.000000	i.i.d.	-560.3575	0.590408	0.000000
4% taper	-118.871757	5.930318	0.000000	4% taper	-134.692585	6.555302	0.000000	4% taper	-197.75296	9.929719	0.000000	4% taper	-560.8379	5.473900	0.000000
8% taper	-118.31127	7.753074	0.000000	8% taper	-134.250143	8.103229	0.000005	8% taper	-197.53891	13.107386	0.000053	8% taper	-560.7909	7.368162	0.000001
15% taper	-117.710199	9.494740	0.000001	15% taper	-133.5348	8.546289	0.000412	15% taper	-197.2299	15.966581	0.001912	15% taper	-560.7034	9.165007	0.000147
Variable	St			Variable	St			Variable	St			Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.078761	0.000590	0.000000	i.i.d.	-0.092542	0.000615	0.000000	i.i.d.	-0.119298	0.000801	0.000000	i.i.d.	-0.310864	0.000451	0.000000
4% taper	-0.080739	0.003411	0.000000	4% taper	-0.093321	0.003497	0.000000	4% taper	-0.121175	0.005376	0.000000	4% taper	-0.311090	0.002988	0.000000
8% taper	-0.080134	0.004310	0.000000	8% taper	-0.092990	0.004161	0.000003	8% taper	-0.121062	0.006931	0.000018	8% taper	-0.311037	0.003904	0.000002
15% taper	-0.079740	0.005297	0.000000	15% taper	-0.092495	0.004387	0.000263	15% taper	-0.120924	0.008404	0.000557	15% taper	-0.311019	0.004884	0.000192
Variable	St^2			Variable	St^2			Variable	St^2			Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000048	0.000001	0.000000	i.i.d.	0.000054	0.000001	0.000000	i.i.d.	0.000057	0.000001	0.918790	i.i.d.	0.000105	0.000000	0.000000
4% taper	0.000048	0.000002	0.001114	4% taper	0.000054	0.000002	0.000264	4% taper	0.000057	0.000002	0.971673	4% taper	0.000104	0.000001	0.000000
8% taper	0.000048	0.000002	0.006371	8% taper	0.000054	0.000002	0.000562	8% taper	0.000057	0.000003	0.975042	8% taper	0.000104	0.000001	0.000000
15% taper	0.000048	0.000003	0.012102	15% taper	0.000054	0.000002	0.004154	15% taper	0.000057	0.000003	0.978023	15% taper	0.000103	0.000001	0.000000
Variable	W			Variable	W			Variable	W			Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.894035	0.000555	0.000000	i.i.d.	-0.881000	0.000593	0.000000	i.i.d.	-0.849367	0.000807	0.000000	i.i.d.	-0.657201	0.000474	0.000000
4% taper	-0.892629	0.003815	0.000000	4% taper	-0.880483	0.003761	0.000000	4% taper	-0.847318	0.006025	0.000000	4% taper	-0.656848	0.003274	0.000000
8% taper	-0.893145	0.004782	0.000000	8% taper	-0.881133	0.004428	0.000000	8% taper	-0.847895	0.007723	0.000001	8% taper	-0.657045	0.004210	0.000000
15% taper	-0.893529	0.005783	0.000003	15% taper	-0.881907	0.004322	0.000086	15% taper	-0.848509	0.009306	0.000162	15% taper	-0.657195	0.005203	0.000002
Variable	W*St			Variable	W*St			Variable	W*St			Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000159	0.000001	0.000046	i.i.d.	-0.000160	0.000001	0.000000	i.i.d.	-0.000161	0.000002	0.000000	i.i.d.	-0.000133	0.000001	0.000000
4% taper	-0.000160	0.000003	0.263614	4% taper	-0.000162	0.000003	0.017883	4% taper	-0.000162	0.000004	0.012441	4% taper	-0.000135	0.000002	0.000000
8% taper	-0.000160	0.000003	0.372278	8% taper	-0.000162	0.000003	0.066059	8% taper	-0.000162	0.000004	0.051337	8% taper	-0.000136	0.000002	0.000010
15% taper	-0.000160	0.000003	0.442718	15% taper	-0.000162	0.000003	0.129024	15% taper	-0.000162	0.000004	0.107662	15% taper	-0.000136	0.000002	0.000484
Variable	W^2			Variable	W^2			Variable	W^2			Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000099	0.000001	0.005045	i.i.d.	0.000098	0.000001	0.095836	i.i.d.	0.000093	0.000002	0.000005	i.i.d.	0.000073	0.000001	0.000000
4% taper	0.000100	0.000003	0.195475	4% taper	0.000099	0.000003	0.282022	4% taper	0.000093	0.000003	0.068479	4% taper	0.000076	0.000002	0.000000
8% taper	0.000099	0.000004	0.273545	8% taper	0.000099	0.000003	0.259513	8% taper	0.000093	0.000004	0.080063	8% taper	0.000076	0.000002	0.000000
15% taper	0.000099	0.000003	0.339741	15% taper	0.000099	0.000003	0.278281	15% taper	0.000093	0.000004	0.099975	15% taper	0.000077	0.000001	0.000075

Tableau A.8 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k\cdot}$; modèle 3

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

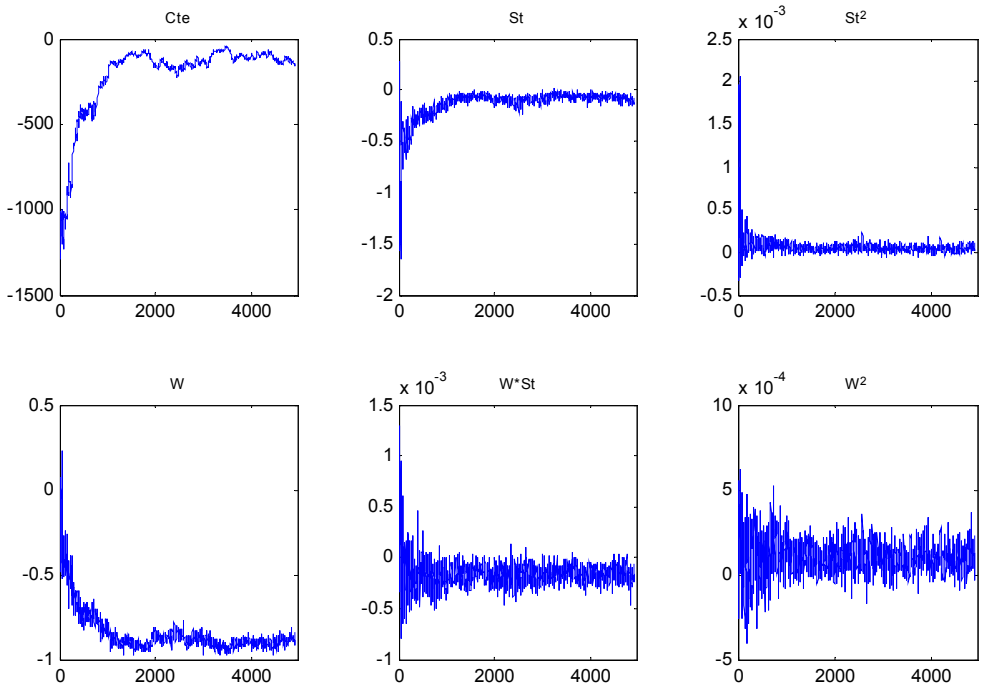


Figure A.6 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 1

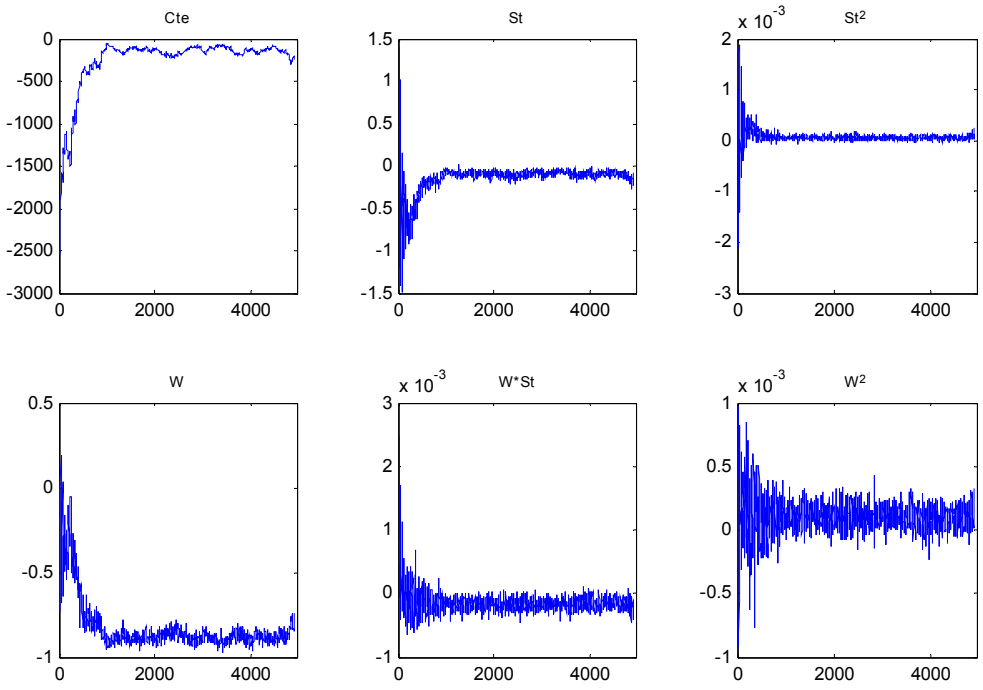


Figure A.7 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

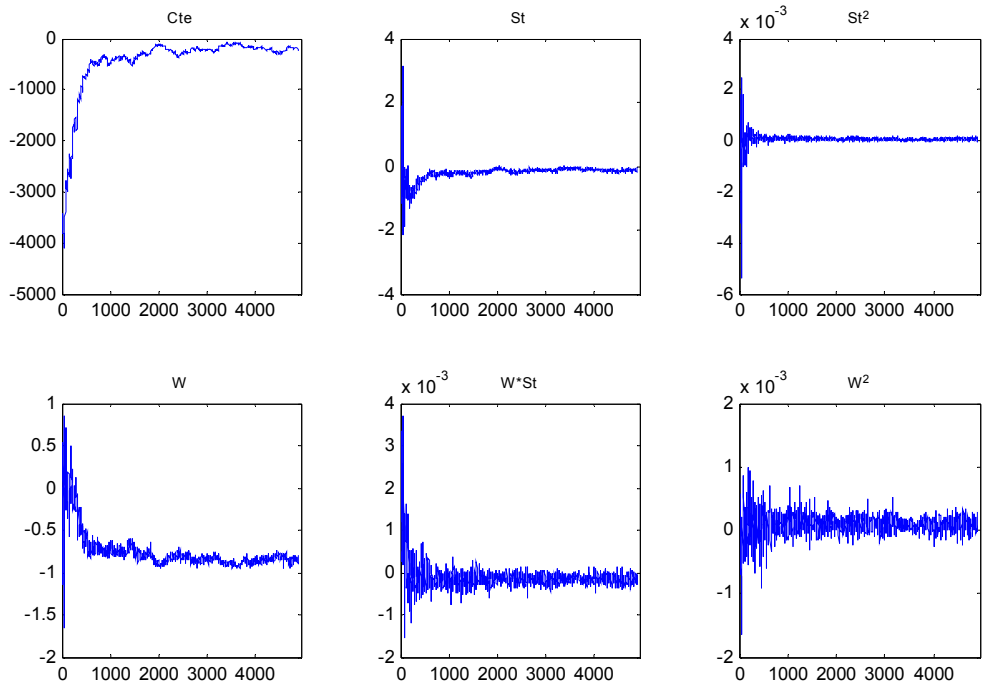


Figure A.8 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 3

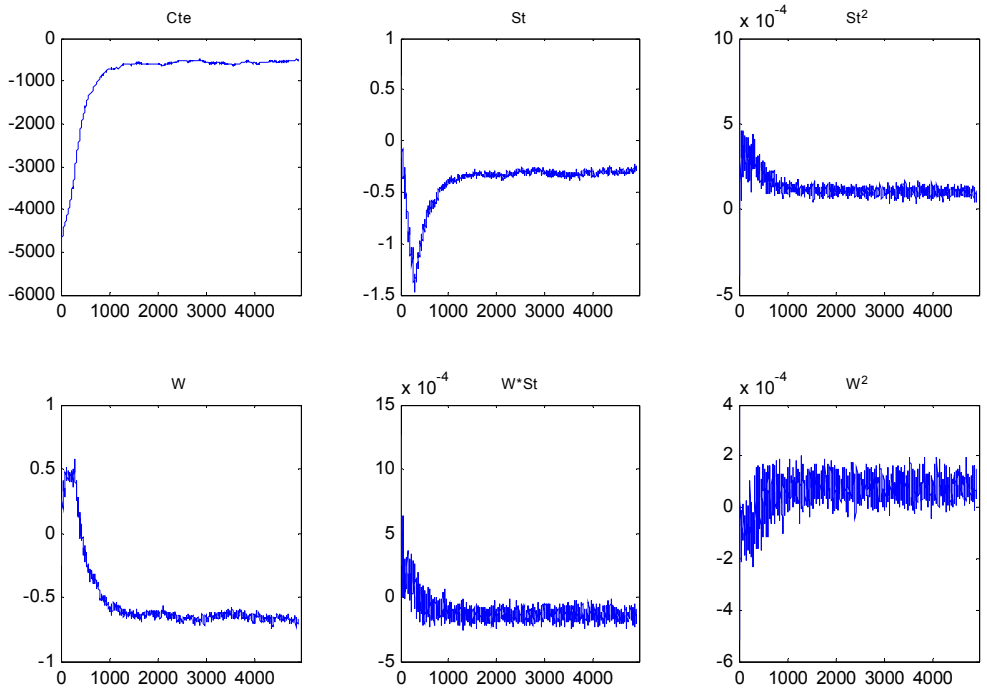


Figure A.9 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.0125, s=0.95). Based on sample size = 4400					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	1	83	3107	304	10.34
2	2	83	6804	304	22.65
3	2	193	9012	304	30.28
4	2	423	425	328	1.29

Tableau A.9 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 3

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.0125, s=0.95). Based on sample size = 2200					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	1	21	1848	304	6.07
2	2	38	3154	304	10.37
3	2	90	4130	304	13.58
4	1	190	191	328	0.63

Tableau A.10 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 3

Modèle 4 : 3éme dégrée – 2 Types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.11 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 10300 tours. Les coefficients auto corrélation sont très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 46320 tours et d'amincir l'échantillon par 6, l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 186 tirages (Tableau A.11). A l'aide des Figure A.10 et A.11 [1]nous avons choisit de laisser les premiers 7000 tirages. Malgré une réduction de la précision souhaitée (q=0.0125, r=0.0125), ce même diagnostic n'indique pas une convergence avec l'échantillon raccourci (Tableau A.12). Après avoir aminci l'échantillon complet par 3 comme il est suggéré (Tableau A.12), le diagnostic de RL indique une meilleure convergence, or elle n'est pas parfaite pour le type 2 (Tableau A.13).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accomplie à partir de l'échantillon raccourci (des premiers 7 mille tirages) et aminci (par 3).

[1] Les Figures A.10 et A.11 n'exposent pas les premiers mille tours car les valeurs de démarrage sont trop éloignes de la valeur posteriori.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 10300

Modèle 4 : 3éme dégrée – 2 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.990	0.963	0.959	0.837
St	0.803	0.381	0.293	-0.008
St^2	0.693	0.136	-0.041	-0.075
St^3	0.796	0.364	0.042	-0.080
W	0.748	0.197	0.029	0.028
W*St	0.830	0.579	0.438	0.175
W*St^2	0.904	0.857	0.813	0.346
W^2	0.694	0.408	0.391	0.194
W^2*St	0.799	0.264	0.437	0.046
W^3	0.668	0.283	0.281	0.234

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	6	186	46320	937	49.434
St	6	186	46320	937	49.434
St^2	6	186	46320	937	49.434
St^3	6	186	46320	937	49.434
W	6	186	46320	937	49.434
W*St	6	186	46320	937	49.434
W*St^2	6	186	46320	937	49.434
W^2	6	186	46320	937	49.434
W^2*St	6	186	46320	937	49.434
W^3	6	186	46320	937	49.434

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	105.761920	584.539601	5.759640	1.000000
St	0.074858	2.618489	0.025801	1.000000
St^2	-0.000003	0.007091	0.000070	1.000000
St^3	0.000000	0.000015	0.000000	1.000000
W	-0.970614	1.116567	0.011002	1.000000
W*St	-0.000581	0.006455	0.000064	1.000000
W*St^2	0.000001	0.000012	0.000000	1.000000
W^2	0.000193	0.001582	0.000016	1.000000
W^2*St	-0.000001	0.000008	0.000000	1.000000
W^3	0.000000	0.000004	0.000000	1.000000

TYPE 2

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.976	0.880	0.766	0.315
St	0.990	0.893	0.712	-0.014
St^2	0.975	0.600	0.151	-0.002
St^3	0.942	0.637	0.273	-0.002
W	0.988	0.891	0.788	-0.018
W*St	0.979	0.629	0.135	0.004
W*St^2	0.761	0.240	0.153	0.008
W^2	0.935	0.481	0.043	0.016
W^2*St	0.883	0.366	0.092	0.010
W^3	0.534	-0.114	-0.038	0.000

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	6	186	46320	937	49.434
St	6	186	46320	937	49.434
St^2	6	186	46320	937	49.434
St^3	6	186	46320	937	49.434
W	6	186	46320	937	49.434
W*St	6	186	46320	937	49.434
W*St^2	6	186	46320	937	49.434
W^2	6	186	46320	937	49.434
W^2*St	6	186	46320	937	49.434
W^3	6	186	46320	937	49.434

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	642.680773	212.314409	2.091996	1.000000
St	0.345239	1.307109	0.012879	1.000000
St^2	-0.000595	0.007102	0.000070	1.000000
St^3	0.000001	0.000020	0.000000	1.000000
W	-1.208098	1.052134	0.010367	1.000000
W*St	-0.000463	0.004606	0.000045	1.000000
W*St^2	0.000001	0.000005	0.000000	1.000000
W^2	0.000099	0.000719	0.000007	1.000000
W^2*St	-0.000001	0.000006	0.000000	1.000000
W^3	0.000001	0.000003	0.000000	1.000000

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	93.636730	0.003784	112.644277	0.002614	130.824525	0.001938
St	0.115226	0.050137	0.128750	0.040158	0.141832	0.033091
St^2	0.000126	0.309117	0.000137	0.261092	0.000149	0.219430
St^3	0.000000	0.134671	0.000000	0.129961	0.000000	0.125357
W	0.023815	0.213415	0.025985	0.179260	0.029630	0.137870
W*St	0.000496	0.016434	0.000520	0.014956	0.000540	0.013882
W*St^2	0.000001	0.009955	0.000001	0.009072	0.000001	0.008351
W^2	0.000109	0.020304	0.000114	0.018831	0.000116	0.017981
W^2*St	0.000000	0.031295	0.000000	0.027120	0.000001	0.023476
W^3	0.000000	0.022562	0.000000	0.019952	0.000000	0.017573

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	23.817387	0.007715	27.815064	0.005657	30.322843	0.004760
St	0.067854	0.036027	0.065275	0.038931	0.063624	0.040977
St^2	0.000194	0.129957	0.000197	0.126108	0.000198	0.124483
St^3	0.000001	0.066748	0.000001	0.066409	0.000001	0.066513
W	0.062310	0.027682	0.060573	0.029292	0.059401	0.030459
W*St	0.000042	1.166673	0.000040	1.272082	0.000039	1.350445
W*St^2	0.000000	0.055142	0.000000	0.053059	0.000000	0.052015
W^2	0.000006	1.420311	0.000006	1.381793	0.000006	1.362110
W^2*St	0.000000	0.109708	0.000000	0.113364	0.000000	0.116314
W^3	0.000000	1.380337	0.000000	1.580278	0.000000	1.712113

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-124.592905	1.193016	0.000000
4% taper	-120.887748	16.499889	0.000011
8% taper	-120.618281	22.534883	0.001020
15% taper	-120.220353	28.717283	0.007839

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	624.167591	0.777138	0.000000
4% taper	627.179311	10.663815	0.029817
8% taper	628.188900	14.569879	0.075194
15% taper	629.039188	18.661223	0.133394

Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.141702	0.001285	0.000000
4% taper	-0.141058	0.012614	0.040730
8% taper	-0.140542	0.016989	0.047319
15% taper	-0.140066	0.021596	0.066695

Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.414561	0.000777	0.000001
4% taper	0.414460	0.007279	0.348553
8% taper	0.414350	0.009906	0.360477
15% taper	0.414184	0.012640	0.357288

Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000222	0.000003	0.008084
4% taper	0.000221	0.000017	0.277599
8% taper	0.000221	0.000022	0.201240
15% taper	0.000220	0.000027	0.152527

Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000405	0.000002	0.004115
4% taper	-0.000405	0.000007	0.337463
8% taper	-0.000405	0.000010	0.316228
15% taper	-0.000405	0.000012	0.307353

Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.002501
4% taper	-0.000000	0.000000	0.284364
8% taper	-0.000000	0.000000	0.271595
15% taper	-0.000000	0.000000	0.263275

Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000087
4% taper	0.000000	0.000000	0.308438
8% taper	0.000000	0.000000	0.308898
15% taper	0.000000	0.000000	0.308545

Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.910467	0.000870	0.002251

Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-1.270890	0.000525	0.000000

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4% taper	−0.911609	0.008503	0.094019	4% taper	−1.270834	0.005245	0.330515
8% taper	−0.912460	0.011478	0.104608	8% taper	−1.270770	0.007124	0.344375
15% taper	−0.914276	0.014577	0.080308	15% taper	−1.270674	0.009109	0.343473
Variable	W*St			Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000091	0.000004	0.000000	i.i.d.	−0.000505	0.000002	0.412976
4% taper	0.000092	0.000014	0.074800	4% taper	−0.000505	0.000006	0.696987
8% taper	0.000092	0.000017	0.135508	8% taper	−0.000505	0.000007	0.620220
15% taper	0.000092	0.000021	0.174431	15% taper	−0.000505	0.000008	0.551963
Variable	W*St^2			Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	−0.000001	0.000000	0.000000	i.i.d.	0.000001	0.000000	0.000006
4% taper	−0.000001	0.000000	0.067809	4% taper	0.000001	0.000000	0.233366
8% taper	−0.000001	0.000000	0.123834	8% taper	0.000001	0.000000	0.254253
15% taper	−0.000001	0.000000	0.161546	15% taper	0.000001	0.000000	0.266567
Variable	W^2			Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000060	0.000001	0.000000	i.i.d.	0.000094	0.000001	0.408271
4% taper	0.000060	0.000003	0.098731	4% taper	0.000094	0.000001	0.646480
8% taper	0.000060	0.000003	0.164825	8% taper	0.000094	0.000001	0.553506
15% taper	0.000060	0.000002	0.205934	15% taper	0.000094	0.000001	0.473113
Variable	W^2*St			Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000	i.i.d.	−0.000001	0.000000	0.003507
4% taper	0.000000	0.000000	0.045511	4% taper	−0.000001	0.000000	0.341433
8% taper	0.000000	0.000000	0.081441	8% taper	−0.000001	0.000000	0.342781
15% taper	0.000000	0.000000	0.105983	15% taper	−0.000001	0.000000	0.339002
Variable	W^3			Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	−0.000000	0.000000	0.000000	i.i.d.	0.000001	0.000000	0.497851
4% taper	−0.000000	0.000000	0.043459	4% taper	0.000001	0.000000	0.461595
8% taper	−0.000000	0.000000	0.087799	8% taper	0.000001	0.000000	0.461421
15% taper	−0.000000	0.000000	0.118352	15% taper	0.000001	0.000000	0.446190

Tableau A.11 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_{k}. ; modèle 4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

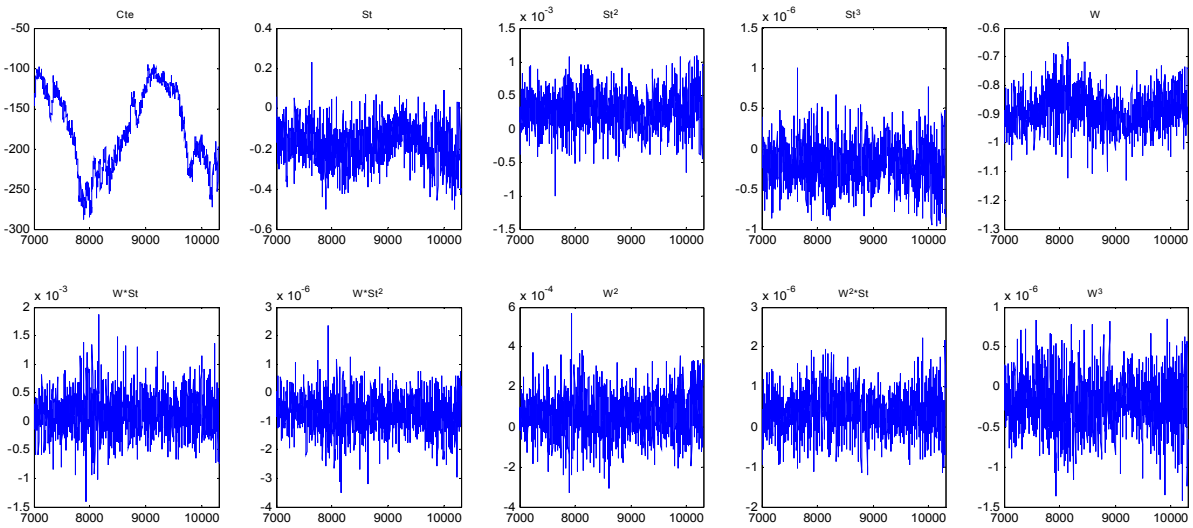


Figure A.10 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 4 ; type 1

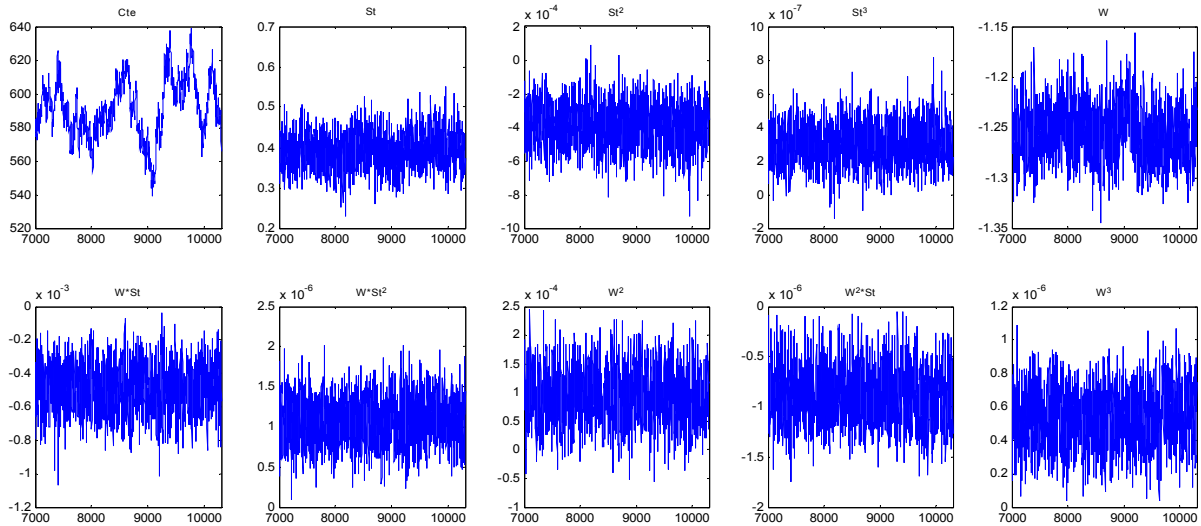


Figure A.11 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 4 ; type 2

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.0125, s=0.95). Based on sample size = 3300					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	3	57	5670	304	18.65
2	6	78	6768	304	22.26

Tableau A.12 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 4

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.02, s=0.95). Based on sample size = 1100					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	2	21	625	119	5.34
2	2	30	1202	119	10.1

Tableau A.13 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modèle 5 : 3éme dégrée – 3 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.14 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 8500 tours. Les coefficients auto corrélation sont très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 17721 tours et d'amincir l'échantillon par 7, l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bas pour la plus part des paramètres. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 74 tirages (Tableau A.14). A l'aide des Figure A.12, A.13 et A.14 nous avons décidé d'effectuer les tests sur l'échantillon raccourci des premiers 1000 tours car les valeurs de démarrage de l'algorithme sont, de façon évidente, très éloignées de l'état final. Ainsi, en réduisant la précision souhaitée (q=0.0125), le diagnostic RL appliqué sur l'échantillon raccourci indique maintenant une convergence pour tous les types (Tableau A.15). Néanmoins, la convergence n'est pas très bonne et il est suggéré d'amincir l'échantillon par 2. A partir des Figure A.12, A.13 et A.14 nous avons choisit de laisser les premiers 5000 tirages parce que les suites semblent se placer dans une autre partie de l'espace de paramètres ; le diagnostic de RL indique une convergence, or elle n'est pas parfaite car l'I-stat est trop élevé (Tableau A.16).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l'échantillon raccourci (des premiers 5 mille tirages).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 8500

Modèle 5 : 3éme dégrée – 3 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.911	0.739	0.587	0.008
St	0.598	0.261	0.158	0.116
St^2	0.648	0.343	0.068	-0.123
St^3	0.828	0.552	0.261	-0.253
W	0.688	0.303	0.104	-0.138
W*St	0.699	0.492	0.302	-0.020
W*St^2	0.817	0.638	0.593	0.219
W^2	0.509	0.053	0.120	-0.022
W^2*St	0.846	0.473	0.241	-0.020
W^3	0.736	0.415	0.474	0.122

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	7	74	17721	937	18.912
St	7	74	17721	937	18.912
St^2	7	74	17721	937	18.912
St^3	7	74	17721	937	18.912
W	7	74	17721	937	18.912
W*St	7	74	17721	937	18.912
W*St^2	7	74	17721	937	18.912
W^2	7	74	17721	937	18.912
W^2*St	7	74	17721	937	18.912
W^3	7	74	17721	937	18.912

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	196.447312	232.450392	2.521279	1.000000
St	0.187394	2.393379	0.025960	1.000000
St^2	-0.000042	0.009672	0.000105	1.000000
St^3	0.000000	0.000021	0.000000	1.000000
W	-1.071987	1.307097	0.014177	1.000000
W*St	-0.000600	0.006675	0.000072	1.000000
W*St^2	0.000001	0.000011	0.000000	1.000000
W^2	0.000131	0.001394	0.000015	1.000000
W^2*St	-0.000001	0.000011	0.000000	1.000000
W^3	0.000001	0.000006	0.000000	1.000000

TYPE 2

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.966	0.906	0.815	0.584
St	0.692	0.368	0.044	0.057
St^2	0.904	0.498	0.069	0.087
St^3	0.936	0.622	0.179	0.048
W	0.843	0.648	0.445	-0.102
W*St	0.911	0.624	0.239	0.061
W*St^2	0.900	0.710	0.757	0.202
W^2	0.772	0.563	0.348	0.056
W^2*St	0.872	0.605	0.338	-0.154
W^3	0.702	0.119	0.104	0.090

Idem type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	27.668719	391.784973	4.249505	1.000000
St	0.008517	2.107127	0.022855	1.000000
St^2	-0.000267	0.017038	0.000185	1.000000
St^3	0.000001	0.000034	0.000000	1.000000
W	-0.894617	1.344568	0.014584	1.000000
W*St	-0.000399	0.010707	0.000116	1.000000
W*St^2	0.000001	0.000013	0.000000	1.000000
W^2	0.000149	0.002107	0.000023	1.000000
W^2*St	-0.000000	0.000011	0.000000	1.000000
W^3	0.000000	0.000005	0.000000	1.000000

TYPE 3

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.991	0.940	0.875	0.444
St	0.997	0.978	0.945	0.483
St^2	0.973	0.761	0.463	-0.059
St^3	0.937	0.740	0.465	0.019
W	0.996	0.957	0.907	0.472
W*St	0.986	0.880	0.688	0.175
W*St^2	0.913	0.734	0.685	0.498
W^2	0.968	0.883	0.771	0.291
W^2*St	0.917	0.648	0.375	0.069
W^3	0.653	-0.058	-0.091	0.017

Idem type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-480.063528	436.826645	4.738050	1.00
St	-0.924032	4.228335	0.045863	1.000000
St^2	0.000740	0.006873	0.000075	1.000000
St^3	0.000001	0.000021	0.000000	1.000000
W	-0.377638	2.849187	0.030904	1.000000
W*St	-0.000127	0.005863	0.000064	1.000000
W*St^2	-0.000000	0.000010	0.000000	1.000000
W^2	0.000128	0.001228	0.000013	1.000000
W^2*St	0.000001	0.000007	0.000000	1.000000

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable NSE 4% RNE 4% NSE 8% RNE 8% NSE 15% RNE 15% Cte 23.748598 0.011271 27.580302 0.008357 30.491224 0.006837 St 0.120069 0.046746 0.121966 0.045303 0.123096 0.044475 St^2 0.000047 4.996989 0.000050 4.396308 0.000052 4.004785 St^3 0.000000 5.735300 0.000000 5.555272 0.000000 5.435370 W 0.029892 0.224951 0.030418 0.217240 0.030884 0.210727 W*St 0.000336 0.046362 0.000345 0.044167 0.000349 0.043081 W*St^2 0.000001 0.016847 0.000001 0.016208 0.000001 0.015903 W^2 0.000040 0.142079 0.000040 0.142016 0.000040 0.141993 W^2*St 0.000000 0.079073 0.000000 0.079822 0.000000 0.080117 W^3 0.000000 0.029816 0.000000 0.029563 0.000000 0.029475	Var. NSE 4% RNE 4% NSE 8% RNE 8% NSE 15% RNE 15% Cte 55.6054 0.00584 67.322 0.003984 80.472 0.002789 St 0.076475 0.089316 0.08302 0.075786 0.090886 0.063237 St^2 0.000393 0.221092 0.0004 0.211735 0.000408 0.204716 St^3 0.000001 0.20253 0.000001 0.198344 0.000001 0.19651 W 0.061141 0.0569 0.060207 0.058676 0.058696 0.061735 W*St 0.000357 0.10577 0.000369 0.098936 0.000380 0.093399 W*St^2 0.000001 0.0157 0.000001 0.014835 0.000001 0.01401 W^2 0.000075 0.0921 0.000077 0.088971 0.000078 0.084921 W^2*St 0.0000 0.253745 0.000000 0.200480 0.000000 0.153472 W^3 0.0000 0.058904 0.000000 0.052551 0.000000 0.046550	W^3 −0.000000 0.000003 0.000000 1.000000 Var. NSE 4% RNE 4% NSE 8% RNE 8% NSE 15% RNE 15% Cte 52.205 0.008 59.893 0.0063 67.838 0.0049 St 0.4639 0.01 0.47 0.00956 0.4669 0.00965 St^2 0.00019 0.1596 0.00019 0.1608 0.0002 0.169 St^3 0.000 0.0413 0.000001 0.0415 0.000 0.0416 W 0.3115 0.0098 0.3148 0.0096 0.3132 0.0097 W*St 0.0004 0.023 0.00044 0.0211 0.00045 0.0203 W*St^2 0.000 0.01 0.000 0.00945 0.000 0.009 W^2 0.0001 0.014 0.0001 0.0135 0.00012 0.013 W^2*St 0.000 0.0288 0.000 0.0283 0.000 0.0287 W^3 0.000 0.358 0.000 0.3759 0.000 0.418
Geweke Chi-squared test for each parameter chain First 20% versus Last 50% of the sample Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 201.927280 0.910875 0.000000 4% taper 204.614032 10.881099 0.105258 8% taper 205.475378 14.256077 0.166464 15% taper 205.352388 17.447619 0.265149	Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −149.479146 1.138672 0.000000 4% taper −143.616927 13.995361 0.000002 8% taper −143.298943 18.605871 0.000301 15% taper −143.028865 23.084647 0.003087	Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −580.510484 0.372107 0.000000 4% taper −580.288778 4.234233 0.003029 8% taper −580.240717 5.479640 0.014617 15% taper −580.166290 6.676681 0.029131
Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.087483 0.001565 0.000004 4% taper 0.087593 0.008235 0.187523 8% taper 0.087645 0.010593 0.249415 15% taper 0.087734 0.013055 0.276766	Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.156998 0.001725 0.000000 4% taper −0.155982 0.012933 0.045802 8% taper −0.155449 0.016735 0.061972 15% taper −0.154880 0.020102 0.072386	Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i i.i.d. −0.475744 0.000830 0.000000 4% taper −0.475724 0.003731 0.164520 8% taper −0.475725 0.004590 0.251384 15% taper −0.475726 0.005367 0.291381
Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000020 0.000004 0.673931	Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.156998 0.001725 0.000000	Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000587 0.000002 0.025380

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4% taper	-0.000020	0.000013	0.786627
8% taper	-0.000020	0.000014	0.705104
15% taper	-0.000020	0.000017	0.628452
Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.686565
4% taper	-0.000000	0.000000	0.873601
8% taper	-0.000000	0.000000	0.824913
15% taper	-0.000000	0.000000	0.767617
Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-1.056029	0.001033	0.057751
4% taper	-1.056089	0.005215	0.509510
8% taper	-1.056220	0.006703	0.418616
15% taper	-1.056362	0.007985	0.383435
Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000274	0.000006	0.000001
4% taper	-0.000273	0.000014	0.191934
8% taper	-0.000273	0.000016	0.243177
15% taper	-0.000273	0.000019	0.265769
Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000001	0.000000	0.000000
4% taper	0.000001	0.000000	0.156300
8% taper	0.000001	0.000000	0.230307
15% taper	0.000001	0.000000	0.265772
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000091	0.000002	0.007102
4% taper	0.000091	0.000004	0.209755
8% taper	0.000091	0.000004	0.266046
15% taper	0.000091	0.000004	0.286754
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000001	0.000000	0.000542
4% taper	-0.000001	0.000000	0.298640
8% taper	-0.000001	0.000000	0.307089
15% taper	-0.000001	0.000000	0.310598
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob

4% taper	-0.155982	0.012933	0.045802
8% taper	-0.155449	0.016735	0.061972
15% taper	-0.154880	0.020102	0.072386
Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.019497
4% taper	-0.000000	0.000000	0.396957
8% taper	-0.000000	0.000000	0.348626
15% taper	-0.000000	0.000000	0.323386
Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.893883	0.001116	0.025200
4% taper	-0.893779	0.008376	0.565345
8% taper	-0.893705	0.010900	0.586163
15% taper	-0.893617	0.013273	0.595879
Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000111	0.000005	0.000193
4% taper	0.000112	0.000015	0.230720
8% taper	0.000111	0.000017	0.226418
15% taper	0.000111	0.000018	0.220023
Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000001	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000001	0.000000	0.114004
8% taper	-0.000001	0.000000	0.165355
15% taper	-0.000001	0.000000	0.187699
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000050	0.000002	0.000127
4% taper	0.000050	0.000004	0.232548
8% taper	0.000050	0.000004	0.241022
15% taper	0.000050	0.000002	0.234286
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000605
4% taper	0.000000	0.000000	0.253702
8% taper	0.000000	0.000000	0.163715
15% taper	0.000000	0.000000	0.105704
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob

4% taper	0.000587	0.000006	0.606636
8% taper	0.000587	0.000007	0.568568
15% taper	0.000587	0.000007	0.498886
Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.288936
8% taper	-0.000000	0.000000	0.301290
15% taper	-0.000000	0.000000	0.300136
Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.677327	0.000515	0.000000
4% taper	-0.677336	0.002679	0.162068
8% taper	-0.677336	0.003252	0.249890
15% taper	-0.677335	0.003692	0.291735
Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000344	0.000003	0.000000
4% taper	0.000344	0.000006	0.190038
8% taper	0.000344	0.000006	0.239100
15% taper	0.000344	0.000006	0.251540
Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000001	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000001	0.000000	0.096042
8% taper	-0.000001	0.000000	0.181593
15% taper	-0.000001	0.000000	0.227508
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000012	0.000001	0.000000
4% taper	0.000012	0.000002	0.152574
8% taper	0.000012	0.000002	0.221079
15% taper	0.000012	0.000002	0.253214
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000001	0.000000	0.000000
4% taper	0.000001	0.000000	0.195805
8% taper	0.000001	0.000000	0.253908
15% taper	0.000001	0.000000	0.297318
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000	i.i.d.	−0.000000	0.000000	0.000000	i.i.d.	−0.000000	0.000000	0.224253
4% taper	0.000000	0.000000	0.216240	4% taper	−0.000000	0.000000	0.075418	4% taper	−0.000000	0.000000	0.331774
8% taper	0.000000	0.000000	0.263896	8% taper	−0.000000	0.000000	0.105371	8% taper	−0.000000	0.000000	0.416514
15% taper	0.000000	0.000000	0.285445	15% taper	−0.000000	0.000000	0.122885	15% taper	−0.000000	0.000000	0.451939

Tableau A.14 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_{k}. ; modèle 5

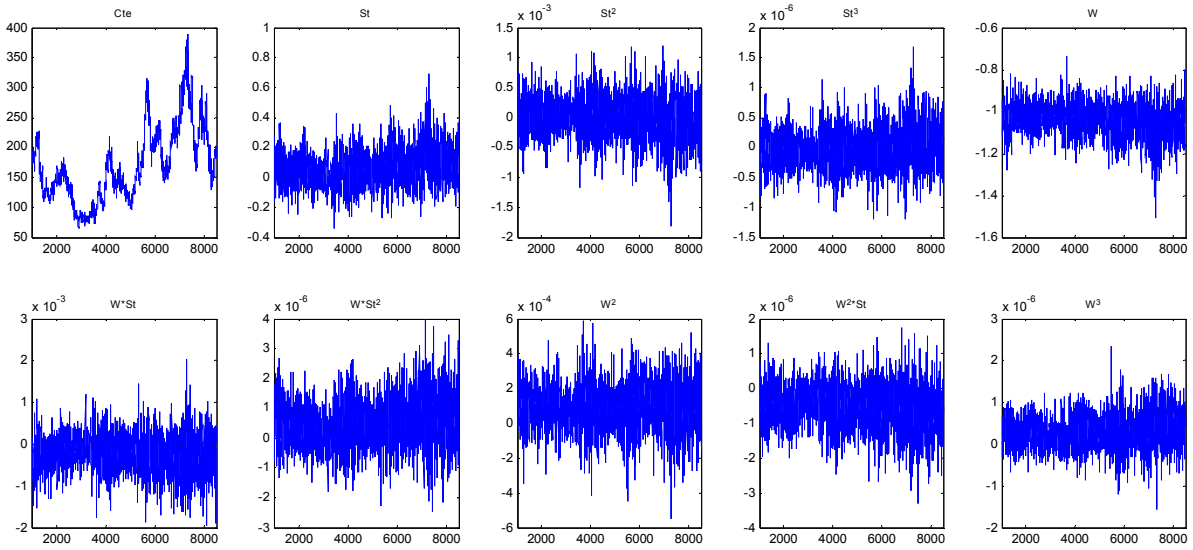


Figure A.12 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 5 ; type 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

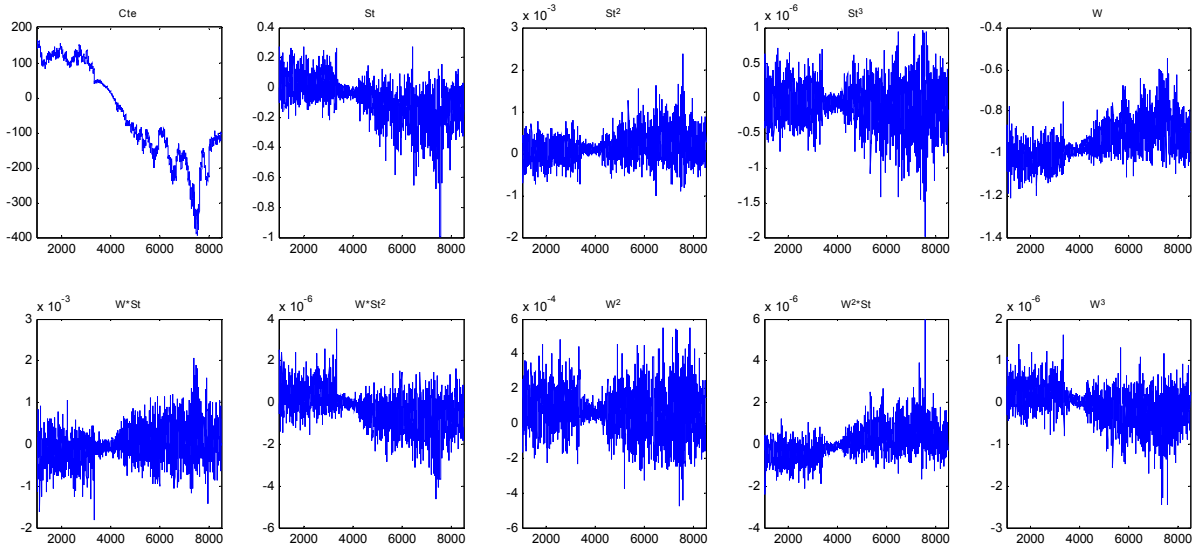


Figure A.13 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 5 ; type 2

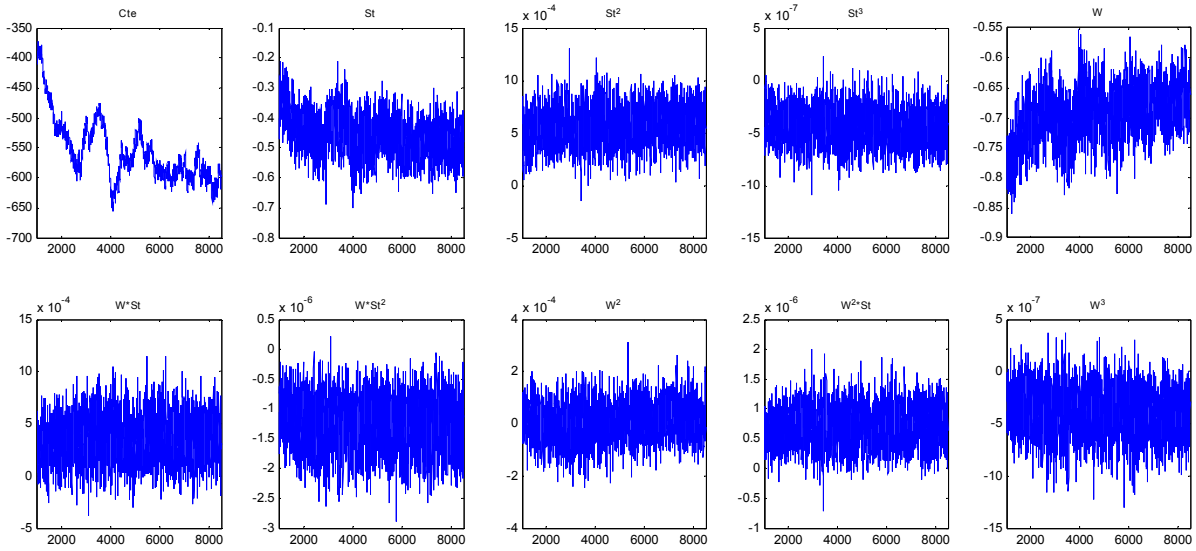


Figure A.14 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 5 ; type 3

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.01, s=0.95). Based on sample size = 7500					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	2	38	5204	475	10.96
2	2	56	7248	475	15.26
3	1	40	5450	475	11.47

Tableau A.15 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 5

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.015, s=0.95). Based on sample size = 3500					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	1	86	3258	211	15.44
2	1	47	2906	211	13.77
3	1	27	1658	211	7.86

Tableau A.16 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 5

Modèle 6 : 3éme dégrée – 4 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.17 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 14500 tours. Les coefficients auto corrélation sont très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 67620 tours et d'amincir l'échantillon par 14, l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bas pour la plus part des paramètres. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 74 tirages (Tableau A.17). A l'aide des Figure A.15, A.16, A.17 et A.18 nous avons décidé d'effectuer les tests sur l'échantillon raccourci des premiers 6000 tours car les valeurs de démarrage de l'algorithme sont de façon évidente, très éloignées de l'état final, et les suites semblent se placer dans une autre partie de l'espace de paramètres à partir de ce nombre de tours. Ainsi, en réduisant la précision souhaitée (q=0.0125 ; r=0.0125), le diagnostic RL appliqué sur l'échantillon raccourci indique maintenant une convergence pour tous les types (Tableau A.18). Néanmoins, la convergence n'est pas très bonne et il est suggéré d'amincir l'échantillon par 2 et l'I-stat est trop élevé (Tableau A.18).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accomplie à partir de l'échantillon raccourci (des premiers 6 mille tirages) et aminci par 2.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 14500

Modèle 6 : 3éme dégrée– 4 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.992	0.982	0.966	0.846
St	0.851	0.721	0.684	0.155
St^2	0.744	0.337	0.256	-0.015
St^3	0.802	0.395	0.142	-0.001
W	0.758	0.525	0.481	0.046
W*St	0.608	0.019	-0.061	-0.001
W*St^2	0.778	0.594	0.564	0.300
W^2	0.456	-0.032	0.067	-0.080
W^2*St	0.772	0.464	0.337	0.055
W^3	0.784	0.585	0.648	0.354

Raftery-Lewis Diagnostics fo each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Var.	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Cte	14	280	67620	937	72.166
St	14	280	67620	937	72.166
St^2	14	280	67620	937	72.166
St^3	14	280	67620	937	72.166
W	14	280	67620	937	72.166
W*St	14	280	67620	937	72.166
W*St^2	14	280	67620	937	72.166
W^2	14	280	67620	937	72.166
W^2*St	14	280	67620	937	72.166
W^3	14	280	67620	937	72.166

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	90.990513	792.187583	6.578760	1
St	0.236718	4.150138	0.034465	1
St^2	-0.000354	0.011733	0.000097	1
St^3	0.000001	0.000019	0.000000	1
W	-1.056778	1.598506	0.013275	1
W*St	-0.000273	0.007185	0.000060	1
W*St^2	0.000001	0.000011	0.000000	1
W^2	0.000040	0.001894	0.000016	1
W^2*St	-0.000000	0.000009	0.000000	1
W^3	0.000000	0.000006	0.000000	1

TYPE 2

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.963	0.869	0.808	0.473
St	0.563	0.082	-0.231	-0.019
St^2	0.745	0.479	0.242	0.046
St^3	0.869	0.681	0.489	0.027
W	0.845	0.596	0.429	0.088
W*St	0.705	0.375	0.203	0.132
W*St^2	0.878	0.689	0.689	0.312
W^2	0.647	0.149	-0.058	0.089
W^2*St	0.814	0.416	-0.046	-0.004
W^3	0.612	-0.065	-0.070	0.017

Idem Type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-41.76162	409.872268	3.403804	1
St	-0.166568	2.550455	0.021180	1
St^2	-0.000125	0.012550	0.000104	1
St^3	0.000001	0.000024	0.000000	1
W	-0.827642	1.932828	0.016051	1
W*St	-0.000162	0.007448	0.000062	1
W*St^2	0.000000	0.000011	0.000000	1
W^2	0.000127	0.001959	0.000016	1
W^2*St	0.000000	0.000009	0.000000	1
W^3	-0.000000	0.000004	0.000000	1

TYPE 3

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.978	0.909	0.826	0.614
St	0.633	0.056	-0.015	0.063
St^2	0.875	0.585	0.391	0.018
St^3	0.937	0.760	0.581	0.067
W	0.881	0.718	0.582	0.117
W*St	0.761	0.369	0.101	-0.016
W*St^2	0.698	0.310	0.295	-0.013
W^2	0.612	0.234	-0.134	-0.004
W^2*St	0.819	0.599	0.269	-0.006
W^3	0.747	0.176	-0.123	-0.026

Idem Type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-159.33562	500.17395	4.15372	1
St	-0.243337	2.188504	0.018175	1
St^2	-0.000267	0.013752	0.000114	1
St^3	0.000001	0.000029	0.000000	1
W	-0.779574	1.950674	0.016199	1
W*St	0.000247	0.007199	0.000060	1
W*St^2	-0.00000	0.000009	0.000000	1
W^2	0.000052	0.001469	0.000012	1
W^2*St	0.000001	0.000009	0.00000	1
W^3	-0.000000	0.000005	0.000000	1

TYPE 4

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.977	0.890	0.812	0.336
St	0.993	0.959	0.930	0.380
St^2	0.971	0.807	0.502	-0.205
St^3	0.928	0.683	0.488	0.027
W	0.994	0.943	0.895	0.383
W*St	0.980	0.839	0.568	-0.214
W*St^2	0.816	0.373	0.264	0.167
W^2	0.971	0.766	0.461	-0.130
W^2*St	0.958	0.723	0.469	0.108
W^3	0.592	-0.085	-0.085	0.013

Idem Type 1

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-541.24229	227.4638	1.888984	1
St	-0.620255	2.258023	0.018752	1
St^2	0.000514	0.004101	0.000034	1
St^3	0.000000	0.000015	0.000000	1
W	-0.579639	1.515738	0.012588	1
W*St	0.000304	0.003391	0.000028	1
W*St^2	-0.000001	0.000005	0.0000	1
W^2	0.000019	0.000742	0.000006	1
W^2*St	0.000001	0.000007	0.00000	1
W^3	-0.00000	0.000002	0.000000	1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	117.042603	0.003159	137.947383	0.002274	157.699216	0.001740
St	0.293270	0.013811	0.308899	0.012449	0.322954	0.011389
St^2	0.000482	0.040932	0.000497	0.038372	0.000513	0.036061
St^3	0.000001	0.063126	0.000001	0.060927	0.000001	0.058939
W	0.097903	0.018385	0.107496	0.015250	0.116257	0.013038
W*St	0.000238	0.062611	0.000260	0.052634	0.000282	0.044876
W*St^2	0.000001	0.009639	0.000001	0.008441	0.000001	0.007399
W^2	0.000034	0.213013	0.000032	0.242698	0.000031	0.263472
W^2*St	0.000000	0.026451	0.000001	0.022366	0.000001	0.018733
W^3	0.000000	0.011633	0.000001	0.010564	0.000001	0.009522

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	51.039067	0.004448	63.682180	0.002857	77.717230	0.001918
St	0.058167	0.132593	0.057582	0.135297	0.055939	0.143364
St^2	0.000328	0.101206	0.000334	0.097339	0.000342	0.092723
St^3	0.000001	0.054405	0.000001	0.053956	0.000001	0.053540
W	0.107664	0.022227	0.105144	0.023305	0.101006	0.025254
W*St	0.000219	0.079877	0.000228	0.073578	0.000240	0.066362
W*St^2	0.000001	0.013105	0.000001	0.012237	0.000001	0.011175
W^2	0.000060	0.074413	0.000060	0.073075	0.000062	0.069838
W^2*St	0.000000	0.328075	0.000000	0.277303	0.000000	0.233530
W^3	0.000000	0.535566	0.000000	0.310216	0.000000	0.194702

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	72.552775	0.003278	95.558124	0.001889	122.098319	0.001157
St	0.063263	0.082533	0.067293	0.072944	0.072681	0.062529
St^2	0.000550	0.043095	0.000563	0.041188	0.000579	0.038867
St^3	0.000001	0.032944	0.000001	0.032568	0.000001	0.032195
W	0.098853	0.026855	0.095675	0.028669	0.090787	0.031838
W*St	0.000109	0.300982	0.000114	0.272737	0.000120	0.249497
W*St^2	0.000000	0.028124	0.000001	0.021404	0.000001	0.015494
W^2	0.000018	0.474155	0.000020	0.374477	0.000023	0.272891
W^2*St	0.000000	0.152266	0.000000	0.123944	0.000000	0.101042
W^3	0.000000	0.265058	0.000000	0.165306	0.000000	0.109044

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	20.603826	0.008405	22.587137	0.006994	23.673983	0.006367
St	0.172686	0.011792	0.171198	0.011997	0.169963	0.012172
St^2	0.000018	3.578048	0.000019	3.099071	0.000020	2.916867
St^3	0.000001	0.036939	0.000001	0.036882	0.000001	0.037011
W	0.115283	0.011922	0.114156	0.012159	0.113270	0.012350
W*St	0.000048	0.346720	0.000048	0.339818	0.000049	0.334644
W*St^2	0.000000	0.027094	0.000000	0.026789	0.000000	0.026664
W^2	0.000011	0.315038	0.000011	0.320716	0.000011	0.321584
W^2*St	0.000000	0.027679	0.000000	0.027921	0.000000	0.028241
W^3	0.000000	0.817796	0.000000	0.875988	0.000000	0.952064

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-181.864170	0.850106	0.000000
4% taper	-180.403162	13.407194	0.000154
8% taper	-180.336634	17.652260	0.003582
15% taper	-180.298101	21.204919	0.014551

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-196.688337	1.258307	0.000000
4% taper	-182.156368	19.946542	0.000001
8% taper	-177.215153	26.503462	0.000027
15% taper	-173.386354	31.855021	0.00018

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-409.794816	1.533661	0.000000
4% taper	-380.137112	22.007636	0.00000
8% taper	-379.200405	26.640819	0.00000
15% taper	-381.137336	29.592746	0.0000

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-579.144201	0.352388	0.000000
4% taper	-578.583148	5.23945	0.054716
8% taper	-578.447059	6.45471	0.090576
15% taper	-578.496369	6.9499	0.126456

Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.184738	0.001649	0.000000
4% taper	-0.184706	0.011872	0.095254
8% taper	-0.184641	0.014905	0.128505
15% taper	-0.184579	0.017660	0.155021

Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.198334	0.001800	0.921447
4% taper	-0.198378	0.016114	0.965580
8% taper	-0.198398	0.021399	0.969078
15% taper	-0.198424	0.025807	0.969806

Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.350408	0.002443	0.008509
4% taper	-0.349445	0.017534	0.349228
8% taper	-0.349035	0.021881	0.381993
15% taper	-0.348567	0.025087	0.38462

Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.458654	0.000753	0.000000
4% taper	-0.458618	0.003592	0.265380
8% taper	-0.458623	0.004321	0.298967
15% taper	-0.458625	0.004670	0.310332

Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000278	0.000005	0.000000
4% taper	0.000278	0.000020	0.191166
8% taper	0.000278	0.000023	0.197630

Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000290	0.000005	0.000232
4% taper	0.000290	0.000023	0.269157
8% taper	0.000290	0.000029	0.248832

Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000450	0.000007	0.000000
4% taper	0.000450	0.000024	0.210179
8% taper	0.000450	0.000030	0.214894

Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000537	0.000002	0.513485
4% taper	0.000537	0.000004	0.831424
8% taper	0.000537	0.000004	0.765473

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

15% taper 0.000278 0.000027 0.204375	15% taper 0.000289 0.000034 0.240293	15% taper 0.000450 0.000035 0.217679	15% taper 0.000537 0.000005 0.688883
Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000000 0.000000 0.000009 4% taper -0.000000 0.000000 0.253644 8% taper -0.000000 0.000000 0.252753 15% taper -0.000000 0.000000 0.252134	Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000000 0.000000 0.000007 4% taper -0.000000 0.000000 0.312983 8% taper -0.000000 0.000000 0.302274 15% taper -0.000000 0.000000 0.296979	Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000000 0.000000 0.000000 4% taper -0.000000 0.000000 0.269952 8% taper -0.000000 0.000000 0.277746 15% taper -0.000000 0.000000 0.28083	Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000000 0.000000 0.000000 4% taper -0.000000 0.000000 0.295322 8% taper -0.000000 0.000000 0.302470 15% taper -0.000000 0.000000 0.304871
Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.882787 0.001080 0.000000 4% taper -0.882912 0.007203 0.033305 8% taper -0.882991 0.008836 0.052844 15% taper -0.883066 0.010642 0.080097	Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.879023 0.001220 0.000004 4% taper -0.878937 0.010329 0.440576 8% taper -0.878854 0.013540 0.473846 15% taper -0.878760 0.016198 0.483339	Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.778695 0.001622 0.018952 4% taper -0.778653 0.011581 0.682042 8% taper -0.778604 0.014454 0.696547 15% taper -0.778546 0.016932 0.699617	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.685565 0.000477 0.000000 4% taper -0.685577 0.003096 0.266693 8% taper -0.685570 0.003803 0.300100 15% taper -0.685567 0.004154 0.311221
Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000149 0.000006 0.000000 4% taper 0.000149 0.000016 0.052763 8% taper 0.000149 0.000018 0.081090 15% taper 0.000149 0.000018 0.098617	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000186 0.000006 0.000003 4% taper 0.000185 0.000027 0.142844 8% taper 0.000185 0.000030 0.150033 15% taper 0.000185 0.000031 0.152948	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000393 0.000009 0.324839 4% taper 0.000393 0.000023 0.688384 8% taper 0.000393 0.000024 0.643574 15% taper 0.000393 0.000025 0.615863	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000370 0.000002 0.057112 4% taper 0.000370 0.000004 0.574367 8% taper 0.000370 0.000004 0.472733 15% taper 0.000370 0.000004 0.39301
Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000001 0.000000 0.000000 4% taper -0.000001 0.000000 0.036809 8% taper -0.000001 0.000000 0.077360 15% taper -0.000001 0.000000 0.107602	Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000001 0.000000 0.000000 4% taper -0.000001 0.000000 0.107384 8% taper -0.000001 0.000000 0.141058 15% taper -0.000001 0.000000 0.15548	Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000001 0.000000 0.000000 4% taper -0.000001 0.000000 0.009065 8% taper -0.000001 0.000000 0.013334 15% taper -0.000001 0.000000 0.015615	Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000001 0.000000 0.000000 4% taper -0.000001 0.000000 0.217362 8% taper -0.000001 0.000000 0.250018 15% taper -0.000001 0.000000 0.264379
Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000060 0.000002 0.112447 4% taper 0.000060 0.000006 0.534058 8% taper 0.000060 0.000005 0.507592 15% taper 0.000060 0.000006 0.469371	Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000051 0.000002 0.000021 4% taper 0.000051 0.000005 0.165934 8% taper 0.000051 0.000005 0.201136 15% taper 0.000051 0.000006 0.212921	Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000006 0.000003 0.006667 4% taper 0.000006 0.000006 0.050248 8% taper 0.000007 0.000006 0.023533 15% taper 0.000007 0.000007 0.017612	Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000005 0.000001 0.056740 4% taper 0.000004 0.000002 0.521912 8% taper 0.000005 0.000002 0.430567 15% taper 0.000005 0.000002 0.367419
Variable W^2*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000000	Variable W^2*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.268930	Variable W^2*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000001 0.000000 0.031671	Variable W^2*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4% taper	0.000000	0.000000	0.034812
8% taper	0.000000	0.000000	0.054746
15% taper	0.000000	0.000000	0.074537

4% taper	0.000000	0.000000	0.541861
8% taper	0.000000	0.000000	0.516231
15% taper	0.000000	0.000000	0.502458

4% taper	0.000001	0.000000	0.411415
8% taper	0.000001	0.000000	0.377749
15% taper	0.000001	0.000000	0.357445

i.i.d.	0.000001	0.000000	0.000000
4% taper	0.000001	0.000000	0.283564
8% taper	0.000001	0.000000	0.304898
15% taper	0.000001	0.000000	0.312592

Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.073258
8% taper	-0.000000	0.000000	0.112665
15% taper	-0.000000	0.000000	0.138271

Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.007629
4% taper	-0.000000	0.000000	0.008278
8% taper	-0.000000	0.000000	0.001181
15% taper	-0.000000	0.000000	0.000179

Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000772
4% taper	-0.000000	0.000000	0.014258
8% taper	-0.000000	0.000000	0.007426
15% taper	-0.000000	0.000000	0.004222

Variable	W^3		
NSE estim	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.451811
4% taper	-0.000000	0.000000	0.422664
8% taper	-0.000000	0.000000	0.452374
15% taper	-0.000000	0.000000	0.4605

Tableau A.17 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 6

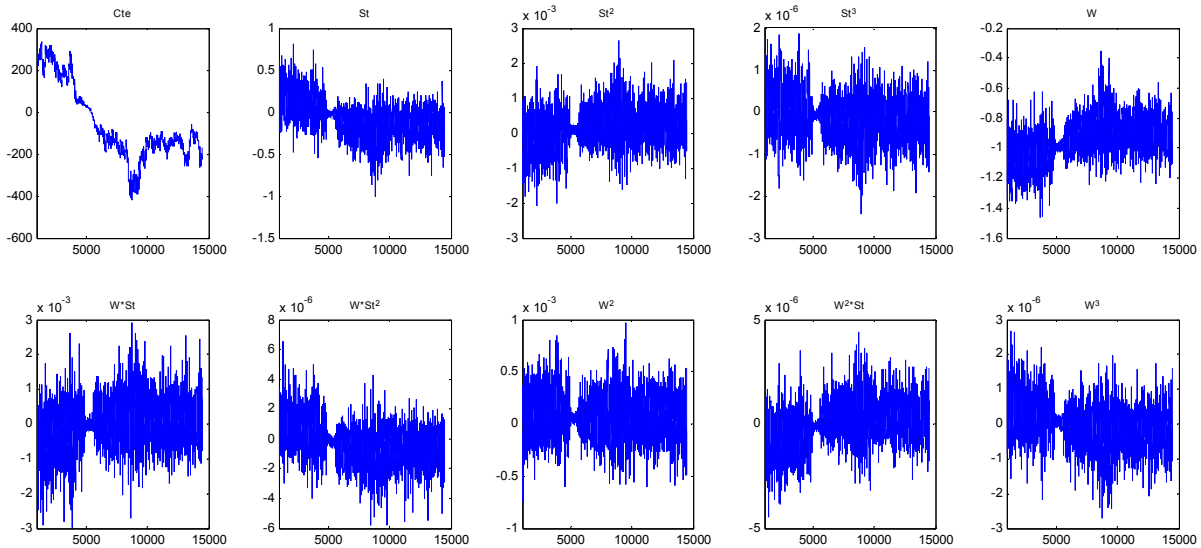


Figure A.15 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

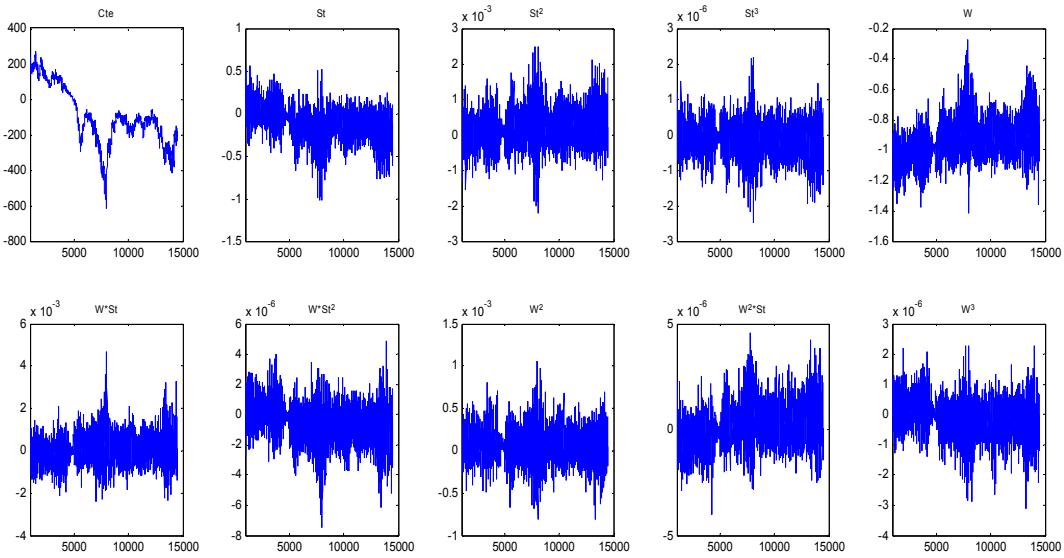


Figure A.16 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 2

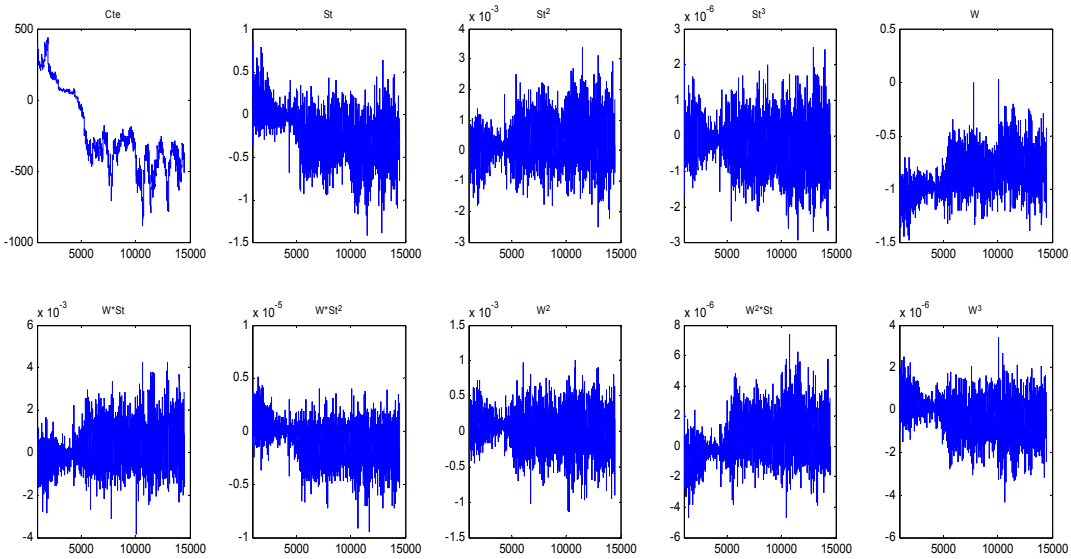


Figure A.17 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 3

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0125, r=0.0125, s=0.95). Based on sample size = 8500					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	2	43	3813	304	12.54
2	4	98	6226	211	29.51
3	2	65	5577	304	18.34
4	2	66	6350	304	20.89

Tableau A.18 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 6

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

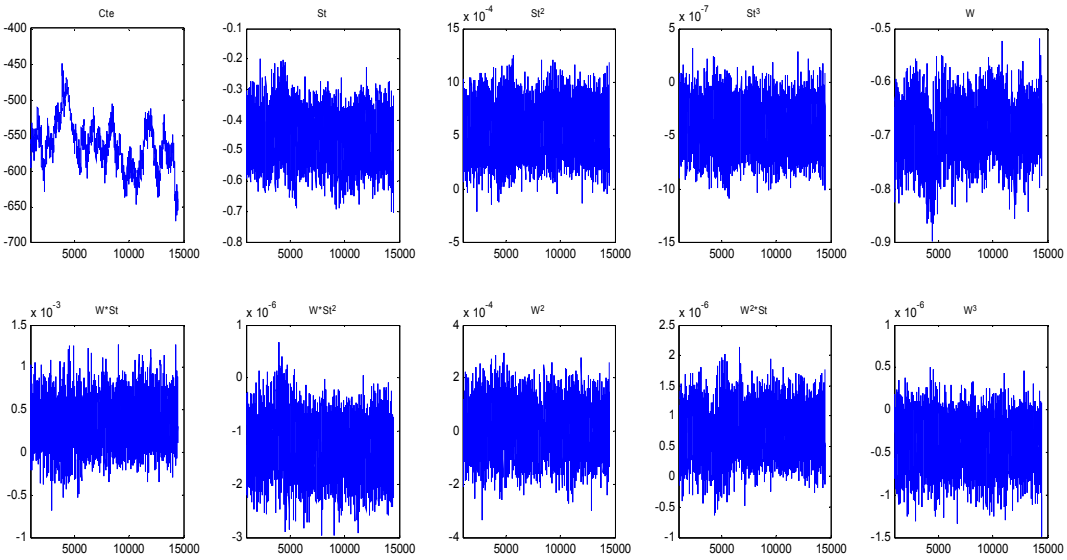


Figure A.18 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 4

Modèle 7 : 4éme dégrée – 2 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.19 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 7500 tours. Malgré que les coefficients auto corrélation ne soient pas très élevés, notamment pour Lag 50, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 66311 tours et d'amincir l'échantillon par 11 car l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 267 tirages (Tableau A.19). A l'aide des **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** et 1.20 [2] et prenant en compte le test Chi de Geweke (Tableau A.19), nous avons choisit de laisser les premiers 2500 tirages. Après une réduction de la précision souhaitée (q=0.02, r=0.01), ce même diagnostic indique une convergence très bonne (Tableau A.20).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k, montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l'échantillon raccourci (des premiers 2,5 mille tirages).

[2] Les Figures 10 et 11 n'exposent pas les premiers mille tours car les valeurs de démarrage sont trop éloignes de la valeur posteriori.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 7500

Modèle 7 : 4éme dégrée – 2 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.930	0.554	0.155	-0.012
St	0.920	0.511	0.109	-0.008
St^2	0.918	0.519	0.127	-0.007
St^3	0.917	0.544	0.168	-0.005
St^4	0.897	0.619	0.322	-0.021
W	0.925	0.543	0.138	-0.013
W*St	0.927	0.551	0.150	-0.015
W*St^2	0.930	0.568	0.175	-0.016
W*St^3	0.934	0.569	0.175	-0.018
W^2	0.924	0.572	0.178	-0.021
W^2*St	0.928	0.590	0.210	-0.028
W^2*St^2	0.926	0.606	0.256	-0.036
W^3	0.917	0.584	0.208	-0.029
W^3*St	0.922	0.606	0.254	-0.042
W^4	0.899	0.574	0.220	-0.033

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Toutes les variables	11	267	66311	937	70.769

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	10941.064995	627897.795316	7250.339223	1
St	-398.718099	14874.613044	171.757237	1.000000
St^2	1.518437	57.378068	0.662545	1.000000
St^3	-0.002831	0.098446	0.001137	1.000000
St^4	0.000002	0.000059	0.000001	1.000000
W	345.048605	11484.201157	132.608133	1.000000
W*St	-2.309093	84.004947	0.970006	1.000000
W*St^2	0.005518	0.201181	0.002323	1.000000
W*St^3	-0.000004	0.000158	0.000002	1.000000
W^2	1.398517	42.018783	0.485191	1.000000
W^2*St	-0.006152	0.201065	0.002322	1.000000
W^2*St^2	0.000007	0.000231	0.000003	1.000000
W^3	0.003025	0.080253	0.000927	1.000000
W^3*St	-0.000006	0.000196	0.000002	1.000000
W^4	0.000003	0.000059	0.000001	1.000000

Variable	NSE4%	RNE4%	NSE8%	RNE8%	NSE15%	RNE15%
Cte	15667.054372	0.214162	15173.394569	0.228324	14687.183510	0.243691
St	348.286828	0.243196	357.501268	0.230821	361.661620	0.225541
St^2	1.373792	0.232589	1.409521	0.220947	1.423513	0.216625
St^3	0.002615	0.189019	0.002683	0.179561	0.002707	0.176337
St^4	0.000002	0.101870	0.000002	0.097320	0.000002	0.095880
W	290.406389	0.208511	300.034444	0.195343	303.812740	0.190515
W*St	2.094984	0.214381	2.157418	0.202153	2.174200	0.199044
W*St^2	0.005294	0.192555	0.005440	0.182340	0.005465	0.180714
W*St^3	0.000004	0.206393	0.000004	0.196239	0.000004	0.195899
W^2	1.169199	0.172206	1.217396	0.158841	1.231672	0.155180

TYPE 2

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.960	0.600	0.222	-0.084
St	0.957	0.586	0.224	-0.021
St^2	0.953	0.572	0.221	0.002
St^3	0.954	0.597	0.278	0.051
St^4	0.842	0.502	0.287	0.178
W	0.955	0.570	0.207	0.011
W*St	0.952	0.561	0.218	0.050
W*St^2	0.954	0.587	0.278	0.111
W*St^3	0.959	0.590	0.291	0.134
W^2	0.954	0.586	0.282	0.157
W^2*St	0.957	0.631	0.387	0.258
W^2*St^2	0.955	0.679	0.505	0.372
W^3	0.962	0.700	0.513	0.403
W^3*St	0.969	0.774	0.659	0.515
W^4	0.969	0.819	0.731	0.589

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Idem Type 1					

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	3096.386979	362388.750532	4184.504853	1
St	375.464868	8032.487283	92.751174	1.000000
St^2	-1.319036	27.075246	0.312638	1.000000
St^3	0.002413	0.042289	0.000488	1.000000
St^4	-0.000001	0.000018	0.000000	1.000000
W	-235.941915	5825.662533	67.268957	1.000000
W*St	1.205370	37.295808	0.430655	1.000000
W*St^2	-0.002220	0.082412	0.000952	1.000000
W*St^3	0.000001	0.000061	0.000001	1.000000
W^2	-0.365159	19.097842	0.220523	1.000000
W^2*St	-0.000707	0.081811	0.000945	1.000000
W^2*St^2	0.000005	0.000082	0.000001	1.000000
W^3	0.000309	0.041298	0.000477	1.000000
W^3*St	-0.000006	0.000092	0.000001	1.000000
W^4	0.000001	0.000044	0.000001	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	8200.249206	0.260396	7124.866727	0.344933	5581.379872	0.562089
St	370.343274	0.062723	377.817258	0.060266	375.296680	0.061079
St^2	1.381874	0.051185	1.406553	0.049405	1.389692	0.050611
St^3	0.002596	0.035380	0.002640	0.034223	0.002605	0.035137
St^4	0.000001	0.023737	0.000001	0.023007	0.000001	0.023959
W	311.679551	0.046581	310.729567	0.046867	297.308774	0.051193
W*St	2.228078	0.037359	2.180963	0.038991	2.036207	0.044732
W*St^2	0.005687	0.028003	0.005488	0.030072	0.005033	0.035746
W*St^3	0.000004	0.026668	0.000004	0.030011	0.000004	0.038161
W^2	1.458144	0.022872	1.394889	0.024994		

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W^2*St 0.005842 0.157965 0.006055 0.147010 0.006089 0.145367 W^2*St^2 0.000007 0.131321 0.000008 0.122775 0.000008 0.122365 W^3 0.002458 0.142090 0.002584 0.128561 0.002619 0.125174 W^3*St 0.000006 0.125997 0.000007 0.114947 0.000007 0.113120 W^4 0.000002 0.119939 0.000002 0.106212 0.000002 0.102640	1.249338 0.031156 W^2*St 0.007126 0.017576 0.006662 0.020109 0.005750 0.026992 W^2*St^2 0.000008 0.014439 0.000007 0.017394 0.000006 0.025810 W^3 0.004202 0.012882 0.003939 0.014655 0.003404 0.019625 W^3*St 0.000010 0.011043 0.000009 0.013104 0.000008 0.019006 W^4 0.000005 0.009942 0.000005 0.011432 0.000004 0.015637
Geweke Chi-squared test for each parameter chain First 20% versus Last 50% of the sample Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -2750.716936 15.662603 0.057247 4% taper -2750.688642 73.276049 0.467427 8% taper -2750.667342 83.602886 0.432718 15% taper -2750.659092 83.194033 0.401556	Variable Cte NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 3671.007665 14.463096 0.854451 4% taper 3671.007132 52.744293 0.954434 8% taper 3671.006346 52.127514 0.946797 15% taper 3671.006327 46.982038 0.940804
Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -21.662213 0.408133 0.029138 4% taper -21.663998 2.195314 0.354497 8% taper -21.665692 2.665947 0.310802 15% taper -21.666925 2.912484 0.287168	Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 3.142583 0.387938 0.000053 4% taper 3.142559 1.330574 0.242906 8% taper 3.142583 1.370917 0.252593 15% taper 3.142410 1.377052 0.288439
Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.043448 0.001570 0.026770 4% taper 0.043453 0.007616 0.358077 8% taper 0.043458 0.009094 0.313354 15% taper 0.043461 0.009770 0.290906	Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.040084 0.001604 0.000011 4% taper 0.040085 0.005102 0.211436 8% taper 0.040086 0.005171 0.241795 15% taper 0.040087 0.005113 0.291732
Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000037 0.000003 0.014340 4% taper -0.000037 0.000012 0.344015 8% taper -0.000037 0.000014 0.305010 15% taper -0.000037 0.000015 0.288506	Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000126 0.000003 0.000000 4% taper -0.000126 0.000009 0.174234 8% taper -0.000126 0.000009 0.230190 15% taper -0.000126 0.000009 0.289317
Variable St^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000918 4% taper 0.000000 0.000000 0.315717 8% taper 0.000000 0.000000 0.291744 15% taper 0.000000 0.000000 0.285094	Variable St^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000000 4% taper 0.000000 0.000000 0.123623 8% taper 0.000000 0.000000 0.220571 15% taper 0.000000 0.000000 0.295674
Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 25.815288 0.563279 0.017538 4% taper 25.819674 3.110808 0.343431 8% taper 25.823895 3.769956 0.299105 15% taper 25.826680 4.078296 0.276410	Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 31.433928 0.583587 0.000053 4% taper 31.431404 2.581230 0.245453 8% taper 31.432456 2.602183 0.290579 15% taper 31.433949 2.544741 0.354947
Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.053276 0.004186 0.021746 4% taper -0.053300 0.020724 0.362801 8% taper -0.053324 0.024750 0.313601 15% taper -0.053338 0.026307 0.289239	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.486145 0.004692 0.000056 4% taper -0.486130 0.020037 0.271914 8% taper -0.486145 0.019995 0.343205 15% taper -0.486158 0.019160 0.412363
Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000100 0.000010 0.016982 4% taper -0.000100 0.000048 0.361911 8% taper -0.000100 0.000057 0.315024 15% taper -0.000100 0.000060 0.294292	Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.001694 0.000013 0.000021 4% taper 0.001694 0.000051 0.299964 8% taper 0.001694 0.000051 0.391589 15% taper 0.001694 0.000049 0.458211
Variable W*St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.023160	Variable W*St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. -0.000002 0.000000 0.000343

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4% taper	0.000000	0.000000	0.376478	4% taper	-0.000002	0.000000	0.398609
8% taper	0.000000	0.000000	0.325134	8% taper	-0.000002	0.000000	0.490596
15% taper	0.000000	0.000000	0.303768	15% taper	-0.000002	0.000000	0.547650
Variable	W^2			Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.098645	0.003295	0.008895	i.i.d.	0.496077	0.004280	0.000040
4% taper	0.098682	0.017985	0.330162	4% taper	0.496037	0.023161	0.338726
8% taper	0.098717	0.021572	0.286585	8% taper	0.496074	0.023561	0.446064
15% taper	0.098735	0.022870	0.267725	15% taper	0.496098	0.022569	0.516703
Variable	W^2*St			Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000177	0.000016	0.007879	i.i.d.	-0.003767	0.000023	0.000432
4% taper	0.000177	0.000081	0.341654	4% taper	-0.003767	0.000123	0.476209
8% taper	0.000177	0.000097	0.298419	8% taper	-0.003767	0.000125	0.578842
15% taper	0.000177	0.000101	0.281082	15% taper	-0.003767	0.000118	0.631989
Variable	W^2*St^2			Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000001	0.000000	0.004217	i.i.d.	0.000006	0.000000	0.081707
4% taper	-0.000001	0.000000	0.335507	4% taper	0.000006	0.000000	0.754847
8% taper	-0.000001	0.000000	0.298505	8% taper	0.000006	0.000000	0.809698
15% taper	-0.000001	0.000000	0.286488	15% taper	0.000006	0.000000	0.832500
Variable	W^3			Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000231	0.000009	0.003594	i.i.d.	0.002083	0.000015	0.000043
4% taper	0.000231	0.000049	0.303951	4% taper	0.002083	0.000094	0.473541
8% taper	0.000232	0.000059	0.265451	8% taper	0.002083	0.000098	0.583152
15% taper	0.000232	0.000062	0.253169	15% taper	0.002083	0.000094	0.634929
Variable	W^3*St			Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000001	0.000000	0.002623	i.i.d.	-0.000008	0.000000	0.017018
4% taper	0.000001	0.000000	0.314539	4% taper	-0.000008	0.000000	0.706540
8% taper	0.000001	0.000000	0.277452	8% taper	-0.000008	0.000000	0.773292
15% taper	0.000001	0.000000	0.266212	15% taper	-0.000008	0.000000	0.800199
Variable	W^4			Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.001221	i.i.d.	0.000003	0.000000	0.000055
4% taper	0.000000	0.000000	0.270406	4% taper	0.000003	0.000000	0.545632
8% taper	0.000000	0.000000	0.239144	8% taper	0.000003	0.000000	0.643934
15% taper	0.000000	0.000000	0.234424	15% taper	0.000003	0.000000	0.684810

Tableau A.19 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 7

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.015, r=0.01, s=0.95). Based on sample size = 5500					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	3	11	2928	753	3.9
2	2	11	2473	753	3.28

Tableau A.20 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 7

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

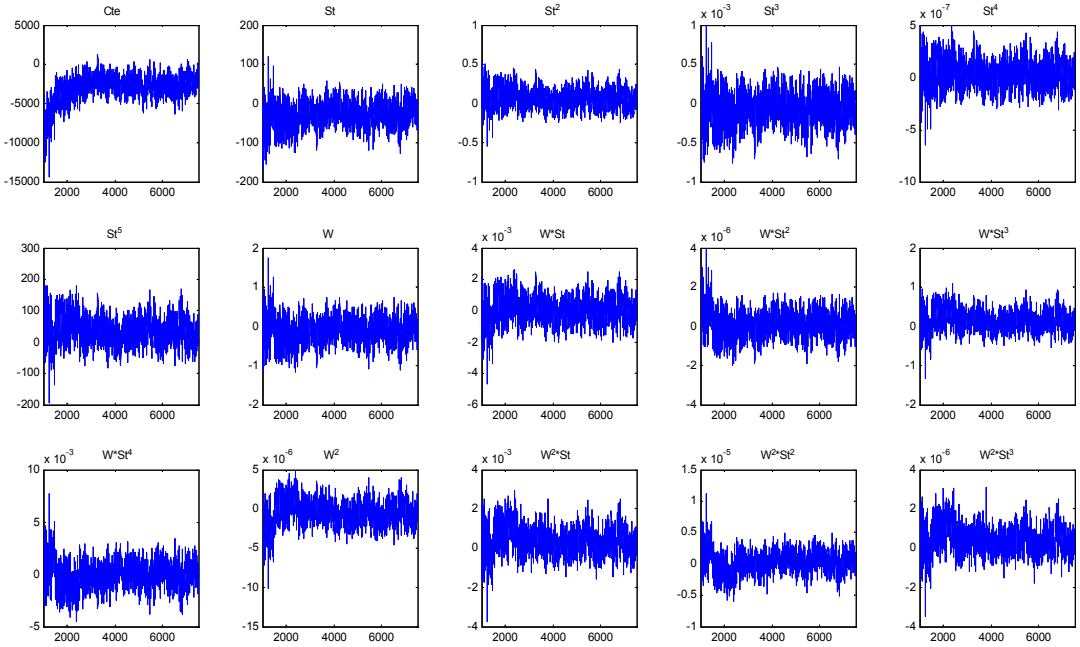


Figure A.1 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 7 ; type 1

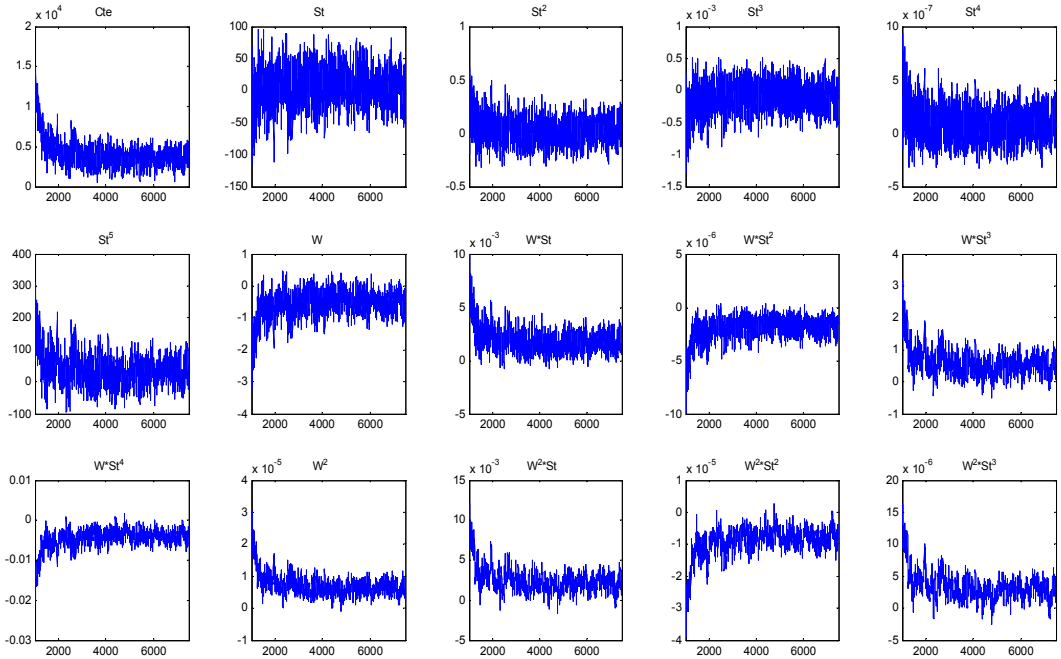


Figure A.2 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 7 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modèle 8 : 4éme dégrée – 3 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.1 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 7500 tours. Malgré que les coefficients auto corrélation ne soient pas très élevés, notamment pour Lag 50, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 22698 tours et d'amincir l'échantillon par 6 car l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bas pour la plupart de paramètres. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 96 tirages (Tableau A.1). A l'aide des Figure A.3, A.22 et A.23 et prenant en compte le test Chi de Geweke (Tableau A.1), nous avons choisit de laisser les premiers 1000 tirages. Le diagnostic RL, pour l'échantillon raccourci, indique une convergence très bonne (Tableau A.2).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k , montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l'échantillon raccourci (des premiers mille tirages).

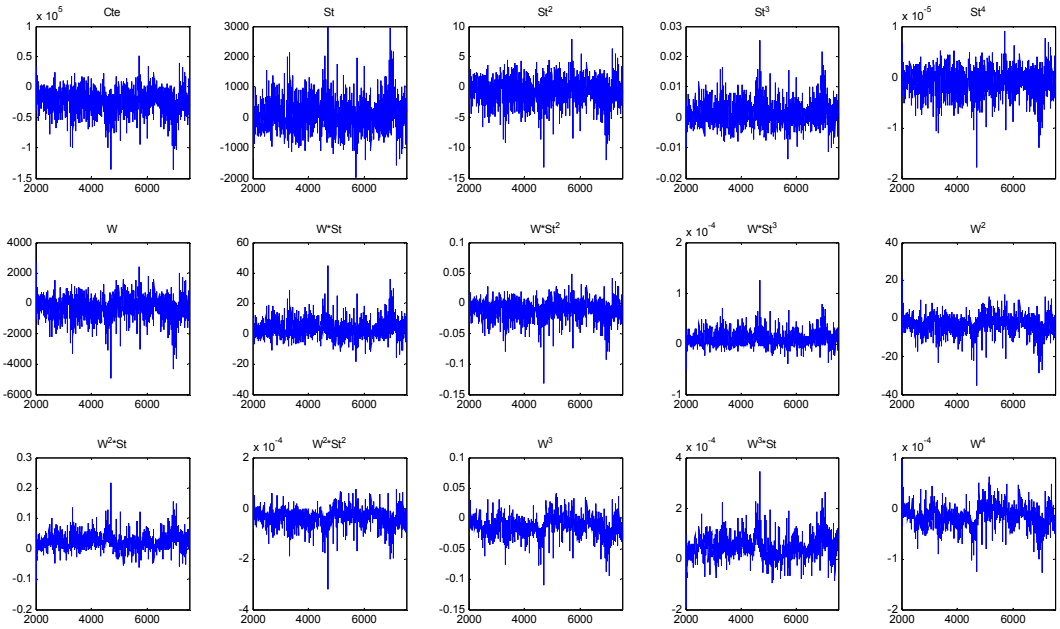


Figure A.3 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 8 ; type 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

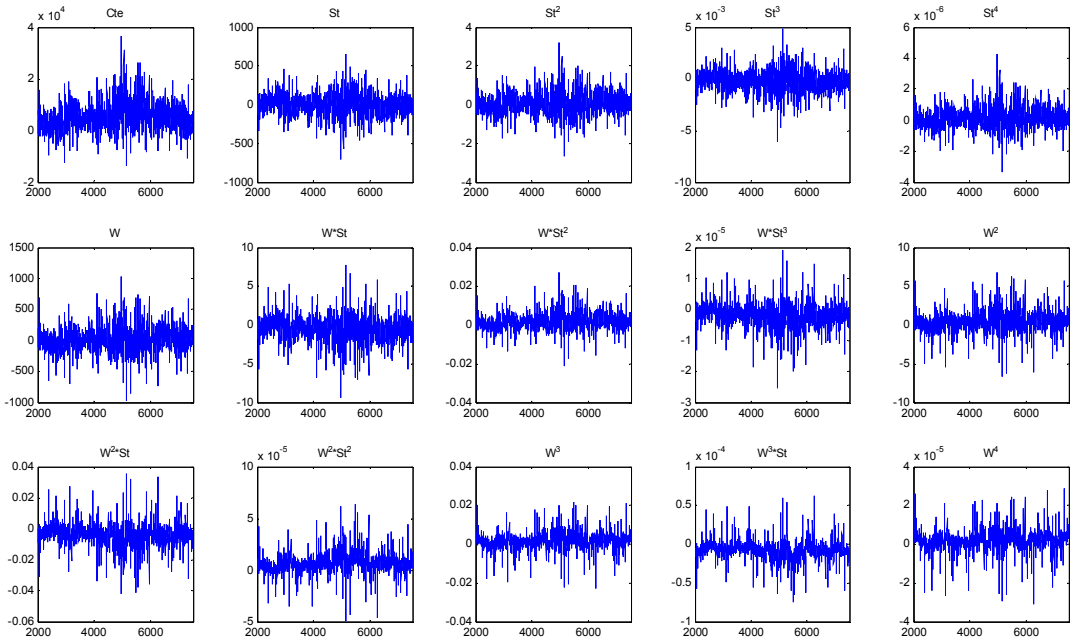


Figure A.4 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 8 ; type 2

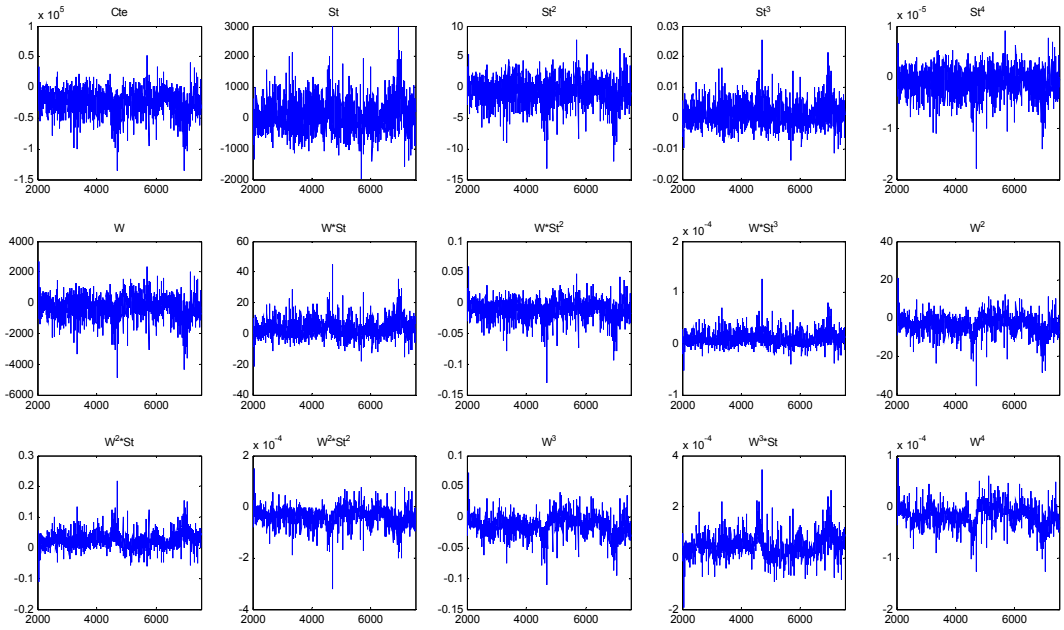


Figure A.5: Suite des coefficients du polynôme du Modèle 8 ; type 3

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 7500

Modèle 8 : 4éme dégrée – 3 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.904	0.648	0.183	-0.059
St	0.886	0.621	0.137	-0.057
St^2	0.881	0.626	0.157	-0.055
St^3	0.883	0.646	0.204	-0.051
St^4	0.881	0.672	0.291	-0.024
W	0.892	0.596	0.136	-0.049
W*St	0.889	0.592	0.154	-0.048
W*St^2	0.890	0.598	0.190	-0.048
W*St^3	0.887	0.588	0.202	-0.047
W^2	0.879	0.536	0.137	-0.034
W^2*St	0.876	0.534	0.175	-0.034
W^2*St^2	0.866	0.520	0.205	-0.033
W^3	0.852	0.457	0.121	-0.014
W^3*St	0.847	0.459	0.169	-0.016
W^4	0.815	0.361	0.078	0.011

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Ttes Var.	6	96	22698	937	24.224

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	25125.967983	1226298.134334	14160.071159	1.000000
St	-1188.752233	29127.234877	336.332338	1.000000
St^2	4.717325	116.080571	1.340383	1.000000
St^3	-0.009153	0.211173	0.002438	1.000000
St^4	0.000007	0.000143	0.000002	1.000000
W	702.403164	23583.155598	272.314825	1.000000
W*St	-3.945495	175.661740	2.028367	1.000000
W*St^2	0.007985	0.436261	0.005038	1.000000
W*St^3	-0.000004	0.000344	0.000004	1.000000
W^2	0.500259	99.152220	1.144911	1.000000
W^2*St	0.004978	0.496402	0.005732	1.000000
W^2*St^2	-0.000014	0.000607	0.000007	1.000000
W^3	-0.005339	0.235139	0.002715	1.000000
W^3*St	0.000028	0.000610	0.000007	1.000000
W^4	-0.000011	0.000237	0.000003	1.0

TYPE 2

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.824	0.513	0.126	0.106
St	0.764	0.452	0.072	0.104
St^2	0.733	0.442	0.086	0.110
St^3	0.712	0.443	0.113	0.121
St^4	0.675	0.455	0.222	0.169
W	0.788	0.440	0.021	0.082
W*St	0.772	0.430	0.010	0.069
W*St^2	0.765	0.424	0.003	0.052
W*St^3	0.766	0.406	-0.037	0.015
W^2	0.752	0.380	-0.055	0.038
W^2*St	0.740	0.366	-0.067	0.000
W^2*St^2	0.728	0.345	-0.055	-0.043
W^3	0.679	0.285	-0.138	-0.005
W^3*St	0.685	0.286	-0.106	-0.048
W^4	0.563	0.148	-0.212	-0.020

Idem type 1

Idem type 1

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	39585.956609	609031.057913	7032.484905	1.00000
St	-755.586378	13722.500253	158.453784	1.000000
St^2	3.030784	52.259822	0.603444	1.000000
St^3	-0.005426	0.089526	0.001034	1.000000
St^4	0.000004	0.000056	0.000001	1.000000
W	536.449656	10419.949933	120.319218	1.000000
W*St	-3.953289	73.990186	0.854365	1.000000
W*St^2	0.009144	0.174281	0.002012	1.000000
W*St^3	-0.000006	0.000135	0.000002	1.000000
W^2	1.775236	37.294947	0.430645	1.000000
W^2*St	-0.008303	0.178387	0.002060	1.000000
W^2*St^2	0.000008	0.000218	0.000003	1.000000
W^3	0.003000	0.073093	0.000844	1.000000
W^3*St	-0.000007	0.000193	0.000002	1.000000
W^4	0.000002	0.000059	0.000001	1.0

TYPE 3

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.953	0.561	0.226	-0.075
St	0.946	0.537	0.210	-0.018
St^2	0.938	0.509	0.189	0.002
St^3	0.934	0.516	0.224	0.041
St^4	0.795	0.385	0.235	0.127
W	0.946	0.535	0.203	0.003
W*St	0.942	0.525	0.200	0.033
W*St^2	0.943	0.549	0.248	0.079
W*St^3	0.949	0.561	0.252	0.094
W^2	0.944	0.547	0.234	0.103
W^2*St	0.949	0.598	0.319	0.179
W^2*St^2	0.949	0.644	0.394	0.263
W^3	0.952	0.640	0.396	0.294
W^3*St	0.966	0.741	0.549	0.391
W^4	0.956	0.753	0.594	0.476

Idem type 1

Idem type 1

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	3020.029842	349938.518307	4040.741955	1.0
St	351.552059	7882.389877	91.017998	1.0000
St^2	-1.255400	27.180582	0.313854	1.0000
St^3	0.002344	0.043342	0.000500	1.000000
St^4	-0.000001	0.000018	0.000000	1.000000
W	-192.311271	5639.150744	65.115304	1.0000
W*St	0.943509	36.601785	0.422641	1.000000
W*St^2	-0.001720	0.081430	0.000940	1.0000
W*St^3	0.000000	0.000061	0.000001	1.0000
W^2	0.106546	17.916645	0.206884	1.00000
W^2*St	-0.002970	0.076687	0.000886	1.00000
W^2*St^2	0.000007	0.000075	0.000001	1.0000
W^3	0.002632	0.035852	0.000414	1.000000
W^3*St	-0.000012	0.000080	0.000001	1.0000
W^4	0.000005	0.000035	0.000000	1.0

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	54071.447138	0.068580	52523.002913	0.072683	50882.83344	0.077
St	1279.6551	0.069080	1265.402972	0.070645	1253.983197	0.071937
St^2	5.375005	0.062187	5.314465	0.063612	5.258882	0.064964
St^3	0.010567	0.053253	0.010452	0.054432	0.010341	0.055605
St^4	0.000008	0.040731	0.000008	0.041550	0.000008	0.042382
W	990.3118	0.075613	972.494076	0.078409	955.065953	0.081297
W*St	7.512858	0.072892	7.345375	0.076254	7.162456	0.080199
W*St^2	0.019370	0.067632	0.018882	0.071173	0.018328	0.075544
W*St^3	0.000015	0.069798	0.000015	0.074045	0.000014	0.079525
W^2	4.024636	0.080926	3.895410	0.086385	3.733818	0.094024
W^2*St	0.020615	0.077312	0.019781	0.083970	0.018673	0.094224
W^2*St^2	0.000026	0.074158	0.000025	0.081588	0.000023	0.09394
W^3	0.009103	0.088964	0.008680	0.097848	0.008064	0.113366
W^3*St	0.000024	0.084739	0.000023	0.095399	0.000021	0.116192
W^4	0.000009	0.101744	0.000008	0.114497	0.000007	0.141092

Var.	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	32759.0424	0.046085	33597.99	0.043812	33854.1	0.04315
St	713.0083	0.049387	732.8	0.046755	740.325800	0.04581
St^2	2.793	0.046662	2.870427	0.044196	2.898687	0.043
St^3	0.00494	0.04374	0.005078	0.041445	0.005127	0.04
St^4	0.000003	0.034	0.000004	0.032954	0.000004	0.032
W	491.234	0.059992	503.272	0.057156	507.447526	0.056
W*St	3.3456	0.065213	3.417495	0.062499	3.437081	0.06
W*St^2	0.007250	0.077055	0.007370	0.0745	0.00738	0.07
W*St^3	0.000004	0.125964	0.000004	0.124	0.000004	0.12
W^2	1.3744	0.098173	1.3904	0.095923	1.389424	0.096
W^2*St	0.005	0.167889	0.0049	0.171142	0.004898	0.176
W^2*St^2	0.000003	0.537240	0.0000	0.653872	0.000	0.759
W^3	0.0016	0.2669	0.001589	0.282137	0.001543	0.299
W^3*St	0.000002	1.1736	0.000002	1.6692	0.000002	2.075
W^4	0.000001	1.321523	0.000001	1.77581	0.000	2.265

Var.	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	6416.29	0.396601	5327.37	0.575302	4171.2	0.938
St	328.96	0.076551	334.658	0.073969	333.59	0.074
St^2	1.236	0.0644	1.255	0.0625	1.2466	0.063381
St^3	0.0023	0.044	0.0023	0.043640	0.0023	0.044
St^4	0.000	0.032	0.000001	0.031112	0.000	0.031
W	258.22	0.063585	255.71	0.064841	245.34	0.0704
W*St	1.852	0.052	1.796	0.055375	1.682871	0.063
W*St^2	0.0047	0.0386	0.0045	0.0426	0.004	0.05
W*St^3	0.0000	0.037748	0.000	0.044	0.000	0.056
W^2	1.117	0.0342	1.051	0.038	0.9294	0.049541
W^2*St	0.0055	0.025	0.005	0.030456	0.004	0.04
W^2*St^2	0.0000	0.02	0.000005	0.0262	0.000	0.04
W^3	0.003	0.017	0.0028	0.021108	0.0023	0.029
W^3*St	0.000	0.014	0.000007	0.017	0.000	0.02692
W^4	0.000004	0.012	0.000003	0.0146	0.000	0.02

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample

Variable Cte

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-24969.177369	272.501070	0.000539
4% taper	-24963.358319	1690.339050	0.368523
8% taper	-24958.542554	2066.043014	0.366117
15% taper	-24955.668461	2216.630870	0.355864

Variable Cte

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	6111.434449	73.391623	0.000001
4% taper	6112.696099	402.169778	0.144026
8% taper	6112.829232	495.160411	0.220527
15% taper	6113.000733	562.794073	0.262687

Variable Cte

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	4162.960610	19.310065	0.796231
4% taper	4162.956614	83.181077	0.935219
8% taper	4162.952177	86.610380	0.923671
15% taper	4162.947544	84.152181	0.908749

Variable St

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	89.217084	6.898748	0.000152
4% taper	89.108040	36.606879	0.311186
8% taper	89.002258	44.609815	0.310662
15% taper	88.905815	50.130110	0.303809

Variable St

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	3.887124	1.890489	0.000001
4% taper	3.862342	8.845164	0.131594
8% taper	3.868013	9.973054	0.210007
15% taper	3.872523	10.297157	0.252014

Variable St

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	15.830152	0.501479	0.000222
4% taper	15.830295	1.744669	0.272316
8% taper	15.830196	1.704567	0.272324
15% taper	15.829698	1.547757	0.291226

Variable St^2

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.626381	0.027989	0.000073
4% taper	-0.626061	0.140268	0.304055
8% taper	-0.625720	0.169812	0.309166
15% taper	-0.625439	0.188209	0.305197

Variable St^2

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.075098	0.007580	0.000001
4% taper	0.075161	0.031994	0.130028
8% taper	0.075127	0.034261	0.210492
15% taper	0.075090	0.031549	0.253155

Variable St^2

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.009041	0.002065	0.000070
4% taper	-0.009040	0.006608	0.237106
8% taper	-0.009039	0.006471	0.257372
15% taper	-0.009037	0.005872	0.290132

Variable St^3

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.001326	0.000050	0.000019
4% taper	0.001325	0.000234	0.292945
8% taper	0.001325	0.000281	0.305148
15% taper	0.001325	0.000306	0.304383

Variable St^3

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000217	0.000014	0.000000
4% taper	-0.000217	0.000054	0.126535
8% taper	-0.000217	0.000056	0.209169
15% taper	-0.000217	0.000047	0.253205

Variable St^3

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000031	0.000004	0.000002
4% taper	-0.000031	0.000011	0.194525
8% taper	-0.000031	0.000011	0.240693
15% taper	-0.000031	0.000010	0.284699

Variable St^4

Variable St^4

Variable St^4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000001	0.000000	0.000001
4% taper	-0.000001	0.000000	0.272700
8% taper	-0.000001	0.000000	0.296979
15% taper	-0.000001	0.000000	0.301106
Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-277.556020	9.916800	0.000369
4% taper	-277.010081	64.446876	0.333518
8% taper	-276.518082	80.763808	0.327249
15% taper	-276.014308	92.759031	0.314836
Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	3.356818	0.078916	0.000412
4% taper	3.352969	0.491055	0.344943
8% taper	3.349388	0.613654	0.339978
15% taper	3.346015	0.696091	0.328196
Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.010580	0.000207	0.000322
4% taper	-0.010572	0.001220	0.350473
8% taper	-0.010564	0.001515	0.348240
15% taper	-0.010557	0.001693	0.337733
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000010	0.000000	0.000548
4% taper	0.000010	0.000001	0.365947
8% taper	0.000010	0.000001	0.362410
15% taper	0.000010	0.000001	0.351429
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-3.335684	0.068850	0.001095
4% taper	-3.326486	0.525167	0.369902
8% taper	-3.318454	0.668190	0.361937
15% taper	-3.309508	0.774885	0.344165
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.023950	0.000363	0.001533
4% taper	0.023906	0.002722	0.395763
8% taper	0.023867	0.003465	0.388976
15% taper	0.023825	0.003985	0.371687

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.121316
8% taper	0.000000	0.000000	0.205960
15% taper	0.000000	0.000000	0.252664
Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	25.499729	2.562552	0.000015
4% taper	25.562848	11.645800	0.145881
8% taper	25.540790	12.333097	0.219182
15% taper	25.514433	11.257783	0.259242
Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.584114	0.020281	0.000045
4% taper	-0.584562	0.086147	0.160470
8% taper	-0.584346	0.086977	0.230397
15% taper	-0.584012	0.064394	0.268675
Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.002129	0.000054	0.000242
4% taper	0.002130	0.000232	0.186284
8% taper	0.002130	0.000239	0.247053
15% taper	0.002129	0.000183	0.281620
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000002	0.000000	0.006211
4% taper	-0.000002	0.000000	0.266045
8% taper	-0.000002	0.000000	0.294720
15% taper	-0.000002	0.000000	0.314204
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.490473	0.016061	0.001424
4% taper	0.491322	0.072798	0.206998
8% taper	0.491074	0.073184	0.261957
15% taper	0.490618	0.057278	0.293791
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.004476	0.000086	0.029224
4% taper	-0.004482	0.000442	0.350140
8% taper	-0.004483	0.000478	0.357499
15% taper	-0.004481	0.000429	0.364726

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.130801
8% taper	0.000000	0.000000	0.217094
15% taper	0.000000	0.000000	0.280577
Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	37.438906	0.787323	0.000484
4% taper	37.432054	3.745811	0.296283
8% taper	37.432805	3.830887	0.320963
15% taper	37.435251	3.745621	0.361426
Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.551202	0.006287	0.000496
4% taper	-0.551157	0.028339	0.315249
8% taper	-0.551171	0.029339	0.364470
15% taper	-0.551190	0.029041	0.411899
Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.001849	0.000017	0.000190
4% taper	0.001849	0.000070	0.333394
8% taper	0.001849	0.000074	0.403208
15% taper	0.001849	0.000074	0.451139
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000002	0.000000	0.001571
4% taper	-0.000002	0.000000	0.425780
8% taper	-0.000002	0.000000	0.495145
15% taper	-0.000002	0.000000	0.535034
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.781602	0.005628	0.002003
4% taper	0.781470	0.033434	0.420742
8% taper	0.781522	0.035143	0.501693
15% taper	0.781560	0.035489	0.555823
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.005446	0.000029	0.010248
4% taper	-0.005445	0.000168	0.564913
8% taper	-0.005445	0.000179	0.640144
15% taper	-0.005446	0.000184	0.678316

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable	W^2*St^2			Variable	W^2*St^2			Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000037	0.000000	0.002000	i.i.d.	0.000007	0.000000	0.477281	i.i.d.	0.000008	0.000000	0.426010
4% taper	-0.000037	0.000003	0.415123	4% taper	0.000007	0.000001	0.760911	4% taper	0.000008	0.000000	0.873200
8% taper	-0.000037	0.000004	0.410891	8% taper	0.000007	0.000001	0.715792	8% taper	0.000008	0.000000	0.898677
15% taper	-0.000037	0.000005	0.395261	15% taper	0.000007	0.000001	0.667012	15% taper	0.000008	0.000000	0.908957
Variable	W^3			Variable	W^3			Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.013551	0.000237	0.003619	i.i.d.	0.001974	0.000050	0.116189	i.i.d.	0.003788	0.000020	0.016713
4% taper	-0.013495	0.001987	0.410984	4% taper	0.001978	0.000247	0.429959	4% taper	0.003788	0.000135	0.636038
8% taper	-0.013448	0.002537	0.403441	8% taper	0.001979	0.000254	0.422991	8% taper	0.003788	0.000144	0.710566
15% taper	-0.013391	0.002955	0.380133	15% taper	0.001977	0.000215	0.420665	15% taper	0.003788	0.000146	0.744642
Variable	W^3*St			Variable	W^3*St			Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000049	0.000001	0.006293	i.i.d.	-0.000009	0.000000	0.883518	i.i.d.	-0.000013	0.000000	0.453464
4% taper	0.000049	0.000005	0.453126	4% taper	-0.000009	0.000001	0.945929	4% taper	-0.000013	0.000000	0.897451
8% taper	0.000049	0.000007	0.446525	8% taper	-0.000009	0.000001	0.932102	8% taper	-0.000013	0.000000	0.919274
15% taper	0.000049	0.000008	0.424291	15% taper	-0.000009	0.000001	0.912362	15% taper	-0.000013	0.000000	0.927798
Variable	W^4			Variable	W^4			Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000018	0.000000	0.011528	i.i.d.	0.000002	0.000000	0.977326	i.i.d.	0.000006	0.000000	0.149196
4% taper	-0.000018	0.000003	0.451670	4% taper	0.000002	0.000000	0.985450	4% taper	0.000006	0.000000	0.813334
8% taper	-0.000018	0.000004	0.445800	8% taper	0.000002	0.000000	0.982369	8% taper	0.000006	0.000000	0.854578
15% taper	-0.000018	0.000004	0.416681	15% taper	0.000002	0.000000	0.978835	15% taper	0.000006	0.000000	0.870787

Tableau A.1 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 8

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.02, r=0.01, s=0.95). Based on sample size = 6500

TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	1	7	1995	937	2.1
2	2	11	3293	937	3.5
3	2	12	4178	937	4.5

Tableau A.2 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 8

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modèle 9 : 4éme dégrée – 4 types

Quelques diagnostics exposés dans le Tableau A.3 indiquent que les coefficients π_k du polynôme ont convergé. Les coefficients auto corrélation ne soient pas très élevés, notamment pour Lag 50, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 4179 tours et d'amincir l'échantillon par 2, l'I-stat est inférieur à 5, mais les RNEs sont très bas pour la plupart de paramètres. A l'aide des Figure A.6, A.25, A.26 et A.27 et prenant en compte le test Chi de Geweke (Tableau A.1), nous avons choisit de laisser les premiers 1000 tirages.

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k , montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l'échantillon raccourci (des premiers mille tirages).

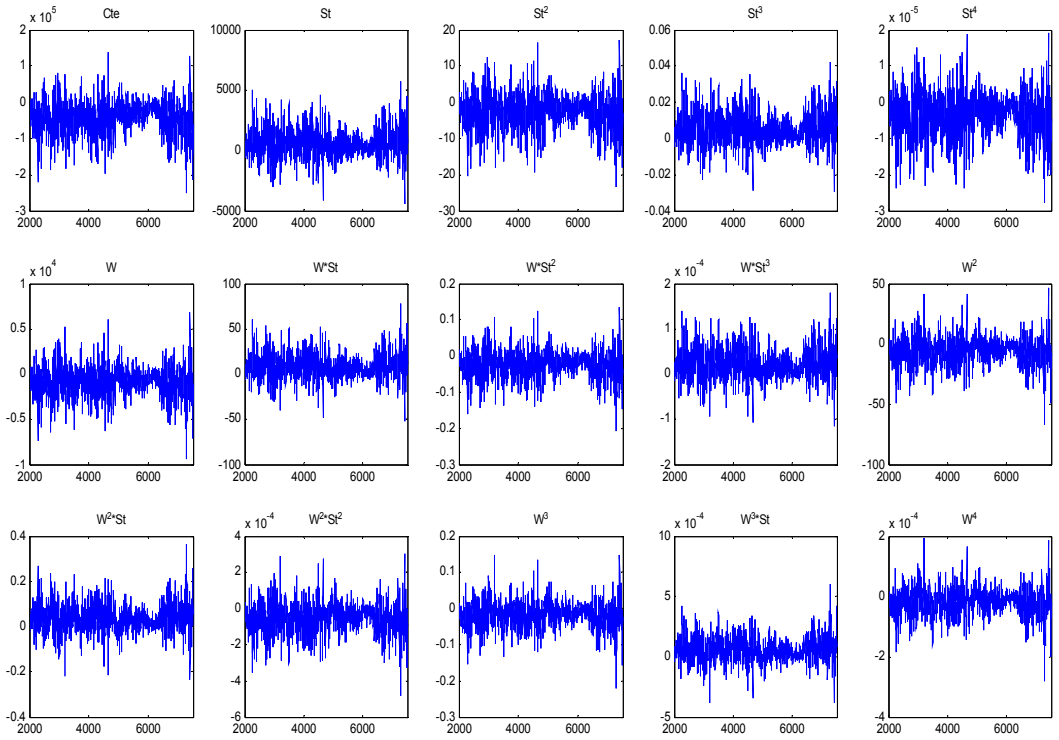


Figure A.6 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 7500

Modèle 9 : 4éme dégrée – 4 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.914	0.635	0.421	0.109
St	0.896	0.581	0.372	0.087
St^2	0.891	0.564	0.365	0.088
St^3	0.889	0.552	0.364	0.096
St^4	0.886	0.545	0.381	0.147
W	0.891	0.648	0.425	0.067
W*St	0.886	0.653	0.433	0.048
W*St^2	0.882	0.656	0.449	0.026
W*St^3	0.873	0.653	0.453	-0.022
W^2	0.859	0.664	0.471	0.026
W^2*St	0.855	0.661	0.496	-0.009
W^2*St^2	0.845	0.638	0.514	-0.052
W^3	0.819	0.643	0.486	-0.006
W^3*St	0.820	0.631	0.519	-0.043
W^4	0.772	0.613	0.465	-0.019

Raftery-Lewis Diagnostics fo each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Var.	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Toutes les paramètres	2	17	4179	937	4.46

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	45857.8	1057664.4	12212.8	1
St	-1303.2	24297.1	280.5	1
St^2	4.653547	94.723300	1.093770	1
St^3	-0.008110	0.169537	0.001958	1
St^4	0.000006	0.000116	0.000001	1
W	753.2	19880.007146	229.554550	1
W*St	-3.508713	143.489944	1.656879	1
W*St^2	0.004695	0.347384	0.004011	1
W*St^3	0.00000	0.000270	0.000003	1
W^2	0.903877	85.064546	0.982241	1
W^2*St	0.003927	0.417274	0.004818	1
W^2*St^2	-0.000014	0.0005	0.000006	1
W^3	-0.001944	0.208930	0.002413	1

TYPE 2

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.956	0.866	0.717	0.091
St	0.953	0.856	0.699	0.073
St^2	0.953	0.855	0.696	0.074
St^3	0.950	0.849	0.689	0.079
St^4	0.943	0.836	0.678	0.098
W	0.947	0.849	0.691	0.084
W*St	0.947	0.846	0.686	0.084
W*St^2	0.945	0.838	0.679	0.088
W*St^3	0.940	0.824	0.665	0.083
W^2	0.926	0.809	0.650	0.086
W^2*St	0.921	0.794	0.635	0.091
W^2*St^2	0.906	0.763	0.605	0.095
W^3	0.892	0.736	0.577	0.075
W^3*St	0.883	0.711	0.552	0.084
W^4	0.850	0.639	0.476	0.048

Idem Type 1

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	132418.1	1475570.2	17038.4	1
St	-2850.9	35241.3	406.9	1
St^2	11.48	141.18	1.63	1
St^3	-0.020915	0.255643	0.002952	1
St^4	0.000014	0.000172	0.000002	1
W	2382.82	27766.94	320.6251	1
W*St	-17.98	204.151203	2.357335	1
W*St^2	0.0443	0.4930	0.005694	1
W*St^3	-0.00003	0.0004	0.000004	1
W^2	10.21	110.492280	1.275855	1
W^2*St	-0.0515	0.5283	0.006100	1
W^2*St^2	0.00006	0.0006	0.00001	1
W^3	0.0239	0.246605	0.002848	1

TYPE 3

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.880	0.703	0.553	0.167
St	0.844	0.662	0.536	0.159
St^2	0.834	0.672	0.563	0.176
St^3	0.837	0.699	0.600	0.201
St^4	0.839	0.733	0.655	0.235
W	0.866	0.712	0.559	0.176
W*St	0.856	0.717	0.572	0.183
W*St^2	0.848	0.725	0.586	0.192
W*St^3	0.823	0.695	0.559	0.175
W^2	0.838	0.685	0.523	0.176
W^2*St	0.812	0.669	0.515	0.176
W^2*St^2	0.758	0.605	0.477	0.163
W^3	0.781	0.598	0.420	0.151
W^3*St	0.730	0.552	0.386	0.144
W^4	0.715	0.480	0.282	0.112

Idem Type 1

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	115944.9	1053635.3	12166.3	1
St	-2226.5	23631.9	272.8	1
St^2	9.01	91.06	1.051551	1
St^3	-0.016	0.160744	0.001856	1
St^4	0.000012	0.0001	0.000001	1
W	2331.7	20586.1	237.708494	1
W*St	-18.177056	148.39	1.713	1
W*St^2	0.046	0.357105	0.004123	1
W*St^3	-0.00003	0.0002	0.0000	1
W^2	12.343	88.581	1.022848	1
W^2*St	-0.064	0.422	0.004876	1
W^2*St^2	0.00008	0.0004	0.0000	1
W^3	0.033	0.208942	0.00241	1

TYPE 4

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.966	0.688	0.235	-0.037
St	0.961	0.656	0.172	0.035
St^2	0.951	0.628	0.124	0.044
St^3	0.936	0.619	0.155	0.077
St^4	0.888	0.516	0.429	-0.047
W	0.965	0.703	0.269	0.052
W*St	0.964	0.706	0.277	0.059
W*St^2	0.962	0.723	0.318	0.090
W*St^3	0.969	0.743	0.347	0.057
W^2	0.965	0.762	0.419	0.097
W^2*St	0.964	0.793	0.495	0.109
W^2*St^2	0.96	0.830	0.600	0.077
W^3	0.966	0.832	0.609	0.153
W^3*St	0.965	0.871	0.714	0.118
W^4	0.965	0.876	0.738	0.188

Idem Type 1

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	3984.7	200335.5	2313.2	1
St	173.8	4247.1	49.0	1
St^2	-0.391	13.459	0.155	1
St^3	0.0004	0.0187	0.0002	1
St^4	0.000000	0.000015	0.000	1
W	-121.362	3637.436	42.0	1
W*St	0.368261	23.871390	0.275	1
W*St^2	-0.00014	0.052	0.0006	1
W*St^3	-0.0000	0.00004	0.000	1
W^2	-0.0206	14.0044	0.1617	1
W^2*St	-0.002	0.0604	0.0006	1
W^2*St^2	0.000	0.000063	0.000	1
W^3	0.001	0.033454	0.000386	1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W^3*St	0.000018	0.000535	0.000006	1	W^3*St	-0.000064	0.0006	0.00001	1	W^3*St	-0.000092	0.0005	0.0000	1	W^3*St	-0.000007	0.00007	0.000	1
W^4	-0.000004	0.000218	0.000003	1	W^4	0.000023	0.0002	0.000003	1	W^4	0.00003	0.0002	0.000002	1	W^4	0.000002	0.000038	0.000	1
Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%	Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%	Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	80880.539819	0.022801	82335.790776	0.022002	83368.647874	0.021460	Cte	116857.539347	0.021259	119394.61	0.020365	120811.073547	0.019890	Cte	83816.6389	0.021070	86552.766756	0.019759	88107.792007	0.019067
St	1751.822889	0.025649	1774.983612	0.024984	1786.030984	0.024676	St	2668.803397	0.023249	2693.363376	0.022827	2697.734707	0.022753	St	1821.1410	0.022452	1871.131156	0.021268	1889.161953	0.020864
St^2	6.776267	0.026054	6.868174	0.025361	6.916100	0.025011	St^2	10.665605	0.023363	10.759128	0.022959	10.780613	0.022867	St^2	7.196683	0.021350	7.394626	0.020222	7.471656	0.019807
St^3	0.012180	0.025832	0.012350	0.025126	0.012440	0.024762	St^3	0.019367	0.023232	0.019534	0.022836	0.019577	0.022737	St^3	0.013196	0.019783	0.013553	0.018757	0.013695	0.018368
St^4	0.000008	0.024696	0.000009	0.024018	0.000009	0.023677	St^4	0.000013	0.022177	0.000013	0.021800	0.000014	0.021704	St^4	0.000009	0.017570	0.000010	0.016701	0.000010	0.016371
W	1454.475968	0.024909	1474.554366	0.024235	1487.752666	0.023807	W	2130.78988	0.022642	2150.026535	0.022239	2155.721508	0.022121	W	1688.182	0.019827	1743.318868	0.018592	1764.717439	0.018144
W*St	10.297782	0.025888	10.442849	0.025174	10.557538	0.024630	W*St	15.590682	0.022862	15.743475	0.022420	15.816781	0.022213	W*St	12.312133	0.019369	12.729249	0.018120	12.913449	0.017607
W*St^2	0.024579	0.026633	0.024911	0.025928	0.025214	0.025309	W*St^2	0.037573	0.022964	0.037971	0.022485	0.038206	0.022210	W*St^2	0.030003	0.018889	0.031040	0.017648	0.031534	0.017099
W*St^3	0.000018	0.030047	0.000018	0.029399	0.000018	0.028652	W*St^3	0.000028	0.023752	0.000028	0.023217	0.000028	0.022866	W*St^3	0.000022	0.019902	0.000023	0.018539	0.000024	0.017899
W^2	5.972087	0.027051	6.058819	0.026282	6.145156	0.025549	W^2	8.399535	0.023072	8.476271	0.022657	8.528133	0.022382	W^2	7.357497	0.019327	7.661388	0.017824	7.799370	0.017199
W^2*St	0.028218	0.029157	0.028619	0.028344	0.029119	0.027380	W^2*St	0.040094	0.023150	0.040599	0.022578	0.041042	0.022093	W^2*St	0.034895	0.019522	0.036444	0.017898	0.037256	0.017126
W^2*St^2	0.000032	0.032853	0.000033	0.032142	0.000033	0.030939	W^2*St^2	0.000045	0.023582	0.000046	0.022845	0.000047	0.022165	W^2*St^2	0.000039	0.021	0.000041	0.019172	0.000042	0.01818
W^3	0.013745	0.030806	0.013959	0.029871	0.014239	0.028706	W^3	0.018100	0.024750	0.018273	0.024285	0.018468	0.023774	W^3	0.016582	0.021169	0.017453	0.019110	0.017880	0.018207
W^3*St	0.000033	0.034165	0.000034	0.033124	0.000035	0.031538	W^3*St	0.000044	0.024622	0.000045	0.023798	0.000046	0.022897	W^3*St	0.000039	0.022473	0.000041	0.020036	0.000043	0.018803
W^4	0.000013	0.035384	0.000014	0.034232	0.000014	0.032562	W^4	0.000016	0.028274	0.000017	0.027815	0.000017	0.027034	W^4	0.000015	0.025199	0.000016	0.022226	0.000017	0.020949

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample

Variable	Cte			Variable	Cte			Variable	Cte			Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-39136.49	583.896258	0.000000	i.i.d.	6361.64399	117.576415	0.00000	i.i.d.	25124.327	332.6749	0.000000	i.i.d.	3150.840476	12.698416	0.7434
4% taper	-39121.95	3455.201123	0.155186	4% taper	6361.1985	507.8279	0.169179	4% taper	25121.413	1521.80811	0.1350	4% taper	3150.8479	62.024852	0.9166
8% taper	-39107.81	4470.769611	0.218494	8% taper	6361.0758	524.479951	0.2217	8% taper	25118.8216	1552.2186	0.19863	8% taper	3150.8555	66.425744	0.896

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

15% taper −39083.92 5497.82 0.246145	15% taper 6361.0588 551.01922 0.2509	15% taper 25114.724 1222.1476 0.2357	15% taper 3150.867 70.048142 0.8764
Variable St	Variable St	Variable St	Variable St
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. 493.96 14.484230 0.000000	i.i.d. −95.040598 3.168918 0.000000	i.i.d. −287.504773 8.794156 0.0000	i.i.d. −13.337130 0.331285 0.00013
4% taper 494.29 57.534240 0.172464	4% taper −95.0289 13.657686 0.19866	4% taper −287.3951 37.928731 0.1527	4% taper −13.33501 1.465451 0.1968
8% taper 494.35 62.995930 0.235229	8% taper −95.0253 13.95877 0.249431	8% taper −287.3221 38.314243 0.2172	8% taper −13.3347 1.479103 0.1862
15% taper 494.29 69.869342 0.262019	15% taper −95.024028 14.20495 0.2750	15% taper −287.2051 29.0931 0.2537	15% taper −13.3356 1.459183 0.2401
Variable St^2	Variable St^2	Variable St^2	Variable St^2
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. −2.313856 0.060240 0.000000	i.i.d. 0.455437 0.013210 0.000000	i.i.d. 1.341708 0.036488 0.000000	i.i.d. 0.093737 0.001357 0.001794
4% taper −2.315019 0.247551 0.169485	4% taper 0.455389 0.057827 0.1998	4% taper 1.341133 0.156442 0.1490	4% taper 0.093724 0.005945 0.238
8% taper −2.315223 0.275945 0.232758	8% taper 0.455373 0.059099 0.2503	8% taper 1.340796 0.157304 0.2150	8% taper 0.093722 0.006022 0.2139
15% taper −2.31487 0.308343 0.259693	15% taper 0.4553 0.060208 0.27522	15% taper 1.340276 0.117333 0.2519	15% taper 0.09372 0.006009 0.2677
Variable St^3	Variable St^3	Variable St^3	Variable St^3
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. 0.004440 0.000110 0.000000	i.i.d. −0.000882 0.000024 0.000000	i.i.d. −0.002511 0.000067 0.000000	i.i.d. −0.000210 0.000002 0.00143
4% taper 0.004442 0.000459 0.164948	4% taper −0.000882 0.000107 0.1992	4% taper −0.002510 0.000283 0.1449	4% taper −0.0002 0.000011 0.28557
8% taper 0.004442 0.000512 0.230287	8% taper −0.000882 0.000110 0.2506	8% taper −0.0025 0.000285 0.2136	8% taper −0.0002 0.000011 0.2982
15% taper 0.004441 0.000570 0.258124	15% taper −0.000882 0.000112 0.2753	15% taper −0.0025 0.000213 0.2513	15% taper −0.0002 0.000011 0.3267
Variable St^4	Variable St^4	Variable St^4	Variable St^4
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. −0.000003 0.000000 0.000000	i.i.d. 0.000001 0.000000 0.000000	i.i.d. 0.000002 0.000000 0.000000	i.i.d. 0.000000 0.000000 0.071766
4% taper −0.000003 0.000000 0.157072	4% taper 0.000001 0.000000 0.19533	4% taper 0.000002 0.000000 0.1407	4% taper 0.00000 0.00000 0.711267
8% taper −0.000003 0.000000 0.226938	8% taper 0.000001 0.000000 0.2495	8% taper 0.000002 0.000000 0.2128	8% taper 0.0000 0.000000 0.701530
15% taper −0.000003 0.00000 0.256861	15% taper 0.000001 0.000000 0.2750	15% taper 0.000002 0.000000 0.2515	15% taper 0.0000 0.000000 0.6249
Variable W	Variable W	Variable W	Variable W
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. −732.208236 20.444110 0.000000	i.i.d. 156.581658 4.751482 0.000000	i.i.d. 522.681848 12.681217 0.0000	i.i.d. 43.723532 0.536722 0.00008
4% taper −732.791567 89.9629 0.178182	4% taper 156.5433 19.876986 0.1926	4% taper 522.4131 57.914341 0.1419	4% taper 43.716004 2.669539 0.221
8% taper −732.84284 100.37677 0.233874	8% taper 156.53199 20.101442 0.2451	8% taper 522.2165 58.576644 0.2075	8% taper 43.7160 2.761082 0.2370
15% taper −732.583 112.661455 0.257592	15% taper 156.525793 19.8798 0.2717	15% taper 521.9199 45.302102 0.2461	15% taper 43.719452 2.763597 0.3112
Variable W*St	Variable W*St	Variable W*St	Variable W*St
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. 7.031016 0.169592 0.000000	i.i.d. −1.540057 0.039429 0.000000	i.i.d. −4.914399 0.104590 0.000000	i.i.d. −0.518855 0.004348 0.00119
4% taper 7.034730 0.776928 0.180052	4% taper −1.539711 0.166873 0.1918	4% taper −4.911578 0.474889 0.1375	4% taper −0.518795 0.021607 0.316
8% taper 7.034174 0.882605 0.231505	8% taper −1.539602 0.168392 0.2435	8% taper −4.909687 0.478519 0.2028	8% taper −0.51879 0.022620 0.3381
15% taper 7.030912 0.995108 0.253100	15% taper −1.539543 0.166299 0.2689	15% taper −4.90692 0.369392 0.2413	15% taper −0.5188 0.023065 0.4061
Variable W*St^2	Variable W*St^2	Variable W*St^2	Variable W*St^2
NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob
i.i.d. −0.020452 0.000464 0.000000	i.i.d. 0.004497 0.000108 0.000000	i.i.d. 0.013854 0.000284 0.000000	i.i.d. 0.001663 0.000012 0.002409
4% taper −0.020461 0.002165 0.183701	4% taper 0.004496 0.000461 0.1910	4% taper 0.013844 0.001276 0.1332	4% taper 0.001662 0.000058 0.3862

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

8% taper	-0.020458	0.002461	0.231107
15% taper	-0.020447	0.002754	0.25039
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000019	0.000000	0.000000
4% taper	0.000019	0.000002	0.198643
8% taper	0.000019	0.000002	0.235954
15% taper	0.000019	0.000002	0.249562
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-5.193731	0.134339	0.000000
4% taper	-5.194661	0.659347	0.187252
8% taper	-5.192734	0.755797	0.231596
15% taper	-5.187416	0.862433	0.24937
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.032790	0.000740	0.000000
4% taper	0.032782	0.003769	0.194144
8% taper	0.032758	0.004380	0.230304
15% taper	0.032715	0.004999	0.243303
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000047	0.000001	0.000000
4% taper	-0.000047	0.000005	0.210644
8% taper	-0.000047	0.000006	0.235475
15% taper	-0.000047	0.000007	0.24089
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.016059	0.000423	0.000000
4% taper	-0.016042	0.002224	0.195866
8% taper	-0.016025	0.002579	0.229961
15% taper	-0.015991	0.002967	0.24175
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000052	0.000001	0.000000
4% taper	0.000052	0.000006	0.204967
8% taper	0.000052	0.000008	0.228462
15% taper	0.000052	0.000009	0.233510
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000018	0.000001	0.000000

8% taper	0.004496	0.000463	0.2426
15% taper	0.004496	0.000455	0.2671
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000004	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000004	0.000000	0.1930
8% taper	-0.000004	0.000000	0.243
15% taper	-0.000004	0.000000	0.2659
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	1.193818	0.032285	0.000000
4% taper	1.193355	0.131817	0.1841
8% taper	1.193229	0.133854	0.2365
15% taper	1.193125	0.128001	0.2629
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.007569	0.000176	0.000000
4% taper	-0.007566	0.000717	0.1772
8% taper	-0.007565	0.000724	0.2290
15% taper	-0.007564	0.000685	0.2545
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000011	0.000000	0.000000
4% taper	0.000011	0.000001	0.1716
8% taper	0.000011	0.000001	0.2225
15% taper	0.000011	0.000001	0.2470
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.003869	0.000105	0.000000
4% taper	0.003867	0.000429	0.1733
8% taper	0.003867	0.000445	0.2239
15% taper	0.003866	0.000418	0.2500
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000013	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000013	0.000001	0.1579
8% taper	-0.000013	0.000001	0.2077
15% taper	-0.000013	0.000001	0.2335
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000005	0.000000	0.000000

8% taper	0.013838	0.001288	0.1992
15% taper	0.013830	0.001018	0.2377
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000012	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000012	0.000001	0.1306
8% taper	-0.000012	0.000001	0.1952
15% taper	-0.000012	0.000001	0.233
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	4.388545	0.085361	0.000000
4% taper	4.387173	0.420757	0.1262
8% taper	4.384388	0.420853	0.1918
15% taper	4.380775	0.331264	0.2330
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.026722	0.000466	0.000000
4% taper	-0.026715	0.002297	0.1173
8% taper	-0.026696	0.002291	0.1823
15% taper	-0.026674	0.001842	0.2236
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000037	0.000001	0.000000
4% taper	0.000037	0.000003	0.1076
8% taper	0.000037	0.000003	0.1716
15% taper	0.000037	0.000003	0.2132
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.015688	0.000279	0.000000
4% taper	0.015697	0.001478	0.1102
8% taper	0.015679	0.001458	0.1747
15% taper	0.015658	0.001165	0.2191
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000049	0.000001	0.000000
4% taper	-0.000049	0.000004	0.0943
8% taper	-0.000049	0.000004	0.1573
15% taper	-0.000049	0.000003	0.202
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000020	0.000000	0.000000

8% taper	0.001662	0.000061	0.4304
15% taper	0.0016	0.000063	0.49233
Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000002	0.000000	0.03363
4% taper	-0.000002	0.00000	0.5431
8% taper	-0.000002	0.00000	0.5683
15% taper	-0.000002	0.0000	0.6162
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.481091	0.004013	0.001730
4% taper	0.481034	0.021577	0.4195
8% taper	0.4810	0.022797	0.467197
15% taper	0.4810	0.023220	0.5155
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.003298	0.000021	0.07886
4% taper	-0.00329	0.000116	0.6779
8% taper	-0.003298	0.000124	0.7091
15% taper	-0.003298	0.00012	0.7292
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000005	0.000000	0.178240
4% taper	0.000005	0.0000	0.771111
8% taper	0.000005	0.000000	0.7832
15% taper	0.000005	0.0000	0.7744
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.001848	0.000014	0.032115
4% taper	0.001848	0.000080	0.6619
8% taper	0.00184	0.000085	0.7017
15% taper	0.001848	0.00008	0.7126
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000006	0.000000	0.3814
4% taper	-0.000006	0.0000	0.8686
8% taper	-0.000006	0.000	0.880464
15% taper	-0.000006	0.00000	0.8746
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000002	0.000000	0.192276

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4% taper	-0.000018	0.000003	0.202684	4% taper	0.000005	0.000001	0.1654	4% taper	0.000020	0.000002	0.0969	4% taper	0.000002	0.000000	0.8175
8% taper	-0.000018	0.000003	0.229149	8% taper	0.000005	0.000001	0.2121	8% taper	0.000020	0.000002	0.1594	8% taper	0.000002	0.000000	0.8397
15% taper	-0.000018	0.000004	0.23617	15% taper	0.000005	0.000001	0.2375	15% taper	0.000020	0.000002	0.2077	15% taper	0.000002	0.00000	0.8368

Tableau A.3 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 9

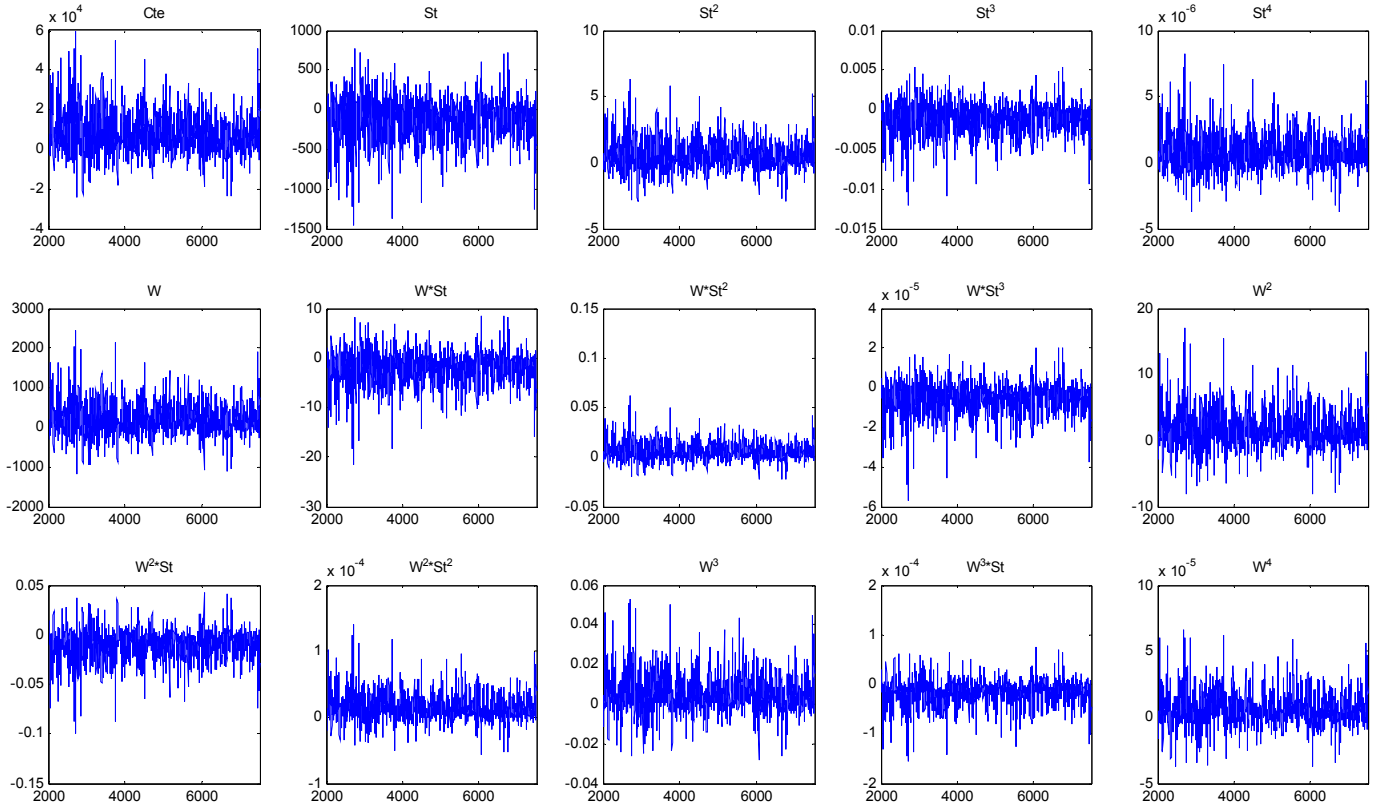


Figure A.7 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

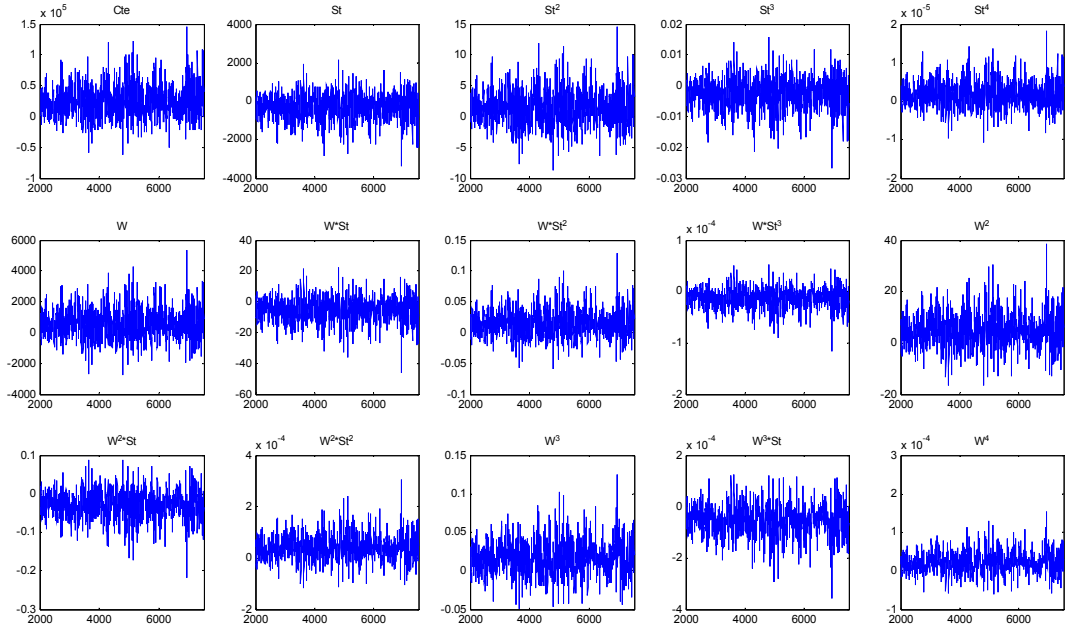


Figure A.8 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 3

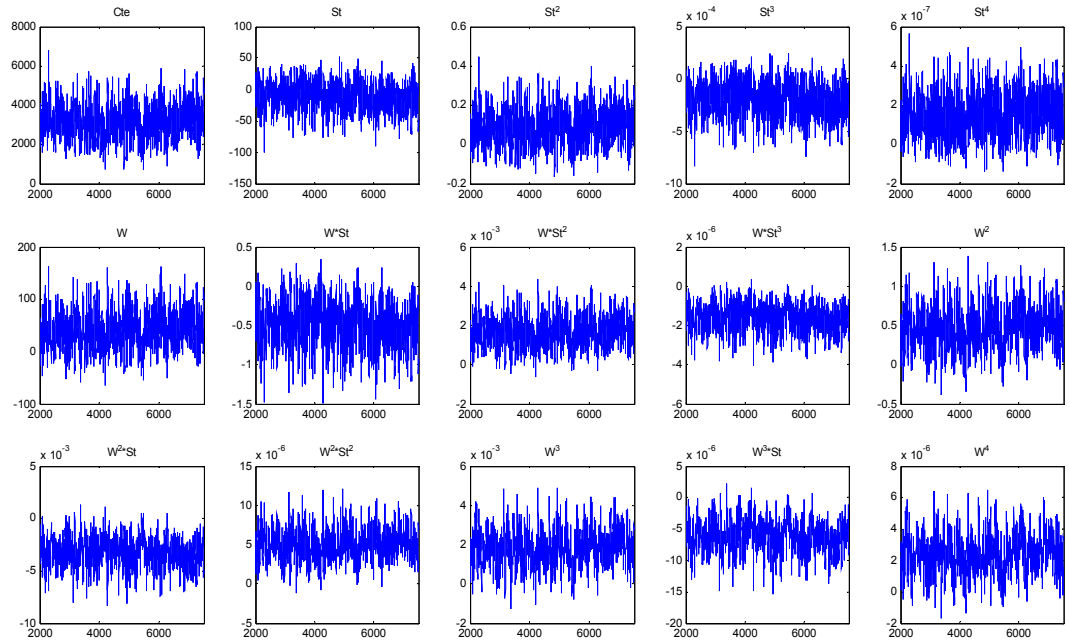


Figure A.9 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modèle 10 : 5éme dégrée – 2 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.4 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 7500 tours. Malgré que les coefficients auto corrélation ne soient pas très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 1114626 tours et d'amincir l'échantillon par 4 car l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 410 tirages (Tableau A.4). A l'aide des Figure A.10 et A.29 [1] et prenant en compte le test Chi de Geweke (Tableau A.4), nous avons choisit de laisser les premiers 2000 tirages. Après une réduction de la précision souhaitée (q=0.015, r=0.01), ce même diagnostic indique une convergence très bonne (Tableau A.5).

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k , montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l' échantillon raccourci (des premiers 2 mille tirages).

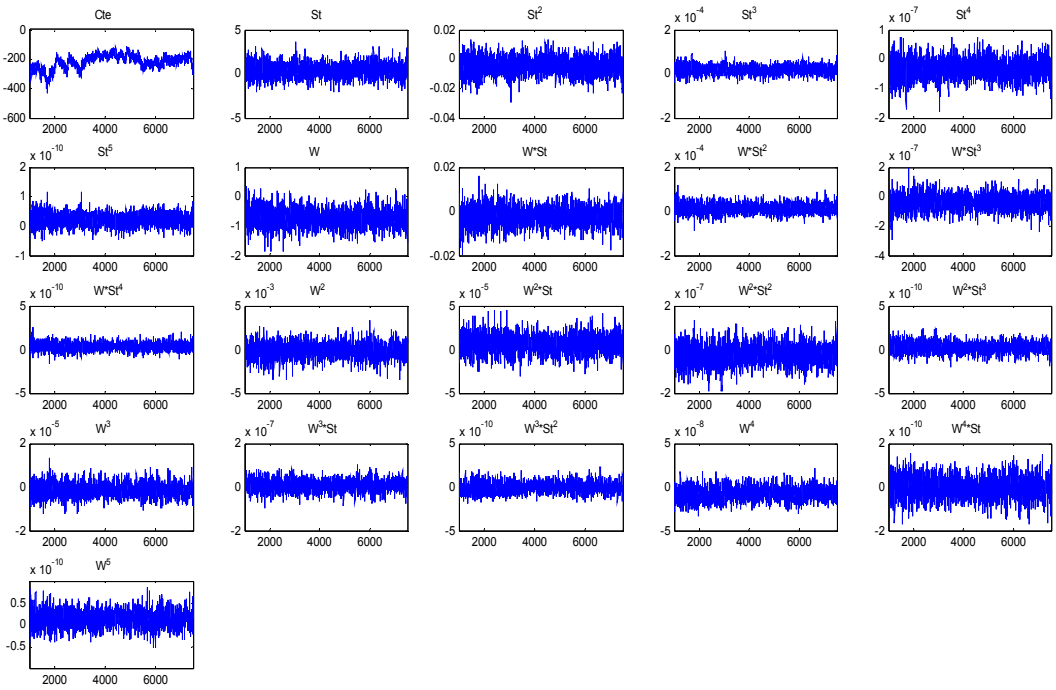


Figure A.10 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 10 ; type 1

[1] Les Figures 10 et 11 n'exposent pas les premiers mille tours car les valeurs de démarrage sont trop éloignes de la valeur posteriori.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 7500

Modèle 10 : 5éme dégrée – 2 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.903	0.734	0.519	0.088
St	0.663	0.230	-0.092	-0.009
St^2	0.654	0.380	0.212	-0.046
St^3	0.794	0.556	0.372	-0.083
St^4	0.892	0.626	0.360	-0.113
St^5	0.955	0.678	0.366	-0.109
W	0.704	0.243	-0.154	0.018
W*St	0.624	0.296	0.065	-0.017
W*St^2	0.653	0.356	0.232	-0.041
W*St^3	0.825	0.492	0.233	-0.108
W*St^4	0.437	0.064	-0.204	-0.006
W^2	0.653	0.289	0.081	-0.014
W^2*St	0.711	0.413	0.287	-0.016
W^2*St^2	0.813	0.512	0.260	-0.070
W^2*St^3	0.877	0.588	0.351	-0.033
W^3	0.723	0.457	0.261	0.004
W^3*St	0.845	0.629	0.365	-0.023
W^3*St^2	0.764	0.553	0.181	-0.013
W^4	0.824	0.635	0.348	-0.003
W^4*St	0.800	0.578	0.437	0.027
W^5	0.608	0.145	-0.148	-0.045

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Toutes les variables	4	410	111426	937	118.918

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	600824.8	8920785.7	103008.4	1
St	-1741.075896	159642.731606	1843.395481	1.000000
St^2	-29.524407	1126.590472	13.008746	1.000000
St^3	0.214390	5.574875	0.064373	1.000000
St^4	-0.000551	0.015431	0.000178	1.000000
St^5	0.000001	0.000024	0.000000	1.000000
W	1538.841485	76950.360090	888.546222	1.000000
W*St	21.144139	832.175737	9.609138	1.000000

TYPE 2

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.985	0.901	0.720	0.005
St	0.974	0.833	0.668	0.022
St^2	0.958	0.860	0.713	0.028
St^3	0.971	0.773	0.608	0.028
St^4	0.978	0.782	0.600	0.026
St^5	0.980	0.789	0.575	0.024
W	0.942	0.534	0.345	0.007
W*St	0.648	0.473	0.249	0.024
W*St^2	0.884	0.401	0.237	0.033
W*St^3	0.948	0.605	0.435	0.034
W*St^4	0.411	-0.221	0.059	-0.004
W^2	0.671	0.321	-0.114	-0.007
W^2*St	0.844	0.127	-0.073	0.039
W^2*St^2	0.915	0.321	0.175	0.043
W^2*St^3	0.948	0.456	0.253	0.038
W^3	0.785	0.161	-0.075	0.033
W^3*St	0.898	0.342	0.215	0.039
W^3*St^2	0.409	-0.191	0.236	-0.026
W^4	0.801	0.025	-0.117	0.024
W^4*St	0.834	0.214	-0.082	-0.008
W^5	0.618	0.095	0.044	-0.003

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Idem Type 1					

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-351315.521646	5127515.259162	59207.446303	1.000000
St	6310.900424	93254.934353	1076.815229	1.000000
St^2	-48.801889	682.178247	7.877116	1.000000
St^3	0.372811	5.469380	0.063155	1.000000
St^4	-0.001160	0.017230	0.000199	1.000000
St^5	0.000002	0.000028	0.000000	1.000000
W	-1613.586297	32734.969057	377.990864	1.000000
W*St	9.589876	190.714539	2.202182	1.000000

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W*St^2	-0.180142	4.078775	0.047098	1.000000
W*St^3	0.000458	0.011720	0.000135	1.000000
W*St^4	-0.000000	0.000005	0.000000	1.000000
W^2	-6.398862	216.386295	2.498614	1.000000
W^2*St	0.124679	2.302336	0.026585	1.000000
W^2*St^2	-0.000432	0.008880	0.000103	1.000000
W^2*St^3	0.000001	0.000012	0.000000	1.000000
W^3	-0.028821	0.515992	0.005958	1.000000
W^3*St	0.000257	0.004647	0.000054	1.000000
W^3*St^2	-0.000000	0.000008	0.000000	1.000000
W^4	-0.000051	0.000944	0.000011	1.000000
W^4*St	0.000000	0.000004	0.000000	1.000000
W^5	-0.000000	0.000002	0.000000	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	613056.327053	0.028232	605341.588594	0.028956	600296.225520	0.029445
St	1779.719637	1.072837	1755.683653	1.102413	1740.323055	1.121960
St^2	29.301232	0.197106	29.307496	0.197021	29.241822	0.197907
St^3	0.212387	0.091866	0.212625	0.091660	0.212237	0.091996
St^4	0.000546	0.106399	0.000547	0.106150	0.000546	0.106533
St^5	0.000001	0.102083	0.000001	0.102009	0.000001	0.102454
W	1558.271300	0.325143	1544.178624	0.331104	1534.007854	0.335510
W*St	21.067417	0.208040	21.034968	0.208682	20.970520	0.209967
W*St^2	0.178456	0.069652	0.178673	0.069483	0.178353	0.069733
W*St^3	0.000453	0.089186	0.000454	0.088900	0.000453	0.089186
W*St^4	0.000000	0.976457	0.000000	0.966604	0.000000	0.966669
W^2	6.363441	0.154175	6.359064	0.154387	6.342117	0.155214
W^2*St	0.123710	0.046182	0.123756	0.046147	0.123488	0.046348
W^2*St^2	0.000428	0.057405	0.000428	0.057316	0.000427	0.057544
W^2*St^3	0.000001	0.051783	0.000001	0.051903	0.000001	0.052204
W^3	0.028746	0.042961	0.028685	0.043143	0.028590	0.043431
W^3*St	0.000255	0.044170	0.000255	0.044197	0.000255	0.044417
W^3*St^2	0.000000	0.065714	0.000000	0.065811	0.000000	0.066165
W^4	0.000051	0.046019	0.000051	0.046078	0.000051	0.046322
W^4*St	0.000000	0.050508	0.000000	0.050049	0.000000	0.050073
W^5	0.000000	3.016534	0.000000	2.809136	0.000000	2.735202

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-124.592905	1.193016	0.000000
4% taper	-120.887748	16.499889	0.000011

W*St^2	-0.139250	2.523932	0.029144	1.000000
W*St^3	0.000647	0.010372	0.000120	1.000000
W*St^4	-0.000000	0.000003	0.000000	1.000000
W^2	-0.641822	49.859388	0.575727	1.000000
W^2*St	0.047914	1.092243	0.012612	1.000000
W^2*St^2	-0.000308	0.005519	0.000064	1.000000
W^2*St^3	0.000000	0.000008	0.000000	1.000000
W^3	-0.008281	0.192705	0.002225	1.000000
W^3*St	0.000121	0.002122	0.000025	1.000000
W^3*St^2	0.000000	0.000002	0.000000	1.000000
W^4	-0.000009	0.000248	0.000003	1.000000
W^4*St	0.000000	0.000002	0.000000	1.000000
W^5	0.000000	0.000001	0.000000	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	354205.355310	0.027941	352193.261322	0.028261	350329.451445	0.028563
St	6277.443078	0.029425	6272.802079	0.029469	6255.958543	0.029627
St^2	48.557636	0.026316	48.517043	0.026360	48.384205	0.026505
St^3	0.370787	0.029011	0.370534	0.029051	0.369547	0.029206
St^4	0.001154	0.029742	0.001153	0.029785	0.001150	0.029945
St^5	0.000002	0.031210	0.000002	0.031256	0.000002	0.031424
W	1602.773462	0.055618	1601.809518	0.055685	1597.644607	0.055976
W*St	9.535298	0.053338	9.528486	0.053414	9.502850	0.053703
W*St^2	0.138311	0.044400	0.138288	0.044415	0.137953	0.044631
W*St^3	0.000643	0.034688	0.000643	0.034721	0.000641	0.034900
W*St^4	0.000000	9.883217	0.000000	9.606639	0.000000	9.526284
W^2	0.638411	0.813265	0.638276	0.813608	0.636679	0.817697
W^2*St	0.047552	0.070345	0.047572	0.070286	0.047470	0.070590
W^2*St^2	0.000306	0.043399	0.000306	0.043418	0.000305	0.043632
W^2*St^3	0.000000	0.039222	0.000000	0.039246	0.000000	0.039443
W^3	0.008207	0.073508	0.008215	0.073366	0.008200	0.073645
W^3*St	0.000120	0.041882	0.000120	0.041898	0.000119	0.042103
W^3*St^2	0.000000	5.504853	0.000000	5.588530	0.000000	5.650754
W^4	0.000009	0.106931	0.000009	0.106883	0.000009	0.107386
W^4*St	0.000000	135.548846	0.000000	144.066336	0.000000	149.712038
W^5	0.000000	0.150157	0.000000	0.150200	0.000000	0.150926

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	843.062722	0.521995	0.000000
4% taper	843.062708	5.133433	0.262197

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

8% taper −120.618281 22.534883 0.001020 15% taper −120.220353 28.717283 0.007839	8% taper 843.062702 6.310544 0.291815 15% taper 843.062704 6.137970 0.300965
Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.412579 0.010315 0.344684 4% taper 0.412579 0.025828 0.486870 8% taper 0.412579 0.028945 0.412312 15% taper 0.412579 0.031348 0.364146	Variable St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.697265 0.009360 0.000000 4% taper −0.697265 0.016243 0.245976 8% taper −0.697265 0.014707 0.279364 15% taper −0.697265 0.010913 0.292287
Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.004643 0.000074 0.023066 4% taper −0.004643 0.000193 0.410811 8% taper −0.004643 0.000224 0.364663 15% taper −0.004643 0.000254 0.341963	Variable St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.009008 0.000068 0.000000 4% taper 0.009008 0.000122 0.250574 8% taper 0.009008 0.000118 0.282108 15% taper 0.009008 0.000090 0.294347
Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000018 0.000000 0.000838 4% taper 0.000018 0.000001 0.375561 8% taper 0.000018 0.000001 0.342321 15% taper 0.000018 0.000001 0.328807	Variable St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000033 0.000000 0.000000 4% taper −0.000033 0.000000 0.252010 8% taper −0.000033 0.000000 0.282884 15% taper −0.000033 0.000000 0.294957
Variable St^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.001918 4% taper −0.000000 0.000000 0.412721 8% taper −0.000000 0.000000 0.364131 15% taper −0.000000 0.000000 0.342026	Variable St^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000000 4% taper 0.000000 0.000000 0.253459 8% taper 0.000000 0.000000 0.283624 15% taper 0.000000 0.000000 0.295405
Variable St^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.001564 4% taper 0.000000 0.000000 0.407915 8% taper 0.000000 0.000000 0.362829 15% taper 0.000000 0.000000 0.341373	Variable St^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000000 4% taper −0.000000 0.000000 0.258852 8% taper −0.000000 0.000000 0.286288 15% taper −0.000000 0.000000 0.296982
Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.748887 0.003804 0.082903 4% taper −0.748887 0.009740 0.247024 8% taper −0.748887 0.010190 0.283861 15% taper −0.748887 0.011511 0.293327	Variable W NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −1.522212 0.003706 0.000018 4% taper −1.522212 0.006422 0.255293 8% taper −1.522212 0.005881 0.282925 15% taper −1.522212 0.005521 0.293325
Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.002115 0.000052 0.027560	Variable W*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.002522 0.000057 0.000012

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4% taper −0.002115 0.000108 0.341240 8% taper −0.002115 0.000104 0.326849 15% taper −0.002115 0.000112 0.319015	4% taper 0.002522 0.000085 0.253755 8% taper 0.002522 0.000070 0.283176 15% taper 0.002522 0.000059 0.294217
Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000013 0.000000 0.000123 4% taper 0.000013 0.000001 0.299909 8% taper 0.000013 0.000001 0.302089 15% taper 0.000013 0.000001 0.305507	Variable W*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000021 0.000000 0.000002 4% taper −0.000021 0.000001 0.246836 8% taper −0.000021 0.000000 0.280353 15% taper −0.000021 0.000000 0.293585
Variable W*St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000690 4% taper −0.000000 0.000000 0.360706 8% taper −0.000000 0.000000 0.332590 15% taper −0.000000 0.000000 0.323219	Variable W*St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000000 4% taper 0.000000 0.000000 0.250878 8% taper 0.000000 0.000000 0.282416 15% taper 0.000000 0.000000 0.294772
Variable W*St^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.302983 4% taper 0.000000 0.000000 0.520009 8% taper 0.000000 0.000000 0.427129 15% taper 0.000000 0.000000 0.381411	Variable W*St^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.741445 4% taper −0.000000 0.000000 0.668847 8% taper −0.000000 0.000000 0.576501 15% taper −0.000000 0.000000 0.489428
Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000156 0.000012 0.010306 4% taper −0.000156 0.000034 0.305424 8% taper −0.000156 0.000035 0.307674 15% taper −0.000156 0.000034 0.307649	Variable W^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000646 0.000011 0.264296 4% taper 0.000646 0.000023 0.532542 8% taper 0.000646 0.000022 0.448354 15% taper 0.000646 0.000021 0.389025
Variable W^2*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000006 0.000000 0.000002 4% taper 0.000006 0.000000 0.261771 8% taper 0.000006 0.000000 0.285230 15% taper 0.000006 0.000000 0.295928	Variable W^2*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000011 0.000000 0.000136 4% taper −0.000011 0.000000 0.223182 8% taper −0.000011 0.000000 0.268475 15% taper −0.000011 0.000000 0.286607
Variable W^2*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000023 4% taper −0.000000 0.000000 0.296426 8% taper −0.000000 0.000000 0.300905 15% taper −0.000000 0.000000 0.304981	Variable W^2*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000001 4% taper 0.000000 0.000000 0.235549 8% taper 0.000000 0.000000 0.274785 15% taper 0.000000 0.000000 0.290387
Variable W^2*St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob	Variable W^2*St^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000009 4% taper 0.000000 0.000000 0.289295 8% taper 0.000000 0.000000 0.300260 15% taper 0.000000 0.000000 0.304729	i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000000 4% taper −0.000000 0.000000 0.244285 8% taper −0.000000 0.000000 0.278915 15% taper −0.000000 0.000000 0.292792
Variable W^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000001 0.000000 0.000001 4% taper −0.000001 0.000000 0.253527 8% taper −0.000001 0.000000 0.283407 15% taper −0.000001 0.000000 0.294810	Variable W^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000001 0.000000 0.000187 4% taper 0.000001 0.000000 0.225503 8% taper 0.000001 0.000000 0.268279 15% taper 0.000001 0.000000 0.285506
Variable W^3*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000001 4% taper 0.000000 0.000000 0.267580 8% taper 0.000000 0.000000 0.288575 15% taper 0.000000 0.000000 0.298068	Variable W^3*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000001 4% taper 0.000000 0.000000 0.236680 8% taper 0.000000 0.000000 0.275377 15% taper 0.000000 0.000000 0.290721
Variable W^3*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000082 4% taper −0.000000 0.000000 0.241399 8% taper −0.000000 0.000000 0.277674 15% taper −0.000000 0.000000 0.291756	Variable W^3*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.672395 4% taper −0.000000 0.000000 0.771134 8% taper −0.000000 0.000000 0.696551 15% taper −0.000000 0.000000 0.617578
Variable W^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000002 4% taper −0.000000 0.000000 0.258041 8% taper −0.000000 0.000000 0.284990 15% taper −0.000000 0.000000 0.296034	Variable W^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.002017 4% taper 0.000000 0.000000 0.218136 8% taper 0.000000 0.000000 0.266596 15% taper 0.000000 0.000000 0.285816
Variable W^4*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000005 4% taper −0.000000 0.000000 0.257105 8% taper −0.000000 0.000000 0.280838 15% taper −0.000000 0.000000 0.293760	Variable W^4*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.935813 4% taper 0.000000 0.000000 0.945538 8% taper 0.000000 0.000000 0.923478 15% taper 0.000000 0.000000 0.896150
Variable W^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.532837 4% taper 0.000000 0.000000 0.295070 8% taper 0.000000 0.000000 0.288188 15% taper 0.000000 0.000000 0.290075	Variable W^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.009252 4% taper −0.000000 0.000000 0.295263 8% taper −0.000000 0.000000 0.303687 15% taper −0.000000 0.000000 0.306864

Tableau A.4 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 10

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.015, r=0.01, s=0.95). Based on sample size = 5500					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	1	12	2035	568	3.58
2	1	14	2276	568	4.01

Tableau A.5 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 10

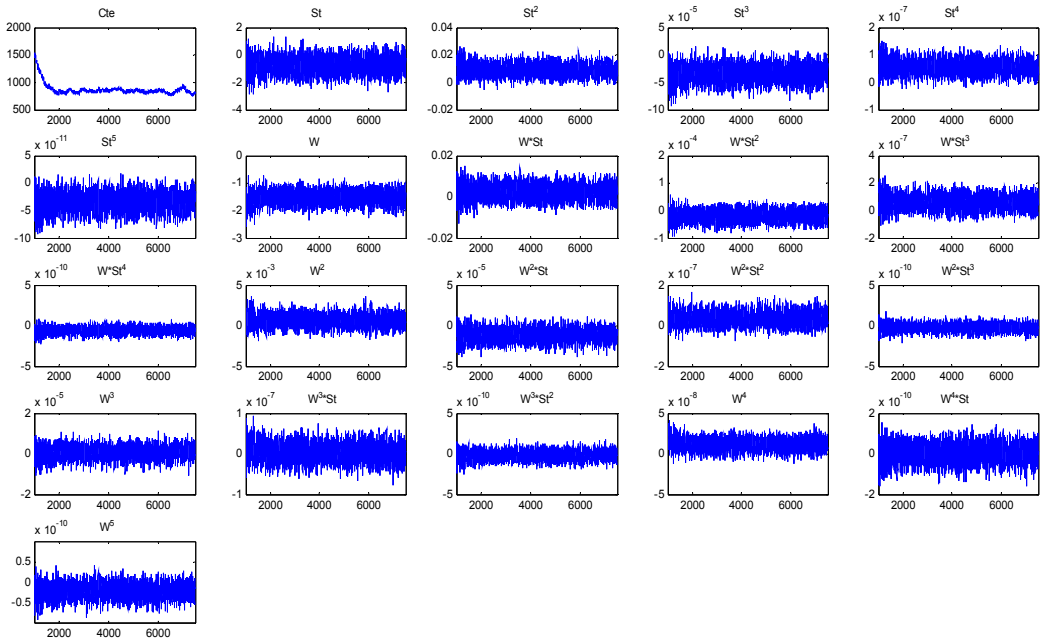


Figure A.11 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 10 ; type 2

Modèle 11 : 5éme dégrée – 3 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.6 indiquent que les coefficients π_k du polynôme ont convergé. Les coefficients auto corrélation ne soient pas très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande juste 5843 tours et d'amincir l'échantillon par 4, l'I-stat est également assez proche de 5, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 23 tirages (Tableau A.6). A l'aide des Figure A.12, A.32 et A.33 et prenant en compte le test Chi de Geweke (Tableau A.6), nous avons choisit de laisser les premiers 2000 tirages. Après une réduction de la précision souhaitée (q=0.0225, r=0.015), ce même diagnostic indique une convergence très bonne (Tableau A.7).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k , montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l' échantillon raccourci (des premiers 2 mille tirages).

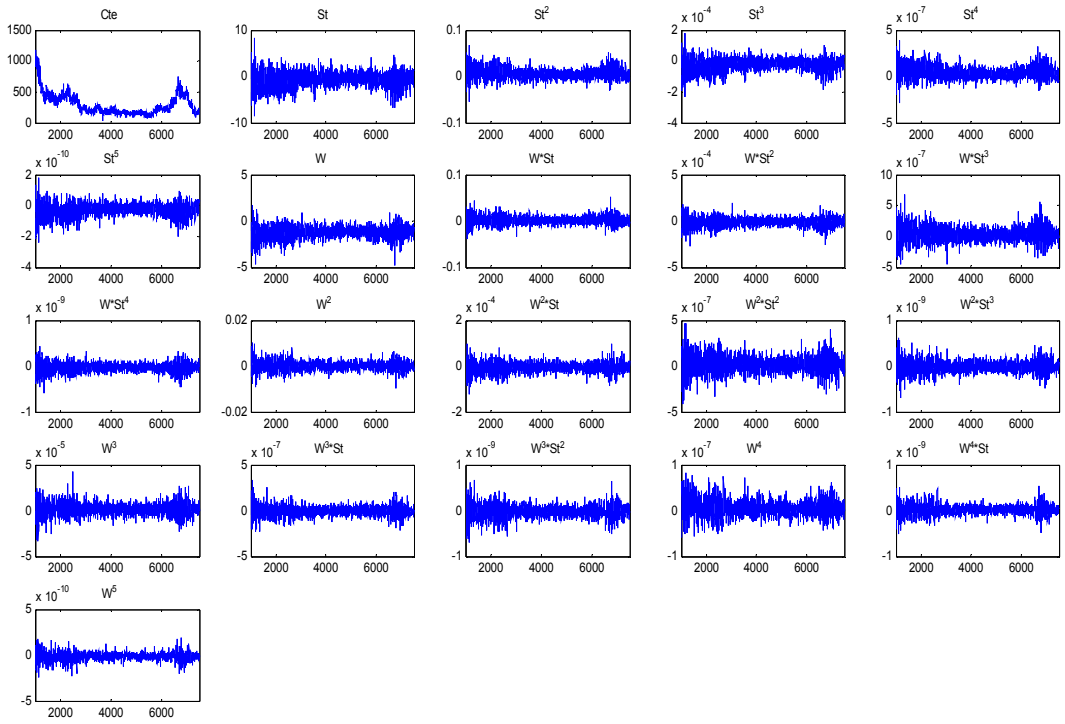


Figure A.12 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 11 ; type 1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 7500

Modèle 11 : 5éme dégrée – 3 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.813	0.611	0.495	0.220
St	0.486	0.193	-0.149	0.082
St^2	0.343	-0.014	-0.166	0.095
St^3	0.759	0.427	0.220	-0.011
St^4	0.889	0.612	0.385	-0.082
St^5	0.951	0.709	0.455	-0.166
W	0.614	0.366	-0.021	0.049
W*St	0.321	0.058	-0.153	0.069
W*St^2	0.664	0.258	0.056	0.073
W*St^3	0.838	0.479	0.269	0.025
W*St^4	0.799	0.355	0.112	0.101
W^2	0.361	0.157	-0.099	0.041
W^2*St	0.589	0.235	-0.067	0.083
W^2*St^2	0.756	0.435	0.128	0.041
W^2*St^3	0.760	0.553	0.214	-0.064
W^3	0.423	0.132	-0.154	0.078
W^3*St	0.551	0.302	0.116	-0.045
W^3*St^2	0.457	0.100	0.230	-0.133
W^4	0.347	0.188	0.124	-0.094
W^4*St	0.543	0.353	0.322	-0.036
W^5	0.541	-0.017	0.082	0.023

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Variable	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Ttes Var.	4	23	5843	937	6.236

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	1021333.697426	11460573.394559	132335.302688	1.000
St	-2540.438969	186514.692337	2153.686157	1.000000
St^2	40.651405	1248.011616	14.410797	1.000000
St^3	-0.285345	8.051808	0.092974	1.000000
St^4	0.000739	0.022550	0.000260	1.000000
St^5	-0.000001	0.000031	0.000000	1.000000
W	420.476323	100565.130445	1161.226103	1.000000
W*St	-19.889594	1026.259836	11.850228	1.000000
W*St^2	0.268854	7.459659	0.086137	1.000000

TYPE 2

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.879	0.709	0.530	0.140
St	0.301	0.065	-0.029	-0.023
St^2	0.328	-0.045	-0.242	-0.019
St^3	0.702	0.387	0.032	-0.048
St^4	0.856	0.585	0.159	-0.043
St^5	0.947	0.707	0.251	-0.035
W	0.455	0.218	0.108	-0.050
W*St	0.365	-0.117	-0.191	0.001
W*St^2	0.661	0.218	0.092	-0.035
W*St^3	0.817	0.461	0.221	-0.056
W*St^4	0.732	0.272	0.215	0.054
W^2	0.421	-0.086	-0.173	0.008
W^2*St	0.652	0.198	0.100	-0.059
W^2*St^2	0.738	0.387	0.188	-0.101
W^2*St^3	0.705	0.482	0.201	-0.181
W^3	0.619	0.127	0.037	-0.074
W^3*St	0.687	0.377	0.215	-0.146
W^3*St^2	0.717	0.579	0.415	-0.029
W^4	0.692	0.462	0.326	-0.102
W^4*St	0.740	0.641	0.580	0.012
W^5	0.668	0.277	0.215	0.073

Idem type 1

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	1193759.942529	15010081.692753	173321.494117	1
St	-540.153341	170332.215023	1966.827004	1.00000
St^2	4.738641	1393.392722	16.089513	1.000000
St^3	-0.113275	8.445779	0.097523	1.000000
St^4	0.000212	0.023489	0.000271	1.000000
St^5	0.000000	0.000032	0.000000	1.000000
W	857.385296	86914.944428	1003.607331	1.000000
W*St	-17.052567	1151.102593	13.291788	1.000000
W*St^2	0.304737	8.490052	0.098035	1.000000

TYPE 3

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.987	0.870	0.691	0.017
St	0.982	0.827	0.566	0.017
St^2	0.980	0.908	0.724	0.027
St^3	0.982	0.848	0.669	0.032
St^4	0.983	0.812	0.608	0.029
St^5	0.982	0.797	0.561	0.026
W	0.960	0.605	0.193	0.002
W*St	0.897	0.328	-0.222	0.005
W*St^2	0.879	0.644	0.610	0.069
W*St^3	0.963	0.736	0.562	0.045
W*St^4	0.482	0.171	0.193	-0.034
W^2	0.925	0.394	-0.144	-0.015
W^2*St	0.788	0.296	0.149	0.041
W^2*St^2	0.920	0.588	0.481	0.072
W^2*St^3	0.948	0.638	0.476	0.059
W^3	0.868	0.412	-0.070	-0.020
W^3*St	0.824	0.430	0.349	0.069
W^3*St^2	0.690	0.492	0.166	-0.037
W^4	0.761	0.226	-0.117	-0.016
W^4*St	0.816	0.124	-0.072	0.002
W^5	0.621	0.096	0.056	-0.007

Idem type 1

Variable	Mean	std dev	NSE iid	RNE iid
Cte	-401401.01	5914519.9	68294.99	1.0000
St	6275.5	99429.33	1148.11	1.0000
St^2	-46.655402	664.451791	7.672428	1.000
St^3	0.380248	5.466406	0.063121	1.000000
St^4	-0.001247	0.018537	0.000214	1.000000
St^5	0.000002	0.000030	0.000000	1.000000
W	-1475.84	34437.99	397.655641	1.0000
W*St	2.277668	237.733146	2.745106	1.000000

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W*St^3	-0.000802	0.021042	0.000243	1.000000
W*St^4	0.000001	0.000013	0.000000	1.000000
W^2	2.570941	273.128968	3.153822	1.000000
W^2*St	-0.088869	3.650854	0.042156	1.000000
W^2*St^2	0.000375	0.014090	0.000163	1.000000
W^2*St^3	-0.000000	0.000016	0.000000	1.000000
W^3	0.009010	0.717804	0.008288	1.000000
W^3*St	-0.000007	0.005513	0.000064	1.000000
W^3*St^2	-0.000000	0.000010	0.000000	1.000000
W^4	-0.000025	0.000974	0.000011	1.000000
W^4*St	0.000000	0.000005	0.000000	1.000000
W^5	-0.000000	0.000002	0.000000	1.000000

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	958142.49	0.019076	984665.45	0.018062	994806.76	0.017696
St	2479.4557	0.7545	2499.758351	0.742282	2503.437561	0.740102
St^2	39.082	0.135963	39.698767	0.131772	39.888299	0.130522
St^3	0.271121	0.117598	0.277010	0.112651	0.279045	0.111014
St^4	0.000699	0.138851	0.000716	0.132419	0.000722	0.130243
St^5	0.000001	0.484227	0.000001	0.454254	0.000001	0.443653
W	510.559	5.172996	467.824002	6.161246	445.800116	6.785053
W*St	20.1441	0.346063	19.954890	0.352659	19.821508	0.357421
W*St^2	0.2593	0.110358	0.262997	0.107269	0.264086	0.106386
W*St^3	0.000767	0.1004	0.000781	0.096758	0.000786	0.095597
W*St^4	0.000001	0.069577	0.000001	0.0677	0.000001	0.067140
W^2	2.743785	1.321217	2.652936	1.413256	2.603774	1.467127
W^2*St	0.08503	0.245806	0.086580	0.237077	0.087085	0.234337
W^2*St^2	0.000354	0.2116	0.000363	0.201013	0.000366	0.197374
W^2*St^3	0.0000	3.861151	0.000000	3.818989	0.000000	3.820083
W^3	0.008512	0.948195	0.008722	0.903033	0.008797	0.887816
W^3*St	0.000019	11.1954	0.000014	20.009	0.000011	31.619165
W^3*St^2	0.0000	0.129118	0.000000	0.131025	0.000000	0.132511
W^4	0.000026	0.192913	0.000025	0.196912	0.000025	0.199748
W^4*St	0.0000	0.054914	0.000000	0.055929	0.000000	0.056671
W^5	0.0000	16.006783	0.000000	29.918897	0.000000	50.240837

Geweke Chi-squared test for each parameter chain
First 20% versus Last 50% of the sample

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	236.689423	1.934557	0.000000
4% taper	236.689608	22.366580	0.125368
8% taper	236.689677	30.446286	0.199219
15% taper	236.689766	38.283786	0.244470

W*St^3	-0.000797	0.024011	0.000277	1.000000
W*St^4	0.000001	0.000015	0.000000	1.000000
W^2	4.925261	302.198644	3.489489	1.000000
W^2*St	-0.142310	4.445803	0.051336	1.000000
W^2*St^2	0.000391	0.016055	0.000185	1.000000
W^2*St^3	0.000000	0.000016	0.000000	1.000000
W^3	0.016364	0.962433	0.011113	1.000000
W^3*St	0.000052	0.007316	0.000084	1.000000
W^3*St^2	-0.000001	0.000015	0.000000	1.000000
W^4	-0.000046	0.001468	0.000017	1.000000
W^4*St	0.000000	0.000007	0.000000	1.000000
W^5	-0.000000	0.000003	0.000000	1.000000

Var.	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	1133892.7	0.023365	1158169.9	0.0224	1166953.6	0.02206
St	531.0074	13.71928	533.1752	13.6079	533.1195	13.61078
St^2	4.3435	13.7216	4.5111	12.7212	4.576428	12.360402
St^3	0.10629	0.84179	0.10926	0.79666	0.11036	0.78094
St^4	0.000196	1.9223	0.0002	1.79093	0.000205	1.74396
St^5	0.0000	6.22745	0.0000	7.453320	0.000000	8.24228
W	871.3848	1.3265	862.188	1.3549	856.055852	1.374433
W*St	16.5513	0.6449	16.7347	0.631	16.781106	0.627373
W*St^2	0.2939	0.11126	0.2981	0.1081	0.299327	0.107267
W*St^3	0.00076	0.1316	0.0008	0.12723	0.000781	0.12587
W*St^4	0.000001	0.05242	0.000001	0.0511	0.00000	0.051
W^2	4.8166	0.525	4.852257	0.5172	4.857368	0.516086
W^2*St	0.13735	0.1397	0.139	0.135885	0.139810	0.13482
W^2*St^2	0.00037	0.2468	0.0004	0.23752	0.00038	0.23454
W^2*St^3	0.0000	28.1689	0.0000	46.7831	0.00000	67.21157
W^3	0.01562	0.5063	0.0159	0.4872	0.016023	0.481050
W^3*St	0.00006	2.1175	0.000055	2.345	0.000054	2.47913
W^3*St^2	0.000001	0.0614	0.000001	0.061	0.00000	0.0613
W^4	0.00005	0.1323	0.000046	0.134	0.000046	0.13491
W^4*St	0.000	0.03075	0.0000	0.030625	0.000000	0.03071
W^5	0.0000	0.2721	0.0000	0.270023	0.000000	0.27035

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	201.925494	0.895256	0.000000
4% taper	201.925517	9.491188	0.162163
8% taper	201.925526	12.458736	0.224508
15% taper	201.925532	14.452367	0.258792

W*St^2	-0.100907	1.439411	0.016621	1.0000
W*St^3	0.000613	0.009105	0.000105	1.0000
W*St^4	0.000000	0.000003	0.000000	1.0000
W^2	0.707767	80.139291	0.925369	1.0000
W^2*St	0.031396	0.609165	0.007034	1.0000
W^2*St^2	-0.000304	0.004244	0.000049	1.0000
W^2*St^3	0.000000	0.000007	0.000000	1.0000
W^3	-0.002424	0.179325	0.002071	1.000000
W^3*St	0.000091	0.001366	0.000016	1.0000
W^3*St^2	0.000000	0.000003	0.000000	1.0000
W^4	-0.000001	0.000224	0.000003	1.000000
W^4*St	-0.000000	0.000002	0.000000	1.0000
W^5	0.000000	0.000001	0.000000	1.00000

Var.	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	403478.9	0.029	401632.61	0.029	399735.8	0.0292
St	6241.69	0.034	6237.31	0.034	6220.66	0.034
St^2	46.414	0.027	46.379	0.0274	46.253	0.0275
St^3	0.378	0.028	0.378	0.0279	0.377	0.028
St^4	0.00124	0.03	0.001	0.03	0.001	0.03
St^5	0.0000	0.03	0.0000	0.03	0.0000	0.03
W	1465.9	0.0736	1465.01	0.0737	1461.2	0.074
W*St	2.26	1.47	2.26	1.47	2.254	1.482587
W*St^2	0.10	0.027	0.10	0.027529	0.01	0.03
W*St^3	0.001	0.03	0.0006	0.03	0.0006	0.03
W*St^4	0.000	0.365	0.000	0.369	0.000	0.372
W^2	0.706	1.72	0.704	1.73	0.701	1.74
W^2*St	0.031	0.051	0.031	0.051	0.031	0.051
W^2*St^2	0.0003	0.026	0.0003	0.026	0.0003	0.026
W^2*St^3	0.000	0.027	0.000	0.027	0.000	0.028
W^3	0.0023	0.76	0.002	0.75	0.0023	0.75
W^3*St	0.0001	0.03	0.0001	0.03	0.0001	0.03
W^3*St^2	0.000	0.193	0.000	0.194	0.000	0.195
W^4	0.000	10.001	0.000	9.804	0.000	9.782
W^4*St	0.000	21704.5	0.000	19963.8	0.000	19030.7
W^5	0.000	0.164	0.000	0.164	0.000	0.165

Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	722.476854	0.691646	0.000000
4% taper	722.476824	7.736051	0.257880
8% taper	722.476802	10.383592	0.288954
15% taper	722.476772	12.953001	0.299199

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable	St			Variable	St			Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.612498	0.018341	0.238119	i.i.d.	-0.430701	0.015012	0.783758	i.i.d.	-0.620375	0.008600	0.000000
4% taper	-0.612498	0.061956	0.332339	4% taper	-0.430701	0.035404	0.817724	4% taper	-0.620375	0.016028	0.248681
8% taper	-0.612499	0.079669	0.318322	8% taper	-0.430701	0.039930	0.753737	8% taper	-0.620375	0.014593	0.280350
15% taper	-0.612499	0.099216	0.310711	15% taper	-0.430701	0.045549	0.682035	15% taper	-0.620375	0.011811	0.292597
Variable	St^2			Variable	St^2			Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.005824	0.000133	0.004707	i.i.d.	0.004403	0.000108	0.768560	i.i.d.	0.008050	0.000064	0.000000
4% taper	0.005824	0.000528	0.210184	4% taper	0.004403	0.000288	0.760460	4% taper	0.008050	0.000125	0.248408
8% taper	0.005824	0.000695	0.252934	8% taper	0.004403	0.000339	0.686675	8% taper	0.008050	0.000117	0.280860
15% taper	0.005824	0.000877	0.273297	15% taper	0.004403	0.000392	0.599838	15% taper	0.008050	0.000103	0.293479
Variable	St^3			Variable	St^3			Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000022	0.000000	0.002094	i.i.d.	-0.000017	0.000000	0.245332	i.i.d.	-0.000030	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000022	0.000002	0.349303	4% taper	-0.000017	0.000001	0.629134	4% taper	-0.000030	0.000000	0.250334
8% taper	-0.000022	0.000002	0.323083	8% taper	-0.000017	0.000001	0.542890	8% taper	-0.000030	0.000000	0.282035
15% taper	-0.000022	0.000003	0.308047	15% taper	-0.000017	0.000001	0.460294	15% taper	-0.000030	0.000000	0.294448
Variable	St^4			Variable	St^4			Variable	St^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.004468	i.i.d.	0.000000	0.000000	0.434787	i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.427002	4% taper	0.000000	0.000000	0.765091	4% taper	0.000000	0.000000	0.253028
8% taper	0.000000	0.000000	0.371864	8% taper	0.000000	0.000000	0.691810	8% taper	0.000000	0.000000	0.283405
15% taper	0.000000	0.000000	0.335964	15% taper	0.000000	0.000000	0.606857	15% taper	0.000000	0.000000	0.295285
Variable	St^5			Variable	St^5			Variable	St^5		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.122172	i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.742654	i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.662250	4% taper	-0.000000	0.000000	0.903310	4% taper	-0.000000	0.000000	0.259103
8% taper	-0.000000	0.000000	0.573292	8% taper	-0.000000	0.000000	0.868882	8% taper	-0.000000	0.000000	0.286408
15% taper	-0.000000	0.000000	0.487460	15% taper	-0.000000	0.000000	0.824736	15% taper	-0.000000	0.000000	0.297061
Variable	W			Variable	W			Variable	W		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-1.169614	0.007216	0.716505	i.i.d.	-1.153643	0.005878	0.392212	i.i.d.	-1.468800	0.003308	0.000198
4% taper	-1.169614	0.019298	0.803693	4% taper	-1.153643	0.014247	0.651477	4% taper	-1.468800	0.007729	0.273001
8% taper	-1.169614	0.021812	0.754103	8% taper	-1.153643	0.015386	0.569402	8% taper	-1.468800	0.009127	0.290671
15% taper	-1.169614	0.024919	0.683898	15% taper	-1.153643	0.017030	0.493694	15% taper	-1.468800	0.010913	0.296907
Variable	W*St			Variable	W*St			Variable	W*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.001424	0.000099	0.092995	i.i.d.	0.001226	0.000081	0.199285	i.i.d.	0.002285	0.000048	0.407082
4% taper	0.001424	0.000221	0.298757	4% taper	0.001226	0.000165	0.238320	4% taper	0.002285	0.000076	0.598753
8% taper	0.001424	0.000235	0.322633	8% taper	0.001226	0.000164	0.268153	8% taper	0.002285	0.000076	0.507256

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

15% taper	0.001424	0.000254	0.316869	15% taper	0.001226	0.000170	0.281742	15% taper	0.002285	0.000080	0.433607
Variable	W*St^2			Variable	W*St^2			Variable	W*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000010	0.000001	0.001751	i.i.d.	-0.000008	0.000000	0.001830	i.i.d.	-0.000017	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000010	0.000001	0.236715	4% taper	-0.000008	0.000001	0.304714	4% taper	-0.000017	0.000000	0.237173
8% taper	-0.000010	0.000002	0.264995	8% taper	-0.000008	0.000001	0.300581	8% taper	-0.000017	0.000000	0.275479
15% taper	-0.000010	0.000002	0.280011	15% taper	-0.000008	0.000001	0.296668	15% taper	-0.000017	0.000000	0.290584
Variable	W*St^3			Variable	W*St^3			Variable	W*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000930	i.i.d.	0.000000	0.000000	0.003970	i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.296970	4% taper	0.000000	0.000000	0.381467	4% taper	0.000000	0.000000	0.247913
8% taper	0.000000	0.000000	0.294228	8% taper	0.000000	0.000000	0.343558	8% taper	0.000000	0.000000	0.280933
15% taper	0.000000	0.000000	0.293406	15% taper	0.000000	0.000000	0.319891	15% taper	0.000000	0.000000	0.293897
Variable	W*St^4			Variable	W*St^4			Variable	W*St^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000080	i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000006	i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.098867
4% taper	-0.000000	0.000000	0.201422	4% taper	-0.000000	0.000000	0.233235	4% taper	-0.000000	0.000000	0.478065
8% taper	-0.000000	0.000000	0.249266	8% taper	-0.000000	0.000000	0.264716	8% taper	-0.000000	0.000000	0.416259
15% taper	-0.000000	0.000000	0.273022	15% taper	-0.000000	0.000000	0.279473	15% taper	-0.000000	0.000000	0.376204
Variable	W^2			Variable	W^2			Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000089	0.000022	0.414903	i.i.d.	0.000106	0.000017	0.157897	i.i.d.	0.000605	0.000010	0.444684
4% taper	0.000089	0.000050	0.587591	4% taper	0.000106	0.000030	0.260027	4% taper	0.000605	0.000017	0.693208
8% taper	0.000089	0.000049	0.530326	8% taper	0.000106	0.000029	0.279862	8% taper	0.000605	0.000019	0.605836
15% taper	0.000089	0.000047	0.462162	15% taper	0.000106	0.000027	0.288450	15% taper	0.000605	0.000020	0.526651
Variable	W^2*St			Variable	W^2*St			Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000004	0.000000	0.034818	i.i.d.	-0.000005	0.000000	0.005474	i.i.d.	-0.000011	0.000000	0.000007
4% taper	-0.000004	0.000001	0.250528	4% taper	-0.000005	0.000000	0.353231	4% taper	-0.000011	0.000000	0.241031
8% taper	-0.000004	0.000001	0.273093	8% taper	-0.000005	0.000000	0.326701	8% taper	-0.000011	0.000000	0.274117
15% taper	-0.000004	0.000001	0.283954	15% taper	-0.000005	0.000000	0.310396	15% taper	-0.000011	0.000000	0.287568
Variable	W^2*St^2			Variable	W^2*St^2			Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.020850	i.i.d.	0.000000	0.000000	0.034778	i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.358383	4% taper	0.000000	0.000000	0.497983	4% taper	0.000000	0.000000	0.230698
8% taper	0.000000	0.000000	0.333495	8% taper	0.000000	0.000000	0.423665	8% taper	0.000000	0.000000	0.272149
15% taper	0.000000	0.000000	0.313943	15% taper	0.000000	0.000000	0.369356	15% taper	0.000000	0.000000	0.288617
Variable	W^2*St^3			Variable	W^2*St^3			Variable	W^2*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.601228	i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.931916	i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.845272	4% taper	-0.000000	0.000000	0.977028	4% taper	-0.000000	0.000000	0.238082

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

8% taper −0.000000 0.000000 0.795629 15% taper −0.000000 0.000000 0.727940	8% taper −0.000000 0.000000 0.968044 15% taper −0.000000 0.000000 0.956401	8% taper −0.000000 0.000000 0.275813 15% taper −0.000000 0.000000 0.290878
Variable W^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000001 0.000000 0.276924 4% taper 0.000001 0.000000 0.314918 8% taper 0.000001 0.000000 0.312725 15% taper 0.000001 0.000000 0.303334	Variable W^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000002 0.000000 0.140714 4% taper 0.000002 0.000000 0.545324 8% taper 0.000002 0.000000 0.459483 15% taper 0.000002 0.000000 0.393841	Variable W^3 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000001 0.000000 0.241324 4% taper 0.000001 0.000000 0.589139 8% taper 0.000001 0.000000 0.497331 15% taper 0.000001 0.000000 0.424394
Variable W^3*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.912734 4% taper −0.000000 0.000000 0.959762 8% taper −0.000000 0.000000 0.945695 15% taper −0.000000 0.000000 0.926008	Variable W^3*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.535774 4% taper −0.000000 0.000000 0.830141 8% taper −0.000000 0.000000 0.771176 15% taper −0.000000 0.000000 0.703652	Variable W^3*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000000 4% taper 0.000000 0.000000 0.227725 8% taper 0.000000 0.000000 0.270389 15% taper 0.000000 0.000000 0.287256
Variable W^3*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.005669 4% taper −0.000000 0.000000 0.308646 8% taper −0.000000 0.000000 0.299409 15% taper −0.000000 0.000000 0.302324	Variable W^3*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.000041 4% taper −0.000000 0.000000 0.276283 8% taper −0.000000 0.000000 0.289998 15% taper −0.000000 0.000000 0.297144	Variable W^3*St^2 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.022267 4% taper −0.000000 0.000000 0.434068 8% taper −0.000000 0.000000 0.384886 15% taper −0.000000 0.000000 0.355276
Variable W^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.024645 4% taper 0.000000 0.000000 0.345736 8% taper 0.000000 0.000000 0.319127 15% taper 0.000000 0.000000 0.314437	Variable W^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.006051 4% taper 0.000000 0.000000 0.411355 8% taper 0.000000 0.000000 0.368883 15% taper 0.000000 0.000000 0.344719	Variable W^4 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.745952 4% taper 0.000000 0.000000 0.848811 8% taper 0.000000 0.000000 0.791879 15% taper 0.000000 0.000000 0.723662
Variable W^4*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000023 4% taper 0.000000 0.000000 0.276299 8% taper 0.000000 0.000000 0.294709 15% taper 0.000000 0.000000 0.300189	Variable W^4*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.000000 4% taper 0.000000 0.000000 0.228443 8% taper 0.000000 0.000000 0.269869 15% taper 0.000000 0.000000 0.286707	Variable W^4*St NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. 0.000000 0.000000 0.993818 4% taper 0.000000 0.000000 0.993278 8% taper 0.000000 0.000000 0.990514 15% taper 0.000000 0.000000 0.987021
Variable W^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.948713 4% taper −0.000000 0.000000 0.956168 8% taper −0.000000 0.000000 0.934671 15% taper −0.000000 0.000000 0.910353	Variable W^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.051432 4% taper −0.000000 0.000000 0.322660 8% taper −0.000000 0.000000 0.317588 15% taper −0.000000 0.000000 0.311368	Variable W^5 NSE estimate Mean N.S.E. Chi-sq Prob i.i.d. −0.000000 0.000000 0.012728 4% taper −0.000000 0.000000 0.311533 8% taper −0.000000 0.000000 0.312205 15% taper −0.000000 0.000000 0.311750

Tableau A.6 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 11

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Raftery-Lewis Diagnostics for each parameter chain (q=0.0225, r=0.015, s=0.95). Based on sample size = 5500					
TYPE	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	Istat
1	1	11	1144	376	3.07
2	3	19	1965	376	5.27
3	4	51	4919	376	13.08

Tableau A.7 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 11

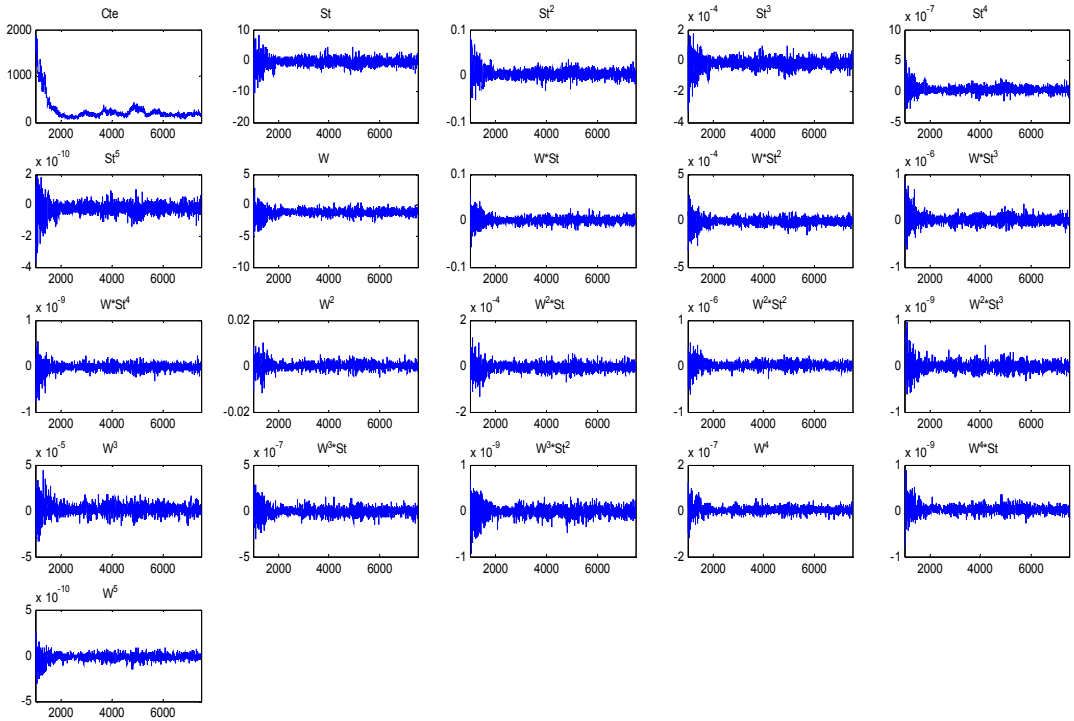


Figure A.13 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 11 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

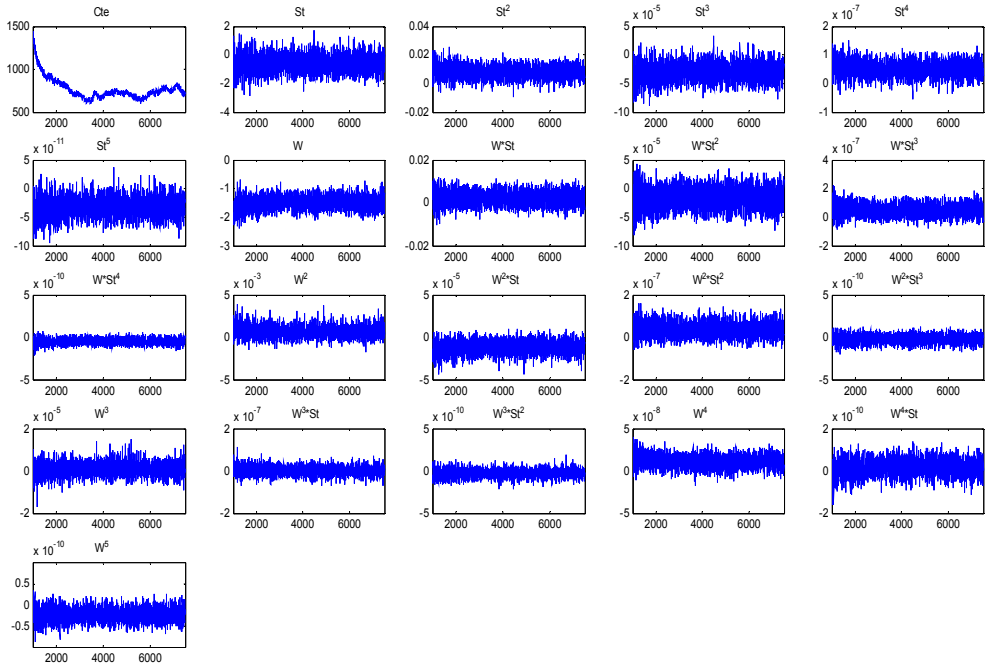


Figure A.14 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 11 ; type 3

Modèle 12 : 5éme dégrée – 4 types

Tous les tests exposés dans le Tableau A.8 indiquent que les coefficients π_k du polynôme n'ont pas convergé après 7500 tours. Malgré que les coefficients auto corrélation ne soient pas très élevés, le diagnostic de Raftery-Lewis demande 118813 tours et d'amincir l'échantillon par 5 car l'I-stat est également très élevé, et tous les RNEs sont très bass. Le diagnostic de Raftery-Lewis (RL) propose de laisser les premiers 423 tirages (Tableau A.8). A l'aide des Figures A.34, A.35, A.36 et A.37 et prenant en compte le test Chi de Geweke (Tableau A.8), nous avons choisit de laisser les premiers 2000 tirages. Après une réduction de la précision souhaitée (q=0.015, r=0.01), ce même diagnostic indique une convergence.

Les diagnostics mis en place pour autres paramètres d'intérêt, σ_k et θ_k , montrent une convergence. Les test de convergence de σ_k ont été effectués sur les éléments de la diagonal principale.

Le calcul des postérieurs est donc accompli à partir de l' échantillon raccourci (des premiers 2 mille tirages).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MCMC CONVERGENCE diagnostics
Based on sample size = 14500

Modèle 6 : 3éme dégrée– 4 types

TYPE 1

Autocorrelations within each parameter chain

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.768	0.445	0.383	0.004
St	0.478	0.074	0.030	-0.029
St^2	0.526	0.116	-0.504	-0.050
St^3	0.683	0.237	-0.343	0.032
St^4	0.811	0.456	0.086	0.082
St^5	0.942	0.717	0.529	0.110
W	0.488	0.041	0.129	-0.016
W*St	0.537	0.207	-0.328	-0.041
W*St^2	0.599	0.142	-0.496	0.022
W*St^3	0.656	0.196	-0.285	0.086
W*St^4	0.578	0.227	-0.124	0.040
W^2	0.606	0.313	-0.213	-0.033
W^2*St	0.650	0.246	-0.285	0.006
W^2*St^2	0.649	0.222	-0.149	0.047
W^2*St^3	0.687	0.314	-0.017	0.029
W^3	0.661	0.353	-0.066	-0.032
W^3*St	0.623	0.258	0.078	-0.031
W^3*St^2	0.590	0.139	0.274	-0.013
W^4	0.647	0.297	0.278	-0.050
W^4*St	0.449	0.078	0.172	0.007
W^5	0.478	-0.094	0.173	0.064

Raftery-Lewis Diagnostics fo each parameter chain
(q=0.0250, r=0.010000, s=0.950000)

Var.	Thin	Burn	Total(N)	(Nmin)	I-stat
Tte Var	5	423	118813	937	126.8

Geweke Diagnostics for each parameter chain

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-942812.6	15552270.4	179582.1	1
St	6786.1	231860.8	2677.3	1
St^2	-27.969	1792.182	20.69	1
St^3	0.375814	8.864685	0.102361	1
St^4	-0.001391	0.022234	0.000257	1
St^5	0.000002	0.000032	0.000000	1
W	-1929.18	113432.53	1309.806116	1
W*St	-30.4	1495.935889	17.273580	1
W*St^2	-0.010	8.632559	0.099680	1

TYPE 2

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.835	0.633	0.624	0.070
St	0.598	0.384	0.179	0.027
St^2	0.514	-0.050	0.253	0.052
St^3	0.775	0.416	0.601	0.088
St^4	0.897	0.694	0.731	0.105
St^5	0.964	0.843	0.773	0.126
W	0.702	0.590	0.439	0.044
W*St	0.517	-0.012	0.296	0.044
W*St^2	0.633	0.123	0.437	0.059
W*St^3	0.804	0.536	0.618	0.093
W*St^4	0.631	0.325	0.438	0.011
W^2	0.537	0.043	0.302	0.053
W^2*St	0.597	0.027	0.379	0.055
W^2*St^2	0.70	0.388	0.498	0.085
W^2*St^3	0.667	0.304	0.402	0.12
W^3	0.47	-0.160	0.296	0.02
W^3*St	0.478	-0.046	0.196	0.011
W^3*St^2	0.75	0.414	0.296	0.006
W^4	0.674	0.242	0.347	-0.007
W^4*St	0.789	0.552	0.365	0.064
W^5	0.749	0.469	0.258	-0.049

Idem Type 1

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-969549.03	13688688.8	158063.36	1
St	-8152.508947	232110.854	2680.18	1
St^2	-40.806213	1985.593	22.927	1
St^3	0.81586	12.08332	0.139526	1
St^4	-0.0026	0.032708	0.000378	1
St^5	0.000004	0.000042	0.0000	1
W	6716.9166	120315.506	1389.28	1
W*St	-29.799093	1648.771	19.038	1
W*St^2	-0.483008	10.31042	0.119	1

TYPE 3

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.832	0.391	0.273	-0.051
St	0.709	0.036	-0.053	-0.057
St^2	0.634	0.023	0.027	0.041
St^3	0.722	0.347	0.275	0.133
St^4	0.853	0.592	0.397	0.174
St^5	0.947	0.736	0.469	0.254
W	0.715	0.037	-0.051	-0.054
W*St	0.579	-0.040	0.063	0.063
W*St^2	0.501	0.137	0.238	0.108
W*St^3	0.692	0.458	0.355	0.124
W*St^4	0.492	0.224	0.206	-0.009
W^2	0.563	-0.009	0.166	0.077
W^2*St	0.361	0.057	0.307	0.082
W^2*St^2	0.55	0.242	0.285	0.075
W^2*St^3	0.63	0.232	0.146	0.115
W^3	0.286	0.138	0.367	0.077
W^3*St	0.523	0.339	0.174	0.108
W^3*St^2	0.51	0.23	-0.176	0.059
W^4	0.491	0.174	0.125	0.099
W^4*St	0.648	0.235	-0.003	0.045
W^5	0.650	0.327	-0.187	-0.002

Idem Type 1

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-184813	16597992	191657	1
St	-2973.5377	339404.27	3919.1	1
St^2	-10.788886	2019.279	23.3166	1
St^3	0.387983	9.312193	0.1075	1
St^4	-0.0014	0.025	0.000289	1
St^5	0.000002	0.000035	0.0000	1
W	2888.247	158754.715	1833.141	1
W*St	-22.266461	1521.548	17.569	1
W*St^2	-0.196	7.988	0.092	1

TYPE 4

Variable	Lag 1	Lag 5	Lag 10	Lag 50
Cte	0.981	0.918	0.788	0.031
St	0.978	0.909	0.798	0.047
St^2	0.974	0.808	0.713	0.038
St^3	0.981	0.800	0.657	0.037
St^4	0.984	0.807	0.626	0.034
St^5	0.981	0.809	0.587	0.030
W	0.952	0.827	0.681	0.038
W*St	0.898	0.402	0.377	0.028
W*St^2	0.940	0.572	0.533	0.044
W*St^3	0.971	0.730	0.583	0.042
W*St^4	0.601	-0.035	0.235	-0.02
W^2	0.856	0.057	-0.114	0.009
W^2*St	0.869	0.140	0.127	0.059
W^2*St^2	0.914	0.406	0.28	0.07
W^2*St^3	0.94	0.478	0.254	0.06
W^3	0.865	0.098	-0.041	0.027
W^3*St	0.884	0.265	0.180	0.057
W^3*St^2	0.75	0.419	0.22	-0.027
W^4	0.864	0.089	-0.196	0.005
W^4*St	0.83	0.154	-0.086	-0.008
W^5	0.697	0.228	0.120	0.001

Idem Type 1

Var.	Mean	std dev	NSEiid	RNEiid
Cte	-277790	3725375	43016	1
St	6229.281	80622.	930	1
St^2	-50.8758	693.767	8.0109	1
St^3	0.372068	5.23	0.06	1
St^4	-0.001142	0.0164	0.00019	1
St^5	0.000002	0.000027	0.000	1
W	-1685.75981	24145.491	278.81	1
W*St	13.806944	233.92628	2.701	1
W*St^2	-0.145818	2.1447	0.0248	1

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

W*St^3	0.00059	0.020024	0.000231	1
W*St^4	0.00000	0.000013	0.000000	1
W^2	12.289	386.526011	4.463218	1
W^2*St	-0.095	4.658674	0.053794	1
W^2*St^2	0.000001	0.0149	0.000172	1
W^2*St^3	0.0000	0.000017	0.0000	1
W^3	0.040471	1.159496	0.013389	1
W^3*St	-0.000124	0.0080	0.000092	1
W^3*St^2	0.0000	0.000016	0.000000	1
W^4	0.000050	0.001512	0.000017	1
W^4*St	0.00000	0.000006	0.000000	1
W^5	0.000000	0.000003	0.000000	1

W*St^3	0.002	0.027916	0.000322	1
W*St^4	-0.000001	0.000014	0.000	1
W^2	8.772922	423.63689	4.8917	1
W^2*St	0.199845	5.026763	0.058	1
W^2*St^2	-0.001093	0.0171	0.0002	1
W^2*St^3	0.000001	0.000018	0.00	1
W^3	-0.009907	0.96975	0.0112	1
W^3*St	0.000088	0.006	0.000072	1
W^3*St^2	0.000001	0.000019	0.00	1
W^4	0.000067	0.002	0.00002	1
W^4*St	-0.000000	0.000010	0.000	1
W^5	0.0000	0.000003	0.000000	1

W*St^3	0.001	0.02219	0.00026	1
W*St^4	-0.0000	0.000013	0.0000	1
W^2	9.803202	364.00	4.203118	1
W^2*St	0.059783	3.6659	0.0423	1
W^2*St^2	-0.00054	0.014	0.00016	1
W^2*St^3	0.000001	0.00002	0.000	1
W^3	-0.0134	0.7512	0.008674	1
W^3*St	0.00023	0.0066	0.000076	1
W^3*St^2	-0.0000	0.000014	0.000	1
W^4	-0.00002	0.0013	0.000015	1
W^4*St	-0.0000	0.000007	0.0000	1
W^5	0.0000	0.000003	0.0000	1

W*St^3	0.000623	0.009	0.0001	1
W*St^4	0.0000	0.000003	0.0000	1
W^2	-1.603271	51.809	0.598	1
W^2*St	0.045243	0.813	0.009	1
W^2*St^2	-0.000246	0.00	0.00004	1
W^2*St^3	0.0000	0.000007	0.0000	1
W^3	-0.007133	0.1833	0.002	1
W^3*St	0.0001	0.0016	0.000019	1
W^3*St^2	0.0000	0.000003	0.000	1
W^4	-0.0000	0.00025	0.0000	1
W^4*St	-0.00000	0.000002	0.000	1
W^5	0.0000	0.000002	0.0000	1

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	895073.371289	0.040254	914169.976	0.038590	921110.773800	0.03801
St	6224.464752	0.185008	6471.980379	0.171127	6567.497509	0.166186
St^2	25.528319	0.657142	26.598747	0.605314	27.014886	0.586809
St^3	0.364747	0.078756	0.368804	0.077032	0.369794	0.076621
St^4	0.001372	0.035030	0.001376	0.034789	0.001375	0.034842
St^5	0.000002	0.023076	0.000002	0.023075	0.000002	0.023183
W	1758.340895	0.554891	1831.247436	0.511588	1859.408901	0.496209
W*St	33.403418	0.267413	31.885263	0.293484	31.085239	0.308785
W*St^2	0.021081	22.358692	0.016393	36.972830	0.013653	53.300883
W*St^3	0.000583	0.157494	0.000586	0.155516	0.000587	0.155347
W*St^4	0.000000	0.571988	0.000000	0.582119	0.000000	0.589695
W^2	12.910669	0.119508	12.573844	0.125997	12.385679	0.129854
W^2*St	0.095822	0.315158	0.095084	0.320072	0.094513	0.323952
W^2*St^2	0.000006	758.259990	0.000004			

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	945587.5097	0.027942	953334.607	0.027490	954941.760810	0.027397
St	8499.907443	0.099426	8307.873294	0.104076	8197.963744	0.106885
St^2	38.925844	0.346931	39.691819	0.333670	39.948456	0.329397
St^3	0.804476	0.030081	0.807210	0.029877	0.806579	0.029924
St^4	0.002605	0.021014	0.002612	0.020908	0.002609	0.020957
St^5	0.000004	0.017900	0.000004	0.017820	0.000004	0.017867
W	6847.656753	0.041162	6763.1854	0.042197	6707.819818	0.042896
W*St	30.743314	0.383494	30.193385	0.397591	29.863669	0.406418
W*St^2	0.478236	0.061974	0.478923	0.061796	0.478122	0.062003
W*St^3	0.001987	0.026328	0.001988	0.026282	0.001985	0.026383
W*St^4	0.000001	0.051062	0.000001	0.051379	0.000001	0.051769
W^2	9.037425	0.292979	8.882145	0.303313	8.788488	0.309812
W^2*St	0.198361	0.085626	0.198405	0.085588	0.197958	0.085974
W^2*St^2	0.001088	0.033218	0.001087			

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	269072.045	0.5073	231891.2332	0.68309	211565.45854	0.82065
St	2779.99317	1.987403	2854.835981	1.884565	2882.060507	1.849129
St^2	16.146815	2.085248	13.755697	2.873203	12.463307	3.499975
St^3	0.401470	0.071736	0.393763	0.074571	0.389224	0.076321
St^4	0.001472	0.038453	0.001455	0.039367	0.001444	0.039993
St^5	0.000002	0.028778	0.000002	0.029200	0.000002	0.029538
W	2705.53552	0.459077	2784.426173	0.433432	2813.667866	0.424469
W*St	21.346169	0.677439	21.715442	0.654595	21.833432	0.647539
W*St^2	0.201985	0.208534	0.198675	0.215542	0.196656	0.219989
W*St^3	0.001101	0.054185	0.001092	0.055029	0.001086	0.055691
W*St^4	0.000000	0.224579	0.000000	0.227207	0.000000	0.229541
W^2	9.606350	0.191437	9.668042	0.189002	9.673747	0.188779
W^2*St	0.060868	0.483636	0.060153	0.495211	0.059679	0.503105
W^2*St^2	0.000549	0.08861	0.000545			

Variable	NSE 4%	RNE 4%	NSE 8%	RNE 8%	NSE 15%	RNE 15%
Cte	280019.48	0.02359	278562.390847	0.023847	277119.986	0.024096
St	6190.4231	0.022615	6188.644809	0.022628	6173.314317	0.022741
St^2	50.585874	0.025079	50.560190	0.025104	50.429373	0.025235
St^3	0.369808	0.026686	0.369670	0.026706	0.368738	0.026841
St^4	0.001135	0.027959	0.001134	0.027983	0.001132	0.028126
St^5	0.000002	0.029911	0.000002	0.029942	0.000002	0.030098
W	1672.123	0.027802	1672.297782	0.027796	1668.495675	0.027923
W*St	13.706929	0.038834	13.708102	0.038828	13.676359	0.039008
W*St^2	0.144641	0.029316	0.144712	0.029287	0.144405	0.029412
W*St^3	0.000618	0.028244	0.000618	0.028242	0.000617	0.028374
W*St^4	0.000000	0.626024	0.000000	0.637296	0.000000	0.645741
W^2	1.588791	0.141781	1.590693	0.141442	1.587813	0.141956
W^2*St	0.044794	0.044001	0.044864	0.043864	0.044791	0.044008
W^2*St^2	0.00024	0.032456	0.000244			

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1507.598659	0.000003	2782.776584		0.033281	0.001084	0.033468		0.090083	0.000541	0.091208		0.032421	0.000244	0.032557	
W^2*St^3	0.000000	1.797015	0.000000	W^2*St^3	0.000001	0.038543	0.000001	W^2*St^3	0.000001	0.0688	0.000001	W^2*St^3	0.00000	0.036064	0.000000
1.905204	0.000000	1.968374		0.038855	0.000001	0.039187		0.06967	0.000001	0.070409		0.036068	0.000000	0.036239	
W^3	0.040152	0.111189	0.040170	W^3	0.009863	1.289049	0.009851	W^3	0.013293	0.425808	0.013341	W^3	0.007044	0.090343	0.007064
0.111089	0.040084	0.111567		1.292070	0.009822	1.299740		0.422756	0.013333	0.423300		0.089853	0.007056	0.090049	
W^3*St	0.000121	0.586643	0.000122	W^3*St	0.000090	0.651562	0.000088	W^3*St	0.000241	0.099681	0.000239	W^3*St	0.000095	0.038768	0.000095
0.576295	0.000122	0.574422		0.670689	0.000088	0.683278		0.101425	0.000238	0.102736		0.038720	0.000095	0.038879	
W^3*St^2	0.000000	0.185068	0.000000	W^3*St^2	0.000001	0.061042	0.000001	W^3*St^2	0.00000	14.522605	0.000000	W^3*St^2	0.00000	0.225325	0.000000
0.185300	0.000000	0.186308		0.060494	0.000001	0.060524		24.512620	0.000000	36.207178		0.225883	0.000000	0.227191	
W^4	0.000049	0.125337	0.000050	W^4	0.000066	0.096430	0.000066	W^4	0.000021	0.531	0.00002	W^4	0.000004	0.687807	0.000004
0.124244	0.000050	0.124379		0.094899	0.000067	0.094647		0.5477	0.00002	0.558410		0.682907	0.000004	0.684183	
W^4*St	0.000000	19.938242	0.000000	W^4*St	0.000000	0.060744	0.000000	W^4*St	0.000000	10.138266	0.000000	W^4*St	0.000000	7.525517	0.000000
17.219506	0.000000	16.243977		0.060076	0.000000	0.060051		13.564655	0.000000	16.172587		7.358227	0.000000	7.311840	
W^5	0.000000	0.661087	0.000000	W^5	0.000000	0.050541	0.000000	W^5	0.000000	0.210468	0.000000	W^5	0.000000	0.101308	0.000000
0.729483	0.000000	0.769888		0.050574	0.000000	0.050826		0.199630	0.000000	0.195884		0.101368	0.000000	0.101873	
Geweke Chi-squared test for each parameter chain															
First 20% versus Last 50% of the sample															
Variable	Cte			Variable	Cte			Variable	Cte			Variable	Cte		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-416.753530	2.520173	0.000000	i.i.d.	-431.549825	1.869115	0.00000	i.i.d.	562.717567	3.901864	0.333234	i.i.d.	769.9615	0.50038	0.0000
4% taper	-416.7537	26.802480	0.193609	4% taper	-431.5499	18.905992	0.20733	4% taper	562.717257	44.742385	0.698126	4% taper	769.961545	4.926859	0.249257
8% taper	-416.7538	34.503389	0.240191	8% taper	-431.5499	24.569734	0.2555	8% taper	562.716545	61.623268	0.614808	8% taper	769.961536	6.271326	0.285195
15% taper	-416.7539	40.527103	0.265462	15% taper	-431.5499	27.832334	0.2764	15% taper	562.7149	80.074938	0.535045	15% taper	769.9615	7.076319	0.297108
Variable	St			Variable	St			Variable	St			Variable	St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	1.232142	0.039512	0.011133	i.i.d.	0.785241	0.035304	0.002292	i.i.d.	-1.098492	0.038832	0.448118	i.i.d.	-0.666491	0.009702	0.000000
4% taper	1.232142	0.104288	0.265674	4% taper	0.785241	0.083492	0.324417	4% taper	-1.098492	0.087732	0.576384	4% taper	-0.666491	0.015659	0.238070
8% taper	1.232142	0.116256	0.276540	8% taper	0.785241	0.083847	0.338122	8% taper	-1.098492	0.095521	0.439940	8% taper	-0.666491	0.013565	0.275609
15% taper	1.232142	0.124807	0.280622	15% taper	0.785241	0.068162	0.328505	15% taper	-1.098492	0.092807	0.385957	15% taper	-0.666491	0.013804	0.290252
Variable	St^2			Variable	St^2			Variable	St^2			Variable	St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.011523	0.000274	0.176516	i.i.d.	-0.008650	0.000251	0.074926	i.i.d.	0.011073	0.000278	0.643200	i.i.d.	0.008410	0.000071	0.000000
4% taper	-0.011523	0.000808	0.255175	4% taper	-0.008650	0.000604	0.204329	4% taper	0.011073	0.000770	0.697899	4% taper	0.008410	0.000119	0.244640
8% taper	-0.011523	0.000920	0.269121	8% taper	-0.008650	0.000633	0.249170	8% taper	0.011073	0.000929	0.610179	8% taper	0.008410	0.000106	0.279145
15% taper	-0.011523	0.001015	0.276697	15% taper	-0.008650	0.000565	0.271225	15% taper	0.011073	0.001054	0.526616	15% taper	0.008410	0.000112	0.292617
Variable	St^3			Variable	St^3			Variable	St^3			Variable	St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob	NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000042	0.000001	0.000229	i.i.d.	0.000033	0.000001	0.000000	i.i.d.	-0.000041	0.000001	0.000293	i.i.d.	-0.000031	0.000000	0.000000
4% taper	0.000042	0.000003	0.179412	4% taper	0.000033	0.000002	0.210183	4% taper	-0.000041	0.000003	0.252964	4% taper	-0.000031	0.000000	0.245803
8% taper	0.000042	0.000003	0.240642	8% taper	0.000033	0.000002	0.261787	8% taper	-0.000041	0.000003	0.285496	8% taper	-0.000031	0.000000	0.279765
15% taper	0.000042	0.000004	0.270321	15% taper	0.000033	0.000002	0.281890	15% taper	-0.000041	0.000004	0.295308	15% taper	-0.000031	0.000000	0.293128

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Variable St^4			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.202008
8% taper	-0.000000	0.000000	0.255435
15% taper	-0.000000	0.000000	0.279129
Variable St^5			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.221694
8% taper	0.000000	0.000000	0.267431
15% taper	0.000000	0.000000	0.286087
Variable W			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.680027	0.015778	0.140678
4% taper	-0.680027	0.039368	0.489710
8% taper	-0.680027	0.041304	0.427724
15% taper	-0.680027	0.047557	0.370953
Variable W*St			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.002800	0.000219	0.078129
4% taper	-0.002800	0.000496	0.401898
8% taper	-0.002800	0.000489	0.377718
15% taper	-0.002800	0.000538	0.352648
Variable W*St^2			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000024	0.000001	0.919619
4% taper	0.000024	0.000003	0.911025
8% taper	0.000024	0.000003	0.871436
15% taper	0.000024	0.000003	0.826138
Variable W*St^3			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.010015
4% taper	-0.000000	0.000000	0.205967
8% taper	-0.000000	0.000000	0.252903
15% taper	-0.000000	0.000000	0.278364
Variable W*St^4			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.190910
4% taper	0.000000	0.000000	0.433566

Variable St^4			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.211434
8% taper	-0.000000	0.000000	0.262823
15% taper	-0.000000	0.000000	0.282831
Variable St^5			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.209466
8% taper	0.000000	0.000000	0.261866
15% taper	0.000000	0.000000	0.282711
Variable W			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.655634	0.014245	0.000001
4% taper	-0.655634	0.027789	0.270918
8% taper	-0.655634	0.026185	0.302100
15% taper	-0.655634	0.022747	0.306238
Variable W*St			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.002446	0.000196	0.117327
4% taper	-0.002446	0.000346	0.352492
8% taper	-0.002446	0.000310	0.344228
15% taper	-0.002446	0.000243	0.330815
Variable W*St^2			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000020	0.000001	0.000046
4% taper	0.000020	0.000002	0.227856
8% taper	0.000020	0.000002	0.273249
15% taper	0.000020	0.000001	0.287805
Variable W*St^3			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.218621
8% taper	-0.000000	0.000000	0.268649
15% taper	-0.000000	0.000000	0.286031
Variable W*St^4			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000009
4% taper	0.000000	0.000000	0.255075

Variable St^4			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.230986
8% taper	0.000000	0.000000	0.274931
15% taper	0.000000	0.000000	0.289848
Variable St^5			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.220772
8% taper	-0.000000	0.000000	0.270662
15% taper	-0.000000	0.000000	0.287925
Variable W			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-1.367302	0.015699	0.114707
4% taper	-1.367302	0.038279	0.349845
8% taper	-1.367302	0.044177	0.301954
15% taper	-1.367302	0.053002	0.302651
Variable W*St			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.002719	0.000216	0.204773
4% taper	0.002719	0.000425	0.371704
8% taper	0.002719	0.000393	0.354390
15% taper	0.002719	0.000361	0.333802
Variable W*St^2			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000023	0.000001	0.032998
4% taper	-0.000023	0.000003	0.261692
8% taper	-0.000023	0.000003	0.279883
15% taper	-0.000023	0.000003	0.291964
Variable W*St^3			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000019
4% taper	0.000000	0.000000	0.224452
8% taper	0.000000	0.000000	0.266679
15% taper	0.000000	0.000000	0.285445
Variable W*St^4			
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.035593
4% taper	-0.000000	0.000000	0.289599

Variable St^4			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.247772
8% taper	0.000000	0.000000	0.280784
15% taper	0.000000	0.000000	0.293763
Variable St^5			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.254888
8% taper	-0.000000	0.000000	0.284305
15% taper	-0.000000	0.000000	0.295856
Variable W			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-1.462472	0.003645	0.000000
4% taper	-1.462472	0.007421	0.241231
8% taper	-1.462472	0.007866	0.276505
15% taper	-1.462472	0.007425	0.290135
Variable W*St			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.002163	0.000057	0.000000
4% taper	0.002163	0.000107	0.247624
8% taper	0.002163	0.000111	0.280014
15% taper	0.002163	0.000107	0.292535
Variable W*St^2			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000018	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000018	0.000001	0.239269
8% taper	-0.000018	0.000001	0.276317
15% taper	-0.000018	0.000001	0.291103
Variable W*St^3			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.243386
8% taper	0.000000	0.000000	0.278563
15% taper	0.000000	0.000000	0.29251
Variable W*St^4			
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.211500
4% taper	-0.000000	0.000000	0.532503

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

8% taper	0.000000	0.000000	0.384489
15% taper	0.000000	0.000000	0.352330
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000421	0.000058	0.005796
4% taper	-0.000421	0.000134	0.326732
8% taper	-0.000421	0.000131	0.326765
15% taper	-0.000421	0.000126	0.319617
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000008	0.000001	0.077361
4% taper	0.000008	0.000001	0.363384
8% taper	0.000008	0.000001	0.331873
15% taper	0.000008	0.000001	0.318470
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.996685
4% taper	-0.000000	0.000000	0.997327
8% taper	-0.000000	0.000000	0.995904
15% taper	-0.000000	0.000000	0.994454
Variable	W^2*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.480164
4% taper	-0.000000	0.000000	0.644422
8% taper	-0.000000	0.000000	0.543723
15% taper	-0.000000	0.000000	0.474827
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.002445
4% taper	0.000000	0.000000	0.281156
8% taper	0.000000	0.000000	0.289104
15% taper	0.000000	0.000000	0.295037
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.180406
4% taper	-0.000000	0.000000	0.478616
8% taper	-0.000000	0.000000	0.401461
15% taper	-0.000000	0.000000	0.359193
Variable	W^3*St^2		

8% taper	0.000000	0.000000	0.288861
15% taper	0.000000	0.000000	0.296081
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000273	0.000049	0.072653
4% taper	-0.000273	0.000123	0.362974
8% taper	-0.000273	0.000129	0.351434
15% taper	-0.000273	0.000121	0.335296
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000009	0.000001	0.000553
4% taper	0.000009	0.000001	0.240737
8% taper	0.000009	0.000001	0.279721
15% taper	0.000009	0.000001	0.290636
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.220231
8% taper	-0.000000	0.000000	0.269998
15% taper	-0.000000	0.000000	0.286373
Variable	W^2*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.211590
8% taper	0.000000	0.000000	0.265930
15% taper	0.000000	0.000000	0.284402
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000001	0.000000	0.376249
4% taper	-0.000001	0.000000	0.510624
8% taper	-0.000001	0.000000	0.438667
15% taper	-0.000001	0.000000	0.380491
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.226208
4% taper	0.000000	0.000000	0.421903
8% taper	0.000000	0.000000	0.379820
15% taper	0.000000	0.000000	0.344087
Variable	W^3*St^2		

8% taper	-0.000000	0.000000	0.288624
15% taper	-0.000000	0.000000	0.294581
Variable	W^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000554	0.000053	0.019510
4% taper	0.000554	0.000164	0.272162
8% taper	0.000554	0.000184	0.301605
15% taper	0.000554	0.000202	0.303813
Variable	W^2*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000010	0.000001	0.157580
4% taper	-0.000010	0.000002	0.246493
8% taper	-0.000010	0.000002	0.259961
15% taper	-0.000010	0.000002	0.28039
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000853
4% taper	0.000000	0.000000	0.224866
8% taper	0.000000	0.000000	0.263508
15% taper	0.000000	0.000000	0.283220
Variable	W^2*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000142
4% taper	0.000000	0.000000	0.205837
8% taper	0.000000	0.000000	0.255735
15% taper	0.000000	0.000000	0.278490
Variable	W^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000002	0.000000	0.119727
4% taper	0.000002	0.000000	0.172168
8% taper	0.000002	0.000000	0.213849
15% taper	0.000002	0.000000	0.254208
Variable	W^3*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.001688
4% taper	0.000000	0.000000	0.220134
8% taper	0.000000	0.000000	0.259223
15% taper	0.000000	0.000000	0.280781
Variable	W^3*St^2		

8% taper	-0.000000	0.000000	0.459773
15% taper	-0.000000	0.000000	0.406572
Variable	W^2		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000505	0.000013	0.007231
4% taper	0.000505	0.000020	0.279666
8% taper	0.000505	0.000022	0.292214
15% taper	0.000505	0.000022	0.296481
Variable	W^2*St		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000010	0.000000	0.000001
4% taper	-0.000010	0.000000	0.215614
8% taper	-0.000010	0.000000	0.264267
15% taper	-0.000010	0.000000	0.283845
Variable	W^2*St^2		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	0.000000	0.000000	0.220912
8% taper	0.000000	0.000000	0.267607
15% taper	0.000000	0.000000	0.286230
Variable	W^2*St^3		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.234416
8% taper	-0.000000	0.000000	0.274230
15% taper	-0.000000	0.000000	0.290163
Variable	W^3		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000001	0.000000	0.000726
4% taper	0.000001	0.000000	0.244355
8% taper	0.000001	0.000000	0.275077
15% taper	0.000001	0.000000	0.287457
Variable	W^3*St		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000000
4% taper	-0.000000	0.000000	0.221405
8% taper	-0.000000	0.000000	0.267740
15% taper	-0.000000	0.000000	0.286084
Variable	W^3*St^2		

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.019247
4% taper	0.000000	0.000000	0.313037
8% taper	0.000000	0.000000	0.309383
15% taper	0.000000	0.000000	0.307629
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.004039
4% taper	-0.000000	0.000000	0.300802
8% taper	-0.000000	0.000000	0.300599
15% taper	-0.000000	0.000000	0.302073
Variable	W^4*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.793434
4% taper	-0.000000	0.000000	0.824293
8% taper	-0.000000	0.000000	0.756434
15% taper	-0.000000	0.000000	0.678738
Variable	W^5		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.265920
4% taper	0.000000	0.000000	0.417066
8% taper	0.000000	0.000000	0.388373
15% taper	0.000000	0.000000	0.361465

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000036
4% taper	0.000000	0.000000	0.272414
8% taper	0.000000	0.000000	0.291624
15% taper	0.000000	0.000000	0.297936
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000945
4% taper	-0.000000	0.000000	0.286340
8% taper	-0.000000	0.000000	0.294604
15% taper	-0.000000	0.000000	0.298370
Variable	W^4*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.000033
4% taper	-0.000000	0.000000	0.266342
8% taper	-0.000000	0.000000	0.287077
15% taper	-0.000000	0.000000	0.294386
Variable	W^5		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.000007
4% taper	0.000000	0.000000	0.282864
8% taper	0.000000	0.000000	0.298190
15% taper	0.000000	0.000000	0.302005

NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.911749
4% taper	-0.000000	0.000000	0.879986
8% taper	-0.000000	0.000000	0.841985
15% taper	-0.000000	0.000000	0.787081
Variable	W^4		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.180811
4% taper	0.000000	0.000000	0.307359
8% taper	0.000000	0.000000	0.295924
15% taper	0.000000	0.000000	0.296973
Variable	W^4*St		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.820330
4% taper	0.000000	0.000000	0.876960
8% taper	0.000000	0.000000	0.846059
15% taper	0.000000	0.000000	0.795313
Variable	W^5		
NSE estimate	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.020324
4% taper	-0.000000	0.000000	0.174303
8% taper	-0.000000	0.000000	0.226798
15% taper	-0.000000	0.000000	0.262501

NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.034118
4% taper	-0.000000	0.000000	0.428391
8% taper	-0.000000	0.000000	0.380739
15% taper	-0.000000	0.000000	0.352567
Variable	W^4		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.221402
4% taper	0.000000	0.000000	0.410107
8% taper	0.000000	0.000000	0.362990
15% taper	0.000000	0.000000	0.333936
Variable	W^4*St		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	0.000000	0.000000	0.706834
4% taper	0.000000	0.000000	0.748670
8% taper	0.000000	0.000000	0.665207
15% taper	0.000000	0.000000	0.578229
Variable	W^5		
NSE est	Mean	N.S.E.	Chi-sq Prob
i.i.d.	-0.000000	0.000000	0.001523
4% taper	-0.000000	0.000000	0.289702
8% taper	-0.000000	0.000000	0.301017
15% taper	-0.000000	0.000000	0.305355

Tableau A.8 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 12

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

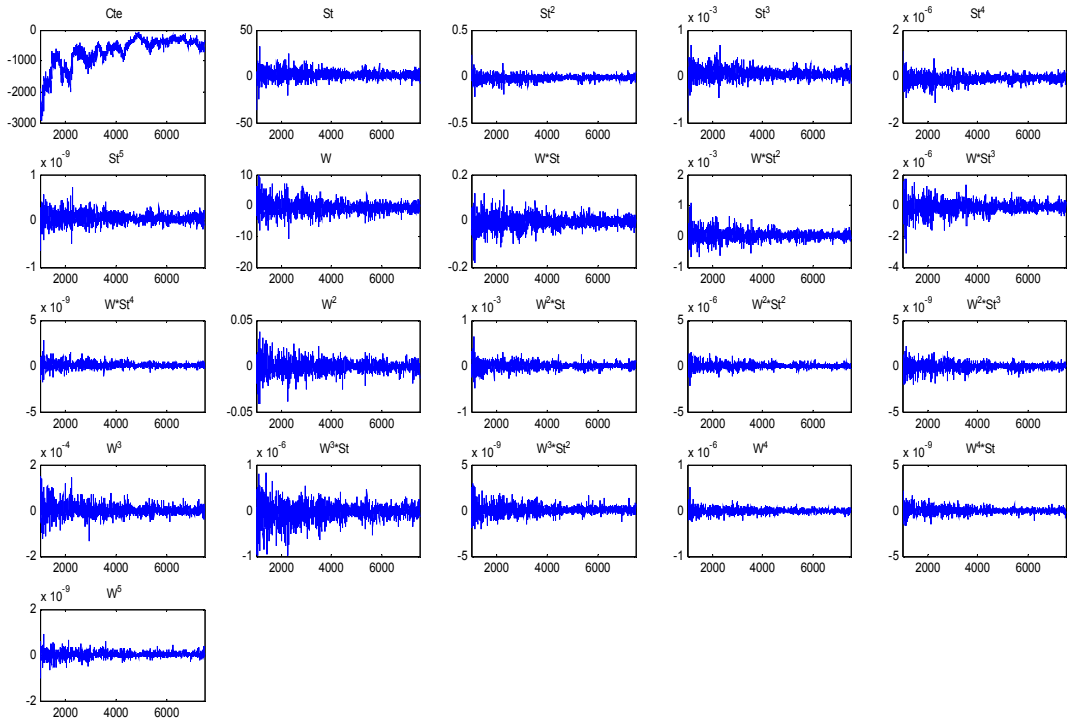


Figure A.15 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 1

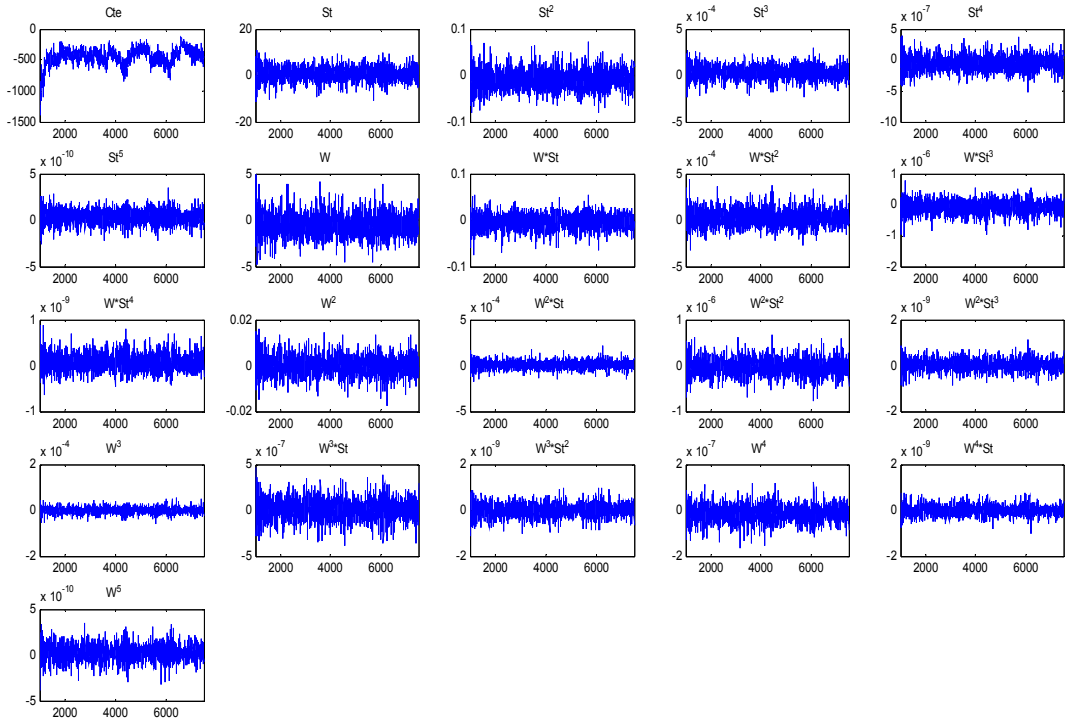


Figure A.16 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

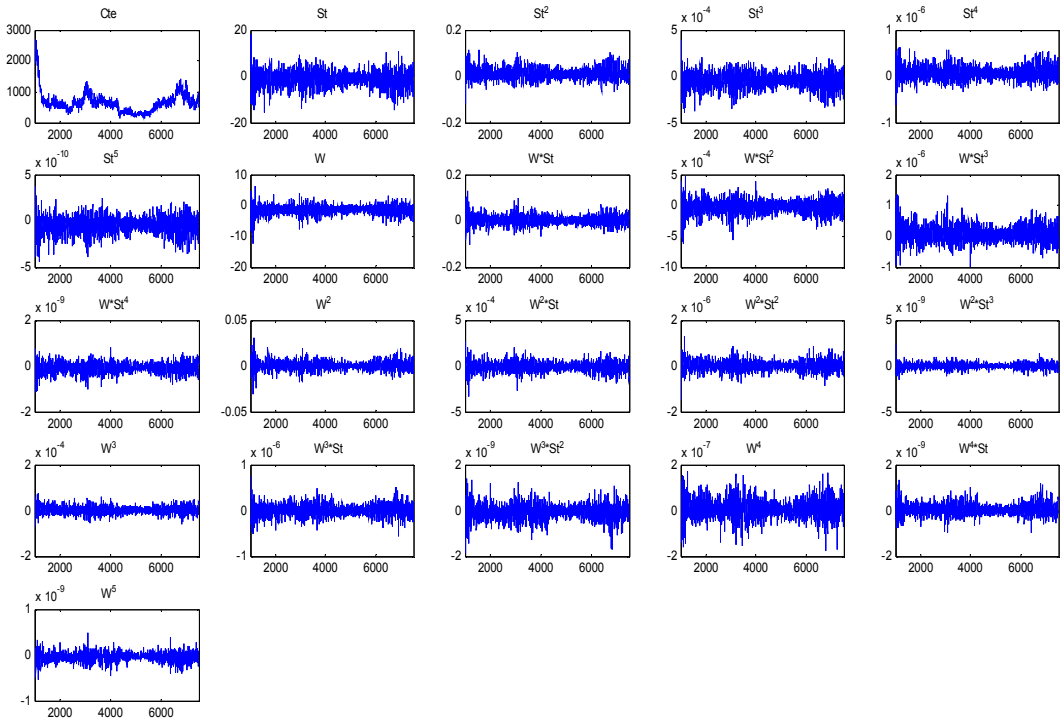


Figure A.17 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 3

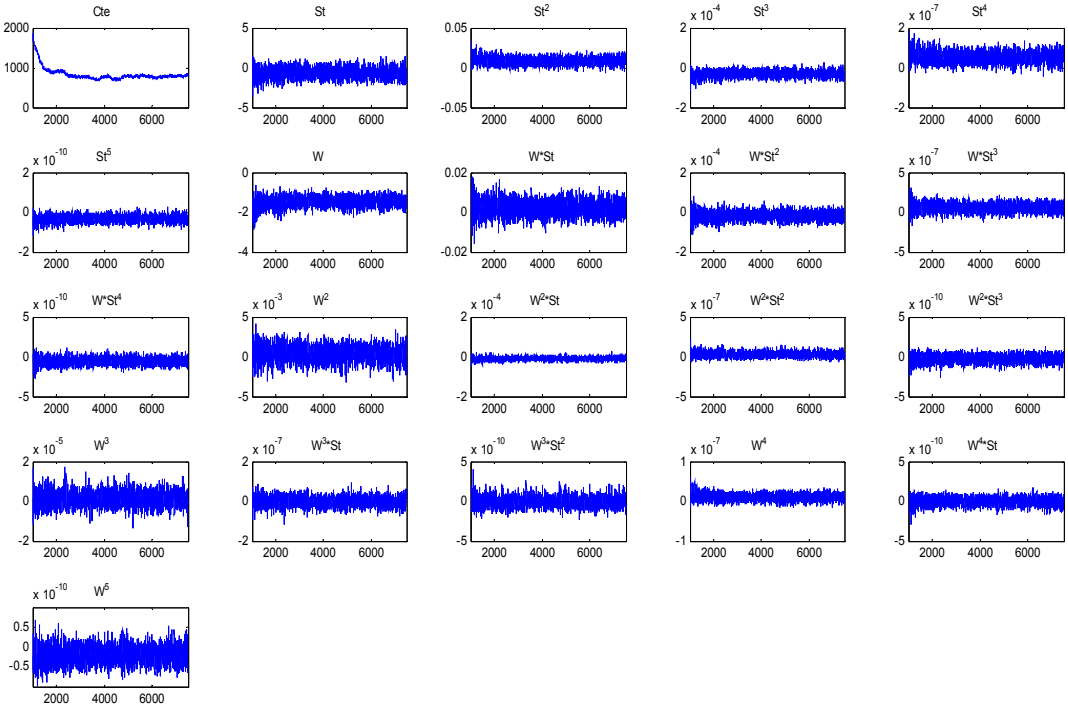


Figure A.18 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4. Régressions linéaires des coefficients de la taxe myope par rapport au temps

Le taux de la taxe myope est représenté par un polynôme de premier degré sous le stock de la ressource (S^t) et la période t (Tableau 3.4) :

$$\tau^t = \kappa^t = S^t \times (0{,}0098 - t \times 0{,}00076603) + t \times 0{,}004 - 0{,}6342 \qquad \text{(A.10)}$$

Pour construire ce polynôme, nous avons calculé des régressions linéaires sur les valeurs des coefficients du taux de la taxe myope (équation 2.17 du chapitre 2) par rapport au temps. Ces coefficients sont exposés dans le Tableau A.9.

	Variables		
Période	Stock	Recharge	Constante
1	0,01	0,031139021	-1,94634364
2	0,008294767	0,024889541	-1,86632253
3	0,0078125	0,019140553	-1,7578125
4	0,007138994	0,014090696	-1,60627366
5	0,006163435	0,010060043	-1,38677285
6	0,004683196	0,007598166	-1,05371901
7	0,00440051	0,004888958	-0,9901148
8	0,003875236	0,002173913	-0,87192817
9	0,002777778	0	-0,625
10	0	0	0

Tableau A.9 : Coefficients de la taxe pigouvienne flexible myope (premier rang) pour chaque période

Régression sur les coefficients de la variable Stock

```
      Source |       SS       df       MS              Number of obs =      72
-------------+------------------------------           F(  1,    70) = 3194.00
       Model |  .000282489     1  .000282489           Prob > F      =  0.0000
    Residual |  6.1911e-06    70  8.8444e-08           R-squared     =  0.9786
-------------+------------------------------           Adj R-squared =  0.9782
       Total |   .00028868    71  4.0659e-06           Root MSE      =   .0003

------------------------------------------------------------------------------
       Stock |      Coef.   Std. Err.      t    P>|t|     [95% Conf. Intervalle]
-------------+----------------------------------------------------------------
      période |  -.0007671   .0000136   -56.52   0.000    -.0007942   -.0007401
       _cons |   .0098132   .0000764   128.47   0.000     .0096608    .0099655
------------------------------------------------------------------------------
```

Régression sur les coefficients de la recharge

```
. reg re x if(x<9)

.    Source |       SS       df       MS              Number of obs =      64
-------------+------------------------------           F(  1,    62) = 1807.13
       Model |  .005550714     1  .005550714           Prob > F      =  0.0000
    Residual |  .000190437    62  3.0716e-06           R-squared     =  0.9668
-------------+------------------------------           Adj R-squared =  0.9663
       Total |  .005741151    63  .000091129           Root MSE      =  .00175

------------------------------------------------------------------------------
    Recharge |      Coeff.   Std. Err.      t    P>|t|     [95% Conf. Interval]
-------------+----------------------------------------------------------------
      period |  -.0040645   .0000956   -42.51   0.000    -.0042556   -.0038734
```


CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

```
       _cons |   .0325378   .0004828    67.39   0.000     .0315726    .0335029
------------------------------------------------------------------------------
```

Régression sur la constante

```
. reg to x

      Source |       SS       df       MS              Number of obs =      72
-------------+------------------------------           F(  1,    70) = 3193.92
       Model |  14.3009766     1  14.3009766           Prob > F      =  0.0000
    Residual |   .31342905    70  .004477558           R-squared     =  0.9786
-------------+------------------------------           Adj R-squared =  0.9782
       Total |  14.6144057    71  .205836699           Root MSE      =  .06691

------------------------------------------------------------------------------
        Cons |      Coef.   Std. Err.      t    P>|t|     [95% Conf. Intervalle]
-------------+----------------------------------------------------------------
      période |   .1726085   .0030542    56.51   0.000     .1665171       .1787
       _cons |  -2.207964    .017187  -128.47   0.000    -2.242242   -2.173685
------------------------------------------------------------------------------
```

5. Annexe de Figures : Les trajectoires de prélèvement moyen par groupe (toutes les séries confondues)

Instruments flexibles

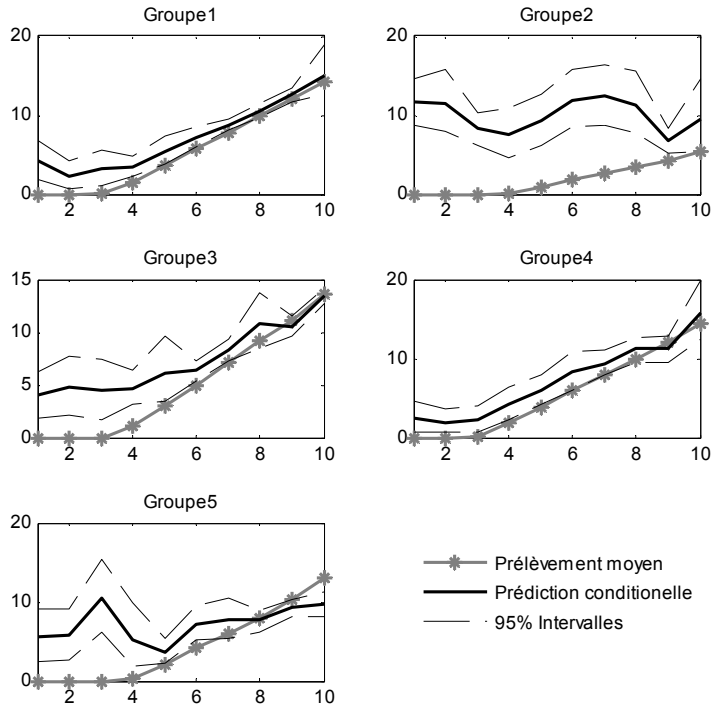


Figure A.19 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TAFU. Instruments temporellement incohérents

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

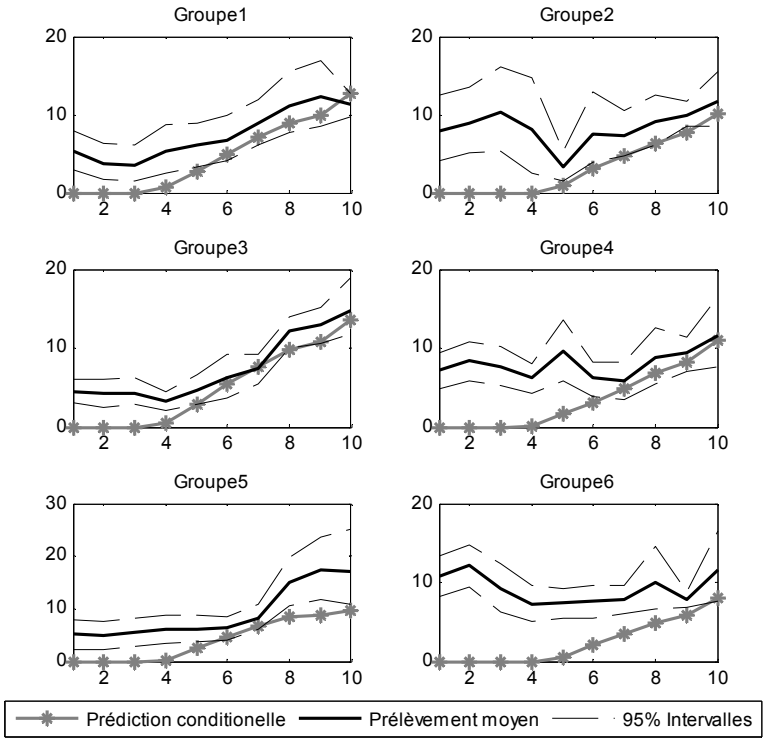


Figure A.20 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement IMFU

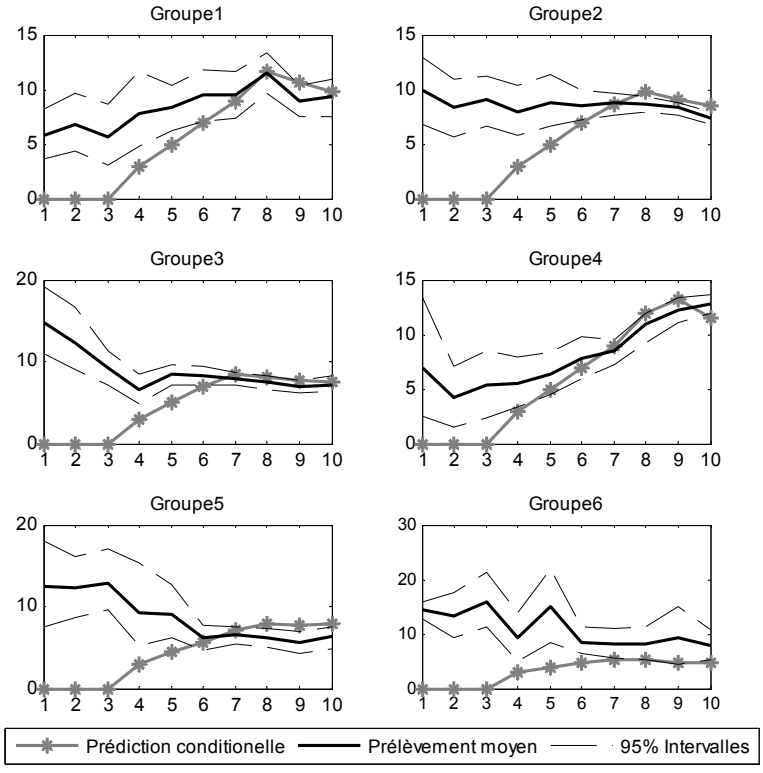


Figure A.21 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupes ; traitement TPNFUO

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

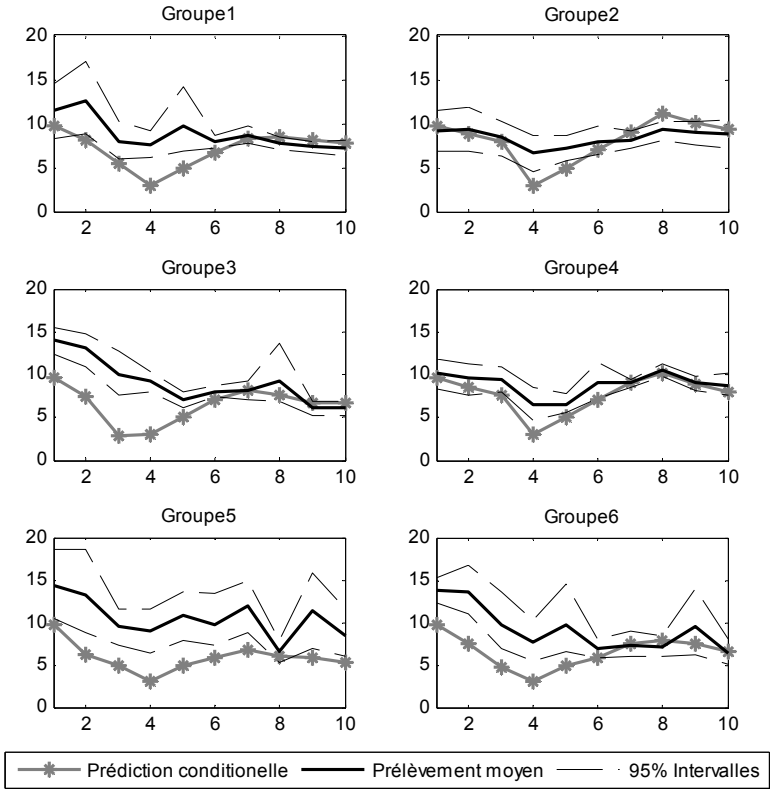


Figure A.22 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TPNFU

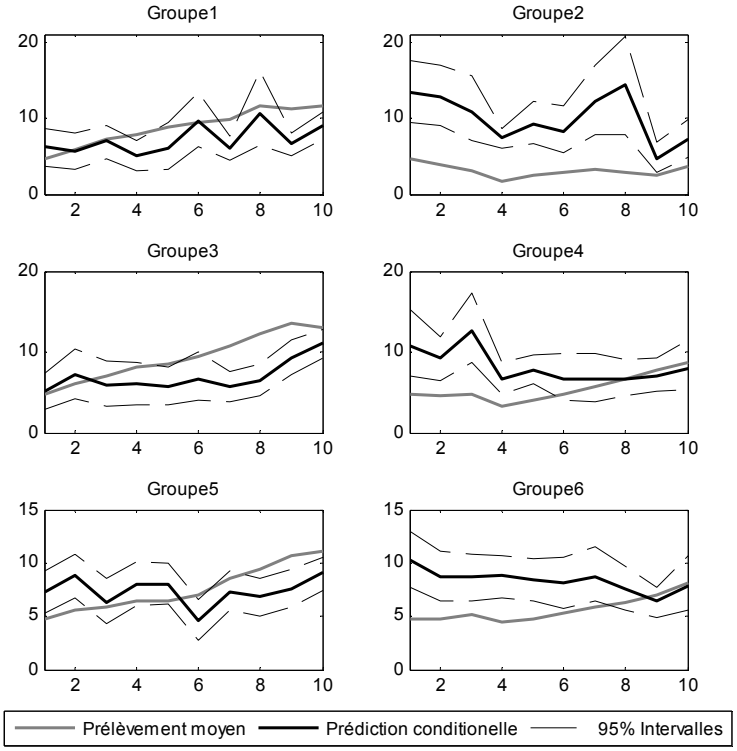


Figure A.23 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TANFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

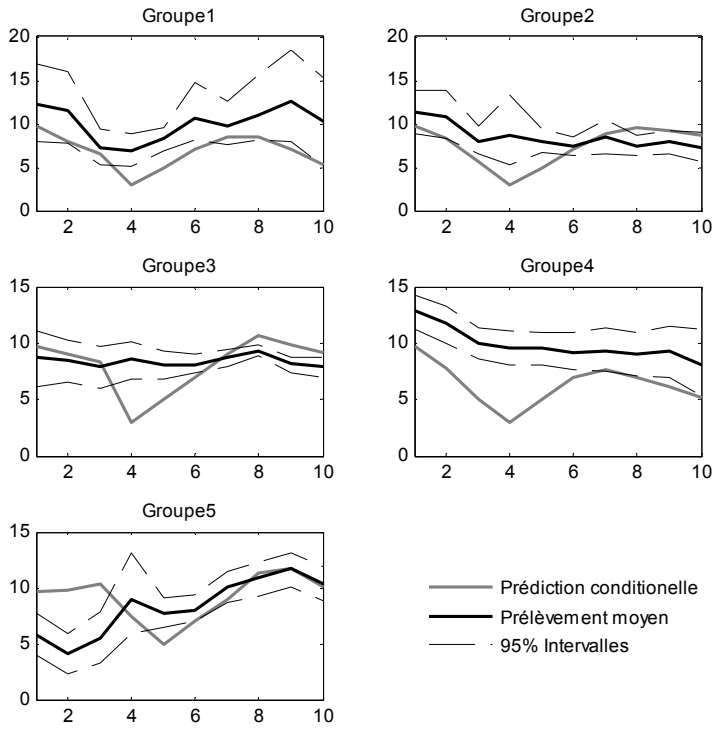


Figure A.24 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement IMNFU

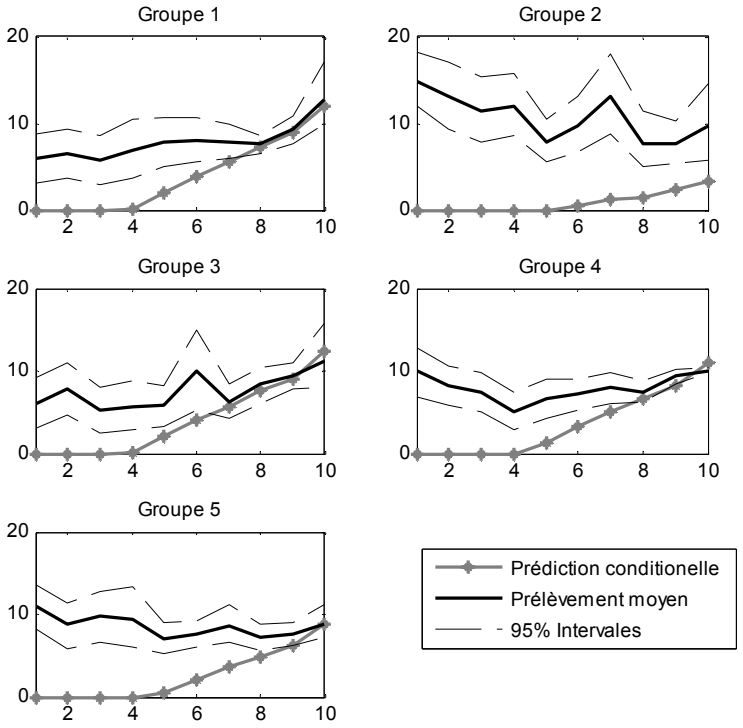


Figure A.25 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TPFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Bibliographie

Abbink K., Irlenbusch B., Pezanis-Christou P., Rockenbach B., Sadrieh A. et Selten R., (2004), “An Experimental Test of Design Alternatives for the British 3G/UMTS Auction”, *European Economic Review*, 49(2), 505-530.

Agence de l'Eau RMC, BRGM, Chambre d'agriculture des Pyrénées-Orientales, Conseil Général des Pyrénées-Orientales, Direction Départementale de l'agriculture et de la Forêt des Pyrénées-Orientales, Direction Régionale de l'Environnement du Languedoc-Roussillon, et Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales des Pyrénées-Orientales (2003) « Connaissance des eaux souterraines de la plaine du Roussillon : Etat des lieux », Perpignan, France, 47 p.

Allingham M.G. et Sandomo A., (1972), "Income Tax Evasion: a Theoretical Analysis", *Journal of Public Economics*, 1, 323-338.

Alm J., McClelland G.H. et Schulze W.D., (1992), “Why do people pay taxes?”, *Journal of Public Economics*, 48(1), 21-38.

Alpizar F., Schram A. et Requate T., (2004), “Collective versus Random Fining: An Experimental Study on Controlling Ambient Pollution,” *Environmental and Resource Economics*, 29, 231-252.

Amigues J.P., Favard P. et Moreaux M., (2001), “Faut-il s'inquiéter de la baisse du niveau des aquifères ? ”, *Economie et prévision* 148(2), 127-139.

Aunay B., Duvail C., Giordana G.A., Dörfliger N., Montginoul M. and Le Strat P., (2006), “Challenges on the sustainable development of coastal groundwater resources. Integrated geological, hydrogeological and economic studies of the Roussillon aquifer (France)”, *Life and Environment*, 56(4), 276-286.

Aunay Bertrand (2007) « Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers », *Thèse de doctorat*, Université Montpellier 2.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Banks J., Ledyard J. et Porter D., (1989), "Allocating Uncertain and Unresponsive Resources", *The RAND Journal of Economics*, 20(1), 1-25.

Banks J., Olson M., Porter D., Rassenti S. et Smith V., (2003), "Theory, Experiment and the Federal Communication Commission Spectrum Auction", *Journal of Economic Behavior and Organization*, 51(3), 303-350.

Bardsley N., (2005), "Experimental economics and the artificiality of alteration", *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 239-251.

Basar T. et Olsder G.J., (1999), *Dynamic Noncooperative Game Theory*, Philadelphia, SIAM.

Baumol W.J. et Oates W.E., (1988), *The theory of environmental policy*. Second Edition (eds. Cambridge), Cambridge University Press. 299 p.

Bchir M.A., Daures N. et Willinger M., (2007), « Tolérance de la fraude et évasion fiscale : une analyse expérimentale du modèle de Greenberg », *Economie et prévision*, à apparaître.

Becker G.S. et Mulligan C.B., (1997), "The Endogenous Determination of Time Preference", *Quarterly Journal of Economics*, 112(3), 729-758.

Becker G.S., (1968), "Crime and Punishment: An Economic Approach", *Journal of Political Economy*, 76, 169-217.

Binmore K. et Klemperer P., (2002), "The Biggest Auction Ever: The Sale of the British 3G Telecom Licences", *Economic Journal*, 112, C74-C96.

Bohm P. et Russell C.S., (1985), *Comparative Analysis of Alternative Policy Instruments*, in Handbook of Natural Resource and Energy Economics, edited by A.V. Kneese and J.L. Sweeney. Amsterdam, New York, Oxford: North Holland.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Brozovic N., Sunding D. et Zilberman D., (2006), *Optimal management of groundwater in space and time*. Chapter 6 in Frontiers in Water Resource Economics, edited by Dinar A. and Zilberman D., Springer

Burt O.R., (1964), "The economics of conjunctive use of ground and surface water", *Hilgardia*, 32, 31-111.

Burt O.R., (1970), "Groundwater storage control under institutional restrictions", *Water Resources Research*, 6, 1540-1548.

Cabe, R. et Herriges J., (1992), 'The Regulation of Nonpoint-Source Pollution Under Imperfect and Asymmetric Information', *Journal of Environmental Economics and Management*, 22, 34–146.

Cardenas J.C., (2003), "Real wealth and experimental cooperation: experiments in the field lab", *Journal of Development Economics*, Elsevier, vol. 70(2), pages 263-289, April.

Cason T.N. et Gangadharan L., (1998), "An Experimental Study of Electronic Bulletin Board Trading for Emission Permits", *Journal of Regulatory Economics*, 14, 55-73.

Cason T.N. et Plott C.R., (1996), "EPA's New Emissions Trading Mechanism: A Laboratory Evaluation", *Journal of Environmental Economics and Management*, 30, 133-160.

Cason T.N., (1995), "An Experimental Investigation of the Seller Incentives in EPA's Emission Trading Auction", *American Economic Review*, 85, 905-922.

Caussade B., Moreaux M. et Reynaud A., (2000), "Redevances et prélèvements optimaux dans les aquifères côtiers menacés d'intrusion saline : les principes de base », *Economie et Prévision*, 143-144 (2-3), 155-173.

Coase R.H., (1960), "The problem of social cost", *The journal of Law and Economics*, 3, 1-44.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Cochard F., Willinger M. et Xepapadeas A., (2005), “Efficiency of Nonpoint Source Pollution Instruments: An Experimental Study”, *Environmental and Resource Economics*, 2005, 30(4), 393-422.

Cole, D.H. et Grossman P.Z., (2002), "The Meaning of Property Rights: Law versus Economics?", *Land Economics*, 78(3), 317-330.

Conlisk, J., (1996), "Why Bounded Rationality?" *Journal of Economic Literature*, American Economic Association, 34(2), 669-700.

Cowell F.A., (1981), “Taxation and labor supply with risky activities”, *Economica*, 48, 365–379.

Cummings R.G. et McFarland W., (1974), « Optimum exploitation of groundwater reserves with saltwater intrusion”, *Water Resources Research,* 10(5), 909-15.

Cummings R.G., (1971), “Optimum exploitation of groundwater reserves with saltwater intrusion”, *Water Resources Research*, 7(6), 1415-24.

Dasgupta P., (1991), *The Environment as a Commodity*, ed. D. Helm. Oxford, Blackwell Publishers.

Dinar A., Howitt R.E., Rassenti S.J. et Smith V.L., (1998), “Development of Water Markets Using Experimental Laboratory Experiments”, In Markets for Water: Potential and Performance, *Natural Resource Management and Policy Series*. K. W. Easter, M. W. Rosegrant and A.Dinar. Boston; Dordrecht and London, Kluwer Academic: 259-75.

Efron B., Hordan R., Jolivet E., Yahi N. et Saporta G., (2001), *Le bootstrap et ses applications*, CISIA-CERESTA Editions.

Farzin Y., (1996), “Optimal pricing of environmental and natural resource use with stock externalities”, *Journal of Public Economics*, 62, 31–57.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Fiore S., Harrison G., Hughes C., Rutström E. (2007) "Virtual Experiments and Environmental Policy", *Frontiers of Environmental Economics*, Washington, Febrery 2007.

Fischbacher U., (2007), "z-Tree: Zurich toolbox for ready-made economic experiments", *Experimental Economics,* 10(2), 171-178.

Fudenberg D. et Tirole J., (1991), *Game Theory*, MIT press.

Geweke J., (1991), "Efficient simulation from the multivariate normal and student-t distributions subject to linear constraints". In: *Computer Science and Statistics: Proceedings of the Twenty-Third Symposium on the Interface*, Alexandria, VAt American Statistical Association, 571-578.

Geweke J., (1992), *Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments*, in Berger J.O., Bernardo J.M, Dawid A.P. et Smith A.F.M. (Eds.).

Geweke, J., Keane, M. and Runkle D. (1994), "Alternative computational approaches to inference in the multinomial probit model", *The Review of Economics and Statistics*, 76(4), 609-632.

Giordana G.A. et Montginoul M., (2006), "Policy instruments to fight against seawater intrusion in coastal aquifers: an overview", *Life and Environment,* 56(4), 287-294.

Giordana, G. A. et Montginoul M., (2004), "Synthèse bibliographique des instruments de gestion de l'eau instaurés pour faire face aux intrusions d'eau saline ». *Irrigation "Rapports"*. C. IRMO. Montpellier, Cemagref.

Gisser M. et Sanchez D.A., (1980), « Competition versus optimal control in groundwater pumping", *Water Resources Research*, 16, 638-642.

Greenberg J., (1984), "Avoiding tax avoidance: A (repeated) game-theoretic approach", *Journal of Economic Theory*, 32(1), 1-13.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Grether D.M., Isaac R. et Plott C.R., (1989), *The Allocation of Scarce Resources: Experimental Economics and the Problem of Allocating Airport Slots,* Westview Press, Boulder, CO.

Grether D.M., Isaac R.M. et Plott C.R., (1981), "The Allocation of Landing Rights by Unanimity among Competitors", *American Economic Review*, 71, 166-71.

GWP, (2000), *Integrated water resource management*, Global Water Partnership, Stockholm, 70 p.

Hahn, R. W., (1992), "Stavins, R. N. "Economic Incentives for Environmental Protection: Integrating Theory and Practice", *American Economic Review*, 82(2), 464–8.

Hansen, L.G. (1998), "A Damage Based Tax Mechanism for Regulation of Non-Point Emissions", *Environmental and Resource Economics*, 12, 99-112.

Hardin G., (1968), "The Tragedy of the Commons", *Science*, 162, 1243-48.

Harrington W., (1988), "Enforcement leverage when penalties are restricted", *Journal of Public Economics*, 37(1), 29-53.

Harrison G.W. et Lesley J.C., (1996), "Must Contingent Valuation Surveys Cost So Much?", *Journal of Environmental Economics and Management*, 31(1), 79-95.

Harrison G.W. et List J.A., "Field Experiments," *Journal of Economic Literature*, 42(4), 1009-1055

Helm, D. et Pearce D., (1991), *Economic Policy towards the Environment: an Overview*, ed. D. Helm. Oxford, Blackwell Publishers, p. 1-24.

Herr, A., Gardner R. et Walker J., (1997), "An Experimental Study of Time-Independent and Time-Dependent Externalities in the Commons", *Games and Economic Behavior*, 19(1), 77-96.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Hogarth R.M., (2005), "The challenge of representative design in psychology and economics", *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 253-263.

Horan, R.D., Shortle J.S. et Abler D. (1998). "Ambient Taxes When Polluters Have Multiple Choices" *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(2), 186-199.

Houser D., Keane M. et McCabe K., (2004), "Behavior in a dynamic decision problem: An analysis of experimental evidence using a Bayesian type classification algorithm", *Econometrica*, 72(3), 781–822.

Ishikida T., Ledyard J., Olson M. et Porter D., (2001), *Experimental Test Bedding of a Pollution Trading System: Southern California's Reclaim Emissions Market*, in R.M. Isaac (Ed.) Research in Experimental Economics, 8.

Knapp K.C. et Olson L.J., (1995). "The economics of conjunctive groundwater management with stochastic surface supplies" *Journal of Environmental Economics and Management*, 28(3), 340-356.

Ko I.D., Lapan H.E. et Sandler T., (1992), "Controlling Stock Externalities: Flexible versus Inflexible Pigouvian Corrections", *European Economic Review*, 36(6), 1263-76.

Kopelman S., Weber, J.M. et Messick D.M., (2002), *Factors influencing cooperation in commons dilemmas: A review of experimental psychological research*. In E.T. Ostrom, Dietz, N. Dolsak, P. C. Stern, S. Sonich & E. U. Weber (Eds.), The drama of the commons. Washington, DC: National Academy Press.

Koundouri P., (2004a), "Current Issues in the Economics of Groundwater Resource Management", *Journal Economic Surveys*, 18(5), 703-740.

Koundouri P., (2004b), "Potential for groundwater management: Gisser-Sanchez effect reconsidered", *Water Resources Research*, 40, W06S16, doi:10.1029/2003WR002164.

Krause K., Chermark J.M., et Brookshire D.S., (2003), "The Demand for Water: Consumer Response to Scarcity", *Journal of Regulatory Economics*, 23, 167-191.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Kritikos A.S., (2004), “A penalty system to enforce policy measures under incomplete information”, *International Review of Law and Economics*, 24(3), 385-403.

Landsberger M. et Meilijson I., (1982), “Incentive generating state dependent penalty system: The case of income tax evasion”, *Journal of Public Economics*, 19(3), 333-352.

Larson B. et Bromley D., (1990), “Property rights, externalities, and resource degradation: locating the tragedy”, *Journal of Development Economics*, 33(2).

Lecat C., (2005), « L'aquifère multicouche de la plaine du Roussillon: Le comportement de prélèvement des agriculteurs irrigants », Mémoire de fin d’études, Ecole National Supérieure Agricole de Rennes, filière Economie Rurale & Gestion, Rennes, p. 83.

Levhari D. et Mirman L.J., (1980), “The great fish war: an example using a dynamic Cournot-Nash solution”, *Bell Journal of Economics*, 11(3), 322-334.

Levhari D., Michener R. et Mirman L.J., (1981), “Dynamic Programming Models of Fishing: Competition”, *American Economic Review*, 71(4), 649-61.

Lewis R. (1996). “Protecting the environment when costs and benefits are Privately Known,” RAND Journal of Economics, 27(4), 819-847, Winter.

Loewenstein, George (1999) “Experimental economics from the vantage point of behavioural economics”, *Economic Journal*, 109(453), 25-34.

Millock K. et Salanié F., (2005), "Nonpoint Source Pollution When Polluters Might Cooperate", *Topics in Economic Analysis & Policy*, 5(1), 1-12.

Millock K., Sunding D., Zilberman D., (2002), “Regulating Pollution with Endogenous Monitoring”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 44(2), 221-241.

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

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Nalbantian H.R. et Schotter A., (1997), "Productivity Under Group Incentives: An Experimental Study", *AmericanEconomic Review*, 87(3), 314-341.

Negri D.H., (1989), “The common property aquifer as a diferential game”, *Water Resources Research,* 25, 9-15.

Normann H.T. et Ricciuti R., (2004), “Experiments for economic policy making”, *Opinion paper for the Economics Network for Competition and Regulation*, p. 37.

OCDE, (1999), "Tarification de l'eau à usage agricole dans les pays de l'OCDE", *Direction de l’Environnement*, Paris, 62 p.

Ostrom E. et Gardner R., (1993), « Coping with Asymmetries in the Commons: Self-Governing Irrigation Systems Can Work”, *Journal of Economic Perspectives*, 7(4), 93–112.

Ostrom E., (1992), *Crafting Institutions for Self-Governing Irrigation Systems,* San Francisco, Calif.: ICS Press.

Ostrom E., (2000), "Collective action and the evolution of social norms." *Journal of Economic Perspectives* 14(3), 137-158.

Ostrom E., Gardner R. et Walker J.M. (1994), *Rules, games, and common-pool resources*, Ann Arbor: The University of Michigan Press.

Oude Essink G.H.P., (2001), “Improving fresh groundwater supply--problems and solutions”, *Ocean & Coastal Manage*, 44(5-6), 429-449.

Paap R. et Geweke J., (2005), *Contemporary Bayesian Econometrics and Statistics*, Wiley, New Jersey, 300p.

Pencavel J.H., (1979), “A note on tax evasion, labour supply and non-linear tax schedules”, *Journal of Public Economics*, 12, 115–124.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Petit V., (1996), *Les aquifères littoraux de France métropolitaine*, BRGM: 78 p.

Plott C.R., (1987), *"Dimensions of parallelism : some policy applications of experimental methods"*, in Laboratory experimentation in economics: six points of view, E. Alvin E. Roth, Cambridge University Press, Cambridge.

Plott C.R. et Porter D.P., (1996), « Market Architectures and Institutional Test bedding: An Experiment with Space Station Pricing Policies", *Journal of Economic Behaviour and Organization*, 31(2), 237-272.

Plott C.R., (1997), "Laboratory Experimental Testbeds: Application to the PCS Auction", *Journal of Economics & Management Strategy*, 6, 605-638.

Pollinsky A.M. et Shavell S., (1979), "The Optimal Tradeoff between the Probability and Magnitude of Fines", *American Economic Review*, 69(5), 880-892.

Provencher B. et Burt O., (1993), « The Externalities Associated with the Common Property Exploitation of Groundwater", *Journal of Environmental Economics and Management,* 24(2), 139-158.

Provencher B., (1995), *Issues in the Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater*, in The Handbook of Environmental Economics, edited by D. Bromley: Blackwell Publisher.

RA (2001) « Recensement Agricole 2000 : Premiers résultats », *Agreste Pyrénées-Orientales*, vol. 2005.

Raftery A.E. et Lewis S.M., (1995), *The number of iterations, convergence diagnostics, and generic Metropolis algorithms*, In Practical Markov Chain Monte Carlo (W.R. http://citeseer.ist.psu.edu/64115.html)

Raftery A.E. et Lewis S.M., (1992), "How many iterations in the Gibbs sampler ?", in *Bayesian Statistics 4* (J.M. Bernardo et al., editors), Oxford University Press, pp. 763-773.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Reinganum, J. et Stokey N., (1985), “Oligopoly extraction of a common property natural resource: the importance of the period of commitment in dynamic games”, *International Economic Review* 26(1), 161-173.

Renshaw, E. F. (1963). “The management of ground water reservoirs.” *Journal of Farm Economics*, 45(2), 285-295.

Rosen, J. B., 1965. “Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games”, *Econometrica* 33 (3), 520–534.

Roseta-Palma C., (2002), “Groundwater management when water quality is endogenous *Journal of Environmental Economics and Management*, 44(1), 93-105.

Roseta-Palma C., (2003), “Joint Quantity/Quality Management of Groundwater”, *Environmental and Resource Economics,* 26(1), 89-106.

Sandmo A., (1981), “Income tax evasion, labour supply, and the equity-efficiency trade-off”, *Journal of Public Economics*, 16(3), 265–288.

Schram A., (2005), "Artificiality: The tension between internal and external validity in economic experiments." *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 225-237.

Segerson K., (1988), “Uncertainty and incentives for nonpoint pollution control”, *Journal of Environmental Economics and Management,* 15(1), 87-98.

Shortle J.S. et Horan R.D., (2001), “The Economics of Nonpoint Pollution Control”, *Journal of Economic Surveys,* 15(3).

Smith, Vernon (1982) “Microeconomic systems as an experimental science”, *American Economic Review*, 72, 923-955.

Spraggon J., (2002), "Exogenous targeting instruments as a solution to group moral hazards", *Journal of Public Economics*, 84(3), 427-456.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tidball M. et Zaccour G. (2005), “An environmental game with coupling constraints”, *Environmental Modeling and Assessment*, 10(2), 153-158.

Tisdell J.G., Ward J.R. et Capon T., (2003), “The Impact of Communication and Information on a Complex Heterogenous Closed Water Catchment Environment”, Working Paper *Australian School of Environmental Studies Gri¢th University*, Brisbane Australia.

Tsur Y. et Graham-Tomasi T., (1991), “The buffer value of groundwater with stochastic surface water supplies”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 21(3), 201-224.

Tsur Y. et Zemel A., (1995), « Uncertainty and Irreversibility in Groundwater Resource Management”, *Journal of Environmental Economics and Management,* 29(2), 149-161.

Tsur Y. et Zemel A., (2004), “Endangered aquifers: Groundwater management under threats of catastrophic events”, *Water Resources Research*, 40.

Tsur Y., (1990), “The stabilization role of groundwater when surface water supplies are uncertain: the implications for groundwater development” *Water Resources Research*, 26, 811–818.

Weitzman M., (1974), “Prices *vs* quantities”, *Review of Economic Studies*, 41.

Willinger M. et Ziegelmeyer A., (1999), "Framing and cooperation in public good games: an experiment with an interior solution," *Economics Letters*, 65(3), 323-328.

Willinger M. et Ziegelmeyer A., (2001), "Strength of the Social Dilemma in a Public Goods Experiment: An Exploration of the Error Hypothesis", *Experimental Economics*, 4(2), 131-144.

Xepapadeas A., (1991), *Advanced Principles in Environmental Policy*, Cheltenham UK, Edward Elgar Publishing.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Xepapadeas A., (1992), “Environmental Policy Design and Dynamic Nonpoint-Source Pollution”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 23(1), 22-39.

Xepapadeas A., (1994), *Controlling Environmental Externalities: Observability and Optimal Policy Rules*, in C. Dosi and T. Tomasi (eds), Nonpoint Source Pollution Regulation: Issues and Analysis, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 67-86.

Xepapadeas A., (1995), "Observability and choice of instrument mix in the control of externalities", *Journal of Public Economics*, 56(3), 485-498.

Yitzhaki S., (1974), “A note on “Income taxation: a theoretical analysis”, *Journal of Public Economics*, 3, 201–202.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sommaire de tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Instruments et actions de gestion des aquifères côtiers

Chapitre 2

Tableau 2.2 : Le coût pour le régulateur de la mise en place des instruments incitatifs à l'équilibre

Tableau 2.3 : Récapitulatif du choix de l'instrument de la part du régulateur pour différentes configurations du coût de fonctionnement

Chapitre 3

Tableau 3.4 : Traitements réalisés pour évaluer et comparer les instruments de régulation des prélèvements

Tableau 3.5 : Valeurs des paramètres communs à tous les traitements

Tableau 3.6 : Valeurs des paramètres pour les traitements concernant les instruments temporellement incohérents non optimaux

Tableau 3.7 : Valeurs des paramètres pour les traitements avec instruments de premier rang (temporellement cohérents et incohérents)

Tableau 3.8 : Efficience, brute et nette des taxes, des trajectoires de prélèvement pour tous les traitements mis en place

Tableau 3.9 : Déviation quadratique moyenne des prédictions inconditionnelles ; traitement LFz0

Tableau 3.10 : Déviation quadratique moyenne des prédictions inconditionnelles ; traitement LFz

Tableau 3.11 : Déviation quadratique moyenne des prédictions conditionnelles ; traitement LFz0

Tableau 3.12 : Déviation quadratique moyenne par rapport aux prédictions conditionnelles ; traitement LFz

Tableau 3.13 : Déviation quadratique moyenne des prédiction inconditionnelles pour une population mixte ; traitement LFz0

Tableau 3.14 : Déviation quadratique moyenne des prédiction inconditionnelles pour une population mixte ; traitement LFz

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau 3.15 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement TPFU

Tableau 3.16 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement TPFU

Tableau 3.17 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement TAFU

Tableau 3.18 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement TAFU

Tableau 3.19 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement IMFU

Tableau 3.20 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement IMFU

Tableau 3.21 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction inconditionnelle myope ; traitement TPNFUO

Tableau 3.22 : Déviation quadratique moyenne par rapport à la prédiction conditionnelle myope ; traitement TPNFUO

Tableau 3.23 : Déviation quadratique moyenne (prédictions inconditionnelles) ; traitement TPNFU

Tableau 3.24 : Déviation quadratique moyenne (prédictions conditionnelles) ; traitement TPNFU

Tableau 3.25 : Déviation quadratique moyenne (prédictions inconditionnelles) ; traitement TANFU

Tableau 3.26 : Déviation quadratique moyenne (prédictions conditionnelles) ; traitement TANFU

Tableau 3.27 : Déviation quadratique moyenne (prédictions inconditionnelles) ; traitement IMNFU

Tableau 3.28 : Déviation quadratique moyenne (prédictions conditionnelles) ; traitement IMNFU

Tableau 3.29 : Comparaison de l'efficacité des instruments fixes, effectuée par couples d'instruments

Tableau 3.30 : Classement des instruments par efficacité et DQM moyennes

Tableau 3.31 : Efficience moyenne brute et nette normalisées ; tous les traitements

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 4

Tableau 4.32 : Valeurs de la vraisemblance marginale pour les différents modèles estimés

Tableau 4.33 : Moyennes à priori et à posteriori et déviations standards des paramètres du composant futur

Tableau 4.34 : Valeurs des paramètres communs à toutes les simulations

Tableau 4.35 : Efficience maximale des trajectoires sous les différentes taxes unitaires, exposée par type et en moyenne, et en termes bruts et (nette)

Annexe 4

Tableau A.36 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k.}$; modèle 1

Tableau A.37 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 1

Tableau A.38 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de σ_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 1

Tableau A.39 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de θ_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 1

Tableau A.40 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k.}$; modèle 2

Tableau A.41 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 2

Tableau A.42 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 2

Tableau A.43 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k.}$; modèle 3

Tableau A.44 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 3

Tableau A.45 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 3

Tableau A.46 : Evaluation de la convergence de la séquence de $\pi_{k.}$; modèle 4

Tableau A.47 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 4

Tableau A.48 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 4

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Tableau A.49 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k. ; modèle 5

Tableau A.50 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci et aminci ; modèle 5

Tableau A.51 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 5

Tableau A.52 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 6

Tableau A.53 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 6

Tableau A.54 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 7

Tableau A.55 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 7

Tableau A.56 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 8

Tableau A.57 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 8

Tableau A.58 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 9

Tableau A.59 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 10

Tableau A.60 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 10

Tableau A.61 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 11

Tableau A.62 : Diagnostic de convergence de Raftery-Lewis de la séquence de π_k pour l'échantillon raccourci ; modèle 11

Tableau A.63 : Evaluation de la convergence de la séquence de π_k ; modèle 12

Annexe 5

Tableau A.64 : Coefficients de la taxe pigouvienne flexible myope (premier rang) pour chaque période

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sommaire de Figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Schéma interface abrupte eau salée/eau douce d'aquifère superficielle libre

Figure 1.2 : Schéma de la mise en relation des réservoirs profond et superficiel dans un aquifère multicouche

Figure 1.3 : Localisation des aquifères dans la plaine du Roussillon, Département des Pyrénées Orientales

Figure 1.4 : Evolution piézométrique enregistrée à St-Laurent-de-la-Salanque dans la nappe profonde entre 1968 et 2005

Figure 1.5 :Evolution des prélèvements pour l'alimentation en eau potable dans l'aquifère plio-quaternaire entre 1975 et 2004

Chapitre 2

Figure 2.6 : Schéma intrusion d'eau de mer

Figure 2.7 : Simulations du modèle à population mixte (N=5 ; T=10 ; a=5,3 ; b=0,09 ; p=7,6 ; l=0,01 ; z=0 ; S(0)=1000 ; r=60)

Figure 2.8 : Simulations du modèle à population mixte (N=5 ; T=10 ; a=5,3 ; b=0,09 ; p=7,6 ; l=0,01 ; z=0,015 ; S(0)=1000 ; r=60)

Chapitre 3

Figure 3.9 : Prédictions théoriques vs prélèvement moyen ; traitement LFz0

Figure 3.10 : Prédictions théoriques vs prélèvement moyen ; traitement LFz

Figure3.11 : Prédictions théoriques des traitements TPNFU et IMNFU

Figure 3.12: Prédictions théoriques du traitement TANFU

Figure 3.13 : Trajectoires des prélèvements moyens, traitements LFz0 et LFz

Figure 3.14 : Prédictions conditionnelles vs prélèvements moyens par groupe et par série, traitement LFz0

Figure 3.15 : Prédictions conditionnelles vs prélèvements moyens par groupe et par série, traitement LFz

Figure 3.16 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TAFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 3.17 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement IMFU

Figure 3.18 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle myope par série ; traitement TPFU

Figure 3.19 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement TPFU

Figure 3.20 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement TAFU

Figure 3.21 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement IMFU

Figure 3.22 : Comparaison multiple d'efficacité (indicateur) ; traitements TPFU, TAFU et IMFU

Figure 3.23 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TPNFUO

Figure 3.24 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TPNFU

Figure 3.25 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement TANFU

Figure 3.26 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par série ; traitement IMNFU

Figure 3.27 : Prédiction conditionnelle myope vs prélèvement moyen, traitement TPNFUO

Figure 3.28 : Prédictions conditionnelle myope et inconditionnelle vs prélèvements moyens, traitement TPNFU

Figure 3.29 : Prédictions conditionnelle myope et inconditionnelle vs prélèvements moyens, traitement TANFU

Figure 3.30 : Prédictions conditionnelle myope et inconditionnelle vs prélèvements moyens, traitement IMNFU

Figure 3.31 : Comparaison multiple d'efficacité ; traitements TPNFUO, TPNFU, IMNFU et TANFU

Figure 3.32 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement TPFU

Figure 3.33 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement IMFU

Figure 3.34 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement TPNFUO

Figure 3.35 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement TPNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 3.36 : Taux de respect moyen par série et intervalles de confiance à 95% ; traitement IMNFU

Figure 3.37 : Comparaison des taux de respect moyens : audit aléatoire versus pénalité collective

Figure 3.38 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement IMNFU

Figure 3.39 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement IMFU

Figure 3.40 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement TPFU

Figure 3.41 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement TPNFUO

Figure 3.42 : Evaluation de l'impact de la fraude sur les prélèvements, traitement TPNFU

Figure 3.43 : Comparaison multiple d'efficacité ; instruments de Premier Rang vs. Deuxième Rang

Chapitre 4

Figure 4.44 : Prélèvements moyens observés par type versus prélèvements moyens simulés

Figure 4.45 : Prélèvements moyens observés par type versus les prélèvements moyens simulés et la prédiction théorique conditionnelle myope ; donnés par groupe et série

Figure 4.46 : Prélèvements individuelles sous les règles de décision estimées et les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

Figure 4.47 : Prélèvements sous la règle 'Quasi Myope' versus les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

Figure 4.48 : Prélèvements sous la règle 'Prévoyants Perturbés' versus les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

Figure 4.49 : Prélèvements individuels versus la recharge naturelle. Figure 4.6a règle Quasi Myope et Figure 4.6b règle Prévoyant Perturbé

Figure 4.50 : Prélèvements individuels d'une population mixte, 50% de préleveurs 'Quasi Myopes' et 50% 'Prévoyants Perturbés', versus les stratégies théoriques Myope, Rationnelle et Optimum

Figure 4.51 : Prélèvements individuels d'une population mixte, 50% de préleveurs 'Quasi Myopes' et 50% 'Prévoyants Perturbés', versus les prédictions théoriques « conditionnelles » Myope, Rationnelle et Optimum

Figure 4.52 : Prélèvements individuels versus la richesse initiale. (a) QM et (b) PP

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure 4.53 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents valeurs de la richesse initiale

Figure 4.54 : Comparaison des prélèvements individuels d'une population mixte de préleveurs Quasi Myopes et Prévoyants Perturbés : richesse initiale nulle et de 2000 points par individu

Figure 4.55 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents distributions d'une richesse initiale de 20 000, 30 000 et 41 000 points

Figure 4.56 : Trajectoires de prélèvement individuel Quasi Myope (a) et Prévoyant Perturbé (b) pour différents taux de la taxe unitaire constante (richesse initiale nulle)

Figure 4.57 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents taux de la taxe unitaire fixe et différentes richesses initiales totales (réparties de façon égalitaire)

Figure 4.58 : Trajectoires de prélèvement Quasi Myope, Prévoyant Perturbé et Optimum pour des taux Myope et Rationnel de la taxe unitaire flexible et une richesse initiale totale nulle

Figure 4.59 : Trajectoires de prélèvement Quasi Myope, Prévoyant Perturbé et Optimum pour des taux Myope et Rationnel de la taxe unitaire flexible, et une richesse initiale totale égale à 20 000 points (répartie de façon égalitaire)

Figure 4.60 : Trajectoires de prélèvement Quasi Myope, Prévoyant Perturbé et Optimum pour des taux Myope et Rationnel de la taxe unitaire flexible, et une richesse initiale totale égale à 41 000 points (répartie de façon égalitaire)

Figure 4.61 : Trajectoires de prélèvement individuel Quasi Myope (a) et Prévoyant Perturbé (b) pour différents taux de l'impôt sur les profits (richesse initiale nulle)

Figure 4.62 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents taux de l'impôt sur les profits et différentes richesses initiales totales (répartition égalitaire)

Figure 4.63 : Efficience des trajectoires de prélèvement Quasi Myope et Prévoyant Perturbé pour différents taux de l'impôt sur la richesse accumulée et différentes richesses initiales totales (réparties de façon égalitaire)

Annexe 4

Figure A.64 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 1 ; type 1

Figure A.65 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 1 ; type 2

Figure A.66 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 2 ; type 1

Figure A.67 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 2 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure A.68 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 2 ; type 3

Figure A.69 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 1

Figure A.70 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 2

Figure A.71 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 3

Figure A.72 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 3 ; type 4

Figure A.73 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 4 ; type 1

Figure A.74 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 4 ; type 2

Figure A.75 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 5 ; type 1

Figure A.76 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 5 ; type 2

Figure A.77 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 5 ; type 3

Figure A.78 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 1

Figure A.79 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 2

Figure A.80 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 3

Figure A.81 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 6 ; type 4

Figure A.82 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 7 ; type 1

Figure A.83 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 7 ; type 2

Figure A.84 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 8 ; type 1

Figure A.85 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 8 ; type 2

Figure A.86: Suite des coefficients du polynôme du Modèle 8 ; type 3

Figure A.87 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 1

Figure A.88 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 2

Figure A.89 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 3

Figure A.90 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 9 ; type 4

Figure A.91 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 10 ; type 1

Figure A.92 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 10 ; type 2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Figure A.93 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 11 ; type 1

Figure A.94 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 11 ; type 2

Figure A.95 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 11 ; type 3

Figure A.96 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 1

Figure A.97 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 2

Figure A.98 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 3

Figure A.99 : Suite des coefficients du polynôme du Modèle 12 ; type 4

Annexe 5

Figure A.100 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TAFU

Figure A.101 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement IMFU

Figure A.102 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupes ; traitement TPNFUO

Figure A.103 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TPNFU

Figure A.104 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement TANFU

Figure A.105 : Prélèvement moyen vs prédiction conditionnelle par groupe ; traitement IMNFU

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Table de Matières

Introduction Générale 1

Chapitre 1 La gestion de l'exploitation des aquifères côtiers : le cas de la plaine du Roussillon

1.1 Introduction 6

1.2 La complexité intrinsèque de la gestion de l'eau souterraine : la ressource, les préleveurs et le régulateur 8

1.2.1 La ressource : les aquifères côtiers 9

1.2.2 Les préleveurs 12

1.2.3 Le régulateur 13

1.3 La gestion de la demande : un défi majeur pour la plaine du Roussillon 15

1.3.1 Les ressources en eau de la plaine du Roussillon 16

1.3.1.1 Les eaux superficielles : trois fleuves côtiers 16

1.3.1.2 L'eau souterraine 18

1.3.2 Les prélèvements dans l'eau souterraine 19

1.3.3 La gestion de l'eau souterraine dans la plaine du Roussillon 23

1.4 Conception et évaluation des politiques publiques à l'aide de l'économie expérimentale 27

1.4.1 Les expériences de politique 28

1.4.2 La validité externe des expériences de politique 29

1.5 Conclusion 33

Chapitre 2 Un modèle conceptuel de régulation des prélèvements en eau souterraine

2.1 Introduction 35

2.2 Le modèle 39

2.2.1 La ressource 40

2.2.2 Les agents 43

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.2.3 Les stratégies des préleveurs en cas de laissez faire 45

2.2.3.1 Comportement Rationnel 47

2.2.3.2 Comportement Myope 51

2.2.3.3 Comportement Optimum 52

2.2.4 Population mixte : préleveurs rationnels et myopes 53

2.3 Régulation 60

2.3.1 Les instruments incitatifs 62

2.3.1.1 Taxes et subventions pigouviennes 63

2.3.1.2 Taxe ambiante ou Pénalité collective 70

2.3.1.3 Instrument mixte 71

2.3.2 Le choix de l'instrument 72

2.3.2.1 La contrainte budgétaire 73

2.3.2.2 Le choix de l'instrument 73

2.4 Conclusion 78

Chapitre 3 Instruments fixes ou flexibles ? Une étude expérimentale sur l'efficacité et l'efficience des instruments économiques dans la régulation de l'exploitation de l'eau souterraine

3.1 Introduction 81

3.2 Le design expérimental 88

3.2.1 Les prédictions théoriques 91

3.2.1.1 Laissez faire 92

3.2.1.2 Les instruments flexibles 94

3.2.1.3 Les instruments fixes 95

3.2.2 Mise en pratique dans le laboratoire 96

3.2.3 Cadre de décision 98

3.3 Les résultats 99

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.1 Le laissez faire 101

3.3.2 Les instruments flexibles 112

3.3.2.1 L'effet de la répétition du jeu 113

3.3.2.2 Efficacité des instruments flexibles 117

3.3.2.3 Comparaison de l'efficacité des instruments flexibles 120

3.3.3 Les instruments fixes 123

3.3.3.1 L'effet de la répétition du jeu 124

3.3.3.2 Ajustement aux prédictions théoriques 134

3.3.3.3 Efficacité des instruments fixes 135

3.3.3.4 Comparaison de l'efficacité des instruments fixes 139

3.3.4 Les fausses déclarations : leur impact sur la performance des instruments et l'efficacité des mécanismes incitatifs pour la contrôler 142

3.3.5 Comparaison de l'efficience et l'efficacité des instruments : cohérence versus incohérence temporelle 151

3.4 Conclusions 155

Chapitre 4 Classification du comportement individuel à partir des données expérimentales et simulations pour la construction des scénarios de gestion des nappes

4.1 Introduction 162

4.2 Un algorithme de classification de type bayésien : l'algorithme HKM 165

4.2.1 Le modèle 166

4.2.2 L'inférence statistique 169

4.3 Spécification empirique 170

4.3.1 Les formes fonctionnelles pour les règles de décision 171

4.3.2 La fonction de vraisemblance, les distributions à priori et la distribution à posteriori des paramètres 172

4.3.3 L'algorithme d'échantillonnage à la Gibbs 175

4.4 Résultats de l'algorithme classification 177

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.4.1 Sélection du modèle et évaluation de l'ajustement 177

4.4.2 Caractérisation des règles de décision 183

4.5 Simulations pour la construction des scénarios de gestion 187

4.5.1 L'impact de la recharge naturelle 188

4.5.2 L'impact de la richesse et de sa distribution 192

4.5.3 Les politiques publiques 197

4.5.3.1 La taxe unitaire 197

4.5.3.2 Les politiques fiscales : impôt sur les profits et sur la richesse 206

4.6 Conclusion 213

Conclusion Générale 215

Annexe I 220

Annexe II 222

Annexe III 234

Annexe IV 235

Annexe V 307

Annexe VI 308

Bibliographie 312

Sommaire des Tableaux 325

Sommaire des Figures 329

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref