



HAL
open science

Impacts socio-économiques des organismes génétiquement modifiés : cas des suicides des agriculteurs du coton 'Bacillus Thuringiensis' en Inde

Naceur Kheraief

► **To cite this version:**

Naceur Kheraief. Impacts socio-économiques des organismes génétiquement modifiés : cas des suicides des agriculteurs du coton 'Bacillus Thuringiensis' en Inde. Economies et finances. Université Nice Sophia Antipolis, 2013. Français. NNT : 2013NICE0022 . tel-00956172

HAL Id: tel-00956172

<https://theses.hal.science/tel-00956172v1>

Submitted on 5 Mar 2014

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.

UNIVERSITE DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS
ÉCOLE DOCTORALE 513 Droit Et Sciences Politiques, Économiques et de
Gestion
INSTITUT SUPERIEUR D'ÉCONOMIE ET DE MANAGEMENT
Groupe de Recherche En Droit, Économie, Gestion UMR CNRS 6227



**Thèse en vue de l'obtention du
Doctorat ès Sciences Économiques**

Soutenue par :

KHERAIEF Naceur

**IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DES ORGANISMES
GENETIQUEMENT MODIFIÉS :
CAS DES SUICIDES DES AGRICULTEURS DU COTON *BACILLUS
THURINGIENSIS* EN INDE**

Présentée et soutenue publiquement le : *27 Septembre 2013*

Jury :

Mr. BAZIN Damien	Maître de Conférences HDR- GREDEG- Université de Nice Sophia Antipolis	Directeur
Mr. CHARLIER Christophe	Maître de Conférences HDR- GREDEG- Université de Nice Sophia Antipolis	Membre
Mr. DESNEUX Nicolas	Chargé de Recherche-INRA- Université de Nice Sophia Antipolis	Membre
Mr. MARIMOUTOU Vélayoudom	Professeur- GREQAM-Aix Marseille Université	Membre
Mr. RAZAFIMAHATOLOTRA Dawidson	Maître de Conférences-Université de Fianarantsoa, Madagascar	Membre
Mr. TAZDAIT Tarik	Directeur de Recherches- CIRED/CNRS	Rapporteur
Mr. THOMAS Alban	Directeur de Recherches-INRA- Université des Sciences Sociales de Toulouse	Rapporteur
Mme. TICHIT Ariane	Maître de Conférences-CERDI- Université d'Auvergne	Membre

L'UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS
n'entend donner aucune approbation ni improbation aux
opinions émises dans cette thèse ; celles-ci doivent être
considérées comme propres à leur auteur.

DEDICACES

Ce travail est spécialement dédié :

A l'esprit de mon père le grand poète tunisien Mohieddine Kheraief (décédé le 18 Novembre 2011) dont le souvenir restera à jamais gravé dans mon cœur :

«Dans ma vie, je n'ai pas vendu les titres au marché; à leur passage, je ne me suis pas aplati d'admiration; pour feindre, je n'ai pas revêtu leurs vérités comme des oripeaux».

(Mohieddine Kheraief extrait de son recueil de poèmes « Paroles aux étrangers », p.41)

A ma femme pour sa patience et sa générosité... A mes filles Nourhène et Doâa.

A ma mère qui m'a donné le goût de la persévérance.

A mes sœurs qui m'ont continuellement soutenu.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Damien Bazin. Je lui suis profondément reconnaissant d'avoir accepté de diriger ma thèse et d'avoir ainsi, par sa rigueur scientifique, ses commentaires constructifs et ses remarques judicieuses, contribué à l'enrichissement du contenu de mon travail. Je le remercie également pour sa diligence, ses conseils avisés et sa gentillesse.

Je suis également très sensible à l'honneur que m'ont fait Tarik Tazdaït et Alban Thomas d'avoir accepté de rapporter mes travaux.

Je voudrais aussi exprimer ma plus sincère reconnaissance à Ariane Tichit, Christophe Charlier, Dawidson Razafimahatolotra, Nicolas Desneux et Vélayoudom Marimoutou d'avoir accepté de figurer dans mon jury de thèse.

J'adresse aussi ma gratitude à Edward Greenberg (Washington University), Jakub Bijack (University of Southampton) et Olivier Gimenez (CNRS) de m'avoir fait part de leur grande expérience en Économétrie Bayésienne.

Je tiens également à remercier le laboratoire GREDEG et l'ISEM pour leur soutien matériel et financier.

Parmi mes amis, je remercie tout particulièrement Myriam Chihi-Bouaziz et son mari Walid Bouaziz pour leur disponibilité et leur soutien inestimable qui m'ont été si précieux ces derniers temps.

Résumé

L'Inde est le deuxième producteur mondial de coton ; après la Chine, avec environ 12,1 millions d'hectares en 2011, soit le quart de la superficie cotonnière mondiale. Après l'avènement des biotechnologies agricoles, le gouvernement indien, sous l'égide du premier ministre Atal Bihari Vajpayee, a encouragé l'utilisation de coton génétiquement modifié, dénommé coton *Bacillus thuringiensis* (*Bt*). Les variétés de coton *Bt* permettent de lutter contre les pertes de rendement causées par les parasites lépidoptères. Toutefois, leur implantation n'a pas été sans difficulté (la résistance des insectes, la pollution des sols, l'utilisation massive d'eau et d'engrais, le déséquilibre de l'écosystème et l'appauvrissement des fermiers). Aujourd'hui, l'Inde connaît un débat majeur autour de son expérience en matière d'adoption de coton transgénique, débat où plusieurs arguments d'impacts sur le bien-être des petits agriculteurs sont avancés. Depuis sa commercialisation en 2002, le coton *Bt* a provoqué les mécontentements et les suicides des fermiers appauvris. En moyenne un paysan se donne la mort toutes les 30 minutes. Les victimes sont principalement les petits fermiers qui cultivaient les semences génétiquement modifiés dans les Etats indiens : Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh et Maharashtra. Ces agriculteurs étaient pour la plupart endettés auprès de la compagnie semencière *Mahyco-Monsanto Biotech* (MMB), qui leur fournissait à crédit les semences *Bt* ainsi que les pesticides. Faut-il y déceler une corrélation entre le coton génétiquement modifié et ces suicides atypiques ? Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'explorer, tant sur le plan théorique qu'empirique, la relation entre l'utilisation du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde.

Essentiellement factuelle, le premier chapitre de cette thèse tente à livrer une revue exhaustive et critique de la littérature sur les impacts socioéconomiques de l'introduction du coton génétiquement modifié en Inde. Le deuxième chapitre présente les différentes approches économiques relatives au suicide. En effet, la théorie économique est fondée sur l'hypothèse du choix rationnel qui pourrait trouver dans le phénomène du suicide un intéressant défi de recherche. Dans le troisième chapitre nous proposons une première contribution théorique où nous avons pris en compte l'évolution de la résistance des ravageurs aux toxines *Bt*. Les agriculteurs reviennent à une utilisation intensive des insecticides ce qui représente tel un coût additionnel. Ces fermiers, qui se retrouvent pris dans une véritable spirale infernale d'endettement, choisissent donc le suicide plutôt que de subir les coûts financiers et sociaux de la dette. La deuxième contribution théorique du quatrième chapitre a pris en considération à la fois la détérioration de la résistance des toxines *Bt* dans le temps et l'augmentation potentielle des populations de ravageurs secondaires. Les agriculteurs, en utilisant une quantité grandissante de pesticides, doivent s'endetter davantage pour pulvériser plus de pesticides. Le dernier chapitre veut tester empiriquement les arguments développés par les modèles théoriques. Enfin, les résultats obtenus nous amènent à penser que l'échec de la culture du coton *Bt* pourrait être à l'origine de surendettement des paysans et de cette vague de suicidaire.

Socio-Economic Impacts of Genetically Modified Organisms: the Case of *Bacillus thuringiensis* Cotton Farmer Suicides in India

Abstract

India is the world's second largest producer of cotton, after China. The total cotton area in India was 12.1 million hectares in 2011, accounting for approximately one fourth of the world's total cotton area. After the advent of agricultural biotechnology, the Indian government, under the former prime minister Atal Bihari Vajpayee, has encouraged the use of genetically modified cotton, called *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) cotton. The *Bt* cotton varieties can provide control against crop loss caused by lepidopteran pests. However, the process of introduction of *Bt* cotton has not been without difficulty (insect resistance to *Bt* crop, soil pollution, the excessive use of water and fertilizer, an imbalance of the ecosystem and impoverishment of farmers). Since its first commercialization in India, *Bt* cotton has caused a considerable discontent and suicides of impoverished cotton farmers. On average, one farmer commits suicide every 30 minutes in India. The victims are mainly small farmer who grow genetically modified cotton seeds in certain states in India (Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh and Maharashtra). Most of these farmers are deeply indebted to the *Mahyco Monsanto Biotech* (MMB) Company, which provided them access to credits for buying *Bt* cotton seeds and pesticides. Is there a correlation between the genetically modified cotton and these suicides? Thus, the purpose of this thesis is to theoretically and empirically explore the causal relationship between *Bt* cotton and farmer suicides in India.

Essentially factual, the first chapter of this dissertation attempts to provide a comprehensive and critical literature review on the socio-economic impacts of the introduction of *Bt* cotton in India. In the second chapter we review economic theories and empirical studies on the socioeconomic aspects of suicide. Indeed, the economic theory, founded on the rational choice assumption, might find in the suicide phenomenon an interesting research challenge. In the third chapter we propose the first theoretical contribution by taking into account the evolution of insect resistance to *Bt* toxin. Farmers revert to the use of chemical pesticides after just few years which represent additional costs. These farmers, who find themselves caught in a vicious circle of debts, choose to commit suicide rather than suffer the financial and social impacts of debts. The fourth chapter, our second theoretical contribution, takes into account both aspects of *Bt* technology: the development of insect resistance to *Bt* cotton over time and the potential of secondary pests emerging. The farmers, by using an increasing amount of pesticides, have to go further into debt to increase the number of chemical sprays to control their cotton pests. In the last chapter we want to empirically assess the arguments advanced in the theoretical models. Finally, our theoretical and empirical results lead us to think that the *Bt* cotton failure in India could be the principal cause of farmer indebtedness and this wave of suicides.

Mots-clés : Coton Biotechnologique/Inde/Suicide des agriculteurs

Key words: *Bt* cotton/India/farmers' suicides

Laboratoire : GREDEG Université de Nice Sophia Antipolis

250 rue Albert Einstein - Bâtiment 2- 06560 Valbonne

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1: LES IMPACTS SOCIOÉCONOMIQUES DU COTON BT EN INDE : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE	15
CHAPITRE 2 : ECONOMIE DU SUICIDE : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	63
CHAPITRE 3 : L'ADOPTION DU COTON BT ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE : PREMIER ESSAI THÉORIQUE	102
ANNEXES DU CHAPITRE 3.....	127
CHAPITRE 4 : L'ADOPTION DU COTON BT ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE : SECOND ESSAI THÉORIQUE	131
ANNEXES DU CHAPITRE 4.....	159
CHAPITRE 5 : L'ADOPTION DU COTON BT ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE : UN ESSAI EMPIRIQUE (<i>UNE APPROCHE SEMIPARAMÉTRIQUE BAYÉSIENNE</i>)	183
ANNEXES DU CHAPITRE 5	223
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	244
BIBLIOGRAPHIE.....	257

1. Chapitre 1 - Les Impacts Socioéconomiques du Coton *Bt* en Inde : une revue de la littérature

Tableau 1.1 : L'adoption du Coton <i>Bt</i> dans les principaux Etats indiens entre 2002 et 2010 (en milliers d'hectares).....	21
Tableau 1.2 : Coton <i>Bt</i> en Inde (chronologie des événements).....	22
Tableau 1.3 : La superficie du coton <i>Bt</i> illégal	24
Tableau 1.4 : Prix des semences du coton <i>Bt</i> aux États indiens (avec et sans contrôle des prix)	29
Tableau 1.5 : Les études sur les impacts économiques du coton <i>Bt</i> en Inde.....	33
Tableau 1.6 : Comparaison des coûts et des rendements de coton <i>Bt</i> et non- <i>Bt</i> en Inde	36
Tableau 1.7 : Le nombre de suicides d'agriculteurs (Maharashtra).....	44
Tableau 1.8: Le suicide des agriculteurs dans les «cinq plus grands Etats Indiens» producteurs du coton par rapport au reste de l'Inde	46
Tableau 1.9 : Résultats de l'étude pour la première année : 2002–2003	47
Tableau 1.10 : Économie de la culture du coton <i>Bt</i> et non <i>Bt</i> durant la saison 2003-2004.....	53
Tableau 1.11 : Économie de la culture du coton <i>Bt</i> et non- <i>Bt</i> durant la saison 2004-2005	55
Tableau 1.12 : Analyse cout-bénéfice du coton <i>Bt</i> et non- <i>Bt</i>	58
Tableau 1.13 : Comparaison entre l'étude de <i>Monsanto</i> et celle de Qayum et Sakkhari (2005)	58

2. Chapitre 2 - Economie du Suicide : une revue de la littérature

Tableau 2.1 : Taux Mondial de Suicides (pour 100 000 habitants) par groupe d'âges et par sexe en l'an 2000 (estimation)	68
Tableau 2.2 : Mortalité imputable au suicide par sexe, groupe d'âge et Pays (pour 100000 habitants).....	71
Tableau 2.3 : La classification des suicides	72

3. Chapitre 5 - L'adoption du coton *Bt* et le Suicide des Agriculteurs en Inde : un essai empirique

Tableau 5.1 : La commercialisation du coton <i>Bt</i> en Inde.....	184
Tableau 5.2 : L'utilisation de pesticides (tonnes métriques).....	187
Tableau 5.3 : Lois <i>a priori</i> marginales pour le modèle.....	194
Tableau 5.4 : Statistiques descriptives des lois marginales <i>a posteriori</i> (les variations en pourcentage dans le suicide par Etat entraîné par un changement dans le taux d'adoption du coton <i>Bt</i> – terme linéaire).....	202
Tableau 5.5 : Statistiques descriptives des lois marginales <i>a posteriori</i> (les variations en pourcentage dans le suicide par Etat entraîné par un changement dans le taux d'adoption du coton <i>Bt</i> – terme quadratique).....	202
Tableau 5.6 : Statistiques descriptives des lois <i>a posteriori</i> marginales (les variations en pourcentage dans le taux de suicide des fermiers provoqué par un changement dans la quantité utilisée de pesticides).....	211

1. Introduction générale

Figure 0.1 : Un modèle examinant la relation causale entre la culture du coton <i>Bt</i> (<i>Bt</i>) et le suicide des fermiers indiens	7
---	---

2. Chapitre 1 - Les Impacts Socioéconomiques du Coton *Bt* en Inde : une revue de la littérature

Figure 1.1 : Le pourcentage d'adoption du coton <i>Bt</i> en Inde	19
Figure 1.2 : L'évolution du nombre d'agriculteurs du coton <i>Bt</i>	20
Figure 1.3 : L'évolution des rendements du coton <i>Bt</i>	22
Figure 1.4 : Les districts de l'Etat indien Andhra Pradesh	48

3. Chapitre 2 - Economie du Suicide : une revue de la littérature

Figure 2.1 : La carte Mondiale des taux du suicide	66
Figure 2.2 : Taux de suicide aux États-Unis et l'Europe (1970- 2000)	69
Figure 2.3 : Le marché du suicide	77
Figure 2.4 : La réduction du suicide et le choix optimal entre les âgés et les jeunes.	96

4. Chapitre 3 - L'adoption du coton *Bt* et le Suicide des Agriculteurs en Inde : premier essai empirique

Figure 3.1 : Le seuil économique de nuisibilité.	113
Figure 3.2 : Le seuil économique de nuisibilité est atteint si et seulement si $e_{D/N}e_{h/x} = 1$	114
Figure 3.3 : La perte en rendement suite au développement de résistance.....	124

5. Chapitre 4 - L'adoption du coton *Bt* et le Suicide des Agriculteurs en Inde : deuxième essai empirique

Figure 4.1 : Les districts de l'Etat de Gujarat	135
Figure 4.2 : L'évolution de quantités de pesticides et de l'efficacité de la toxine de Bt au cours du temps	140
Figure 4.3 : L'évolution de l'utilisation des insecticides dans la culture de coton en Inde entre 2000 et 2010 (en million de roupies)	150

6. Chapitre 5 - L'adoption du coton *Bt* et le Suicide des Agriculteurs en Inde : un essai empirique

Figure 5.1 : L'évolution du nombre de suicide des agriculteurs dans l'ensemble de quatre Etats de l'Inde (Andhra Pradesh, Karnataka, Maharashtra et Madhya Pradesh) : 1995-2009	186
Figure 5.2 : Les ajustements linéaire et quadratique de la relation entre l'adoption du coton <i>Bt</i> et le suicide des agriculteurs par Etat en Inde	189
Figure 5.3 : Densité des lois a posteriori pour le paramètre beta (terme linéaire) tirée à partir d'un échantillon de 450000 itérations.....	206
Figure 5.4 : Densité des lois a posteriori pour le paramètre beta (terme quadratique) tirée à partir d'un échantillon de 450000 itérations.....	207
Figure 5.5: Vérification de la convergence de chaînes de Markov pour le paramètre beta (terme linéaire) : Les chaînes convergent vers un état stationnaire correspondant à la vraie valeur.	208
Figure 5.6 : Vérification de la convergence de chaînes de Markov pour le paramètre beta (terme quadratique) : Les chaînes convergent vers un état stationnaire correspondant à la vraie valeur	209
Figure 5.7 : Densité des lois a posteriori pour le paramètre θ tirée à partir d'un échantillon de 450000 itérations.....	213
Figure 5.8 : Vérification de la convergence de chaînes de Markov pour le paramètre θ : les chaînes convergent vers un état stationnaire correspondant à la vraie	214

INTRODUCTION GENERALE

1. Présentation générale et formulation de la problématique

Au cours des deux derniers siècles, le modèle de la diversité génétique agricole, pour des nombreux pays en développement, a été radicalement changé par l'intensification et la libéralisation des marchés agricoles. Ce processus s'est accéléré avec l'avènement de « la révolution verte » dans les années 60 lorsque les chercheurs du secteur public et les bailleurs de fonds ont explicitement favorisé le transfert des variétés de semences génétiquement modifiées aux pays en développement. Depuis la révolution verte, « *on a assisté à un recentrage de la recherche et le développement (R&D) agricole, le secteur privé multinational ayant pris la relève du secteur public* » (Raney et Pingali, 2005, p. 40). La libéralisation des échanges agricoles internationaux, les découvertes scientifiques en biologie moléculaire et le renforcement de la protection des droits de propriété intellectuelle ont incité le secteur privé à investir dans la R&D agricole. Le rôle important qui a été joué par le secteur privé, dans les activités de R&D agricole, a entraîné des transformations rapides dans le type de la technologie agricole développée ainsi que dans la façon de diffuser celle-ci entre les agriculteurs. Ainsi, les plantes transgéniques, qui ont été élaborées et diffusées presque exclusivement par le secteur privé, offrent sans doute l'illustration la plus claire des changements technologiques provenant du progrès rapide du secteur privé dans le domaine de la R&D agricole. Les entreprises privées dans les biotechnologies agricoles sont actuellement responsables de développement et de la commercialisation de la quasi-totalité des plantes génétiquement modifiées cultivées dans le monde entier.

Aujourd'hui, les semences génétiquement modifiées font partie intégrante de l'économie indienne. Au cours de la dernière décennie, on a constaté une diffusion remarquable du coton génétiquement modifié (*Bacillus thuringiensis- Bt*) en Inde, depuis son autorisation en 2002, pour remplacer 90% des surfaces dédiées au coton conventionnel (Choudhary et Gaur, 2010 ; Arora et Bansal, 2012). En effet, le coton *Bt*, résistant aux vers de la capsule du coton (*Helicoverpa armigera* et *Helicoverpa zea*), a été considéré par le gouvernement indien comme un moyen pour réduire l'utilisation de pesticides et améliorer le rendement. En 2005, ce sont 728 kg de coton par hectare qui ont été produits par les cultivateurs du Gujarat soit plus que la moyenne mondiale de 715 kg par hectare : c'est un véritable record. Par conséquent, l'Inde a dépassé les Etats-Unis et représente de nos jours le deuxième producteur mondial de coton après la Chine. En quelques années seulement, l'Inde est passée d'un pays importateur à un important pays exportateur de coton. Selon Clive (2011), « *L'Inde a augmenté le revenu reçu par les fermiers qui cultivent le coton Bt par 9.4 milliards de \$US pendant la période 2002 à 2010 dont 2.5 milliards de \$US dans seul 2010. Les principaux*

Introduction générale

bénéficiaires sont 7 millions de petits fermiers qui exploitent un moyen de 1.5 hectares chacun ».

Bien que l'utilisation du coton génétiquement modifié recèle des effets positifs en termes d'efficacité technique, de rentabilité économique et d'impacts positifs sur le plan environnemental et de la santé publique (impacts consécutifs à la réduction des traitements chimiques), cette vision ignore ce qui se trame réellement sur le terrain à savoir *une recrudescence de suicides d'agriculteurs en Inde*. D'où l'existence d'une polémique concernant l'utilisation du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs. D'après les activistes¹, il semblerait que la cause première du suicide des fermiers indiens serait les semences génétiquement modifiées.

Selon Mishra (2007) il y aurait eu 86 922 suicides en Inde sur la période 2001-2005, dont la majeure partie proviendrait des Etats produisant du coton. Les données du département du crime national indien mettent en exergue que sur la période 2001-2005, il y a eu 1920 suicides des fermiers dans la région de *Vardhaba* de l'Etat du Maharashtra qui n'est pas la seule région touchée par les suicides ; *Warangal*, une autre région qui appartient à l'Etat de l'Andhra Pradesh, enregistre aussi des taux de suicide élevés parmi les planteurs cotonniers. Il en a découlé une controverse concernant l'impact du coton génétiquement modifié sur les conditions de vie des fermiers. Les Etats indiens les plus impactés sont ceux ayant adopté la culture des organismes génétiquement modifiés. *Faut-il déceler en cela une relation de causalité entre la mise en culture des semences transgéniques et les suicides des fermiers ?*

Il s'avère qu'une des causes du suicide des fermiers planteurs de coton est leur surendettement. D'une part, au niveau parcellaire, il est rare de constater une réduction du coût total du contrôle des insectes ravageurs parce que les vers de la capsule du coton ont développé une certaine résistance à la toxine *Bt* et par conséquent la nouvelle technologie génétiquement modifiée n'est plus totalement efficace pour lutter contre les insectes cibles. Ainsi, la capacité des toxines *Bt* à éliminer le ver du coton peut donc diminuer au cours du temps, ce qui oblige l'agriculteur à augmenter les doses de pesticides. Afin de lutter contre ce type de ravageurs, les coûts des pesticides, peuvent de loin dépasser les dépenses en produits phytosanitaires associées aux variétés conventionnelles, en particulier si on prend en considération les prix élevés du coton *Bt*. Selon Fok (2010, p. 307), *« le contrôle des ennemis de la culture par l'utilisation de variétés transgéniques est devenu globalement plus coûteux, tant par l'augmentation continue du prix des semences que par les pesticides à utiliser en complément. Dès lors, le sentiment de confort qui prévalait au début de cette utilisation est*

¹ Vandana Shiva est l'une des chefs de file des écologistes.

Introduction générale

remplacé par un sentiment d'incertitude sur l'efficacité et la rentabilité de ce contrôle ». D'autre part, la perception du risque financier est ainsi accrue pour les agriculteurs à ressources financières limitées. Une fois les semences génétiquement modifiées adoptées, il n'est plus possible de garder des graines d'une année sur l'autre pour les replanter (une technologie dite « *terminator* » qui rend stérile les graines de seconde génération des semences *Bt*) ; de ce fait, les producteurs doivent acheter les nouvelles semences à chaque saison, ce qui entretient mécaniquement la demande de semences et de crédit. Dans cette situation, les paysans possèdent une option de réaction à savoir l'endettement. Avec des externalités négatives non attendus, les petits agriculteurs se retrouvent ainsi pris dans une véritable spirale infernale d'endettement, et le suicide s'apparente alors à une alternative rationnelle lorsque le coût de la vie devient insoutenable (Hamermesh et Soss, 1974).

2. L'originalité du sujet

L'originalité de notre travail réside dans la recherche d'une relation entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des paysans indiens. Un problème qui a été quasi-systématiquement occulté dans la littérature. En effet, les travaux de recherche précédents se sont essentiellement intéressés aux :

- résultats concernant les avantages économiques du coton *Bt* pour les fermiers indiens. Selon ces études, l'adoption de la technologie génétiquement modifiée permettrait aux agriculteurs d'accroître leurs rendements tout en réduisant les coûts des intrants notamment le coût d'usage des pesticides.
- résultats concernant les impacts de l'introduction du coton *Bt* dans la filière cotonnière en Inde. Les résultats montrent une amélioration de la qualité de fibre ainsi qu'une baisse des ventes de produits phytosanitaires.

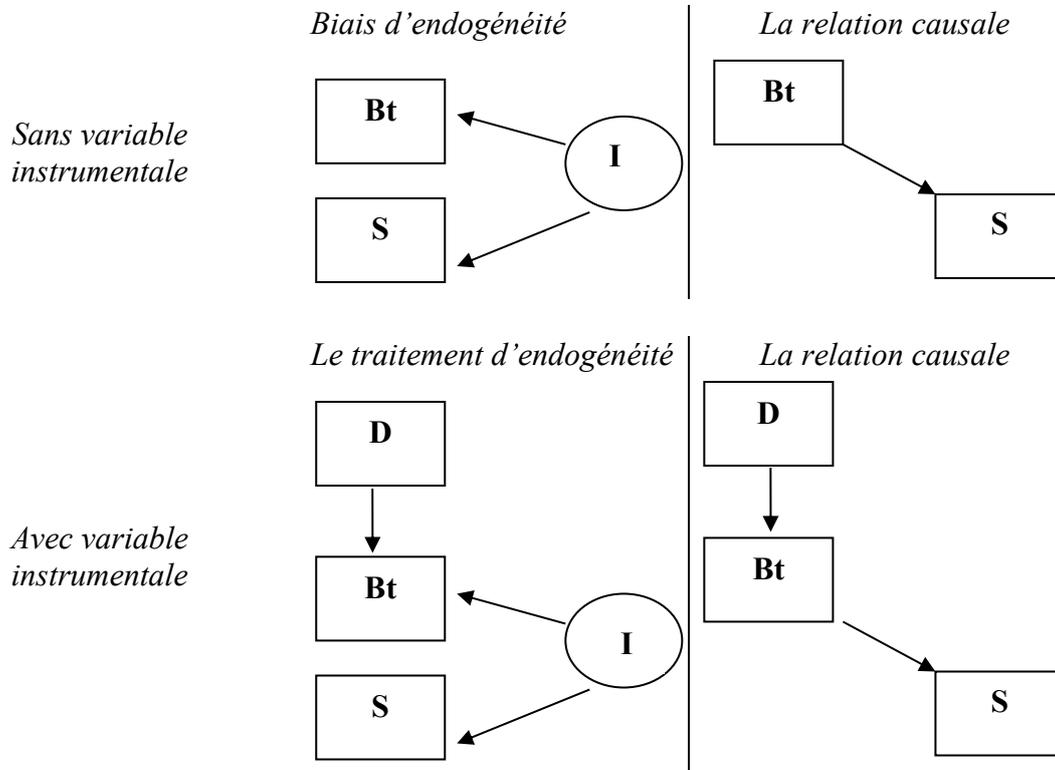
La plupart de ces études, selon nous, présentent toutefois certaines lacunes :

- L'activité agricole est par définition liée à *l'incertitude* (l'aléa climatique, ravageurs et maladies). Pour mieux appréhender la décision des agriculteurs il importe d'intégrer ce paramètre dans un cadre dynamique. L'analyse que nous avons menée a montré que c'était l'incertitude sur la rentabilité de la technologie *Bt* qui pouvait expliquer en partie le comportement suicidaire de l'agriculteur indien. Certes, le contrôle de ravageurs par l'utilisation des semences génétiquement modifiées devient de plus en plus coûteux à cause de l'augmentation du prix des variétés transgéniques et les coûts, sans cesse croissants, liés aux traitements supplémentaires du coton *Bt*. Les semences transgéniques, cultivées aujourd'hui en Inde, n'apportent pas véritables solutions définitives au problème du contrôle de ravageurs en raison de l'émergence de la résistance aux toxines *Bt* et l'apparition d'autres ravageurs secondaires. Par conséquent, l'utilisation de ces variétés génétiquement modifiées n'a pas entraîné *in fine* une réduction durable de produits phytosanitaires, devenus de nouveau indispensables. Les petits paysans (cultivant moins de 2 hectares) se retrouvent ainsi pris dans une véritable spirale infernale d'endettement, ce qui entraîne un accroissement régulier du nombre de suicides parmi eux.

Pour étudier la décision du suicide, un papier séminale de Hamermesh et Soss (1974) semble s'imposer. Ce travail a été essentiellement élaboré dans un cadre d'analyse intertemporelle pour expliquer la décision de suicide. La fonction d'utilité intertemporelle dépend de la consommation qui, elle-même, une fonction du revenu permanent. Les

auteurs montrent que l'agent économique se donne la mort quand la valeur actualisée de son utilité baisse en dessous d'un certain seuil où le suicide devient un choix « optimal ». Une telle analyse n'explique pas cependant que le revenu provenant d'une source agricole est considéré comme totalement incertain par les agriculteurs. Dans ce contexte, nous proposons ainsi une extension du modèle de Hamermesh et Soss où l'hypothèse de l'incertitude (inhérente à la rentabilité du coton *Bt*) sera retenue (*cf.* chapitre IV). En effet, une augmentation moyenne du rendement que permettent les variétés *Bt* ne suffit pas pour confirmer que l'efficacité de cette technologie est indéniable, il faut également que l'incertitude ne soit pas trop élevée.

- Un problème d'endogénéité entre le choix de la technologie *Bt* et la décision sur la quantité utilisée de pesticides (Huang *et al.*, 2002), ce qui peut induire une estimation biaisée des coefficients de régression. À cet égard, il paraît indispensable de contrôler le biais d'endogénéité qui en découle. Dans ce contexte, notre étude empirique a tenté de résoudre ce problème. En effet, notre objectif consiste à tester la relation de causalité entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs indiens (*cf.* chapitre V). Toutefois, des facteurs non observables (tels que le niveau de pression exercé par les ravageurs) peuvent affecter simultanément le taux de suicide et le taux d'utilisation des semences transgéniques (*cf.* Fig. 0.1). De plus, les agriculteurs se procurent les semences génétiquement modifiées à crédit et par conséquent un niveau d'endettement élevé pourrait être positivement corrélé avec le suicide des fermiers. Il est donc possible que la covariance entre la variable explicative (utilisation du coton *Bt*) et les résidus soient différents de zéro. En d'autres termes, l'adoption du coton *Bt*, pourrait être endogène avec le suicide des agriculteurs et par conséquent une relation systématique pourrait exister entre l'endettement, l'utilisation du coton *Bt* et le suicide des paysans (*cf.* Fig. 0.1). L'endogénéité dont peut souffrir l'estimation pourrait être donc corrigée par l'utilisation de l'endettement comme un instrument. Dans cette thèse, l'estimation de la relation entre le suicide des paysans et l'utilisation des semences *Bt* se fera dans le cadre d'un modèle semiparamétrique bayésien (à variables instrumentales) qui permet une estimation plus précise et mieux adaptée pour contourner les problèmes associés aux échantillons de petite taille. La relation entre la variable 'nombre de suicides de paysans' et la variable 'l'utilisation du coton *Bt*' est non linéaire dans la plupart des États indiens (producteurs du coton). Enfin, il est important de souligner que notre approche empirique pourrait être utilisée sur des enquêtes de terrain (données individuelles et /ou temporelles).



Source : auteur.

Figure 0.1 : un modèle examinant la relation causale entre la culture du coton *Bt* (Bt) et le suicide des fermiers indiens

Un modèle examinant la relation causale entre la culture du coton *Bt* (Bt) et le suicide des fermiers indiens (S). Le facteur inobservable *niveau de pression exercé par les ravageurs* (I) peut affecter le processus de prise de décision (le choix de cultiver les variétés *Bt* ou la décision de suicide). Afin de corriger un éventuel biais d'endogénéité, nous utilisons l'endettement (D) comme instrument.

3. Méthodologie de la thèse

L'approche méthodologique que nous avons adoptée est composée de trois étapes complémentaires qui répondent aux objectifs de notre analyse.

Dans un premier temps, nous menons une revue critique et systématique de la littérature des principales études empiriques portant sur l'impact économique de l'adoption du coton génétiquement modifié sur les paysans indiens. Ladite revue porte essentiellement sur les méthodes et les données utilisées. Les résultats quantitatifs de ces travaux empiriques seront également confrontés et comparés. Nous présentons ensuite une deuxième synthèse de la littérature traitant la question de suicide du point de vue économique. Enfin, à partir de ces synthèses, nous ajoutons un certain nombre d'hypothèses qui n'ont pas été prises en considération par les précédentes études empiriques.

Dans un deuxième temps, en utilisant les méthodes d'optimisation dynamique avec contraintes, nous avons élaboré deux essais théoriques afin d'apporter des éléments de réponse au débat persistant sur le lien de causalité entre l'utilisation du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde. Le choix d'un cadre d'optimisation dynamique est justifié par le changement du comportement des insectes ravageurs au cours du temps.

Finalement, une démarche de validation empirique est effectuée. Nous proposons un modèle semiparamétrique bayésien et nous implémentons un échantillonneur de Gibbs (à l'aide d'un programme écrit dans le langage de logiciel WinBUGS). Le choix d'un tel modèle économétrique est motivé par la relation non linéaire entre le suicide des agriculteurs et le taux d'adoption des semences transgéniques. Toutefois, même si les données utilisées sont des données secondaires (recueillies par d'autres études de recherche), la méthode d'analyse empirique développée peut-être profitable pour des futures enquêtes du terrain (transversales ou panel).

4. Contribution de la thèse à la littérature

Le travail présenté dans cette thèse se veut humblement être une contribution à la littérature économique tant sur le plan théorique qu'empirique.

Au plan théorique notre contribution se concentre surtout sur les points suivants :

- la littérature précédente n'a pas pris en considération le caractère dynamique de l'évolution des organismes nuisibles. En effet, juste après l'adoption du coton *Bt*, les économistes se sont concentrés sur les effets directs (à court terme) des semences transgéniques à savoir le rendement, le coût de production, le profit et les inputs. Toutefois, des effets négatifs à moyen et à long terme (tels que la baisse de l'efficacité de la protéine *Bt* et/ou l'apparition d'autres ravageurs secondaires) peuvent se manifester après l'adoption des semences génétiquement modifiées. Dès lors, notre analyse propose l'intégration des nouvelles hypothèses à savoir l'évolution de la résistance², chez les insectes lépidoptères, aux toxines *Bt* et l'émergence de parasites secondaires. Ce type de représentation dynamique a permis d'étudier les effets de ces phénomènes sur la consommation de pesticides et la vulnérabilité des paysans.
- les travaux existants n'ont pas traité explicitement l'incertitude inhérente à la culture des semences transgéniques. En effet, l'utilisation excessive de pesticides (pour le contrôle de ravageurs de plus en plus résistants à la toxine *Bt* ainsi que d'autres insectes non ciblés par cette toxine) a créé une forte incertitude quant à la rentabilité de coton *Bt*. Il semble alors intéressant de prendre en compte cette hypothèse. Pour ce faire, on a choisi d'approximer le gain net par un processus stochastique.
- On a examiné l'interaction entre la gestion intégrée des pesticides (*Integrated Pest Management*) et l'adoption du coton *Bt*. Dans ce cadre, nous précisons le lien entre le suicide de l'agriculteur et le seuil économique de nuisibilité.
- Enfin, notre apport théorique consiste à considérer les éléments expliquant la relation entre la culture du coton transgénique et le suicide des agriculteurs en Inde. En effet, le coton *Bt* et les pesticides ne sont pas réellement substituables.

² Le principal problème avec les plantes *Bt* est la pression sélective en faveur d'insectes résistants. La sélection d'insectes ravageurs résistants à la toxine *Bt* s'exprime par l'augmentation, dans une population déterminée, de la fréquence d'allèles de résistance (Wolfenbarger & Phifer, 2000). Pour cela, Monsanto a conseillé les agriculteurs d'utiliser leur nouveau produit Bollguard II contenant deux toxines agissant par des mécanismes indépendants sur les insectes. Toutefois, une étude (Zhao *et al.*, 2005) a montré que la culture de coton à doubles toxines est totalement inefficace si elle est réalisée à proximité de cultures de coton *Bt* à une seule toxine (Bollguard I).

Introduction générale

La présente thèse se veut également être une contribution empirique à l'analyse des déterminants du suicide des fermiers indiens ayant opté pour l'adoption du coton *Bt*.

- Certes, il existe de nombreux travaux empiriques relatifs aux avantages économiques (à court terme) du coton transgénique, mais, à notre connaissance, il n'y a aucun modèle qui cherche à expliquer la relation entre le coton *Bt* et les suicides des paysans. La majorité de ces études économétriques confirment que l'utilisation des semences transgéniques augmente le rendement et diminue l'usage de pesticides. Toutefois, ces examens empiriques n'ont pas pris en considération le problème d'endogénéité entre l'adoption de la technologie *Bt* et l'utilisation des pesticides ce qui peut donner une estimation biaisée. D'une part, on peut imaginer qu'une utilisation intensive de pesticides pourrait inciter l'agriculteur à adopter la technologie *Bt*. D'autre part, le recours aux semences transgéniques peut aboutir à l'usage intensif des produits phytosanitaires (phénomène de résistance).
- Pour tester le lien entre le suicide des agriculteurs et l'utilisation du coton transgénique, nous proposons un cadre semiparamétrique (partiellement linéaire). L'inférence de notre modèle est menée dans le cadre bayésien avec l'algorithme de Gibbs. L'approche bayésienne nous permet de proposer une modélisation riche et flexible pour une meilleure compréhension de l'incertitude. L'estimation des données de panel à effets fixes, sous l'hypothèse des lois *a priori* peu informatives, peut contrôler les effets de biais de sélection dans l'analyse des enquêtes qui pourrait être effectuée. Plus encore, notre approche a pris en considération l'endogénéité qui peut caractériser l'adoption des semences transgéniques et le suicide. En effet, le choix de cultiver les variétés *Bt* est affecté par la même variable inobservable (le niveau de pression exercé par les ravageurs) qui influence la décision du suicide chez les agriculteurs.

5. Organisation de la thèse

La thèse se décline en cinq chapitres :

- les deux premiers chapitres sont consacrés à la revue de la littérature pour laquelle il a été nécessaire d'éclairer notre problématique et d'introduire les outils d'analyse indispensables à notre travail de recherche. Le premier chapitre constitue une synthèse des travaux précédents qui ont étudié les impacts socioéconomiques de l'introduction du coton *Bt* en Inde. Le deuxième chapitre est entièrement dédié à un survol de la littérature théorique et empirique sur *l'Économie du suicide*.
- les trois derniers chapitres constituent des essais (deux modèles théoriques et une validation empirique). L'objectif poursuivi dans ces chapitres est d'étendre les travaux présentés dans la revue de la littérature de deux premiers chapitres de la thèse par des contributions dans lesquelles *la relation entre l'adoption du coton Bt et le suicide des paysans indiens* est systématiquement analysée.

Le premier chapitre passe en revue l'ensemble de la littérature prenant pour objet les impacts économiques et sociaux, relatifs à l'adoption du coton *Bt*, sur les agriculteurs indiens. La question principale à laquelle les chercheurs ont essayé de répondre est la suivante : l'avènement du coton *Bt* en Inde a-t-il augmenté le profit de l'agriculteur (amélioration du rendement et réduction de la quantité utilisée de pesticides) ? la majorité des travaux empiriques ont confirmé que les semences transgéniques ont réalisé les résultats escomptés. En effet, les agriculteurs adoptants la technologie *Bt* ont obtenu à la fois des rendements plus élevés et des coûts plus bas de pesticides que ceux qui ont continué à cultiver des semences conventionnelles. Par ailleurs, la diminution des coûts liés à l'utilisation de pesticides a permis de compenser les coûts élevés des semences transgéniques. Toutefois, la grande majorité de ces travaux souffrent de certaines limites méthodologiques (la définition des coûts de production n'est pas homogène entre les différentes études empiriques) et d'échantillonnage (la taille réduite des échantillons, le biais potentiel de sélection et le caractère endogène de l'utilisation de pesticides). Ce chapitre est aussi l'occasion d'aborder le thème important du suicide des agriculteurs du coton *Bt* en Inde. En effet, les effets négatifs non prévus des semences transgéniques et la baisse des cours internationaux du coton ont aggravé rapidement le problème d'endettement du fermier indien. Par conséquent, le suicide devient l'unique échappatoire face à une situation économique insupportable.

Le deuxième chapitre propose un survol des contributions théoriques et empiriques liées à l'Économie du Suicide. Ce chapitre s'articule autour de deux points principaux. Le premier apporte une réflexion générale sur le débat qui oppose l'approche économique de suicide, d'une part et celle sociologique, d'autre part. En effet, il semble difficile de parvenir à expliciter les déterminants économiques du suicide sans imposer au préalable des hypothèses sur l'environnement social de l'individu. Le second point vise à dresser un état des lieux sur le phénomène suicidogène d'un point de vue économique. Cette littérature très fournie, au travers d'approches théoriques ou empiriques, balaie un spectre très large aussi bien dans les méthodes adoptées que dans les résultats obtenus. Les travaux théoriques en ce domaine considèrent souvent que les difficultés économiques représentent des facteurs de risque pour le suicide. L'hypothèse centrale de ces travaux est que *le suicide s'apparente à un choix rationnel* (Hamermesh et Soss, 1974; Becker, 1976). En effet, le suicide, où pourrait être modélisé dans le cadre d'un problème de maximisation de l'utilité intertemporelle, devient un choix rationnel si l'utilité espérée de l'agent baisse en dessous d'un certain seuil (Hamermesh et Soss, 1974). En ce qui concerne les études empiriques, la plupart de ces travaux ont mis en évidence la relation entre le chômage et le suicide. Toutefois, ces études ont, pour l'essentiel, négligé l'importance de prendre en considération les caractéristiques politiques, culturelles et sociales propres à chaque pays.

Le troisième chapitre constitue la première contribution théorique de la thèse. Dans ce chapitre nous avançons une explication du comportement suicidaire chez les cultivateurs indiens du coton OGM. En effet, la technologie transgénique est associée à un facteur de risque qui dépend du degré de résistance des insectes ravageurs du coton (vers de la capsule du cotonnier) à la toxine *Bt*. L'exposition prolongée de ces insectes à la protéine *Bt* stimule le développement de résistance chez les ravageurs ciblés, en rendant la nouvelle technologie *Bt* inefficace. Par ailleurs, lorsque la pression de l'insecte cible devient élevée, le coton *Bt* n'est plus résistant et les agriculteurs reviennent à une utilisation intensive et irraisonnée de produits phytosanitaires ce qui représente ainsi un coût additionnel. Outre le prix non négligeable de semences, les coûts des pesticides, nécessaires pour lutter contre les ravageurs résistants, deviennent plus conséquents que ceux payés par le cultivateur de coton conventionnel. Les petits agriculteurs se retrouvent ainsi pris dans une véritable spirale infernale d'endettement ; ce qui entraîne mécaniquement et inexorablement un accroissement régulier du nombre de suicides. Afin de répondre à notre problématique, nous avons tenté de formuler un modèle théorique décrivant le comportement du cultivateur de coton qui est à la fois producteur et consommateur. Dans un premier temps (le problème du producteur) nous

Introduction générale

faisons une extension du modèle de Lichtenberg et Zilberman (1986). Notre contribution (modèle dynamique) suggère que la culture du coton *Bt* revêt un impact positif sur la réduction des dommages mais cet effet est décroissant au cours du temps (le phénomène de résistance au *Bt*). Une autre hypothèse cruciale supposait que les pesticides sont utilisés lorsque *le seuil économique de nuisibilité* est atteint. Ce seuil de tolérance est représenté par la taille de la population de ravageurs qu'un agriculteur peut admettre sans un grand risque pour sa récolte. Dans un second temps (le problème du consommateur), nous utilisons l'approche de l'utilité aléatoire pour expliquer le comportement suicidaire des cultivateurs de coton *Bt* en Inde. Les résultats de cette étude montrent que si le niveau de la population d'insectes croît au-delà du seuil de tolérance, la valeur de l'utilité espérée devient négative et par conséquent l'agriculteur choisira le suicide qui lui rapporte une valeur d'utilité actualisée nulle, *ad vitam aeternam*.

Le quatrième chapitre, le second essai théorique de la thèse, vise pareillement à expliquer le phénomène des suicides d'agriculteurs du coton transgénique en Inde lorsqu'on prend en compte le phénomène de résistance observé chez les insectes ravageurs aux toxines *Bt* ainsi que le problème de l'émergence des insectes secondaires qui peuvent causer des dégâts importants. En effet, les ravageurs secondaires, contre lesquels la toxine *Bt* n'apporte aucun contrôle, sont devenus un sérieux problème. Les agriculteurs doivent donc pulvériser encore plus de pesticides pour contrôler ces insectes qui n'étaient pas vraiment un problème avant l'avènement du coton-*Bt*. Plus encore, une utilisation excessive de pesticides peut également accélérer la résistance chez les organismes nuisibles aux produits chimiques. Ainsi, le modèle développé dans ce chapitre consiste à endogénéiser tout ces aspects en les intégrant dans un programme d'optimisation dynamique en tant que contraintes intertemporelles. Ce type de représentation dynamique a permis *in fine* de déterminer les nouvelles conditions d'équilibre relatives à l'utilisation de pesticides et de semences transgéniques. En effet, les quantités d'équilibre doivent prendre en considération *les coûts indirects* attribuables à la résistance des insectes dans le temps. Par ailleurs, l'hypothèse qui se dégage fortement de cette analyse est que la rentabilité des variétés transgéniques se caractérise par une incertitude accrue pouvant influencer la décision de suicide chez les cultivateurs du coton *Bt*. L'apport de notre modèle consiste donc à introduire l'incertitude sur le gain net associé à la culture du coton *Bt* en supposant que le gain net évolue selon un processus stochastique (une combinaison d'un mouvement brownien géométrique et un processus de Poisson avec sauts vers les bas). Le modèle est résolu analytiquement pour déterminer *le gain net du seuil* (au-dessous duquel un cultivateur du coton *Bt* se donne la mort). Ce gain net minimum est exprimé en fonction des

Introduction générale

paramètres du processus stochastique à savoir la valeur espérée du taux de croissance du gain net, sa variance et la probabilité de saut du gain net vers le bas (à la suite de l'apparition du phénomène de résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt*). Les impacts de changements de ces paramètres sur la valeur du seuil sont également calculés.

Dans *le cinquième chapitre* nous étudions empiriquement les effets de l'adoption du coton *Bt* observés dans les États Indiens producteurs de coton dans le but d'apporter un éclairage sur la relation entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde. En effet, les techniques d'estimation bayésienne (notamment l'échantillonneur de Gibbs) développées dans ce chapitre nous permettent de contourner le problème de la taille réduite de l'échantillon disponible. Notre estimation consiste donc, en premier temps, à fixer des distributions *à priori peu informative* (un choix motivé par l'absence d'informations pertinentes sur la loi *à priori* de paramètres estimables). Dans un second temps, nous procédons à des simulations par l'échantillonneur de Gibbs afin de déduire les caractéristiques *à posteriori* de ces paramètres. Ainsi, en estimant un modèle semiparamétrique bayésien, sur des données agrégées, nos conclusions démontrent clairement un impact positif de l'utilisation du coton transgénique sur le suicide des fermiers indiens. Les cultivateurs de coton *Bt*, avec leurs coûts agricoles élevés, leur agriculture forte utilisatrice des pesticides chimiques et leur dette importante, sont vulnérables et par conséquent sont exposés à un risque élevé de faillite.

Dans la *conclusion générale* nous faisons le point sur les principaux résultats théoriques et empiriques de la thèse. Les différents résultats obtenus nous permettent d'énoncer la conclusion suivante : *les variétés Bt, utilisées aujourd'hui en Inde, n'ont pas fait disparaître définitivement le problème d'insectes de la culture de coton (à cause de l'émergence des ravageurs secondaires et de la résistance au coton Bt développée par les vers de la capsule du cotonnier). En conséquence, l'adoption de ces variétés transgéniques n'a pas permis de réduire l'utilisation de pesticides d'une manière notable. Au contraire, les agriculteurs reviennent à l'utilisation massive de produits phytosanitaires ; ce qui conduit à une augmentation des coûts de production et une dégradation de la situation financière de petits fermiers. De telles circonstances ont poussé des milliers de petits agriculteurs indiens à se suicider.* Néanmoins, certains aspects de notre travail méritent d'être encore approfondis et développés pour conforter notre conclusion. Enfin, pour achever ce travail, nous proposons certaines pistes de recherche futures.

CHAPITRE 1

LES IMPACTS SOCIOECONOMIQUES DU COTON *BT* EN INDE : UNE REVUE DE LA LITTERATURE

1.1 Introduction

Le gouvernement indien a largement encouragé l'adoption du coton génétiquement modifié. Ces semences biotechnologiques, résistants aux insectes ravageurs, ont été commercialisées pour la première fois en 2002. Entre-temps, la diffusion de la nouvelle technologie a été rapide au point qu'elle a remplacé la majorité de la superficie totale cultivée en semences conventionnelles. En 2010, les variétés transgéniques occupent environ 90% de la surface exploitée pour la production de coton (Arora et Bansal, 2012 et Choudhary et Gaur, 2010). Les millions des agriculteurs, qui ont adopté la technologie génétiquement modifiée, peuvent choisir entre des dizaines de variétés.

La technologie *Bt* est souvent considérée comme une solution contre les problèmes liés à la culture du coton (notamment les vers de la capsule du coton). Ainsi, l'utilisation des semences transgéniques a entraîné un accroissement dans la production et le rendement. Les bénéfices sont palpables pour les fermiers indiens les plus pauvres. Durant la saison agricole 2005-2006, l'Etat du Gujarat a réalisé un véritable record en enregistrant un rendement de 728 kg de coton par hectare tandis que la moyenne mondiale n'a été que 715 kg par hectare. Par conséquent, l'Inde est devenue le deuxième pays producteur de coton au monde après la Chine. D'après Clive (2011), « *l'Inde a augmenté le revenu de la ferme grâce au coton Bt de 9.4 milliards de \$ US durant la période 2002-2010 et de 2.5 milliards de \$ US pour la seule année 2010. Ainsi, le coton Bt a transformé la production de coton en Inde en augmentant le rendement de manière substantielle, en diminuant les traitements insecticides d'environ 50% et, via des bénéfices de bien-être, a contribué à la diminution de la pauvreté de 7 millions de petits fermiers pauvres et de leurs familles durant la seule année 2011* »³. L'entreprise semencière multinationale *Monsanto* a affirmé que les OGM nous permettent de produire encore plus sans augmenter la superficie des terres agricoles utilisées.

Toutefois, cette affirmation ne prend pas en considération les impacts de type social ou éthique de la nouvelle technologie *Bt*. En effet, la littérature sur les OGM se concentre essentiellement sur leurs effets à court terme, en omettant les impacts à moyen et à long terme. Cette manière d'évaluer l'adoption du coton transgénique en Inde est lacunaire et qui occulte le fait que la production cotonnière au centre et au Sud du pays peut avoir contribué à un problème économique et social grave.

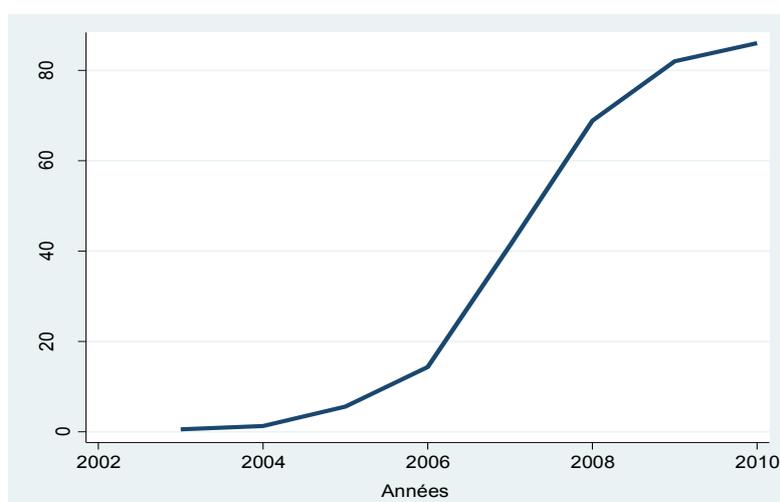
³ James, Clive. 2011. Situation mondiale des plantes GM commercialisées : 2011. ISAAA Brief No. 43. ISAAA: Ithaca, NY.

Bien que l'adoption du coton transgénique ait des impacts positifs sur la productivité, la rentabilité économique, l'environnement et la santé publique (impacts consécutifs à la réduction des traitements chimiques), cette vision ignore ce qui se passe réellement sur le terrain. Ces dernières années, en Inde, de nombreux cas de suicides par ingestion de pesticides ont été constatés. Les victimes sont les petits cultivateurs du coton *Bt* dans les États producteurs du coton (Andhra Pradesh, Karanataka, Madhya Pradesh et Maharashtra). Depuis 2002, en moyenne un paysan se suicide toutes les 30 minutes. Il s'avère que la cause principale du suicide des fermiers réside dans leur surendettement. Ce dernier pourrait provenir du prix élevé des semences ainsi que l'échec de la culture du coton *Bt* en Inde. Ce risque s'accroît avec le pouvoir de monopole exercé par le joint-venture *Mahyco-Monsanto* (le propriétaire du brevet) au détriment des cultivateurs. Ces derniers doivent payer annuellement le droit de cultiver les semences transgéniques. Les fermiers indiens sont contraints d'acquiescer les semences *Bt* cinq fois plus cher que les semences conventionnelles (Rs. 4500 par hectare contre Rs. 950 pour les semences conventionnelles). L'achat de graines de coton *Bt*, dont les prix sont plus élevés que ceux de semences conventionnelles, contribuerait ainsi à l'augmentation de la dette et du coup des suicides, et ce d'autant plus que l'absence d'un marché du crédit formel conduit au recours à l'emprunt, sur le marché du crédit informel, à des taux usuriers pour acheter des variétés OGM. Les imperfections des marchés en milieu rural (Janvry et *al.* 1991) peuvent expliquer pourquoi les paysans ne substituent pas d'autres semences aux celles OGM (Hoogeveen et Oostendorp, 2003). Si l'on ajoute l'idée que ces semences ont une productivité aléatoire, on peut comprendre que des paysans « risquophobes » se suicident à partir d'un certain seuil de revenu agricole (Hamermesh et Soss, 1974). Plus encore, la déception des fermiers indiens a été corroborée par l'absence de réformes profondes du secteur cotonnier et la faible hausse du rendement associé au produit OGM. D'une part, si la quantité d'engrais et celle de pesticides utilisée diminuent, la répartition inégalitaire du revenu, entre les fermiers du coton et le quasi-monopole *Mahyco* (qui détient le brevet des semences transgéniques en Inde), augmente et donc la pauvreté et par conséquent les suicides des agriculteurs augmentent. D'autre part, l'utilisation des semences *Bt* augmente les rendements qui accusent une diminution des prix du coton et une augmentation des prix des semences *Bt*, donc les revenus des agriculteurs diminuent. Ces problèmes, associés à l'adoption du coton *Bt*, prouvent que l'équilibre des systèmes agricoles, dont dépendent les fermiers, pourrait être fragilisé.

Ainsi, l'objet de ce chapitre est de présenter une revue de la littérature concernant les impacts économiques et sociaux de l'adoption du coton *Bt* sur les agriculteurs indiens. Face à une littérature particulièrement riche, l'objet de ce chapitre n'est pas de fournir un survol exhaustif de toute la littérature mais d'apporter une synthèse des travaux empiriques relatifs aux effets controversés de la diffusion des semences transgéniques sur les paysans indiens. Ce chapitre retrace ainsi dans une première section les chiffres et les faits stylisés de la diffusion rapide du coton *Bt* en Inde. En deuxième section nous discutons le phénomène de commercialisation de semences « illégales » en Inde. En effet, la demande de semences *Bt* a toujours excédé l'offre ce qui a créé par conséquent des troubles sérieux lors de la distribution et a abouti dès 2003, au développement d'un marché de semences illégales. Ainsi, la troisième section sera consacrée à la discussion de la politique des prix des semences transgéniques en Inde. En effet, le prix de la technologie semble très élevé en Inde. Les agriculteurs doivent payer les frais de la technologie *Bt* à *Monsanto* ajoutés au prix de nouvelles variétés (supposées donner un meilleur rendement par rapport aux semences conventionnelles). Ensuite, dans une quatrième section, on passera en revue l'impact économique de l'adoption du coton *Bt* sur les paysans indiens. Dans une cinquième section nous en ferons une analyse critique des travaux empiriques qui ont déjà été présentés dans la section précédente. Enfin, la dernière section discutera le lien entre l'adoption du coton et transgénique et le suicide des agriculteurs.

1.2 Des faits et des chiffres

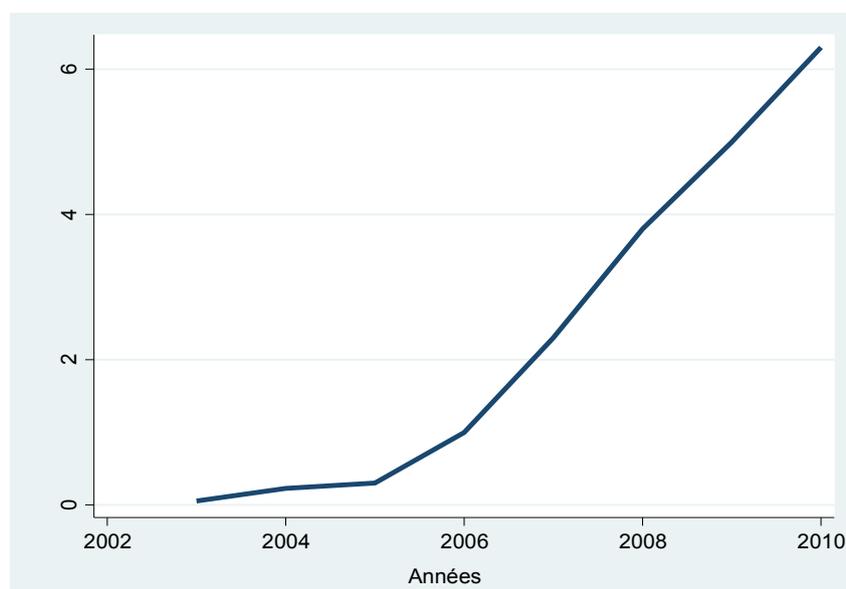
Le coton constitue une importante culture de rente pour des millions de paysans indiens. Cette culture est essentiellement cultivée en neuf Etats indiens répartis dans les différentes régions du pays : le Nord (Pendjab, Haryana et du Rajasthan), le Centre (Madhya Pradesh, Gujarat et Maharashtra) et le Sud (Andhra Pradesh, Karnataka et Tamil Nadu). Le coton contribue pour près de 30% au PIB agricole indien (Bennett *et al.*, 2004a). Au cours de ces dernières années, la superficie cotonnière a considérablement augmenté. Aujourd'hui, l'Inde a la plus grande superficie de coton dans le monde (12 millions d'hectares pour la saison agricole 2010-2011). De même, le rendement annuel moyen du coton a augmenté de façon significative, passant d'environ 278 kg par hectare, durant la saison agricole 2000-2001, à plus de 475 kg par hectare durant la campagne agricole 2010-2011 (*cf.* Fig. 1.3). Selon le Comité Consultatif Indien du Coton (*Cotton Advisory Board of India*), la production de coton a atteint, durant la saison 2010-2011, un record de 5,3 millions de tonnes et la superficie s'est considérablement étendue à un niveau record de l'ordre de 12 millions d'hectares pour la même campagne agricole (*cf.* Tableau 1.1). En conséquence, l'Inde a pu améliorer sa position dans le commerce mondial du coton passant du troisième plus grand importateur en 2002-03 au deuxième plus grand exportateur après les États-Unis en 2007-08. Ces augmentations considérables, de la superficie et de la production, sont attribuées aux rendements élevés réalisés par les cultivateurs de coton au cours de la dernière décennie. Une telle augmentation du rendement est due en grande partie à l'introduction et la diffusion rapide de la nouvelle technologie *Bt* (Khadi, Rao et Singh, 2007).



Source : Choudhary et Gaur (2010, p. 3)

Figure 1.1 : Le pourcentage d'adoption du coton Bt en Inde

En Inde, le coton *Bt*⁴ (*Bollgard I*) a été officiellement commercialisé en Mars 2002 (cf. Tab. 1.2). Cependant, des variétés transgéniques non autorisées ont déjà été cultivées depuis 1998 dans les Etats de Gujarat, Madhya Pradesh, l'Andhra Pradesh, Karnataka et certaines régions de l'Etat de Maharashtra (Scoones, 2005). Les hybrides *Bt* avaient été développés par la société indienne Mahyco en collaboration avec la multinationale *Monsanto* dans le cadre d'une joint-venture appelée « *Mahyco-Monsanto Biotech Limited* » (MMBL). Plus tard, MMBL va concéder sous licence sa technologie *Bt* à d'autres entreprises semencières en Inde. Selon *Monsanto*, le premier semencier mondial, le coton *Bt* est censé aider le cultivateur à réduire les coûts (en réduisant les quantités de pesticides utilisées). De même, en diminuant les dégâts causés par les insectes ravageurs, le coton biotechnologique permet d'améliorer le rendement et par conséquent augmenter le revenu du producteur.



Source : Choudhary et Gaur (2010, p. 7)

Figure 1.2 : L'évolution du nombre d'agriculteurs du coton *Bt*

⁴ Les initiales « *Bt* » renvoient à la *Bacillus thuringiensis*, une bactérie que l'on trouve naturellement dans les sols, et qui produit des toxines nocives pour des insectes de l'ordre des lépidoptères : le ver de la capsule du cotonnier (*Helicoverpa armigera*) et ver rose de la capsule du cotonnier (*Helicoverpa zea*).

L'Etat	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Maharashtra	25	30	200	607	1840	2800	3130	3396	3710
Andhra Pradesh	8	10	75	280	830	1090	1320	1049	1650
Gujarat	10	36	122	150	470	908	1360	1682	1780
Madhya Pradesh	2	13	80	146	310	500	620	621	610
Région du Nord	-	-	-	60	215	682	840	1243	1162
Karnataka	3	4	18	30	85	145	240	273	370
Tamil Nadu	2	7	5	27	45	70	90	109	110
Autre	-	-	-	-	5	5	5	8	8
Total	50	100	500	1300	3800	6200	7605	8381	9400

Source : ISAAA, 2010

Tableau 1.1 : L'adoption du Coton *Bt* dans les principaux États indiens entre 2002 et 2010 (en milliers d'hectares)

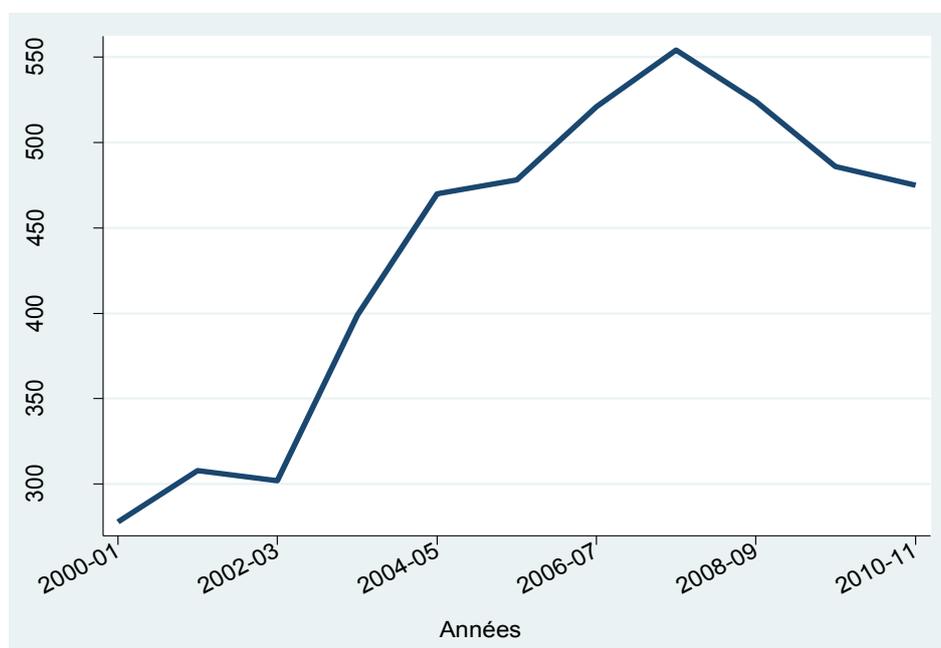
Dates	Evénements
1990-1993	<i>Monsanto</i> a fait une proposition au ministère du gouvernement indien de biotechnologie (Government's Department of Biotechnology) de collaborer sur le développement et la commercialisation de la technologie <i>Bt</i> . Le Gouvernement indien a rejeté l'offre.
1995	Une autorisation a été accordée à Mahyco pour importer le coton <i>Bt</i> de la part de <i>Monsanto</i> .
1996	Le coton <i>Bt</i> de <i>Monsanto</i> a été approuvé pour la diffusion commerciale aux Etats-Unis.
1996	En utilisant le coton Génétique de <i>Monsanto</i> ainsi que ses propres hybrides, Mahyco a développé trois lignes de rétrocroisement et commence les tests de la biosécurité.
1998	<i>Monsanto</i> a acheté des actions dans Mahyco pour former conjointement MMBL. Le but de cette société est de développer et commercialiser les produits biotechnologiques en Inde.
1996-2002	MMBL a effectué des essais de terrain et de la biosécurité pour appuyer le processus d'approbation réglementaire du coton <i>Bt</i> .
2002	Le "Genetic Engineering Approval Committee" (GEAC) a approuvé l'utilisation commerciale du coton <i>Bt</i> de MMBL (<i>Bollgard-I</i>) dans 6 Etats de l'Inde pour une période d'essai de 3 ans.
2006	Le (GEAC) a approuvé l'utilisation commerciale du <i>Bollgard-II</i> la deuxième génération du coton <i>Bt</i> de Mansanto.
2006-2008	Le GEAC a approuvé un total de 274 hybrides de coton <i>Bt</i> commercialisées par 30

	différentes sociétés.
2008	Le GEAC a approuvé le coton <i>Bt</i> génétiquement développé par le secteur public.
2009	La multinationale <i>Monsanto</i> a obtenu le brevet pour vendre la deuxième génération du coton <i>Bt Bollgard-II</i> sur le marché indien.

Source : auteur

Tableau 1.2 : Coton *Bt* en Inde (chronologie des événements)

Dix ans après l'introduction de la technologie *Bt* en Inde, les cultures de coton biotechnologique ont très rapidement atteint 10.6 millions d'hectares, soit environ 90% de la superficie totale (ISAAA, 2011). En juillet 2011, le gouvernement indien a déclaré que 90% de la superficie totale du coton était cultivée avec le coton transgénique, ce qui implique un quasi-monopole des semences de *Monsanto* (*The Hindu*, 2011). La plupart des fermiers indiens ont d'ailleurs accepté de tenter l'expérience du coton *Bt* dans l'idée d'accroître leurs revenus (cf. Fig. 1.2). la surface emblavée avec du coton transgénique a augmenté de 44.5 milles hectares en 2002 à 10.6 millions d'hectares en 2011, soit une multiplication par plus que 200 fois en 10 ans (cf. Fig. 1.1). L'Inde devient aujourd'hui le deuxième plus grand producteur du coton au monde après la Chine.



Source: The Cotton Corporation of India Ltd (2012) le lien NBP

Figure 1.3 : L'évolution des rendements du coton *Bt*

Bien que la diffusion du coton transgénique ait atteint 90% de la superficie totale, le rendement moyen estimé en 2011 a baissé jusqu'à 475kg/ha, soit le plus bas niveau observé depuis cinq ans. Il est à noter que le rendement de coton est passé de 302kg/ha en 2002 à 554kg/ha en l'an 2007. Toutefois, durant la période 2007-2010, le rendement moyen a baissé graduellement pour atteindre 475kg/ha. Selon les entreprises semencières, la baisse du rendement est due principalement à l'utilisation des semences *Bt* illégales.

1.3 Les semences *Bt* illégales

Les variétés de coton *Bt* « illégales » ont été cultivées en Inde avant même les semences transgéniques certifiées. En 2001, le coton *Bt* illégal (hybride NB-151), de la compagnie Navbharat, a été cultivé dans l'Etat du Gujarat sur plus de 10.000 hectares (Ramaswami *et al.*, 2011). Après des tests, il a été constaté que l'hybride NB-151 contenait le gène Cry1Ac, développé par la multinationale *Monsanto*, sans cependant avoir la licence de celle-ci. À partir de 2001, le marché noir des semences *Bt* illégales s'est développé dans les différents États indiens d'une manière exponentielle. Par conséquent, le gouvernement a interdit la commercialisation des semences de la compagnie Navbharat et il l'a poursuivi pour violation de la loi sur la biosécurité. Néanmoins, la distribution des semences non brevetées, vendues sous d'autres noms commerciaux, a continué de se multiplier. Durant la période 1998-2005, l'adoption de semences illégales a considérablement augmenté pour s'étendre sur une superficie plus vaste que celle emblavée en coton *Bt* légal. Durant la campagne agricole 2006-07, les semences *Bt* illégales ont atteint un niveau exceptionnel de 2 millions d'hectares (*cf.* Tab. 1.3)⁵. Cependant, les semences non brevetées sont géographiquement concentrées dans l'Etat de Gujarat et à moindre degré dans les Etats du Pendjab et de l'Andhra Pradesh.

En comparaison avec les semences *Bt* certifiées, la diffusion rapide des variétés illégales est essentiellement attribuée au prix. Plus encore, certains agriculteurs estiment que les semences illégales sont mieux adaptées aux conditions locales (Gupta et Chandak, 2005; Roy *et al.*, 2007). Les semences non brevetées sont vendues entre 800 et 1200 roupies indiennes

⁵ Selon des enquêtes menées par Lalitha *et al.* (2008), entre les saisons 2002/2003 et 2005/2006, la zone couverte par le coton *Bt* illégal a dépassé la surface consacrée aux semences brevetées. Durant la campagne agricole 2006/2007, la superficie cultivée en semences illégales a diminué jusqu'à 34% de la surface totale ensemencée en plantes transgéniques. Bien que la plantation de semences illégales soit encore prédominante, les restrictions sur les prix semblent avoir un effet positif pour rendre les prix du coton *Bt* vendu sous licence plus compétitifs.

(Rs.) par paquet de 450 grammes (une quantité assez suffisante pour planter une acre⁶), par rapport à un prix assez élevé pour les semences officiellement autorisées, soit Rs. 1600 (Murugkar *et al.*, 2007).

Toutefois, la baisse des prix et la disponibilité d'une grande quantité d'hybrides brevetés ont probablement contribué à la réduction de la superficie emblavée en coton *Bt* illégale. Bennett *et al.* (2005) ont montré que les profits moyens associés aux hybrides *Bt* illégaux sont plus élevés que les bénéfices générés par les semences conventionnelles. Cependant, ces profits restent toujours moins importants que les gains réalisés par les hybrides brevetés. En 2007, une enquête auprès de 200 agriculteurs de coton de l'Etat du Gujarat a révélé que 60% de la superficie totale, cultivée par ces fermiers, étaientensemencée par le coton *Bt* illégale (Lalitha *et al.*, 2008). Ainsi, les semences illégales, vendues dans l'Etat du Gujarat, ont continué d'occuper une place importante dans la culture du coton.

Années	La superficie du coton <i>Bt</i> illégal (en million d'hectares)
2002-2003	0.03
2003-2004	0.1
2004-2005	0.6
2005-2006	1.2
2006-2007	2
2007-2008	1.8
2008-2009	1.6
2009-2010	1.3

Source: Pray, Ramaswami et Lalitha (2012, p. 178).

Tableau 1.3 : La superficie du coton *Bt* illégal

1.4 Les prix des semences *Bt* :

Jusqu'à 2006, le prix de semences brevetées en Inde était de l'ordre Rs. 1600 par paquet (*cf.* Tab. 1.4). A ce prix s'ajoute une redevance de 1250 Rs. chargé par MMBL sous forme d'un « trait OGM *Bt* ». Le débat sur les prix du coton *Bt* a déjà commencé en 2005, quand l'association « *South India Cotton Association* » a invité les entreprises semencières à modérer leurs prix. Cette idée a acquis une certaine popularité chez plusieurs associations d'agriculteurs et a encouragé également le gouvernement d'Andhra Pradesh de critiquer le

⁶ 1 acre = 0,4046 hectares

« *Monopolies and Restrictive Trade Practices Commission* » (MRTPC) en annonçant que le prix pratiqué par MMBL était à la fois « exorbitant » et « non étudié ». En réponse, MMBL a affirmé que sa politique des prix est basée sur le partage du gain de la productivité avec l'agriculteur. L'entreprise semencière a précisé que la valeur de la technologie *Bt* a été fixée pour soutenir ce produit sur le marché (en tant que technologie environnementale) et financer également la recherche et développement d'autres nouveaux produits (The Hindu Business Line, 2006a).

La question des prix a pris une tournure politique quand les représentants de l'entreprise MMBL et le gouvernement d'Andhra Pradesh ont réclamé l'intervention de l'Etat fédéral indien. Le ministre de l'agriculture a appuyé donc la proposition de l'Etat d'Andhra Pradesh de faire baisser le prix des semences *Bt* et la société MMBL a proposé en conséquence de réduire le tarif à 900 Rs. Cependant, le gouvernement indien a fait encore une fois un appel pour faire baisser les tarifs du coton transgénique. Cet appel a été appuyé par MRTPC en conduisant MMBL de fixer le prix à un niveau raisonnable et comparable à celui chargé par *Monsanto* aux Etats-Unis et en Chine (The Hindu Business Line, 2006b). L'entreprise MMBL s'est défendue des accusations portées contre elle, en affirmant que l'affaire en cause ne relève pas de la compétence de la commission et elle a contesté l'ordre de MRTPC devant la Cour Suprême. Pendant ce temps, alors que l'affaire était encore devant les tribunaux, le gouvernement de l'Andhra Pradesh a émis une directive obligeant les entreprises semencières de ne pas vendre les semences *Bt* au-dessus d'un seuil de 750 Rs. par paquet. Plusieurs autres Etats cotonniers ont suivi l'exemple d'Andhra Pradesh. Plus tard, la Cour Suprême a confirmé l'ordre de MRTPC en imposant à l'entreprise MMBL de vendre les semences *Bt* au même prix fixé en Chine. Ainsi, les prix des semences *Bt* en Inde ont baissé d'une manière significative depuis 2006, malgré les incertitudes juridiques qui demeurent. Ainsi, quel est l'impact d'un prix plafonné sur la diffusion du coton transgénique ?

L'argument le plus commun est que la politique du contrôle des prix peut accélérer la diffusion de la technologie *Bt*. Depuis l'autorisation de la commercialisation de coton *Bt* en 2002, la superficie emblavée en OGM est sans cesse croissante. Durant la période 2002-09, la diffusion de la technologie *Bt* en Inde était rapide (cf. Fig. 1.1). En 2006, après avoir adopté la politique de prix plafond, le taux d'adoption a enregistré une hausse de 192% par rapport à l'année précédente. La superficie plantée en coton transgénique a respectivement augmenté de 63% et 23% en 2007 et 2008.

Il existe dans la littérature économique deux points de vue divergents sur l'impact du contrôle des prix des semences sur la demande des biotechnologies agricoles.

Le premier point de vue :

La politique du prix plafond contribue non seulement à la diffusion rapide de la nouvelle technologie *Bt* (les semences deviennent plus accessibles aux agriculteurs) mais aussi à l'accroissement de la rentabilité de l'entreprise agricole (Qaim et de Janvry, 2003). Motivé par un faible taux d'adoption de coton *Bt* en Argentine, Qaim et de Janvry (2003) ont analysé la prédisposition des agriculteurs à payer (*farmers willingness to pay*) ainsi que la courbe de demande pour la nouvelle technologie simulée sous des différents régimes de tarification. En utilisant la méthode d'évaluation contingente, les auteurs ont constaté que la courbe de demande pour le coton *Bt* est très élastique par rapport au prix et la prédisposition des agriculteurs à payer était beaucoup plus faible que le prix du marché des semences transgéniques en Argentine. Par conséquent, Qaim et de Janvry (2003) ont suggéré que la réduction de « mark-up » de coton *Bt* serait bénéfique non seulement pour l'agriculteur mais aussi pour les entreprises semencières et entraînerait ainsi une amélioration de bien-être au sens de Pareto.

Le deuxième point de vue :

Sadashivappa et Qaim (2009) ont analysé l'adoption du coton *Bt* en Inde sous l'hypothèse d'un prix plafonné par l'Etat. Ils ont constaté que le niveau de la prédisposition à payer est élevé (un niveau très proche au prix du marché). Selon les auteurs, la phase initiale de l'adoption des semences transgéniques a déjà commencé avant 2006 et donc les interventions de l'Etat sur le prix ont eu un faible impact sur le taux d'adoption globale. Par conséquent, le contrôle des prix des semences pourrait réduire la prédisposition des entreprises semencières à innover dans le futur et l'intervention de l'Etat ne peut donc être qu'inutile. Ainsi, la politique interventionniste de l'Etat doit être mise en œuvre après une analyse approfondie de l'impact potentiel - à long terme- qui aurait le contrôle du prix sur les innovations agricoles.

Quel est l'impact de la politique de l'intervention de l'Etat en matière des prix sur la diffusion du coton *Bt* en Inde ?

Pray et Rao (2008) ont eu recours à l'analyse coût/bénéfice dans le but d'évaluer l'efficacité, à court et à long terme, de la politique du contrôle des prix des semences *Bt* en Inde. Cette politique peut évidemment améliorer le bien-être de l'agriculteur à court terme (à la suite d'une baisse du coût de production). Cependant, le contrôle du prix des semences

peut entraîner une distorsion du marché à long terme. En effet, la politique interventionniste en matière des prix peut amener les entreprises semencières à long terme à réduire le montant d'investissement consacré à la recherche et développement et retarder ainsi l'offre des biotechnologies agricoles. Pray et Rao (2008) ont pu déduire que les bénéfices à court terme, associés à la politique du contrôle des prix, semblent l'emporter sur les pertes potentielles à long terme. Basu et Qaim (2007) ont discuté également le rôle que l'Etat doit jouer pour encourager l'adoption des semences *Bt* légales et réduire le nombre d'agriculteurs cultivant des OGM non brevetés. Basés sur des observations empiriques, Basu et Qaim (2007) ont développé un modèle théorique qui retrace la décision de l'agriculteur en matière d'adoption de la technologie *Bt* suite à des stratégies de tarification d'un monopole étranger et un fournisseur national des semences conventionnelles. Les deux auteurs ont montré qu'il existe une corrélation positive entre le prix des OGM et celui des semences conventionnelles. En se basant sur cette complémentarité stratégique entre les prix, Basu et Qaim (2007) ont évalué une série des instruments politiques qui visent à généraliser l'accès des agriculteurs les plus démunis aux semences *Bt*. Les deux auteurs ont déduit que la forme optimale de l'intervention de l'Etat est celle qui correspond à subventionner la production des semences conventionnelles.

Murugkar, Ramaswami et Shelar (2007) ont discuté les situations de concurrence parfaite et de monopole au marché des semences *Bt*. Ils ont cité deux solutions pour accéder aux hybrides *Bt* :

- i) l'entreprise peut acquérir le gène *Bt* sous licence chez un fournisseur de biotechnologies,
- ii) elle peut développer son propre gène *Bt* en entreprenant des activités de recherche et de développement.

Selon ces auteurs, pour une entreprise semencière, le développement de ses propres gènes *Bt* représente un coût considérablement élevé. Cependant, les investissements nécessaires au développement du gène *Bt* pourraient être récupérés facilement si la firme suit la première solution puisque les investissements en recherche et développement ne constituent pas des barrières à l'entrée. En 2006, deux compagnies de semences indiennes, « JK Agri Genetics Ltd » et « Graines Nath Ltd », ont opté pour la deuxième solution. Elles ont obtenu l'autorisation pour leurs propres hybrides du coton *Bt* (intégrant de nouveaux gènes non inventés par *Monsanto*). Murugkar, Ramaswami et Shelar (2007) ont soutenu l'idée que la concurrence provenant d'autres firmes « agbiotech » pourraient avoir un impact important en

termes de la baisse de prix puisque les entreprises semencières concurrentes pourraient cibler une valeur du trait OGM inférieure à celle fixée par MMBL. Ainsi, le plafonnement du prix des semences *Bt* peut contrôler la tarification pratiquée par le monopole (MMBL), mais cette politique peut décourager les autres entreprises agbiotech, «*JK Agri Genetics Ltd*» et «*Graines Nath Ltd*», à investir dans la recherche et développement en raison des coûts élevés.

Enfin, Arora et Bansal (2012) ont examiné si la politique de prix plafonné des semences a vraiment influencé le taux de diffusion et dans quelle mesure. Les auteurs ont constaté que l'augmentation de la superficieensemencée avec le coton *Bt* ne peut pas être entièrement attribuée à la politique interventionniste de l'Etat. Elle est également liée à certains d'autres facteurs comme la variation des cours du coton et l'introduction d'autres nouveaux hybrides depuis 2005. Plus encore, l'année 2006 a été caractérisée par l'autorisation commerciale de trois autres variétés (hybride *Bollgard-II* qui a été développé par MMBL et deux autres nouvelles variétés développées par «*JK Agri Genetics Ltd*» et «*Graines Nath Ltd*»). Selon ces auteurs, la baisse de prix des semences doit logiquement contribuer à l'accélération de diffusion des variétés transgéniques mais son impact reste très limité. Par conséquent, le gouvernement devrait chercher d'autres politiques qui permettraient d'augmenter à la fois le taux de diffusion de la technologie *Bt* et le bien-être social. L'une des politiques proposées consiste à simplifier les formalités et les procédures administratives visant l'autorisation des nouveaux hybrides *Bt*. Selon Lalitha *et al.* (2008), le cadre réglementaire actuel en Inde est très complexe, prend du temps, et agit comme une barrière à l'entrée pour les nouveaux hybrides. Ainsi, la révision du cadre réglementaire en vigueur pourrait encourager les nouvelles firmes agbiotech d'avoir un accès au marché des semences et créer une certaine concurrence entre elles. La concurrence, entre les fournisseurs de gènes, pourrait réduire les prix des semences par les forces du marché (non par la politique interventionniste de l'Etat) et permettrait donc à augmenter le taux d'adoption des semences transgéniques.

Années	Prix de vente de semences dans les Etats Indiens par paquet de 450 grammes (en roupies indiennes)				Le frais total de trait ⁷ par paquet de 450 grammes (en roupies indiennes) dans les Etats avec contrôle des prix		Le droit de fournisseur de la technologie par paquet de 450 grammes (en roupies indiennes) dans les Etats avec contrôle des prix	
	Les États sans aucun contrôle des prix		Les États avec contrôle des prix					
	BGI	BGII	BGI	BGII	BGI	BGII	BGI	BGII
2002/03	1600		1600		1200		696	
2003/04	1600		1600		1200		696	
2004/05	1675		1675		1250		726	
2005/06	1700		1700		1250		726	
2006/07	750	1390	650	750	260	435	150	225
2007/08	750	925	650	750	150	260	96	160
2008/09	750	925	650	750	150	260	96	160
2009/10	750	925	650	750	150	260	96	160

Notes: BGI = la technologie *Bt* de *Monsanto* contenant une seule protéine (*Bollgard-I*); BGII= la technologie *Bt* de *Monsanto* contenant double-protéines (*Bollgard-II*)
 Les contrôles des prix ont été officiellement imposés par les Etats : Andhra Pradesh, Maharashtra et Gujarat au début de la saison agricole 2006. Ces trois états occupent ensemble près de 80% de la superficie totale du coton *Bt*. Cependant, au Madhya Pradesh, le contrôle des prix ont été imposées au cours de la saison 2006 qui a été après retiré suite à une défaite contre le MMBL devant la Cour Suprême. Le contrôle des prix n'ont pas été adoptés dans les Etats : Haryana, Panjab, Rajasthan, Karnataka et Tamil Nadu.

Source : Pray et Nagarajan (2010, p. 302).

Tableau 1.4 : Prix des semences du coton Bt aux États indiens (avec et sans contrôle des prix)

1.5 L'impact économique du coton *Bt* en Inde :

De nombreuses études ont été publiées concernant l'impact économique des cultures génétiquement modifiées sur le fermier indien. Ces travaux varient d'une simple analyse descriptive à des études économétriques avancées. Smale *et al.* (2009) ont dressé une revue bibliographique de 137 études réalisées au cours de la période 1996-2007 et publiées dans des revues à comité de lecture. Le survol a examiné l'impact économique de la culture transgénique sur l'agriculteur, le consommateur, l'industrie et le commerce international dans les pays en développement. Cette revue de la littérature est dominée par des travaux théoriques et empiriques portant sur le coton *Bt*, ce qui montre la place importante occupée par cette plante dans les études économiques sur la biotechnologie agricole. Le but de cette

⁷ Les variétés OGM commercialisées en Inde contiennent des traits génétiques Monsanto.

section consiste ainsi à examiner, à travers ces études économiques, l'impact de la culture de coton *Bt* en Inde sur le coût de production, le rendement et le gain.

Le tableau 1.4 donne un aperçu général sur les données et les méthodes utilisées par les différentes études qui ont tenté à évaluer l'impact économique du coton *Bt* sur les différents agents économiques en Inde. Ces études se distinguent par deux catégories: *ex-ante* et *ex-post*. Les études *ex-ante* utilisent généralement les modèles d'équilibre partiels ou les modèles d'équilibre général calculable pour analyser les coûts et les bénéfices attendus de l'adoption du coton transgénique. Ces études se sont également focalisées sur la répartition des bénéfices entre les différents agents économiques (les producteurs, les consommateurs et les entreprises qui fournissent les semences transgéniques). Les études *ex-post* mesurent les avantages effectifs (l'amélioration du rendement et la baisse du coût de production) en utilisant les différentes approches statistiques et économétriques⁸.

⁸ L'estimation d'une frontière de production stochastique, l'estimation d'une fonction de réduction des dommages, le modèle d'effet du traitement (treatment effect model)...

	L'année de l'enquête	Taille de l'échantillon	Type d'étude	Méthode
1. Sahai et Rehman (2003)	2002-2003	100 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
2. Qaim (2003)	2001	157 agriculteurs	<i>Ex-ante</i>	Analyse des données de l'essai sur le terrain
3. Qaim et Zilberman (2003)	2001	157 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	L'analyse des données, la fonction de rendement-densité et la fonction logistique associée au contrôle des dommages
4. Sahai et Rehman (2004)	2002-2003	100 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
5. Pemsil, Waibel et Orphal (2004)	2002	100 agriculteurs	<i>Ex-ante / Ex-post</i>	Equilibre partiel stochastique du budget
6. Bennett, Ismael, Kambhampati et Morse (2004a)	2002-2003	7751 parcelles (2709 agriculteurs); 1580 parcelles (787 agriculteurs)	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
7. Barwale, Gadwal, Zehr et Zehr (2004)*	2001	157 agriculteurs	<i>Ex-ante</i>	Analyse des données de l'essai sur le terrain
8. Bennett, Ismael, Morse et Shankar (2005)	2003	622 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole et l'analyse de régression multiple
9. Morse, Bennett, et Ismael (2005b)	2002-2003	7751 parcelles; 1580 parcelles	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
10. Naik, Qaim, Subramanian, et Zilberman (2005)	2003	341 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole, fonction de production
11. Orphal (2005)*	2002-2003	100 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
12. Bennett, Kambhampati, Morse et Ismael (2006a)	2002-2003	7751 parcelles; 1580 parcelles	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête

				agricole, fonction de production
13. Narayanamoorthy et Kalamkar (2006)	2003	150 agriculteurs (50 cultivateurs du coton non-Bt)	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
14. Qaim, Subramanian, Naik, et Zilberman (2006)	2003	341 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole, fonction de production
15. Gandhi et Namboodiri(2006)*	2004	694 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
16. Qayum et Sakkhari (2005)	2002-03, 2003-04, 2004-05	225, 164, 220 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole
17. Crost, Shankar, Bennett et Morse (2007)	2002 et 2003	338 agriculteurs, 718 parcelles	<i>Ex-post</i>	Analyse des données de l'enquête agricole, données de panel (effet fixe), le biais de sélection et fonction de production Cobb-Douglas
18. Morse, Bennett et Ismael (2007a)*	2002 et 2003	63 agriculteurs non adoptant du coton <i>Bt</i> et 94 cultivateurs du coton <i>Bt</i>	<i>Ex-post</i>	Comparaison entre les adoptants et les non-adoptants via une analyse de la variance (ANOVA).
19. Morse, Bennett et Ismael (2007b)	2002 et 2003	63 agriculteurs non adoptant du coton <i>Bt</i> et 94 cultivateurs du coton <i>Bt</i>	<i>Ex-post</i>	Comparaison entre les adoptants et les non-adoptants via une analyse de la variance, la mesure de l'inégalité de la marge bénéficiaire brute par le coefficient de Gini
20. Dev et Rao. (2007)*	2004-2005	186 agriculteurs non adoptant du coton <i>Bt</i> et 437 cultivateurs du coton <i>Bt</i>	<i>Ex-post</i>	Analyse descriptive
21. Gruère et Sengupta (2011)*			<i>Méta-analyse</i>	La méta-analyse de la littérature disponible ; un cadre conceptuel

				pour examiner les suicides des agriculteurs du coton <i>Bt</i> au centre de l'Inde
22. Crost et Shankar. (2008)*	2002 et 2003		<i>Ex-post</i>	Des estimations à effets fixes, le modèle d'aversion au risque de Just et Pop
23. Subramanian et Qaim (2009)*	2004	305 agriculteurs	<i>Ex-ante / Ex-post</i>	Matrice de Comptabilité Sociale (SAM)
24. Sadashivappa et Qaim (2009)*	Données de Panel : 2002-2003 2004-2005 2006-2007	341, 318 et 289 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	Une analyse Descriptive et la Prédiposition à payer
25. Shahzad et Qaim (2011)*	Données de Panel : 2002-2004 2006-2008	198 agriculteurs	<i>Ex-post</i>	La régression de poisson sur données de panel

Source : Smale *et al.* (2009, p. 22).

Note: * indique que l'étude n'a pas été mentionnée dans Smale *et al.* (2009).

Tableau 1.5 : Les études sur les impacts économiques du coton *Bt* en Inde

Au niveau de l'exploitation agricole, les impacts économiques du coton *Bt* pourraient être examinés par la comparaison entre le revenu de plantes transgéniques et le gain de semences conventionnelles. Malgré les différents types des données et des méthodes utilisées, la plupart des études ont clairement constaté les impacts positifs de la culture de coton *Bt*. Les effets positifs rapportés sont : une amélioration du rendement et une réduction des applications de pesticides ce qui entraîne ainsi un accroissement de la marge bénéficiaire brute pour ceux qui ont adopté le coton *Bt* par rapport à ceux qui ne l'ont pas adopté. Cette section se propose donc de présenter une revue des études empiriques qui abordaient plus spécifiquement la mesure des impacts économiques liés à l'adoption du coton transgénique. Il s'agit également de discuter les méthodes empiriques qui permettent de mesurer les effets de la culture de variétés *Bt* sur le coût de production, le rendement, la marge bénéficiaire brute, les heures de travail, la santé, l'environnement et les moyens d'existence (*livelihood*).

L'Inde, qui cultive le quart des superficies cotonnières mondiales, occupe la première place dans le monde suivie par les Etats-Unis et la Chine. En 2002, la culture du coton transgénique a été autorisée dans six Etats indiens : Andhra Pradesh, Madhya Pradesh,

Gujarat, Karnataka, Maharashtra et Tamil Nadu (Barwale *et al.*, 2004). L'adoption du coton biotech a entraîné une augmentation de la production à un taux annuel moyen de 10% entre 2000 et 2007. Durant la même période, le rendement moyen a atteint 554 kg/ hectare avec une hausse de 84% (Fig. 1.3). Toutefois, le rendement du coton indien demeure encore le plus faible à l'échelle internationale. La part de la superficie irriguée représente 30% de la surface totale cultivée en coton, par contre la plus grande partie de la production dépend des eaux pluviales. Des enquêtes de panel ont été menées dans les différents Etats cotonniers (Tab. 1.4). Les études empiriques réalisées montrent que l'impact de la technologie *Bt* varie selon les enquêtes ainsi que les conditions agricoles et environnementales propres à chaque Etat indien. L'enquête de panel, qui a été effectuée dans les Etats Maharashtra, Karnataka, Andhra Pradesh et du Tamil Nadu durant les années 2002-2003, 2004-2005 et 2006-2007, montre bien que les résultats ne sont pas complètement homogènes entre ces Etats (Tab. 1.5).

Les économies sur le coût de production par hectare dépendent de la variation des charges liées aux semences et aux produits phytosanitaires. Les deux dernières colonnes du tableau 1.5 correspondent aux marges bénéficiaires brutes associées respectivement aux variétés *Bt* et non-*Bt*. La marge bénéficiaire brute par hectare est définie par différence entre le revenu du coton et son coût de production. Cependant, le calcul du coût de production entre les différentes études n'est pas identique. Certaines études ne contiennent que les coûts de contrôle d'insectes (qui incluent le prix de la technologie *Bt*) par contre d'autres travaux ont pris en considération seulement les coûts associés au traitement de vers de la capsule du coton et la charge liée aux semences transgéniques et certaines autres études ont calculé le coût de production total (les pesticides, les semences, les engrais, l'eau...). Ainsi, les résultats entre ces études ne sont pas toujours comparables.

Selon les estimations de ces travaux, l'Inde a enregistré une augmentation substantielle du rendement à la suite de l'introduction du coton *Bt*. La mise en culture du coton *Bt*, a entraîné ainsi un accroissement de la marge bénéficiaire brute. Cependant, il existe une différence importante entre les Etats producteurs du coton (Tab. 1.5). Par exemple, la diminution du nombre de pulvérisations varie entre -0,5 et -4,5 et la baisse du coût d'utilisation de pesticides en pourcentage est comprise entre 5,8% et 72,9%. Les études disponibles sur l'Etat de Maharashtra ont montré que les variétés *Bt* atteignent un rendement nettement plus élevé que les variétés conventionnelles. En général, les études empiriques ont constaté que la performance du coton *Bt* varie non seulement entre les périmètres irrigués et « non irrigués » de l'Etat (Orphal, 2005), mais également entre les différents districts au sein d'un même Etat

(Bennett *et al.*, 2006; Morse *et al.*, 2007b). Gandhi et Namboodiri (2006) sont parvenus à la même conclusion pour quatre Etats indiens (Gujarat, Maharashtra, Andhra Pradesh et du Tamil Nadu). Dans l'ensemble, Qaim *et al.* (2006) ont montré que le coton *Bt* semblait être plus rentable que les semences conventionnelles. Toutefois, selon ces auteurs, les adoptants du coton *Bt* dans les Etats du Maharashtra, Karnataka et Tamil Nadu ont obtenu des gains nets suffisamment importants, tandis que les cultivateurs du coton génétiquement modifié en Andhra Pradesh ont subi une perte. En effet, au moment de l'enquête, la plupart des agriculteurs étaient touchés par une sévère sécheresse durant laquelle les hybrides *Bt* n'ont pas été parfaitement adaptée. L'étude de Qaim *et al.* (2006) est basée sur une enquête de terrain menée dans quatre Etats au cours de la campagne 2003. Sadashivappa et Qaim (2009) ont utilisé des données de panel (durant les saisons agricoles 2002-03, 2004-05 et 2006-07) relatives aux mêmes Etats (Maharashtra Karnataka, Andhra Pradesh et du Tamil Nadu). Les deux auteurs ont montré que la performance économique du coton *Bt* varie non seulement selon la région mais également selon la saison agricole.

La grande majorité de ces références ont utilisé des bases de données recueillies durant les périodes 2002-03, 2003-04 et 2004-05. Afin d'examiner l'impact du coton *Bt* sur le rendement et la consommation de pesticides, Gruère et al. (2011) ont fait une méta-analyse de ces études. Les résultats indiquent que la performance économique du coton *Bt* varie entre les régions. Par exemple, la marge bénéficiaire brute de la variété *Bt* par rapport aux semences conventionnelles était plus élevée dans l'Etat de Tamil Nadu (196%), suivie par Gujarat (89%) et Karnataka (59%).

	Différence entre les nombres de pulvérisations de pesticides	La différence en pourcentage				La marge bénéficiaire brute	
		Coût de pesticides	Coût de semences	Coût total	rendement	Bt	Non-Bt
Orphal (2005)^a							
Karnataka (Irriguée)	-1.0	-54.7	304.5	9.4	13.1	444	359
Karnataka (Non-Irriguée)	--	-16.3	308.4	26.8	-2.2	256	339
Gandhi and Namboodiri (2006)^c							
Gujarat	--	--	136.8	13.7	35.4	32,065	18,244
Maharashtra	-1.9	-21.3	192.4	36.5	46.3	22,634	14,317
Andhra Pradesh	-3.8	-25.8	173.1	5.6	44.6	18,831	5,426
Tamil Nadu	-2.0	-54.5	237.0	13.7	28.5	15,242	5,772
Qaim et al. (2006)^b							
Maharashtra	-1.8	-40.9	--	16.8	34.2	4,998	3,203
Karnataka	-2.8	-43.8	--	15.4	31.9	8,306	3,051
Tamil Nadu	-4.5	-48.9	--	18.5	72.9	6,890	2,096
Andhra Pradesh	-1.8	-72.9	--	5.4	43.0	2,008	3,353
La Moyenne	-2.6	-40.9	221.0	16.8	34.2	5,294	3,133
Bennett et al.(2006a)^b							
Maharashtra (2002)	-0.9	-47.6	232.0	14.7	45.0	15,700	10,524
Maharashtra (2003)	-1.1	-57.1	216.6	2.1	62.8	20,600	11,849
Morse et al.(2007b)^{b, d}							
Maharashtra (2002)	--	-5.8	241.2	30.8	84.8	12,523	4,954
Maharashtra (2003)	--	-30.2	226.7	33.4	81.7	14,048	5,956
Dev and Rao (2007)^b							
Andhra Pradesh (2004-05)	--	-18.2	134.4	11.5	31.6	-363	-2169
Sadashivappa and Qaim (2009)^b							
2002-03	-2.6	-40.9	221.0	16.8	34.2	5,294	3,133
2004-05	-2.6	-34.8	208.2	12.6	34.8	4,922	2,152
2006-07	-0.5	3.0	67.6	23.5	42.7	7,121	4,181

Source : auteur

Notes : Le signe négatif indique que l'indicateur associé au Bt est moins que celui relatif aux variétés non-Bt.

a : La marge bénéficiaire brute est exprimée en \$ US / hectare.

b : La marge bénéficiaire brute est exprimée en Roupies / acre.

c : La marge bénéficiaire brute est exprimée en Roupies par hectare.

d : le coût des pesticides comprend seulement le coût des pulvérisations de vers de la capsule du cotonnier.

-- : signifie non disponible.

Tableau 1.6 : Comparaison des coûts et des rendements de coton Bt et non-Bt en Inde

L'expérience de l'Inde en matière de variétés transgéniques indique que le coton *Bt* a un avantage économique comparé aux semences conventionnelles. Cet avantage est exprimé par une augmentation substantielle des rendements. En effet, la toxine *Bt* permet à la plante de s'auto-protéger contre l'insecte nuisible en réduisant ainsi les pertes considérables du rendement. La comparaison entre les rendements des grands agriculteurs et ceux des petits exploitants montre une certaine variabilité de résultats. Suite à l'adoption du coton *Bt* en Inde, les rendements du coton *Bt* ont augmenté de 83% et de 10% respectivement pour les grands et les petits agriculteurs. Par contre, les dépenses en pesticides ont diminué de 24% pour les petits agriculteurs et ont augmenté de 14% pour les grands exploitants (Dev et Rao, 2007).

Outre les effets sur le rendement, la marge bénéficiaire brute et les coûts, le coton *Bt* a d'autres impacts qui doivent être discutés. Il s'agit notamment de l'impact sur les heures de travail, la santé, l'environnement et les moyens d'existence. La revue de littérature sur ces impacts pourrait être résumée par les points suivants :

- avec l'utilisation du coton transgénique le nombre de pulvérisations a été réduit ce qui a permis une diminution de la consommation de pesticides et également une baisse de la main-d'œuvre embauchée. Toutefois, l'accroissement de la production de coton peut augmenter la demande de main-d'œuvre durant la période de récolte. Dev et Rao (2007) ont observé que l'adoption du coton *Bt* a fait augmenter les besoins en main d'œuvre à la fois permanente et occasionnelle. En effet, Dev et Rao (2007) ont observé une augmentation du nombre d'heures de travail ce qui entraîne un accroissement des opportunités d'emploi pour les pauvres dans les zones rurales et peut donc jouer un rôle important au développement de l'économie rurale (en augmentant le revenu des travailleurs occasionnels). Dans le cas du village de Kanzara (l'Etat de Maharashtra), Subramanian et Qaim (2010) ont montré que l'adoption de semences *Bt* certifiées a eu un effet significativement positif sur l'activité économique du village se traduisant par la création de nouveaux postes d'emploi, en particulier pour les femmes. Généralement, les femmes s'en chargent des travaux de récolte par contre les hommes s'occupent de l'entretien des plantes. La part la plus importante du revenu total du village Kanzara revient aux salariés agricoles. Il s'agit des femmes arrivant de familles qui ne possèdent pas des terres et travaillant dans des exploitations agricoles voisines. Ainsi, la demande de main d'œuvre a affiché une croissance grâce à l'accroissement du rendement engendré par la culture de coton *Bt*. En comparaison avec les semences conventionnelles, les variétés *Bt* ont entraîné une augmentation moyenne des revenus de 55%, soit un surplus de 40 \$US par hectare. Selon Subramanian et Qaim (2010), la culture du coton

Bt a généré un revenu additionnel pour plus de 400 millions d'ouvrières. Par contre, l'accroissement du revenu moyen des hommes n'était pas évident car ils s'en chargent plutôt des cultures et leur part salariale est sensiblement inférieure à celle des femmes.

– En plus des avantages potentiels du coton *Bt* pour la santé, la diminution du nombre de pulvérisations nécessaires (pour contrôler les vers de la capsule du cotonnier), peut également apporter des avantages environnementaux. Néanmoins, l'application intensive de pesticides contre les autres types d'insectes (les ravageurs secondaires) peut annuler ces avantages.

– la majorité des études ont examiné l'impact du coton *Bt* sur l'utilisation des pesticides et le rendement. Bien que les résultats varient selon les régions et les compagnes agricoles, ces études ont communément montré qu'avec l'adoption du coton *Bt* l'agriculteur a pu contrôler les pertes en rendement, réduire les dépenses en pesticides, et augmenter ainsi son revenu brut. Ces études n'ont pas examiné l'impact direct de semences transgéniques sur la pauvreté, mais elles ont supposé que l'accroissement de revenu a permis une réduction de la pauvreté. En utilisant les modèles d'équilibre partiel ainsi que les modèles d'équilibre général calculable, ces études indiquent également que le coton génétiquement modifié est une technologie qui améliore le bien-être. Cependant, peu est connu au sujet de l'impact de la technologie *Bt* sur le bien-être économique des agriculteurs. Deux études seulement (Subramanian et Qaim 2009; 2010) qui ont testé empiriquement l'impact de l'adoption du coton *Bt* sur le bien-être économique de l'agriculteur. Subramanian et Qaim (2009; 2010) ont élaboré une matrice de comptabilité sociale (SAM) pour le village indien Kanzara. A la suite des simulations, ces études ont montré que la culture de coton *Bt* a permis une réelle augmentation du revenu pour tous types de ménages y compris ceux dont le revenu est inférieur au seuil de la pauvreté. Ainsi, selon les auteurs, la technologie *Bt* semble être la solution pour réduire la pauvreté.

– Kouser et Qaim (2011) ont analysé l'impact du coton *Bt* sur la santé des agriculteurs indiens. Les auteurs ont utilisé les données d'une enquête de panel réalisée pendant la période 2002-2008. Les résultats montrent que l'utilisation du coton *Bt* a permis une réelle diminution de la quantité de pesticides dangereux et a évité ainsi plusieurs cas d'intoxication aiguë. Ces avantages ont entraîné des économies annuelles sur les dépenses de santé estimées entre 14 et 51 millions de dollars US. Les auteurs considèrent que les effets positifs sur la santé doivent être pris en considération dans l'évaluation des risques et des avantages des produits OGM.

1.6 Une évaluation critique de la littérature

L'analyse présentée à la section précédente nous a permis d'identifier certains problèmes liés à la fois aux données et aux méthodes utilisées. Dans la présente section nous allons résumer ces problèmes par les points suivants :

- Deux problèmes, liés à la cohérence des données, qui peuvent être identifiées: 1) la taille réduite des échantillons et 2) le biais potentiel de sélection⁹. La plupart des articles, publiés jusqu'à nos jours, ont été élaborés sur la base des échantillons de taille réduite, couvrant un petit nombre d'agriculteurs durant certaines saisons agricoles (Smale *et al.* 2006a, 2006b). Un large éventail d'approches sera nécessaire pour comprendre les impacts du coton *Bt* sur les différents types de ménages (ou groupes de ménages) ainsi que les risques engendrés.

- Un problème majeur provient des hypothèses fondamentales sur lesquelles se basent un bon nombre d'études. En particulier, les chercheurs ont supposé que l'agriculteur a tendance à maximiser le profit moyen plutôt que minimiser les risques, et par conséquent la productivité devient prioritaire sur la sécurité alimentaire; ces préférences ainsi que les priorités supposées peuvent ne pas refléter le comportement réel des agriculteurs (Soleri *et al.* 2008). L'hypothèse de la maximisation du profit, qui a été retenue par la majorité des études, est à la base de la croyance erronée qui dit que le coton transgénique et les pesticides doivent être traités comme des *inputs substituables* pour lutter contre les insectes ravageurs. En d'autres termes, une augmentation de la superficie de coton transgénique doit être compensée par une diminution proportionnelle de la quantité de pesticides utilisée. Toutefois, la multinationale *Monsanto* a pour la première fois reconnu que son coton *Bt* est entrain de devenir totalement inefficace, les insectes ravageurs ayant développé une résistance oblige les agriculteurs à multiplier les épandages d'insecticides. Ainsi, la relation négative entre l'adoption du coton *Bt* et la consommation des pesticides reste à vérifier. En Inde, suite à l'adoption du coton *Bt*, une diminution de l'utilisation de produits phytosanitaires a été constatée par la plupart des études empiriques. Toutefois, ces changements dans la consommation de pesticides ont eu lieu dans un contexte caractérisé par une utilisation non optimale de ce facteur de production (une utilisation souvent excessive). Ainsi, Il n'est pas évident que la baisse de consommation de pesticides observée soit attribuable à l'adoption des

⁹ Les échantillons choisis dans certaines études préliminaires (Qaim 2003 ; Qaim et Zilberman, 2003) contiennent une certaine forme de biais de sélection provenant du fait que la technologie *Bt* a été initialement adoptée par des agriculteurs dotés des ressources financières importantes. Un tel facteur n'a pas toujours été suffisamment contrôlé ou reconnu dans les interprétations des résultats.

variétés transgéniques ou à d'autres facteurs. Certains agriculteurs du coton-*Bt* continuent à utiliser les pesticides d'une manière démesurée en raison de l'émergence et la multiplication de ravageurs secondaires.

- L'évaluation des avantages du coton transgénique en Inde n'a pas abordé la question de comparaison entre la technologie *Bt* et d'autres options conduisant à l'amélioration du bien-être de cultivateur du coton. Par exemple, l'irrigation pourrait avoir un impact beaucoup plus significatif sur le rendement que la technologie *Bt* ou bien une formation efficace pour l'agriculteur pourrait conduire à des effets généralement bénéfiques sur les rendements indépendamment de l'adoption de la technologie *Bt*.

- On peut identifier trois questions relatives aux méthodes utilisées par ces études : 1) problème de mesure c'est-à-dire les définitions du coût ainsi que la marge bénéficiaire brute qui en résulte; 2) le problème du biais de sélection ; 3) analyse inadéquate de la situation contrefactuelle.

1) *Les problèmes de mesure* : la marge bénéficiaire brute est définie par la différence entre les recettes et les coûts. Toutefois, la définition du coût n'est pas homogène entre les différentes études. Certaines études ne considèrent que les coûts de pesticides et de semences transgéniques ; d'autres incluent le coût total de production (Morse *et al.* 2007a). Par conséquent, les résultats entre ces études ne sont pas toujours comparables.

2) *Le biais de sélection* : la plupart des études offrent une comparaison entre le coton *Bt* et les variétés conventionnelles sur la base du rendement moyen, des coûts des inputs et du revenu net. Toutefois, les données de l'enquête agricole sont basées sur des agriculteurs hétérogènes (des différentes expériences agricoles, différentes conditions...). Par conséquent, les estimations de la production moyenne, des coûts et de bénéfice pourraient être influencées par la taille de l'exploitation agricole, le niveau d'éducation des agriculteurs, le marché des facteurs de production... Ainsi, une comparaison entre ces indicateurs peut créer un problème du biais de sélection ce qui pourrait aboutir à des estimations biaisées. Crost *et al.* (2007) ainsi que Morse *et al.* (2007a) ont étudié l'effet de l'adoption du coton *Bt* sur les fermiers indiens. Les auteurs ont constaté que les adoptants précoces sont dotés de l'expérience et des exploitations agricoles de grande taille. Ainsi, pour éviter des estimations biaisées, ces études concluent que l'augmentation significative du rendement ne dépend pas seulement de l'adoption du coton *Bt*. Morse *et al.* (2007a) ont montré que la moitié du gain de rendement observé est due à l'agriculteur (*farmer effect*) et l'autre moitié à la technologie *Bt*. Cette étude a remarqué une différence significative entre les caractéristiques des agriculteurs adoptants et

non-adoptants. Par exemple, les fermiers qui ont adopté le coton transgénique tirent 80% du revenu total du coton, tandis que la proportion tirée par ceux qui n'ont pas adopté la technologie *Bt* est de l'ordre de 50%. Ceci laisse supposer que cette catégorisation reflète deux différents types d'agriculteurs. Par conséquent, la partition des agriculteurs en deux groupes (adoptants et non-adoptants) peut conduire à des estimations biaisées et le modèle peut souffrir d'un problème du biais de sélection.

3) *Analyse inadéquate de la situation contrefactuelle :*

L'impact de la nouvelle technologie ne peut être évalué correctement que si une analyse contrefactuelle soit effectuée. Une approche de type contrefactuel consiste à mesurer l'impact de l'adoption du coton *Bt* sur la variation du bien-être de l'agriculteur indien par la différence entre cette variation effectivement observée et celle à laquelle on aurait assistée si la technologie *Bt* n'a pas été adoptée.

1.7 Le coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde

Depuis 2002, une vague de suicides touche quatre Etats indiens— le Maharastra, l'Andhra Pradesh, le Karnataka et le Pendjab. Le nombre de suicide est élevé dans les exploitations du coton transgénique. Des cas de suicide ont été rattachés à la culture du coton transgénique, de même que l'apparition de ravageurs secondaires, ainsi qu'une résistance à la toxine du *Bt*.

En dépit des résultats globalement très favorables de l'utilisation du coton *Bt*, la culture des semences transgéniques a suscité beaucoup de controverses depuis son adoption en Inde. Le suicide des agriculteurs fait depuis l'adoption du coton *Bt* la une des journaux. Le centre des droits de l'homme et de la justice mondiale de l'université de droit de New York a confirmé dans un rapport¹⁰ publié en 2011 que « depuis 2002, l'année de la commercialisation de la technologie *Bt* en Inde, en moyenne un paysan se suicide toutes les 30 minutes ». Il est important de noter que les taux de suicide les plus élevés correspondent aux principaux Etats producteurs du coton¹¹.

¹⁰ Un rapport intitulé : "Toutes les 30 minutes : Le suicide des fermiers, les droits de l'homme et la crise agraire en Inde." www.chrgj.org/publications/docs/every30min.pdf

¹¹ Center for Human Rights and Global Justice & International Human Rights Clinic, Every Thirty Minutes: Farmer Suicides, Human Rights, and the Agrarian Crisis in India, New York: NYU School of Law, 2011: <http://www.chrgj.org/publications/docs/every30min.pdf>.

Les effets positifs anticipés par la multinationale *Monsanto* n'ont pas été confirmés. Selon Fok (2006, p. 779), «*les résultats positifs enregistrés par Qaim (2003) et ayant contribué à l'idée d'une très forte rentabilité du coton Bt en Inde, correspondent surtout à une extrapolation de résultats d'expérimentation fournis par la firme Monsanto*». Au niveau parcelle, Fok (2006, p. 795) a constaté qu' «*il est rare de constater une réduction du coût total du contrôle des ravageurs parce que le surcoût des semences dépasse l'économie réalisée sur les insecticides* ». Ainsi, «*la perception du risque financier est ainsi accrue pour les agriculteurs à ressources financières limitées* ». Dans cette situation, les fermiers ont un seul choix à savoir l'endettement. Avec des effets négatifs non attendus, l'agriculteur se trouve ainsi surendetté et le suicide devient une option rationnelle lorsque le coût de vivre devient insoutenable. En effet, L'augmentation du coût de production et l'effondrement des cours internationaux du coton à leur niveau le plus bas ont poussé les agriculteurs à s'endetter et par conséquent se suicider s'ils deviennent incapables de rembourser leurs dettes (Shiva, 2008).

Selon Fok (2006, p. 788), «*Le gain de rentabilité procuré par l'utilisation du coton Bt est variable et il dépend fondamentalement de quatre facteurs : le surcoût des semences, le degré de réduction du coût des insecticides, le degré de gain de rendement, le niveau et la stabilité du prix de vente du coton-graine. Le premier facteur est le seul qui dépende des conditions de distribution des semences de coton Bt. Les autres facteurs sont dépendants des conditions des Etats indiens utilisateurs et méritent aussi d'être pris en compte dans les réflexions sur les conditions de rentabilité du coton Bt* ».

Quoiqu'une grande partie de la littérature scientifique affirme que le gain de fermier indien augmente avec les variétés transgéniques, il est encore prématuré pour évaluer d'une manière concluante l'ampleur et la stabilité des rendements des variétés *Bt* par rapport aux semences traditionnelles, parce que ces points dépendent, entre autres, des pratiques agricoles et de niveau d'infestation par les ravageurs qui varient entre les saisons et les champs agricoles (Stone, 2011, p. 388). Plus encore, les travaux empiriques ne prennent pas en considération le pouvoir de monopole qui pourrait jouer la multinationale *Monsanto* en fixant un prix supérieur à celui du marché.

L'avantage pour les petits agriculteurs indiens reste donc controversé. Le problème est de savoir cependant les impacts socioéconomiques de l'utilisation du coton *Bt* en Inde. Le présent papier vise précisément à faire le point sur cette question. Ce chapitre s'articule selon quatre sections. Dans une première section nous passons en revue les statistiques sur le

suicide des agriculteurs en Inde. Dans une deuxième section, nous présentons une étude du terrain qui a été menée par Qayum et Sakkhari, (2005) durant la période 2002-2005. Dans une troisième section, nous proposons une lecture où le suicide est dû au taux d'intérêt élevé se répercutant en termes d'endettement, certes mais aussi en termes d'incertitude technologique. Dans une quatrième section, nous présentons nos principales conclusions.

1.8 Statistiques

Les premiers suicides de paysans ont eu lieu dans le district de Warangal de l'Andhra Pradesh. Selon le rapport de « National Crime Records Bureau¹² » (2008), au moins 16,196 agriculteurs se sont suicidés en Inde en 2008 et l'Etat du Maharashtra se classe au premier rang du pays pour la quatrième année consécutive, avec 3,802 suicides de paysans. Dans la région de *Vidarbha* (l'Etat de Maharashtra), où les semences *Bt* sont largement adoptées, le taux de suicide parmi les agriculteurs de coton est très élevé avec une fréquence de 100 suicides par mois en 2006. Dans l'Etat de Maharashtra, 12493 suicides de fermiers ont été recensés entre 2006 et 2008, soit 600 suicidés de plus par rapport à la période 2003-2005 et une augmentation de l'ordre de 85% en comparaison avec le nombre de suicides enregistré durant la période 1997-1999 (*cf.* Tab. 1.7).

A l'échelle de l'Inde, le taux de suicide annuel après 2002 est supérieur à celui de la période 1997-2002 (avant l'utilisation officielle des semences *Bt*). Cette constatation est plus claire dans les principaux cinq Etats indiens producteurs du coton (*cf.* Tab. 1.8). Le nombre annuel moyen de suicides des agriculteurs du Maharashtra a augmenté de l'ordre de 43,5% entre les deux périodes 1997-2002 et 2003-2008. Ainsi, les activistes et les ONG considèrent qu'on ne peut pas nier l'hypothèse qui fait le lien entre l'utilisation du coton *Bt* et l'accroissement de suicide des cultivateurs du coton en Inde.

1997-1999	1999-2002	2003-2005	2006-2008
1917	3022	3836	4453
2409	3536	4147	4238
2423	3695	3926	3802
6749	10253	11909	12493

Source : National Crime Records Bureau (2008)

Tableau 1.7 : Le nombre de suicides d'agriculteurs (Maharashtra)

Le gouvernement du Maharashtra a annoncé que 1920 agriculteurs du coton se sont donné la mort entre le 1^{er} janvier 2001 et le 19 août 2006 et par conséquent, le phénomène du suicide s'est accéléré après l'avènement des semences transgéniques sur le marché en Juin 2005¹³. La région de *Vidarbha* (l'Etat de Maharashtra), où se trouvent les plus grandes

¹² Le "National Crime Records Bureau (NCRB)" est une agence gouvernementale qui recense les crimes et suicides dans le pays et qui dépend du "Ministry of Home Affairs", le ministère de l'intérieur.

¹³ Jaideep Hardikar, « One suicide every 8 hours », *DNA India*, 26 août 2006.
http://www.dnaindia.com/india/report_one-suicide-every-8-hours_1049554

plantations de coton transgénique en Inde, a enregistré plus de 8.200 suicides d'agriculteurs durant la dernière décennie. Dans la même région, 209 suicides de fermiers ont été recensés en 2011, en lien avec les rendements décroissants du coton *Bt*¹⁴. Par conséquent, « l'Etat de Maharashtra vient de suspendre les licences¹⁵ de culture de coton Bt pour vendre ses propres semences. La région revient donc, après une décennie de commercialisation, sur sa décision d'autoriser ce type de cultures. Alors que plus de 90% des cultivateurs indiens de coton recourent aux semences OGM, le ministère de l'agriculture du pays a reconnu en janvier 2012 un lien entre les suicides de fermiers, souvent ruinés, et l'utilisation de semences génétiquement modifiés », rapporte le site « *Environment News Network* » le 09 août 2012¹⁶.

Ainsi, la question qui se pose ici est : pourquoi les taux de suicide chez les agriculteurs de coton en Inde ont-ils considérablement augmenté après l'introduction du coton *Bt* ?

¹⁴«Indian State of Maharashtra Revokes Monsanto's Cotton Seed License» August 23, 2012. <http://alternateneWSmedia2012.wordpress.com/2012/08/23/indian-state-of-maharashtra-state-revokes-monsantos-cotton-seed-license/>

¹⁵ Ces licences avaient été accordées à la firme Mahyco Monsanto Biotech.

¹⁶ Environment news Service: «*Maharashtra State Revokes Monsanto's Cotton Seed License* » August 9, 2012. <http://ens-newswire.com/2012/08/09/maharashtra-state-revokes-monsantos-cotton-seed-license/>

Chapitre I- Les Impacts Socioéconomiques du Coton Bt en Inde : Une Revue de la littérature

Années	Maharashtra	Andhra Pradesh	Karnataka	Madhya Pradesh & Chhatisgarh *	Le total des suicides d'agriculteurs dans les 5 Etats (le total annuel)	Le nombre total de suicides d'agriculteurs en Inde	le % des 5 Etats dans le nombre total de suicides d'agriculteurs en Inde
1995	1083	1196	2490	1239	6008	10720	56,0
1996	1981	1706	2011	1809	7507	13729	54,7
1997	1917	1097	1832	2390	7236	13622	53.1
1998	2409	1813	1883	2278	8383	16015	52.3
1999	2423	1974	2379	2654	9430	16082	58.6
2000	3022	1525	2630	2660	9837	16603	59.2
2001	3536	1509	2505	2824	10374	16415	63.2
2002	3695	1896	2340	2578	10509	17971	58.5
Total 1995-2002	20066	12716	18070	18432	69284	121157	57.19
2003	3836	1800	2678	2511	10825	17164	63.1
2004	4147	2666	1963	3033	11809	18241	64.7
2005	3926	2490	1883	2660	10959	17131	64.0
2006	4453	2607	1720	2858	11638	17060	68.2
2007	4238	1797	2135	2856	11026	16632	66.3
2008	3802	2105	1737	3152	10797	16196	66.7
2009	2872	2414	2284	3197	10765	17368	62,0
2010	3141	2525	2585	2363	10614	15964	66,5
2011	3337	2296	2100	1326	8969	14027	63,9
Total 2003-2011	33752	20610	19083	23956	97401	149783	65.0
Total 1995-2011	53818	33326	37153	42388	166685	270940	61.5

Source : National Crime Records Bureau (2012)

Tableau 1.8 : le suicide des agriculteurs dans les «cinq plus grands Etats Indiens» producteurs du coton par rapport au reste de l'Inde

1.9 Une étude du terrain

Deux agronomes indiens Qayum et Sakkhari ont mené depuis 2003 une étude sur la performance du coton *Bt* en Inde¹⁷. Ils ont montré que, malgré les nombreuses promesses de la culture transgénique, le coton *Bt* n'a pas permis aux paysans indiens de réduire de façon significative l'utilisation des pesticides ni d'augmenter le rendement des cultures. Au contraire, « le coton *Bollgard* de Mahyco *Monsanto* Biotech, a eu un rendement inférieur au coton non-*Bt*, un coût de production supérieur au *Bt* et par conséquent une rentabilité inférieure au non-*Bt*. Plus encore, le coton transgénique a causé des problèmes de toxicité du sol, a favorisé le développement de nouvelles maladies et l'apparition de nouveaux ravageurs contrôlés auparavant par les pesticides ».

La saison 2002-2003 :

Durant la saison agricole 2002-2003, les agriculteurs du coton *Bt* ont dépensé, en termes de coût de production, 10655 Roupies¹⁸ (Rs) par acre¹⁹, contre 9653 Rs/acre pour les agriculteurs du coton conventionnel. Ces derniers ont déboursé 1002 Rs/acre ou 10% de moins que les agriculteurs du coton transgénique. Ces derniers, ayant utilisé des pesticides, ont consommé un montant à peu près équivalent à celui versé par les fermiers du coton transgénique. Concernant le rendement, les agriculteurs du coton *Bt* ont enregistré une baisse de l'ordre 240 kg/acre comparé aux agriculteurs du coton non-*Bt* (cf. Tab. 1.9).

No	Question traitée	Pour le coton <i>Bt</i>	Pour le coton non <i>Bt</i>
1	Coût total de la culture/hectare	Rs. 26,375 (\$605)	Rs. 23,907 (\$543)
2	Coût des semences/hectare	Rs. 4000 (\$90)	Rs. 1125 à 1250 (\$26 à 29)
3	Dépenses en pesticides/hect.	Rs. 7272 (\$165)	Rs. 7427 (\$168)
4	Rendements moyens/hectares	1125 kg	1725 kg
5	Bénéfices nets/hectares	(-) Rs. 3237 (\$73.5)	Rs. 13420 (\$305)

Source : Qayum et Sakkhari (2005, p. 10).

Tableau 1.9 : Résultats de l'étude pour la première année : 2002–2003

¹⁷ En 2005, après avoir étudié le coton *Bt* à Warangal pendant trois ans, les résultats ont été publiés dans l'étude intitulée : «Did *Bt* Cotton save farmers in Warangal? A seasonal long impact study of *Bt* Cotton-Kharif 2002 in Warangal District of Andhra Pradesh ».

¹⁸ Le taux de change moyen de l'Euro contre la Roupie indienne durant l'année 2011-2012 est : 1 Euro = 66,7375 Rs.

¹⁹ 1 acre ~ 2500 m².

La saison 2003-2004

Durant la saison 2003-2004, l'étude a été menée dans 27 villages répartis entre quatre districts de l'Etat d'Andhra Pradesh : Adilabad, Nalgonda, Kurnool et Warangal, suscitant des données provenant de 164 agriculteurs à des intervalles de deux semaines. Les données recueillies auprès de ceux-ci sont présentées sous une forme compilée dans le tableau ci-dessous (cf. Tab. 1.10).



Source : http://www.pondichery.com/french/etats/andhra_pradesh.htm

Figure 1.4 : Les districts de l'Etat d'Andhra Pradesh

Primo, les chercheurs ont remarqué que le prix du coton *Bt* a baissé de 9%, par contre il n'y avait pas une réduction significative du prix des hybrides non-*Bt* par rapport à la saison 2002-2003 (environ 1%). *Secundo*, indépendamment de type du coton (*Bt* ou non-*Bt*), les agriculteurs ont continué à pulvériser les pesticides à coût élevé sur leurs cultures pour lutter contre les vers de la capsule du coton. Plus encore, l'étude met en évidence que la culture du coton *Bt* a besoin d'une plus grande quantité de pesticides, par rapport aux variétés non-*Bt*, afin de lutter contre les insectes ravageurs suceurs : pucerons, mouches blanches, jassides,

acariens et punaise rouge du cotonnier (Qayum et Sakkhari, 2002). La différence était plus significative pour la catégorie « petit agriculteur » (Rs 145). *Tertio*, malgré la campagne publicitaire massive en faveur des hybrides *Bt* (une technologie qui permet de réduire le coût total de production, en limitant les pulvérisations de pesticides, et par conséquent d'améliorer les rendements), le bénéfice net reste plus élevé pour le coton conventionnel en comparaison avec les semences *Bt*. En effet, l'agriculteur du coton non-*Bt* a réalisé un gain net de l'ordre de Rs 8401 par acre, par contre le cultivateur des hybrides transgénique a acquis un profit net égal à Rs 7650, soit une différence de Rs 751 par acre en faveur du producteur des variétés conventionnelles (cf. Tab. 1.10). Enfin, les résultats montrent que le coût de production total²⁰ du coton *Bt* était supérieur de l'ordre de 8% (Rs 903 par acre) par rapport à celui du coton non-*Bt*.

La saison 2004-2005 :

Durant la saison 2004-2005, les données ont été collectées tous les quinze jours auprès de 220 agriculteurs (les données sont résumées dans le Tableau 5). Sur un total de 220, 106 ont utilisé les hybrides de *Monsanto* (MECH-12²¹, le MECH-162 et le MECH-184) et les autres 114 producteurs ont adopté l'hybride *Bt* de l'entreprise « Rasi seeds » (RCH-2²²). Tous ces fermiers ont continué de cultiver les variétés conventionnelles (les détails des coûts de la culture sont présentés dans le Tab. 1.11). L'étude a montré les éléments suivants :

Les agriculteurs du coton *Bt* ont dépensé sur les semences à peu près Rs 1600 par acre, tandis que les agriculteurs non-*Bt* ont payé environ Rs 500 par acre (cf. Tab. 1.11). Ainsi, le coût du coton *Bt* est significativement supérieur à celui du coton conventionnel (plus de 300%). De nombreux agriculteurs ont dû emprunter pour payer le coût des semences *Bt* (le prix des hybrides *Bt* coutait 3 à 4 fois plus que ceux des variétés conventionnelles). La plupart d'entre eux, durant la période 2003-2005, avaient été dans l'incapacité de rembourser leurs dettes. L'infestation des vers de la capsule du cotonnier était élevée au cours de la saison 2004-2005 quelque soit le coton (*Bt* ou conventionnel). Par conséquent, ces hybrides *Bt* ont conduit les agriculteurs à tomber dans une "trappe à endettement".

²⁰ Le coût total de la production a été calculé en additionnant tous les coûts payés pour les semences, les fertilisants et fumiers, l'irrigation, la protection phytosanitaire, la cueillette et le transport des semences, y compris la contribution de main-d'œuvre familiale.

²¹ MECH-12 désigne *MAHYCO cotton hybrid number 12*.

²² RCH-2 désigne *Rasi cotton hybrid number 2*.

Au cours de l'étude, il a été également constaté que les agriculteurs avaient demandé l'irrigation préférentielle aux cultures *Bt* à des stades critiques de la croissance des cultures en retardant ou en refusant l'irrigation pour les cultures non-*Bt*. Cela a été clairement observé dans le cas des hybrides de *Monsanto*. Un examen rapide des coûts totaux de l'irrigation pour les hybrides des *Monsanto* vis-à-vis des variétés conventionnelles montre que la culture *Bt* a été fournie avec une quantité d'eau d'irrigation supérieure de 18% par rapport à celle utilisée par les hybrides conventionnels.

Contrairement aux affirmations du secteur, selon lesquelles la culture du coton *Bt* entraîne une épargne de 30% sur le coût de production, l'étude a montré que:

(i) le coût de production totale a grimpé de 16% (Rs 1943) pour les petits exploitants qui cultivent les hybrides de *Monsanto*, tandis que pour les petits fermiers qui utilisent ces mêmes variétés en conditions pluviales le coût de production a augmenté de 13% (Rs 1278).

(ii) Le coût de production total a augmenté de 15% (Rs. 1873) et de 18% (Rs. 1803) pour les exploitants moyens qui ont eu recours aux hybrides de *Monsanto* respectivement sous des conditions irriguées et celles pluviales.

- Généralement, on plante le coton en avril, la récolte commence en septembre et se poursuit jusqu'au mois de mars, en fonction de la disponibilité des ressources en eau pour l'irrigation et des règles essentielles à respecter au moment des semis²³. Sous conditions pluviales, la récolte de coton s'achève au mois de Janvier, tandis que dans les zones irriguées la récolte continue jusqu'au mois de mars. A partir du Tableau 5, il est très simple de déduire que :

(i) pour les petits exploitants qui ont adopté les hybrides *Bt*, le gain de rendement était négligeable (seulement 6 kilos de plus par rapport aux variétés conventionnelles). En conditions pluviales, le gain de rendement avec les hybrides non-*Bt* était bien visible (le rendement de variétés non-*Bt* a dépassé celui des hybrides *Bt* d'environ 1,5 quintal). Il est à noter que les hybrides n'ont pas donné des bons résultats dans les situations de stress, même après avoir dépensé plus de semences et d'engrais.

(ii) Pour les exploitants moyens qui utilisent les hybrides *Bt*, le gain de rendement était positif (une amélioration du rendement de l'ordre de 10% par rapport aux semences conventionnelles). En conditions pluviales la tendance a été renversée et le rendement des variétés conventionnelles a dépassé celui des hybrides *Bt* de l'ordre de 24%.

²³ Les conditions climatiques, la maîtrise de la profondeur du semis, la dose des semis et la préparation du sol.

- Les semences conventionnelles ont amené des meilleurs résultats par rapport aux hybrides *Bt* à la fois pour les petits exploitants et les petits exploitants en conditions pluviales. Les hybrides ont entraîné une perte nette de Rs 963 et Rs 719 respectivement pour les deux catégories qui ont été déjà mentionnées, tandis que les variétés non-*Bt* ont impliqué un gain net de Rs 967 et Rs 3267 respectivement pour ces mêmes catégories d'agriculteurs. Il est important de souligner que les agriculteurs du coton conventionnel sous un régime pluvial ont réussi à acquérir de profits plus élevés que ceux réalisés par toute autre situation. Dans une telle configuration, les coûts de production réduits auraient pu être traduits par une hausse de gains nets. Concernant la catégorie « exploitants moyens », les cultivateurs du coton *Bt* ont réalisé un gain net de l'ordre de Rs. 170 par rapport aux hybrides non-*Bt*. Tandis que dans les conditions pluviales, tous les exploitants moyens ont subi une énorme perte nette de Rs 2051 contre un bénéfice net de Rs 1753 dégagé par les agriculteurs des hybrides non-*Bt* (soit une différence de Rs 3784).

- En comparaison avec les semences conventionnelles, les hybrides transgéniques se caractérisent par une consommation élevée d'eau d'irrigation et une utilisation massive de fertilisants. Cette escalade des coûts, associée aux hybrides *Bt*, aurait pu aboutir à des pertes très élevées. En outre, les agriculteurs estiment que les hybrides sont plus sensibles à la situation de sécheresse, et flétrissent²⁴ rapidement sous des situations pluviales prolongées (ce qui conforme les observations qui ont été faites dans les études précédentes).

Enfin, les résultats de l'étude de la performance du coton *Bt* dans la région de Warangal (l'Etat d'Andhra Pradesh), entre 2002 et 2005, sont résumés comme suit (Qayum et Sakhari 2005, p. 5-6) :

- *L'utilisation du coton Bt n'a pas abouti à une diminution significative de la consommation de pesticides*²⁵. « En fait, la différence entre les volumes de pesticides utilisés par les cultivateurs *Bt* et par les exploitants 'non *Bt*' était quasiment insignifiante. Les agriculteurs *Bt* ont dépensé en moyenne Rs. 2571 de pesticides par acre tandis que les exploitants non *Bt* ont payé un montant de Rs. 2766 pour les pesticides sur les trois ans. La différence s'élève à peine à 7% des coûts liés à la lutte contre les insectes nuisibles et à 2% des coûts totaux de production (une différence n'est guère visible) ».

²⁴ Une plante flétrie, cela signifie qu'elle ne peut plus absorber l'eau par les racines (les racines sont endommagées à cause de la consommation d'une très grande quantité d'eau pendant une longue période).

²⁵ Dans sa campagne marketing, Monsanto a toujours mis en avant l'économie de pesticide réalisé grâce au *Bt*, affirmant que les agriculteurs dépenseraient moins d'argent pour les traitements.

- *Le coton Bt n'a pas apporté de réel gain de rendement.* « En fait, le rendement moyen sur trois ans pour les petits cultivateurs de coton *Bollgard*, dans de bonnes conditions pluviométriques, s'est maintenu autour de 535 kg par acre alors que le rendement des hybrides de coton non *Bt*, dans les mêmes conditions climatiques, a dépassé ce chiffre de 28%. Lors des années sèches, les exploitants *Bt* ont récolté 35% de moins de coton que les agriculteurs des variétés conventionnelles ».
- *Le coton Bt n'a pas apporté une amélioration des profits pour les agriculteurs.* « La moyenne sur les trois ans (2002-2005) nous indique que les cultivateurs du coton non-*Bt* ont eu des profits supérieurs de l'ordre de 60% à ceux des agriculteurs des variétés *Bt*. En fait, le coton *Bt*, et surtout les variétés de coton de *Mahyco-Monsanto*, ont apporté d'innombrables souffrances aux paysans qui ont abouti à des violentes manifestations de rues. Les manifestants n'ont pas hésité à brûler plusieurs points de vente de semences dans la ville de Warangal. Les agriculteurs ont attaché les représentants de *Mahyco-Monsanto* dans leurs villages et la police a dû porter secours aux malheureux vendeurs de *Monsanto* ».
- *Le coton Bt n'a pas réduit les coûts de production des agriculteurs.* « En fait, les variétés *Bt* appartenant à *Mahyco-Monsanto* ont coûté 3 à 4 fois plus chères. Les cultivateurs de coton transgénique ont dû dépenser des montants supplémentaires pour répandre les engrais, irriguer et s'occuper de la précieuse semence. Beaucoup de paysans, surtout dans les zones d'agriculture pluviale, ont dû mettre la main à la poche pour près de 2000 roupies de plus par acre que pour les hybrides conventionnels. En moyenne, les coûts de production des cultivateurs de coton *Bt* ont augmenté de 12% par rapport à ceux de leurs homologues».
- *Les semences Bt ne respectent pas l'environnement.* « Les chercheurs ont estimé qu'une forme particulière de pourriture des racines se propageait à cause du coton *Bollgard*. Les agriculteurs ont commencé à se plaindre de l'infection de leurs sols traités au *Bt* parce qu'ils ne pouvaient plus cultiver d'autres variétés sur ces mêmes parcelles. La culture du coton transgénique a eu un effet toxique sur les sols et un impact néfaste aussi sur la santé humaine et animale. En revanche, les fermiers pouvaient très facilement changer de culture sur les sols cultivés avec les variétés conventionnelles. Il s'agit d'une alerte précoce qui exige une recherche active et immédiate menée par des spécialistes des sols ».

Chapitre 1- Les Impacts Socioéconomiques du Coton Bt en Inde : Une Revue de la littérature

N _o	Paramètre	La catégorie de l'exploitation agricole									La moyenne des exploitations agricoles		
		Les petits agriculteurs			Les agriculteurs moyens			Les grands agriculteurs			Bt	Non-Bt	Le gain de Non-Bt
		Bt	Non-Bt	Le gain de Non-Bt	Bt	Non-Bt	Le gain de Non-Bt	Bt	Non-Bt	Le gain de Non-Bt			
1	Coût des semences (Rs./acre)	1499 (12%)	468 (4%)	+1031	1487 (12.5%)	452 (4%)	+1035	1368 (11.6%)	380 (3.6%)	+988	1469 (12.2%)	445 (4%)	+1024
2	Coût de traitement de « bollworm » (Rs./acre)	1452	1922	- 470	1322	1730	-408	2074	2565	-491	1516	1964	-448
3	Coût de traitement des autres insectes (Rs./acre)	693	546	+147	807	717	+90	893	828	+65	778	670	+108
4	Coût total de traitement des insectes (Rs./acre)	2145 (17.5%)	2468 (21.4%)	-323	2129 (18%)	2447 (22%)	-318	2967 (25%)	3393 (32%)	-426	2287 (19%)	2608 (23.4%)	-321
5	Coût total de la culture (Rs./acre)	12253	11527	+726	11938	11031	+907	11763	10497	+1266	12030	11127	+903
6	Rendement (quintal/acre)	8.16	8.0	-0.16 q	8.65	9.16	+0.51 q	7.67	6.0	- 1.67 q	8.27 q	8.0	-0.27 q
7	Bénéfices nets/acre	6880	7451	+571	8698	11179	+2481	6967	4302	-2665	7650	8401	+751
8	Ratio B/C*	1.56	1.65	+0.09	1.73	2.01	+0.28	1.59	1.41	- 0.18	1.64	1.76	+0.12

Source : Qayum et Sakkhari (2005, p. 15).

* ratio Bénéfice/Coût.

Note : Les chiffres entre parenthèses indiquent la proportion du coût total de la culture.

Tableau 1.10 : Économie de la culture du coton Bt et non Bt durant la saison 2003-2004

1.10 L'endettement des agriculteurs

Les agriculteurs dont le niveau de rendement à peine dépassait les 500 kg de coton par hectare n'ont pas été vraiment en mesure d'accroître les rendements ni de réduire la consommation de pesticides. Les rendements du coton transgénique sont généralement faibles et aléatoires. Ainsi, l'adoption des variétés *Bt* ne s'avère pas toujours avantageuse et se révèle en premier lieu par des dépenses sensiblement accrues pour l'achat des semences. L'adoption du coton *Bt* dans la région a brusquement entraîné une aggravation de l'endettement des agriculteurs. Ceux-ci ont procuré les semences à crédit et les revenus collectés, après une année, semblent insignifiants pour rembourser leurs propres dettes.

L'endettement des agriculteurs indiens augmente avec une plus grande dépendance à des ressources financières externes (nécessaires à la culture de la plante génétiquement modifiée). Une telle dépendance financière est à la tête de suicides alarmants chez les agriculteurs qui se trouvent piégés par l'endettement. Selon Qayum et Sakkhari (2005, p.39) l'introduction de cultures génétiquement modifiées peut accentuer ce phénomène tragique (le suicide).

Lors d'une réunion organisée par l'ONU sur la biodiversité biologique, en Mars 2006, à Curitiba (le Brésil), Shiva²⁶ a exprimé: « Ces semences tuent la biodiversité, les agriculteurs et la liberté des gens, par exemple le cas du coton *Bt* de *Monsanto*, qui a déjà poussé des milliers de paysans indiens à l'endettement, le désespoir et le suicide. Le Coton *Bt* est basé sur ce qui a été surnommé «Terminator Technology», ce qui rend les plantes génétiquement modifiées produire des semences stériles. Les coûts élevés de la culture et des rendements faibles de semences génétiquement modifiées ont provoqué la ruine des cultivateurs du coton indiens. En conséquence, les petits fermiers sont souvent pris dans un cycle infernal de dettes qui en amène beaucoup à se suicider par pur désespoir. Plus de 40.000 paysans se sont suicidés au cours de la dernière décennie en Inde, bien que le terme le plus exact soit un homicide, ou un génocide »²⁷.

²⁶Vandana Shiva est une physicienne indienne et activiste environnemental.

²⁷ Voir www.ipsnews.net/africa/print.asp?idnews=32438 (Mars 2006).

	Les petites exploitations		Les petites exploitations (irriguées)		Les petites exploitations (pluviales)		Les moyennes exploitations		Les moyennes exploitations (irriguées)		Les moyennes exploitations (pluviales)		Le total des exploitations		Le total des exploitations (irriguées)		Le total des exploitations (pluviales)	
	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>	<i>Bt</i>	<i>Non-Bt</i>
taille	n= 56	n=121	n= 28	n= 67	n= 28	n= 54	n= 43	n=81	n= 35	n= 57	n= 8	n= 24	n=106	n=220	n=66	n=133	n=40	n=87
Coût des semences (Rs./acre)	1603	510	1607	515	1600	504	1603	498	1603	504	1600	483	1602	505	1605	510	1599	498
Coût des fertilisants (Rs./acre)	2166	1956	2672	2152	1659	1713	2317	2087	2483	2308	1594	1561	2201	2028	2551	2258	1623	1677
le coût de la protection phytosanitaire (Rs./acre)	2702	2697	2905	2913	2498	2429	2388	2690	2404	2884	2319	2231	2510	2717	2562	2973	2425	2325
Coût total (Rs./acre)	12079	10136	13819	11002	10339	9061	12342	10469	12824	11328	10233	8430	12081	10298	13192	11263	10247	8822
Rendement (Kgs./acre)	650	644	765	612	534	683	706	640	762	665	464	579	669	635	768	639	506	629
Gain brut	11116	11103	12612	10116	9620	12327	12864	10823	13934	11101	8181	10163	11828	10894	13487	10644	9092	11277
Gain net	-963	967	-1207	-886	-719	3267	523	353	1111	-227	-2051	1733	-252	597	295	-619	-1155	2455

Source : Qayum et Sakhari (2005, p. 21)

Tableau 1.11 : Économie de la culture du coton *Bt* et *non-Bt* durant la saison 2004-2005

Toutefois, selon une étude²⁸ de l'IFPRI (*International Food Policy Research Institute*), depuis l'adoption du coton *Bt* en Inde, le nombre de suicides d'agriculteurs est stable et même très faible par rapport au reste de la population. Mais il reste à un niveau très élevé, comme c'était le cas bien avant l'introduction des semences transgéniques en Inde. Après une comparaison entre les données économiques sur l'adoption du coton Génétiquement Modifié et les chiffres sur les suicides d'agriculteurs en Inde, Gruère et Sengupta [2011] ont précisé que l'usage du coton *Bt* en Inde *n'est ni une condition nécessaire ni une condition suffisante* pour expliquer la question du suicide des agriculteurs. Les chercheurs scientifiques de l'Institut International de Recherche sur les Politiques Alimentaires (IFPRI) ont constaté qu'il manque de données pertinentes pour confirmer la corrélation entre le suicide des agriculteurs et l'utilisation des semences transgéniques.

Pour ces auteurs, le coton *Bt* est très efficace, mais le contexte indien, dans lequel cette technologie vient s'insérer, a engendré des désenchantements et l'utilisation des semences transgéniques ne soit pas à blâmer. En effet, de nombreux autres facteurs de risque, qui ne sont pas tous liés à l'agriculture, ont probablement joué un rôle prépondérant dans le désespoir et par conséquent dans les suicides des agriculteurs : des conditions climatiques rugueuses, des situations économiques et sociales désastreuses telles que défaut d'assurance, modes d'irrigation archaïques, système bancaire inefficace, pesticides potentiellement toxiques... La cause principale enregistrée par cette étude est le lien indirect entre le coton *Bt*, par le biais de la perte de récoltes, et l'incapacité des agriculteurs à rembourser leurs dettes.

En conclusion, l'étude a montré un succès global du coton *Bt*, malgré des échecs locaux, surtout au tout début, et qui ont pu effectivement contribuer au suicide de paysans dans un contexte de fort endettement généralisé du monde rural. L'endettement de presque 50% des agriculteurs indiens (surtout dans les Etats producteurs du coton), est un vieux problème. En effet, il existe différents facteurs pouvant accroître l'endettement et la solvabilité des agriculteurs : physiques (les aléas du climat et adaptation de la nouvelle technologie aux conditions locales), économiques (les prix d'inputs et d'outputs), institutionnels (subvention des prix, accès aux crédits formels, soutien de l'Etat aux agriculteurs,...) ou humains (l'expérience acquise par l'agriculteur et capacité de celui-ci de s'adapter à la nouvelle technologie).

²⁸ L'étude est intitulée « *Bt Cotton and farmer suicides in India: Reviewing the evidence* » réalisée en octobre 2008 et publiée par Gruère et Sengupta en *Journal of Development Studies* (2011)

L'activiste Shiva²⁹ a qualifié l'étude, qui a été menée par les chercheurs de l'IFPRI (2008), par un « papier toxique ». Ce papier vise à influencer l'opinion publique sur les OGM tout en essayant de faire la séparation entre les impacts économiques du monopole (de la multinationale semencière *Monsanto*) sur les paysans indiens et le développement des semences non renouvelables (les graines développées par le génie génétique). Shiva a ajouté « puisque le choix de la littérature était biaisé alors les affirmations vont être en conséquence biaisées aussi ».

Selon Shiva (2008), bien que la réalité montre que le coton *Bt* ne parvient pas à lutter contre les ravageurs et conduit même à augmenter la présence de nuisibles (ce qui entraîne par conséquent à augmenter l'utilisation des pesticides), le papier «toxique» de l'IFPRI a affirmé que l'adoption du coton *Bt* réduit le nombre de pulvérisations de pesticides de 32 à 40%, baisse les coûts de pesticides de 30 à 52%, augmente le coût total de production de 32 à 40%, n'a pas d'effet évident sur l'augmentation des prix des semences transgéniques et augmente les rendements de 34 à 42% et le gain net de 52 à 71%. Ces affirmations sont fausses parce que les prix élevés des semences transgéniques sont reflétés non seulement par l'endettement et le suicide des agriculteurs mais aussi par le conflit juridique sur le droit à payer qui a opposé le gouvernement de l'Andhra Pradesh contre la multinationale *Monsanto*³⁰.

Le rapport de l'IFPRI est également toxique en termes de ses conclusions contradictoires et incohérentes. En effet, le rapport admet d'une part une augmentation des coûts de production qui entraîne une baisse de revenu de l'agriculteur. D'autre part, l'étude de l'IFPRI affirme que le gain net de cultivateur du coton *Bt* a augmenté de 71%.

L'affirmation faite par les chercheurs de l'IFPRI (l'adoption du coton *Bt* augmente systématiquement le gain net) a été également faussée par de multiples enquêtes de terrain. Une enquête menée en 2008 par Navdanya³¹, afin de comparer le profit du coton *Bt* avec celui du coton conventionnel, a montré que les producteurs du coton non-*Bt* gagnent presque dix fois plus que les cultivateurs du coton transgénique (*cf.* Tab. 1.12).

²⁹ Voir l'article "Toxic Genes and Toxic Papers : IFPRI covering up the link between *Bt*. Cotton and Farmers Suicides" (Shiva V., December 2008) www.whale.to/b/shiva1.pdf

³⁰ Le 2 janvier 2006, l'autorité de l'Etat d'Andhra Pradesh a porté plainte auprès de la Commission des Pratiques Restrictives et des Monopoles contre Monsanto d'avoir chargé un prix exorbitant pour son coton transgénique.

³¹ Un rapport intitulé : « *THE GMO EMPEROR HAS NO CLOTHES A Global Citizens Report on the State of GMOs - False Promises, Failed Technologies* » (Vandana Shiva, Debbie Barker et Caroline Lockhart, 2011). <http://www.navdanya.org/>

	Karnataka		Madhya Pradesh	
	Coton <i>Bt</i>	Coton non- <i>Bt</i>	Coton <i>Bt</i>	Coton non- <i>Bt</i>
Les dépenses (les semences, fertilisants, pesticides, irrigations...)	Rs. 8925	Rs. 10250	Rs. 6675	Rs. 7005
Rendement total	3.82 quintaux	7 quintaux	4.01 quintaux	7.05 quintaux
Gain brut (/acre)	Rs. 7640	Rs. 14000	Rs. 7218	Rs. 12690
Gain net (/acre)	- Rs. 1285	Rs. 3750	Rs. 543	Rs. 5685

Source: Shiva , Barker et Lockhart (2011, p. 149).

Tableau 1.12 : Analyse cout-bénéfice du coton *Bt* et non-*Bt*

L'étude qui a été menée par Qayum et Sakkhari (2005) a encore montré que les résultats de l'étude de *Monsanto* sont biaisés (cf. Tab. 1.13).

L'Etat	% de Réduction de vers de capsule du coton	% de Réduction en usage de pesticides		% d'augmentation de rendement		% d'augmentation de bénéfice net
		Rs.	%	Quintal/acre	%	
Andhra Pradesh	%	Rs.	%	Quintal/acre	%	Rs. / acre
L'étude de <i>Monsanto</i>	58%	1856	24%	1.98	92%	5138
L'étude de Qayum, A. et Sakkhari, K. (2005)	14%	321	2%	0.09	-9%	-750

Source : Shiva, Barker et Lockhart (2011, p. 150).

Tableau 1.13 : comparaison entre l'étude de *Monsanto* et celle de Qayum et Sakkhari (2005)

Pour conclure, l'écologiste indienne Shiva (2008) a affirmé que :

« Lorsque le coton *Bt* fonctionne bien, c'est la «technologie» et quand il fait mal c'est le « contexte ». Cette séparation opportuniste entre la «technologie» et le «contexte» au moment opportun est au cœur du faux débat de l'IFPRI en affirmant qu'il n'existe pas un lien entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs. Comme il est indiqué dans le rapport « Pour certaines régions et dans quelques années, le coton *Bt* pourrait indirectement contribuer à l'endettement (via une mauvaise récolte) conduisant ainsi les agriculteurs au suicide. L'échec du coton *Bt* est principalement le résultat du contexte ou l'environnement dans lequel a été planté et la technologie en elle-même n'est pas à blâmer ». Cet argument est « toxique » parce que toutes les technologies sont intégrées dans leur

contexte. Il n'existe pas de technologies désincarnées sauf dans l'idéologie. En effet, les toxines *Bt* sont exprimées dans le cotonnier génétiquement modifié et les semences sont plantées dans le sol. La technologie *Bt*. ne peut pas exister indépendamment de la semence, et par conséquent c'est la pure idéologie de parler du coton *Bt* comme une technologie indépendante de la semence et du sol. La semence a été vendue aux agriculteurs comme une "baguette magique" pour réaliser des superprofits ».

Une étude de Stone (2011), menée d'une manière indépendante sur la période 2003-2007, offre des conclusions plus nuancées, et n'attribue pas la hausse du nombre de suicides à l'apparition du coton transgénique. Stone (2011) a comparé la situation dans quatre districts de l'Andhra Pradesh (Sud-est de l'Inde), avant l'adoption des semences transgéniques, en 2003, et après leur adoption généralisée, en 2007. Stone (2011) a suivi une démarche qui fait la distinction entre les résultats associés au « champ agricole » et les performances correspondantes à « l'exploitation agricole ». Ce dernier aspect a été négligé par la plupart des travaux empiriques. *« Les études à l'échelle exploitation agricole s'intéressent de la prestation de la plante en conditions de croissance, les variables principales dont dépendent les inputs, les phénomènes écologiques, les rendements et les profits. Tandis que le champ agricole désigne l'unité de gestion socio-économique ainsi que d'autres paramètres tels que les dettes et les revenus, l'accès au travail, à la terre et à la technologie, les liens sociaux avec d'autres agriculteurs et vendeurs ainsi que la connaissance indigène »* (Stone, 2011, p. 387-388). En effet, « au niveau du champ agricole, l'adoption des semences transgéniques semble rentable pour les agriculteurs. Ensuite, quand les insectes ravageurs développent une résistance, une nouvelle génération de semences sera diffusée entre les agriculteurs. Par contre, à l'échelle de l'exploitation agricole, le vrai problème n'est pas le ver du coton mais plutôt la diffusion rapide de la technologie *Bt* sur un marché qui se change rapidement et faiblement réglementé. Ces tendances affectent la bonne gestion au sein des exploitations agricoles ce qui aide à mieux comprendre la situation dans le District de Warangal, où le changement rapide de la technologie agricole a conduit à la déqualification agricole³² (agricultural deskilling) » (Stone, 2011, p. 395).

Stone (2011) a mis en évidence les bénéfices liés à la culture du cotonnier *Bt* à savoir une augmentation des rendements de 18% et une baisse de l'usage des insecticides de l'ordre de

³² « En effet, les changements technologiques accélérés présentent deux inconvénients principaux : ils ciblent les symptômes des problèmes agricoles et non les causes sous-jacentes et ils ont mené à la déqualification des exploitants agricoles dépassés par toutes ces transformations ». (Stone, 2011 p.8)

55%. Les chiffres habituellement trouvés sont plutôt une augmentation des rendements de l'ordre de 30 à 40% et une baisse de l'usage des pesticides du même ordre (le rapport de l'IFPRI, 2008). Par ailleurs, personne ne remet en cause que la baisse de l'usage des pesticides a engendré une hausse des populations de ravageurs secondaires. Les résultats ne sont pas aussi prometteurs que le laissent entendre les semenciers, ni aussi catastrophiques que l'affirment les opposants des organismes génétiquement modifiés.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié deux aspects de l'impact de l'adoption du coton *Bt* sur les paysans indiens : économique et sociale. Ces deux aspects nous ont permis de comprendre la controverse autour du coton OGM. La question principale à laquelle les chercheurs ont essayé de répondre est la suivante : l'avènement du coton *Bt* a-t-il augmenté le profit de l'agriculteur (augmentation du rendement et réduction de la quantité utilisée de pesticides) ?

Bien que la majorité des travaux empiriques confirme que la situation économique des agriculteurs indiens a progressé, le profit associé à l'adoption du coton *Bt* est donc affecté par de différents aléas (climatiques, cours internationaux du coton, la résistance des ravageurs, les insectes secondaires...). Selon Qayum et Sakkhari (2005), le coton *Bt* n'a pas réalisé les résultats escomptés (faire disparaître les problèmes d'insectes et réduire ainsi l'utilisation de pesticides) et les fermiers qui ont utilisé ce type de semences ont eu un autre problème à savoir le développement d'insectes secondaires qui nécessite des doses supplémentaires de pesticides. Le gain apporté par cette nouvelle technologie a été plus élevé dans les exploitations irriguées et plus faible dans les fermes pluviales.

En général, quoiqu'une grande partie de la littérature scientifique affirme que le gain de fermier indien augmente avec les variétés transgéniques, il est encore prématuré pour confirmer d'une manière concluante l'ampleur et la stabilité des rendements des variétés *Bt* par rapport aux semences traditionnelles, parce que ces points dépendent, entre autres, des pratiques agricoles et de niveau d'infestation par les ravageurs qui varient entre les saisons et les champs agricoles (Stone, 2011, p. 388). Plus encore, les travaux empiriques ne prennent pas en considération le pouvoir de monopole qui pourrait jouer la multinational *Monsanto* en fixant un prix supérieur à celui du marché.

Pour un pays comme l'Inde, les impacts positifs prévus par la multinationale *Monsanto* n'ont pas encore été confirmés sur le terrain. Les travaux empiriques ayant conclu (Qaim M., 2003, Qaim, Subramanian, Naik et Zilberman, 2006 et Subramanian et Qaim, 2009) des résultats positifs comportent des problèmes associés soit aux données utilisées (biais de sélection) ou aux méthodes appliquées. Bien qu'au niveau du « champ agricole » l'adoption

du coton *Bt* était rapide et semble rentable, à l'échelle de l'exploitation agricole la diffusion technologique instantanée a conduit à la déqualification agricole (Stone, 2011).

L'augmentation du coût de production et la baisse des cours internationaux du coton ont aggravé l'endettement de l'agriculteur en Inde. Plus encore, avec des impacts négatifs non prévus de la technologie *Bt*, le cultivateur du coton se trouve dans un état de surendettement et le suicide, surtout dans les grands Etats producteurs du coton, devient l'unique échappatoire face à une situation économique insupportable. Comment peut-on expliquer le suicide d'un point de vue économique ? La réponse à cette question fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

ECONOMIE DU SUICIDE : UNE REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 Introduction

Plus qu'une simple présentation des contributions majeures de la littérature sur les déterminants économiques du suicide, nous apportons une réflexion générale sur le débat qui oppose l'approche économique de suicide, d'une part et celle sociologique, d'autre part. Ainsi, la problématique de ce chapitre est de dresser un état des lieux sur le phénomène suicidogène d'un point de vue socio-économique.

Dans les manuels de microéconomie, le suicide n'a que très peu été considéré comme un thème de recherche. Pour ainsi dire, les économistes semblent continuer à ignorer un tel sujet. Pourtant, Il y a trois facteurs importants, semble-t-il selon nous, qui pourraient inciter un économiste à participer au débat sur le suicide. *Primo*, la théorie microéconomique est fondée sur l'hypothèse du *choix rationnel* qui pourrait trouver dans le phénomène du suicide un intéressant défi de recherche épistémologique³³. *Secundo*, les tendances observées au niveau des données statistiques sur le suicide représentent une matière très riche pour utiliser les techniques économétriques récentes. Par exemple, les pionniers de la sociologie du suicide avaient conclu une certaine corrélation entre le suicide et le cycle économique³⁴. *Tertio*, les outils de la théorie microéconomique standard pourraient être aussi une source d'information très riche pour évaluer l'efficacité des mesures de politiques économiques contre le suicide³⁵.

Toutefois, il semble difficile de parvenir à expliciter les déterminants du suicide sans imposer au préalable des hypothèses sur l'environnement socio-économique de chaque région ou individu. C'est la raison pour laquelle il n'existe à l'heure actuelle aucune étude économique qui aboutit à des résultats globaux sur le suicide. Les travaux théoriques supposent souvent que les problèmes économiques constituent généralement un facteur de risque important pour le suicide. Ces travaux reposent sur une hypothèse fondamentale qui considère l'acte suicidaire comme un *choix rationnel*. En effet, le suicide, qui a été modélisé dans le cadre d'un problème de maximisation d'utilité, devient un choix rationnel si l'utilité espérée de l'agent baisse en dessous d'un certain seuil (Hamermesh et Soss, 1974). Toutefois, il est épineux d'appréhender pourquoi un pays comme la Finlande (un pays à haut niveau de

³³ Bien qu'il soit conditionné par l'environnement socio-économique, le suicide est un acte individuel.

³⁴ Durkheim (1789 ; chap. 5 : le suicide anémique ; 264-311), Halbwachs (1930 ; chap. 12 : L'influence des crises économiques : le mouvement des suicides en Prusse et en Allemagne ; pp. 355-374), Dublin et Bunzel (1933; pp. 65-66) et Thomas (1922).

³⁵ Par exemple les outils économiques reposant sur la théorie microéconomique telle que l'analyse coût-bénéfice ou l'analyse coût-efficacité sont particulièrement bien adaptés.

revenu par tête) a longtemps figuré aux toutes premières places du palmarès mondial des suicides³⁶. La formulation de cette question est surtout l'occasion de signaler qu'il n'existe, malgré tous les arguments avancés, aucune réponse formelle qui corrobore la supériorité des problèmes économiques par rapport à toute autre cause de suicide (problèmes sociaux, problèmes mentaux, problèmes de réglementation institutionnelle, etc...). En ce qui concerne les travaux empiriques, le suicide est souvent étudié d'un point de vue macroéconomique³⁷. Pour la plupart de ces travaux, il existe une relation de cause à effet entre le chômage et le suicide. Loin de vouloir remettre en cause la généralisation de ce résultat, il est néanmoins légitime de se poser la question dans la mesure où les données agrégées, utilisées par la majorité de ces travaux, ne sont pas d'une grande utilité pour comprendre le suicide à un niveau individuel. Plus encore, certaines caractéristiques économiques, culturelles, institutionnelles et sociales propres à chaque pays sont susceptibles de modifier la modélisation du suicide. Ainsi, dans certains pays comme l'Egypte, bien que le taux de chômage atteigne un niveau record, le taux de suicide est demeuré faible (en 1987 le taux de suicide est de l'ordre de 0,1 pour 100 000³⁸).

Toutes ces remarques montrent combien l'environnement dans lequel se produit le suicide est complexe. Ainsi, les résultats les plus généraux de ces travaux économiques n'apportent pas une réponse définitive à la problématique posée. Evidemment, il est difficile de prendre en compte tous ces aspects dans un modèle théorique unique. Toutefois, il semble important d'étudier l'impact de ces divers éléments, même de manière isolée sur le suicide. Mieux encore, l'analyse doit être étendue à l'aspect *socio-économique* du suicide. Il s'agit d'un sujet encore peu examiné dans la littérature bien que l'outil microéconométrique soit largement développé³⁹.

Globalement, nous avons orienté notre étude de la revue de la littérature spécialisée autour de 7 axes. Plus précisément, le premier axe traite des données statistiques existantes sur le

³⁶ En 1999, le taux de suicide en Finlande est de l'ordre de 28,4 pour 100 000 habitants, par contre en Grèce ce taux était estimé en 1999 de 4,2 pour 100 000 (Le Rapport Mondial sur la Violence et la Santé [2002; p. 206].

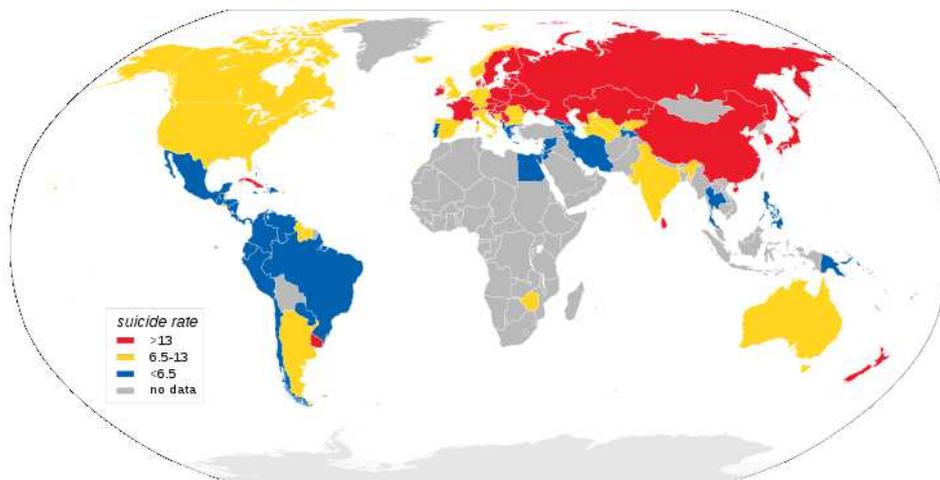
³⁷ La rareté des données individuelles fait qu'il faut souvent suivre une approche macroéconomique pour étudier le suicide.

³⁸ World Health Organization (http://www.who.int/mental_health/prevention/suicide_rates/en/index.html).

³⁹ Le passage d'une économétrie centrée sur les grandes relations macro-économiques à une économétrie préoccupée des comportements des individus est expliqué par la pertinence des informations fournies par les enquêtes sur les ménages. Seules ces enquêtes servent à tester le comportement de l'agent rationnel abordé selon « l'individualisme méthodologique » (A ce titre, on peut citer l'exemple du débat entre l'enseignement de Malinvaud dans les années 60 et celui de Gouriéroux depuis les années 80).

sujet. Le deuxième axe s'intéresse de la théorie durkheimienne du suicide. Le troisième axe fait le point sur l'approche microéconomique en insistant très distinctement sur l'intérêt d'une telle approche. Seront développés plus en détail trois modèles significatifs à partir desquels on puisera dans la littérature existante. Le quatrième axe brosse les approches théoriques en vogue telles que la théorie des jeux. Nous insistons sur les avantages ainsi que les limites intrinsèques de ce type de modélisation. Nous focalisons dès lors notre lecture au travers des études empiriques sur le sujet : l'approche macro-économétrique, certes, mais aussi celle microéconométrique. Dans un souci de réalisme, nous conceptualisons dans une section notre lecture au travers des mesures de prévention du suicide telles qu'elles sont perçues par les politiques économiques. Enfin, on examine les développements économiques récents sur le suicide.

2.2 Informations Statistiques sur le suicide



Source : Rapport Mondial sur la Violence et la Santé (OMS, 2002)

Figure 2.1 : La carte Mondiale des taux du suicide

(Par 100 000 habitants ; l'année disponible la plus récente est à partir de Mars 2002)

(Rouge : >13, jaune : 6,5-13, bleu : <6,5.)

Avant d'aborder la discussion sur les contributions théoriques et empiriques en économie suicide, nous présentons les informations statistiques mondiales relatives au taux de suicides pour montrer les fortes variations de ce taux par pays (selon l'âge et le sexe).

Selon le Rapport Mondial sur la Violence et la Santé⁴⁰, il est précisé qu'« En 2000, le suicide a fait quelques 814 000 victimes dans le monde, soit un taux global ajusté selon l'âge de 14.5 pour 100 000 – ou un décès toutes les 40 secondes environ. Le suicide est la treizième cause de décès dans le monde. Plus de 60% des suicidés étaient des hommes et plus de la moitié d'entre eux étaient âgés de 15 à 44 ans »⁴¹.

Tout d'abord, durant des périodes, on constate une grande variation des taux de suicide entre les Etats-Unis et l'Europe (La Fig.1.1). En 2000, les Etats-Unis ont enregistré un taux de suicides de l'ordre de 10.7 pour 100 000 habitants, ce qui est supérieur au taux de criminalité enregistré à la même période dans ce pays (5.5 pour 100 000 habitants). En Europe, le taux du suicide global varie de 21.5 pour 100 000 habitants en Finlande (en 2000) à 3.26 en Grèce (en 1999). Entre 1970 et 1990, la Suède a connu une baisse du taux du suicide de l'ordre de 42.5 pour cent, tandis que, pour la même période, l'Espagne a connu une augmentation de ce même taux de l'ordre de 52.6 pour cent.

Pour l'ensemble des pays, les Figures 2.1 et 2.3 montrent clairement qu'en général le taux de suicide est plus élevé chez les hommes que chez les femmes. Encore une fois on remarque pour chaque catégorie de sexe une grande variation du taux de suicide par pays et par période. À titre d'exemple, en Finlande on note que les taux de suicides masculins et féminins sont nettement plus élevés que ceux de tous les autres pays assemblés (pendant l'année 2000 les taux de suicide masculins et féminins sont respectivement de l'ordre de 32.9% et 10.5%), tandis que la Grèce a enregistré de très faibles taux de suicide masculins et féminins (les taux de suicides sont respectivement de l'ordre de 6% et 1.4%). Durant la période 1970 – 1998, l'Espagne a enregistré une augmentation des taux de suicides masculins et féminins (respectivement de l'ordre de 54,5% et 35,6%). Pour la France on a enregistré aussi une légère augmentation des taux de suicide pour les deux sexes entre 1970 et 2000.

Selon McIntosh (2009), en moyenne, il semble qu'il y ait 4 fois plus de suicides masculins que féminins, par contre les femmes font 3 fois plus de tentatives de suicide que les hommes.

⁴⁰ Publié en 2002 par l'Organisation Mondiale de la Santé.

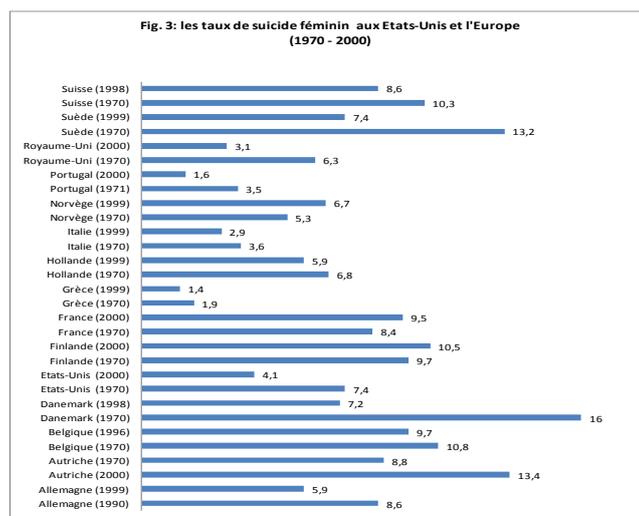
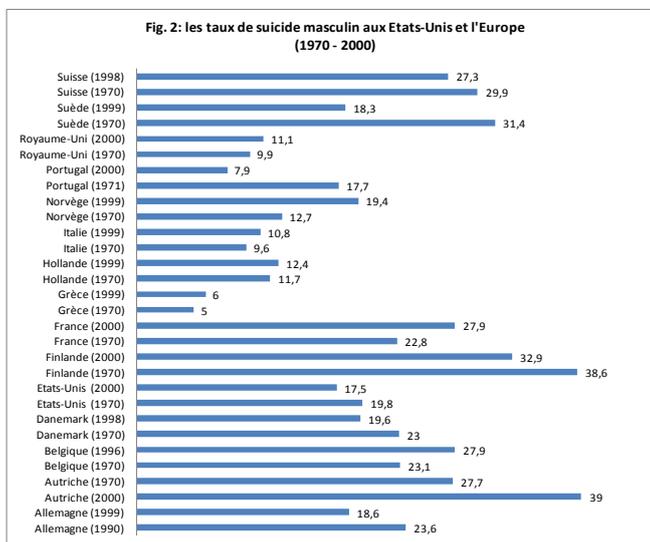
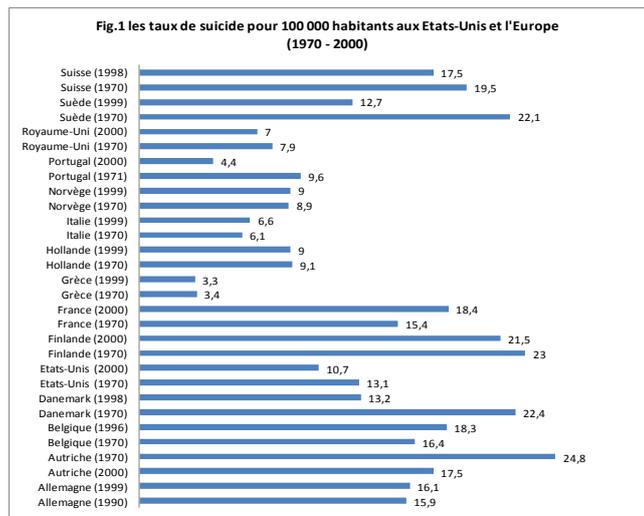
⁴¹ Le Rapport Mondial sur la Violence et la Santé (2002; p. 11) : http://www.who.int/violence_injury_prevention/violence/world_report/en/full_fr.pdf

Il a souligné également que les taux de tentatives de suicide sont beaucoup plus fréquents chez les femmes mais leurs conséquences sont moins graves (les méthodes utilisées sont moins violentes) et *vice versa* pour les hommes.

Groupe d'âge	Hommes	Femmes
0-4	0,0	0,0
5-14	1,7	2,0
15-29	15,6	12,2
30-44	21,5	12,4
45-59	28,4	12,6
≥ 60	44,9	22,1
Total	18,9	10,6

Source : Rapport Mondial sur la violence et la santé (2002, p. 11)

Tableau 2.1 : Taux Mondial de Suicides (pour 100 000 habitants) par groupe d'âges et par sexe en l'an 2000 (estimation)



Source : Rodriguez (2005) et *National Center for Health Statistics* (www.cdc.gov/nchs/).

Figure 2.2 : taux de suicide aux États-Unis et l'Europe (1970- 2000)

Le tableau 2.1 présente la distribution des taux de suicide selon l'âge, le sexe et le pays. On remarque que pour les deux sexes, les taux de suicide augmentent avec l'âge. C'est parmi les hommes âgés de 60 ans et plus qu'on enregistre des taux de suicide les plus élevés, tandis que chez les femmes les plus hauts taux de suicide sont enregistrés dans le groupe d'âge 45-54. Pour les jeunes (le groupe d'âge 15-24), les taux de suicide sont généralement plus élevés chez les hommes que chez les femmes. Plus encore, les taux de suicide des hommes, appartenant à ce même groupe d'âge, ont augmenté avec le temps aux Etats-Unis et dans presque tous les pays Européens.

McIntosh (2009) a également noté qu'en 2006 le suicide était la troisième cause de décès des jeunes aux Etats-Unis, alors qu'il était la onzième cause de décès dans la population en général. Cutler *et al.* (2001) ont souligné que la hausse des taux de suicides chez les jeunes (groupe d'âge 15-24) entre 1950 et 1999 était principalement axée dans les Etats ruraux du pays. Au moment des écrits de Durkheim, le suicide était un phénomène principalement urbain et en fait il s'en était servi comme une preuve que la société agricole traditionnelle⁴² a joué un rôle important en favorisant le bon fonctionnement de l'environnement social.

Cependant, ce qui a été présenté dans les 3 figures ne relève pas de l'augmentation massive des taux de suicide dans les économies en transition d'Europe de l'Est, qui représente peut-être une forme de suicide *anémique* et économique (baisse du PIB après la chute du régime partout dans la zone). En 2000, l'Estonie, l'Ukraine, la Lettonie, la Belarus et la Russie obtenaient des taux de suicide masculins significativement plus élevés (par 100 000 habitants) que n'importe quel pays mentionné dans les 3 Figures. Ces taux de suicide sont respectivement : 45.8, 52.1, 56.6, 63.6 et 70.6.

Ainsi, les informations statistiques sur le suicide montrent que, pour les deux sexes, les taux de suicides augmentent avec l'âge et c'est parmi les personnes âgées de 60 ans et plus qu'ils sont les plus élevés pour les hommes par contre pour les femmes les taux de suicides augmentent dans le groupe d'âge 45-54 (voir tableau 2.2). Cependant, les taux de suicides sont généralement plus élevés parmi les hommes que parmi les femmes (voir tableau 2.2). Certains pays affichent une tendance à l'augmentation des taux de suicides dans le temps. Selon le Rapport Mondial sur la Violence et la Santé (2002) : « *sur trente ans, entre 1960 et 1990, au moins 28 pays et territoires ont enregistré une hausse de leurs taux de suicides* ».

⁴² Particulièrement la société agricole catholique [Durkheim 1879, p. 150-151].

La question est maintenant de savoir comment les économistes expliquent-ils le phénomène du suicide ? Toutefois, il est important de rappeler la théorie durkheimienne du suicide comme fait social.

	Année	Masculin							Féminin						
		Age							Age						
		0-14	15-24	25-34	35-44	45-54	55-64	65-74	0-14	15-24	25-34	35-44	45-54	55-64	65-74
Allemagne	1999	0.4	12.8	17.7	23.4	24.9	25.9	30.9	0.1	3	4.4	6.8	8.7	10.5	10.9
	1970	0.3	13.6	22.3	25.2	33.7	35.7	39	0.1	4	6.9	7.9	12.9	14.3	19.4
Autriche	2000	0.5	21.8	23.3	31.9	32.8	44.1	48.6	0.6	5.8	5.3	11.5	11.5	16.3	17.5
	1970	0.4	26.9	31.8	46.7	61.8	65.3	72.7	0	5.7	8.2	16.4	23	25.6	27.5
Belgique	1996	0.3	21.4	30.4	42.1	34.7	38.2	34.7	0.3	5.7	10.1	15.2	15.6	13.4	15.3
	1970	0	7.9	13.3	20.8	31.8	46.1	59.8	0	2.6	6.6	12	17.1	23.2	27.3
Danemark	1998	0.4	10.4	20.2	27	33.3	25.3	25.3	0	2.8	4	7.3	13.5	18.1	10.3
	1970	0.3	10.7	25.6	39.5	56	48.9	45.7	0	5.5	10.8	22.7	30.3	34.2	26.8
Espagne	1998	0.1	7.8	13.5	12.2	13.1	15.9	23.2	0.1	1.5	3.1	3.8	4	4.8	7.8
	1970	0.1	2	4.1	7.1	9.6	15.6	22	0	0.9	1.4	1.6	3.8	5.4	5.7
Etats-Unis	2000	1.2	17.1	19.6	22.8	22.4	19.4	22.7	0.3	3	4.3	6.4	6.7	54	4
	1970	0.5	13.5	19.8	22.1	27.9	32.9	36	0.2	4.2	8.6	11.9	12.6	11.4	9
Finlande	2000	0	31.2	46.1	50.4	44.3	37.3	34.1	0.4	8.1	12.2	13.6	17.4	18.1	13.3
	1970	0.78	22.4	41.3	55.5	59.6	62.4	66.6	0.2	6.8	9.8	11.3	21	16	12.1
France	1999	0.3	12.5	26.1	35.8	34.3	31.2	39.3	0.2	3.4	7.6	11.3	14.9	14.3	14.8
	1970	0.4	9.4	17.1	25.5	37	50.9	55.4	0	4.4	7.5	8	11.7	16.2	17.8
Grèce	1999	0	3.8	7.3	5.8	7.2	8.2	7	0	0.9	2	1.2	2.2	1.5	3.2
	1970	0	1.7	4.1	6.1	6.9	10.6	10.5	0.1	1.4	1.8	1	3.3	4.3	1.7
Italie	1999	0.3	7.2	11.5	10.4	12.2	15.3	22.2	0	1.9	2.5	3.6	3.5	4.9	6.2
	1970	0.2	3.5	5.9	7.4	11.6	18.2	24	0.1	2.3	2.7	3.5	5.4	7	7.5
Norvège	1999	0.2	28.1	26.1	19.2	23.2	25.4	31.2	0.2	9.1	8	9.9	11.1	5.4	9.4
	1970	0.2	5.3	15.2	17.3	19.3	24.7	19.6	0	2	4.3	10	10.4	9	6.9
Pays-Bas	1999	0.5	8.5	15	16.6	18.7	14.8	18.8	0.3	4.4	6.4	7.7	9.7	9.2	8.1
	1970	0.4	5.7	6.4	11.2	15.8	24	25.4	0.1	2	5.5	7.5	11.2	12.6	15
Portugal	2000	0	3.6	4.9	8.7	6.4	10.8	20.7	0	0.5	1.2	1.1	2.1	3	3.8
	1971	0.3	4.2	9.2	14	22.4	35.7	50.2	0.3	1.4	3.1	3	6.3	5.9	6.3
Royaume-Unis	2000	0.1	10.6	17	16.8	15.8	11.7	10.4	0.1	2.9	3.9	4.4	4.9	3.8	3.6
	1970	0	5.8	8.9	11.7	13.9	17.9	19.7	0	2.4	4.6	7.4	10.7	12.9	14.1
Suède	1999	0.3	14.7	16.1	24.7	26.3	27.6	30.4	0	6.3	7.4	11.7	11.9	10	9.6
	1970	0.4	17.8	28.4	44.7	52.5	54.7	46.3	0.4	7.7	15.4	19.2	26.1	18.2	15.6
Suisse	1998	0.5	21.8	28.5	27.6	35.3	44.3	42.7	0.3	5.6	5.4	10.5	14.5	13.6	16.7
	1970	0.5	22.6	26.6	28.7	47.7	44.6	50.5	0	5	9.9	8.2	19.3	19.5	22.2

Source : Rodriguez (2005) et National Center for Health Statistics.(<http://www.cdc.gov/nchs/>)

Tableau 2.2 : Mortalité imputable au suicide par sexe, groupe d'âge et Pays (pour 100 000 habitants)

2.3 L'approche de Durkheim

Le suicide est un sujet qui a suscité un intérêt phénoménal depuis des siècles, du fait de son aspect religieux en particulier, mais aussi en raison de ses impacts mesurés en affichant des chiffres très alarmants par sexe, âge, nation, ethnie, état de l'économie et par période. D'un point de vue science sociale, la contribution la plus célèbre à ce sujet a été entreprise en 1897 par le sociologue français Emile Durkheim dans son ouvrage *Le Suicide*.

Par contraste au discours religieux et moral, Durkheim a fait du Suicide un objet de sciences sociales. Après un travail de théorisation et de généralisation fondé sur des statistiques européennes concernant les taux de suicide (XVIII^{ème} siècle), Durkheim a pu identifier quatre types différents de suicide en fonction de deux variables à savoir : l'intégration (attachement au groupe) et la régulation (attachement aux règles).

	Excès d'intégration	Défaut d'intégration
Régulation sociale (Force des normes et des règles)	Suicide Fataliste	Suicide Anomique
Intégration sociale (Attachement de l'individu aux groupes sociaux)	Suicide Altruiste	Suicide Egoïste

Tableau 2.3 : la classification des suicides

2.3.1 Le suicide anémique : l'absence de normes

Le terme « Anémique », dérivé du verbe Grec *anomie*, renvoie au non-respect des lois ou à l'anarchie. *Nomos* signifie coutume ou loi et *nemein* exprime le partage. Par conséquent, l'anomie est définie par l'instabilité sociale résultant d'une absence des normes, de règles ou des lois qui maintiennent la cohérence sociale et règlent la conduite des individus. Selon Durkheim, le suicide anémique est lié à une insuffisance de réglementation ou des contraintes externes sur les individus. Cela se produit quand « la forme standard » de la vie est perturbée soit à travers d'un changement dramatique dans la société ou bien dans la situation personnelle de l'individu.

Durkheim a partagé le suicide anémique en *i*) anémie économique (où il existe une corrélation statistique entre le taux de suicide et une phase de récession particulièrement importante ou une phase de croissance particulièrement singulière) et *ii*) anémie familiale (par exemple les suicides de divorcés sont fortement supérieurs à ceux des autres populations). La première pourrait être générée pendant les périodes associées à une dépression économique ou à une expansion économique rapide. De même, pour l'anémie familiale, un individu peut ne pas être en mesure de faire face à un changement exprimé par la mort de son conjoint. Dans les deux cas, la pression de la situation pourrait obliger l'individu à commettre un acte suicidaire.

2.3.2 Le suicide fataliste : un excès de régulation sociale

Contrairement au suicide anémique, le suicide fataliste peut se produire suite à une surcharge de réglementation et autres législations. Durkheim (1897, p. 311) a suggéré que ce type de suicide « *c'est celui qui résulte d'un excès de réglementation ; celui que commettent les sujets dont l'avenir est impitoyablement muré, dont les passions sont violemment comprimées par une discipline oppressive* ». Durkheim a évoqué à titre d'exemple le cas de suicides des prisonniers condamnés à des peines de prison à vie.

Cela étant, nous pouvons observer que dans la situation des détenus politiques, les individus réagissent différemment en fondant une cause pour laquelle ils continuent de lutter et de vivre. De telles tentatives peuvent représenter un mécanisme d'auto-motivation déterminant pour les individus qui s'accrochent à la croyance qu'un jour ils seront libres.

2.3.3 Le suicide égoïste : un défaut d'intégration sociale

Le suicide égoïste intervient lors d'un défaut d'intégration de l'individu dans un groupe social dont il fait partie. Le défaut d'intégration sociale génère un sentiment d'isolement et de non appartenance à ce groupe. Quand une société se désagrège, l'individu est renvoyé à lui-même (à son égo) : avec le désarroi qui peut en résulter. Il apparaît ainsi que l'individualisme est un facteur favorable au suicide : « *ce qui distingue l'égoïste qui se tue, c'est une dépression générale qui se manifeste soit par une langueur mélancolique, soit par l'indifférence*

épicurienne... le détachement mélancolique résulte de cet état d'individuation exagéré » (Durkheim 1879, p. 319).

Selon Durkheim, une intégration suffisamment forte des individus dans une structure familiale, un groupe religieux ou dans une certaine autre forme du groupe social peut diminuer le risque de suicide. A cet égard, Durkheim a porté un intérêt particulier au taux du suicide chez les hommes non mariés. Ceci a été reflété en quelque sorte dans les travaux empiriques intéressés par le divorce qui soulèvent certaines questions importantes concernant le suicide par sexe. Par exemple, un homme homosexuel qui vit dans une communauté solide et solidaire devrait, selon les hypothèses de Durkheim, être moins susceptible de commettre un acte de suicide en comparaison avec un homme hétérosexuel célibataire ou divorcé.

2.3.4 Le suicide altruiste : un excès d'intégration sociale

Paradoxalement, dans le cas du suicide altruiste, la personne est trop fortement intégrée. L'individu est tellement attaché à un groupe social qu'il est prêt à sacrifier sa vie pour ce groupe. Le cas extrême de ceci serait l'attentat-suicide exécuté par un kamikaze qui a pour but de promouvoir le bien commun de la Nation ou d'un groupe religieux (Berman et Laitin, 2008). Généralement, dans les sociétés où la vie est difficile et la durée de vie risque d'être courte, il est admis qu'une personne âgée peut se donner la mort parce qu'elle ne veut pas être un fardeau pour ses proches (Kiemo, 2004). En réalité, il s'agit d'un transfert intergénérationnel de l'utilité⁴³. Toutefois, l'acte du suicide ne pourra que très faiblement se produire si, à la marge, la personne trouve que sa productivité marginale de survie est suffisamment élevée (Becker-Posner, 2006).

En conclusion, Durkheim a repéré ces différents types de suicide dans un cadre de régulation sociale. Essentiellement, un type de suicide se manifeste quand un individu se trouve incapable de faire fonctionner adéquatement ses propres besoins en parfaite harmonie avec ceux de la société. La plupart des taxonomies construites par Durkheim s'articulent autour du fait que les individus qui ne ressentent pas leurs rôles dans la société (les individus qui se perçoivent exclus par la société) sont les plus exposés au risque de suicide. Au moment

⁴³ La fonction d'utilité intergénérationnelle (Barro, 1974) est bâtie sur l'hypothèse de l'altruisme et d'une utilité " enchaînée" de la part de la génération ancienne pour la nouvelle génération.

où Emile Durkheim rédigeait son ouvrage « *Le Suicide* », le statut de mariage semblait être une grande issue à l'individu pour éviter le suicide. En effet, cette approche, axée sur la famille, semble encore être à la base d'un grand nombre de recherches contemporaines sur le suicide malgré l'intérêt qu'on accorde de plus en plus au rôle de la sexualité dans les pays développés. En marge de la recherche sur le suicide, il existe une littérature importante concernant le taux de suicide élevé chez les adolescents homosexuels (Gibson, 1989). Ce phénomène suggère que le suicide dépend de l'hostilité de la société à l'égard d'une déviation évidente et l'individu doit s'adapter aux normes de la société⁴⁴.

Après Durkheim, plusieurs études ont été publiées sur le sujet par des philosophes, des psychiatres et des sociologues. Il existe même des « suicidologistes »⁴⁵ qui sont entièrement consacrés à l'étude du suicide. Une contribution modeste mais tout à fait novatrice par rapport aux autres études a été faite par les économistes tels que le travail de Hamermesh et Soss en 1974. C'est un travail pionnier et une référence incontestée dans le domaine de l'économie de suicide. Plus encore, plusieurs critiques ont été formulées au sujet de la typologie de Durkheim dans le sens que certaines caractéristiques ont été négligées dans sa thèse. Les développements récents de la théorie microéconomique s'attachent plus à incorporer ces caractéristiques. L'une de ces théories est la tendance croissante d'examiner les conflits dans les préférences, la deuxième approche est l'utilisation de la théorie des jeux, en particulier le jeu des signaux, pour étudier l'adoption de la tentative de suicide comme une stratégie de négociation qui pourrait induire un changement dans son comportement par l'influence d'autres personnes.

Toutefois, avant le XX^{ème} siècle, les économistes ont montré peu d'intérêt pour ce sujet. En 1759, dans son ouvrage « *The Theory of Moral Sentiments* », Adam Smith a consacré des pages au phénomène du suicide (pp.334-340). L'essentiel de cette discussion porte sur des anciennes positions philosophiques (en particulier le stoïcisme) concernant la question : l'acte de suicide est-il moralement condamnable? Sa propre thèse envisage que le suicide n'est pas un acte rationnel mais plutôt le résultat d'un certain trouble nerveux.

⁴⁴ Pour des références sur le phénomène du suicide des adolescents gays voir le site suivant: <http://www.youth-suicide.com/gay-bisexual/>

⁴⁵ La Suicidologie est une science interdisciplinaire ayant pour objectif de comprendre et de prévenir le suicide. La Suicidologie prétend en effet « gérer » le suicide sans comprendre l'acte suicidaire. Le fondateur de l'*American Association of Suicide Prevention* (Denver), Edwin S. Shneidman est considéré comme le père de la Suicidologie.

David Hume, dans son ouvrage « *Of Suicide* », a discuté largement la même question. Bien qu'il arrive aussi à la conclusion que le suicide n'est pas un crime qui nécessite la punition, il va plus loin pour considérer le suicide comme un choix rationnel, en disant : « je crois que jamais aucun homme ne se défit d'une vie qui valait la peine d'être conservée » (Hume, 1759, p.26). En fait, Hume a attiré l'attention sur les variables « âge » et « malheur » comme facteurs qui peuvent entraîner le suicide. Ces causes s'avèrent être les principaux paramètres de décision dans la nouvelle théorie économique de suicide.

Le phénomène du suicide a été étudié selon deux approches économiques à savoir l'approche microéconomique et celle macroéconomique.

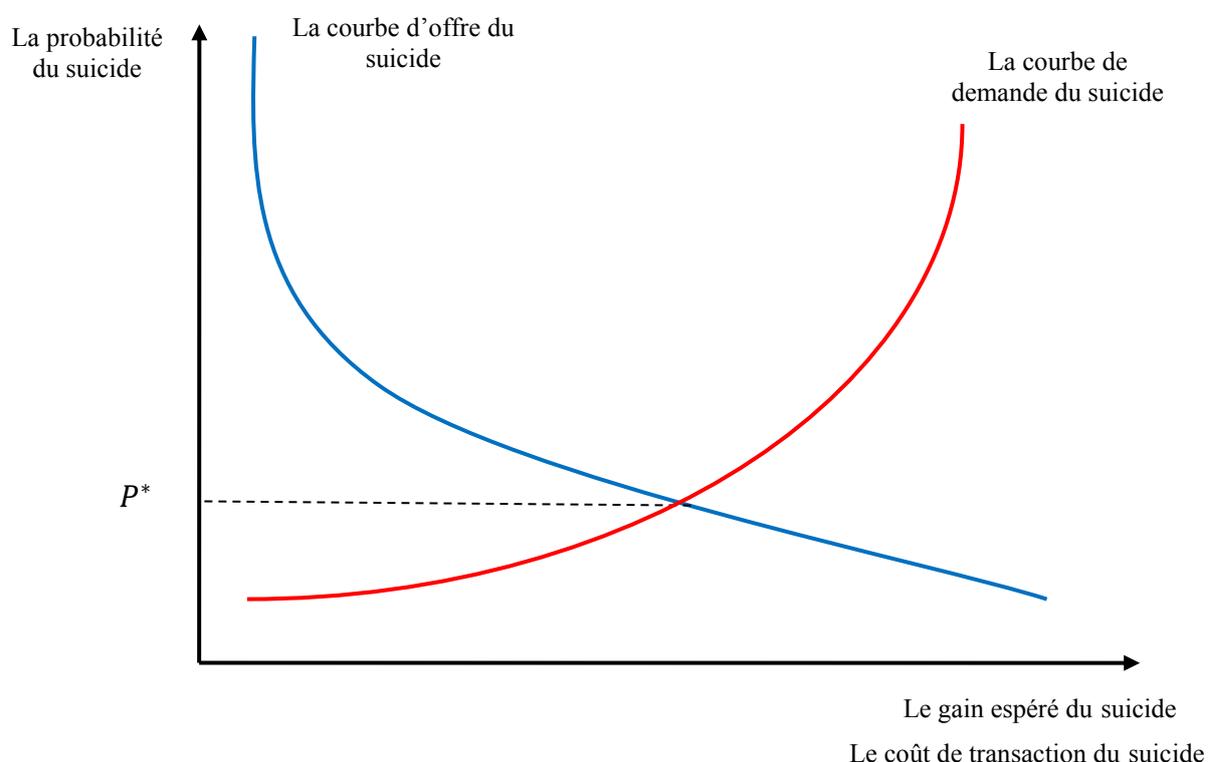
2.4 L'approche microéconomique

Cette section présente les principales théories économiques de suicide. Les thèmes discutés comprennent le cadre de la maximisation de l'utilité considérant le comportement suicidaire comme étant *un choix rationnel*. On discute également la tentative de suicide sous la perspective d'un jeu stratégique. Par ailleurs, on présente la théorie du suicide contagion avec l'idée que l'acte de suicide est « épidémique ». Toutefois, jusqu'à présent, aucune étude théorique n'a appliqué les enseignements de la théorie des jeux sur la théorie contagion du suicide pour expliquer ce comportement.

2.4.1 Le modèle offre-demande du suicide : le marché du suicide

Il est intuitif de penser que le suicide a rarement été considéré comme un bien économique que l'on pourrait vendre sur le marché à un vecteur donné de quantité-prix. Yang (1987) a cependant suggéré que l'on peut effectivement avoir un modèle offre-demande du suicide. Il a proposé une analyse coût-bénéfice pour étudier ce phénomène. Du côté de la demande, le gain espéré que l'on peut tirer du suicide est le soulagement de la détresse. Etant donné qu'une grande souffrance morale peut augmenter la probabilité de suicide, alors la courbe de demande de l'individu pour le suicide sera caractérisée par une pente positive entre le gain attendu et la probabilité du suicide. Du côté offre, les coûts escomptés sont les coûts de

transaction qui incluent à la fois les coûts monétaires (la perte de revenu futur) et non monétaires (la peur de la mort et la privation de toute jouissance qu'il pourrait éprouver dans le reste de sa vie). Étant donné qu'un coût de transaction élevé peut diminuer la probabilité du suicide, alors la courbe d'offre du suicide sera caractérisée par une pente négative entre les coûts attendus et la probabilité du suicide. Par conséquent, dans ce modèle statique, l'intersection entre les courbes d'offre et de la demande détermine la probabilité d'équilibre du suicide (Fig. 2.4). Toutefois, ce modèle ne peut pas prendre en considération de l'ajustement à l'équilibre au long terme.



Source : auteur

Figure 2.3 : Le marché du suicide

Un autre modèle microéconomique a été développé par Huang (1997) dans le cadre d'un modèle de l'offre. L'idée de base consiste à procéder à une analogie entre la décision d'un individu qui veut commettre un suicide et celle d'un travailleur qui désire quitter le marché du travail. Tout en admettant qu'un travailleur décide du nombre d'heures qu'il doit affecter au travail, un individu doit décider de la quantité d'effort qu'il faudra fournir pour demeurer en vie. Si un travailleur décide de passer zéro heure au travail, il quittera le marché du travail. De la même façon, si un individu décide de fournir une quantité d'effort égale à zéro pour rester

en vie, il quittera « le marché de la vie ». En d'autres termes, dans ce contexte, la décision de commettre un suicide sera considérée comme une solution en coin.

En résumé, selon le modèle d'offre-demande, le taux de suicide est le résultat de l'interaction entre les forces du marché. Le premier argument qui justifie l'utilisation de ce type des modèles est l'hypothèse du choix rationnel. Toutefois, l'analyse reste au stade statique et c'est avec Hamermesh et Soss (1974) qu'on va aborder la question de l'analyse temporelle du suicide.

2.4.2 Le modèle de Hamermesh et Soss : maximisation de l'utilité

Par contraste avec les modèles statiques cités ci-dessus, celui développé par Hamermesh et Soss (1974), est plutôt dynamique, et peut donc aborder la question du *timing*. Ils ont modélisé le suicide dans le cadre d'un programme de maximisation d'une fonction d'utilité intertemporelle. La fonction d'utilité dépend de la consommation qui, elle-même, est fonction de l'âge et du revenu. Plus encore, Hamermesh et Soss supposent que l'individu possède un taux d'escompte donné considéré connu durant toute la période de sa vie. Afin que le suicide puisse être un choix qui améliore le bien être, l'individu doit atteindre le point où continuer à vivre lui apportera une utilité espérée négative. Toutefois, il est important de noter que cela ne veut pas dire nécessairement que chaque période future est caractérisée par une utilité nette négative. Analytiquement, la valeur de la fonction d'utilité intertemporelle à l'âge a est donnée par :

$$Z(a, Y) = \int_a^{a^*} e^{-r(m-a)} U_m P(m) dm \quad (2.1)$$

Où, a^* dénote l'âge maximum qu'on peut atteindre, Y correspond au revenu permanent, r est le taux d'escompte, $P(m)$ renvoie à la probabilité de vivre jusqu'à l'âge m ; étant donné que l'individu a vécu jusqu'à l'âge a et, U_m représente la fonction d'utilité de l'individu. Cette fonction dépend de la consommation qui est à son tour une fonction d'âge et du revenu.

D'après l'équation (1), le suicide s'apparente à une simple décision sur la valeur de l'investissement. Le terme à gauche représente la valeur de la vie qui pourrait être abandonnée par l'individu. Si son revenu permanent augmente alors, *ceteris paribus*, la valeur de la vie s'élève et donc la décision de continuer à vivre devient préférable à celle de commettre un

suicide. L'âge intervient dans la fonction d'utilité intertemporelle comme une composante négative. Cela est dû au fait que si l'individu avance dans l'âge, alors la valeur de son capital (la vie) va baisser en termes de durée (qui doit donc posséder la plus faible valeur totale escomptée). Formellement, $e^{-r(m-a)}$ diminue parce que la quantité $(m-a)$ augmente avec l'âge. Plus encore, plus la probabilité de survie, $P(m)$, est faible plus la probabilité du suicide est forte.

Ce modèle simpliste⁴⁶ a fait l'objet de certaines extensions. Comme l'équation (2.1) le montre, l'analyse est fondée sur l'hypothèse du revenu permanent à laquelle le modèle accorde une grande importance. Le revenu permanent est le flux de revenu perpétuel tiré du patrimoine au sens large de l'agent économique. En effet, dans le modèle de Koo et Cox [2008], l'hypothèse du revenu permanent a été remplacée par celle du revenu relatif. Le revenu relatif est supposé être une fonction du capital humain. On préjuge aussi que le revenu relatif d'une personne au chômage se déprécie parce que le chômeur perd l'opportunité de la valorisation de son capital humain par le biais de la formation au cours de l'emploi. Leur modèle montre comment un taux de chômage élevé peut entraîner l'accroissement du taux de suicide.

Les modèles microéconomiques standard supposent qu'il existe un jeu complet de marchés, hypothèse particulièrement forte dès lors que l'intertemporel et l'incertain sont pris en compte (Salanié, 1988). Cependant, en présence d'asymétrie d'information ou des coûts de transaction, il devient alors crucial de favoriser l'hypothèse de l'incomplétude des marchés. Cette nouvelle perspective nous permettra de justifier pourquoi les préférences envers le suicide sont susceptibles d'évoluer. Ce qui nous emmène, dans la section précédente, à proposer une synthèse relativement succincte de différents types de préférences envers le suicide.

2.4.3 Les préférences et le suicide : le changement de l'ordre de préférences

Sur le plan relatif au développement mathématique, le modèle microéconomique du suicide est peut-être compliqué mais les hypothèses sous-jacentes restent simples. La personne qui tente de se suicider est traitée comme un agent rationnel. Par conséquent, on

⁴⁶ Il n'existe pas des imperfections du marché.

peut lui associer une fonction d'utilité intertemporelle avec un taux d'escompte constant ainsi qu'une perception du risque fondée sur la fonction d'utilité de Von Neumann-Morgenstern. Ces hypothèses ont été, de plus en plus, contestées dans certains domaines comme l'assurance et la prise de risque en général. En cas d'une décision importante, comme celle de se suicider, il est impératif que les hypothèses clés soient scrutées.

On peut modifier les hypothèses d'un modèle standard en prenant en compte la possibilité qu'un individu puisse commettre une erreur. En fait, une telle confusion est due aux défaillances du marché, c'est-à-dire les circonstances où l'équilibre de marché n'est pas optimal. L'information imparfaite peut induire l'individu à surestimer le nombre de périodes futures caractérisées par des utilités négatives. Plus encore, même si l'individu dispose de l'information nécessaire, il ne possède pas nécessairement une capacité suffisante pour la traiter afin d'aboutir à un choix rationnel. L'extension la plus simple que l'on peut entreprendre à l'approche de préférences ordonnées est de supposer qu'un agent peut avoir deux ordres de préférence différents. Il s'agit donc d'apporter des réponses à ces deux questions : d'abord, quel ensemble de préférences l'agent essaiera-t-il de maximiser ? Ensuite, quel ensemble de préférences l'agent devrait-il maximiser ? La première question porte sur le domaine de *l'économie positive* tandis que la deuxième question couvre le terrain de *l'économie normative*.

(i) *Les préférences à long terme vs celles à court terme : la dimension temporelle*

Si les individus s'engagent dans un processus d'apprentissage dynamique, les préférences à long terme permettraient la correction des « erreurs ». Certes, le suicide n'offre pas l'occasion d'un tel apprentissage ; par contre un individu en marge d'une tentative de suicide peut apprendre à partir de l'observation du comportement des autres (« suicide contagion »).

(ii) *Les préférences d'ordre supérieur vs celles d'ordre inférieur : le choix intertemporel*

L'individu désirerait bien suivre l'ensemble des préférences d'ordre supérieur⁴⁷ mais il succombe à la tentation et cède à celles d'ordre inférieur (Frederick, Loewenstein et O'Donoghue, 2002). Pour l'acte du suicide, on peut obtenir deux conséquences opposées : l'individu regrette de faire valoir son envie pour le suicide comme étant une préférence d'ordre inférieur. Par conséquent, un tel comportement exige d'appliquer des contrôles continus sur lui. Inversement, l'individu peut croire que l'acte de suicide correspond à

⁴⁷ Les préférences d'ordre supérieurs sont définies par les choix immédiats par contre les préférences d'ordre inférieurs sont définies par les choix différés dans le temps.

l'optimum (dicté par le choix des préférences d'ordre supérieur) et par conséquent, il regrette toute lâcheté ou réticence possible de céder à la tentation de rester en vie. Dans un contexte de préférences duales, l'individu optimiserait son comportement en choisissant une méthode de suicide où il est si difficile de se sauver.

(iii) *Les préférences temporaires vs permanentes : le rôle des émotions*

Elster (1998) a noté que le rôle des émotions dans l'économie a été souvent négligé. La notion de « préférences temporaires » d'Elster s'intéresse aux préférences qui se manifestent à la suite d'un stimulant. Pour l'acte du suicide, les mauvaises nouvelles pourraient ramener les préférences temporaires de l'individu à un niveau où le suicide semble être optimal dans son état d'esprit actuel. Par contre, si l'acte du suicide a été suffisamment retardé (ce qui pourrait survenir en raison des aléas associés au temps nécessaire pour accomplir l'acte), les préférences temporaires prennent la relève et peuvent décroître la probabilité pour qu'un acte soit achevé. Cette notion de préférences temporaires vs permanentes, ne doit pas être confondue avec celle de (i), les préférences à long terme vs celles à court terme. Un exemple remarquable des préférences temporaires pour le suicide est le « suicide romantique ». On entend par « suicide romantique », tout suicide qui suit une expérience présente dure parce que le suicidé sent que tout événement qui vient par la suite est condamné à être une pareille déception même si le flux d'utilité pourrait être positif à tout moment.

En résumé, selon Durkheim, un taux de suicides excessif est l'indicateur d'un dérèglement social et on ne peut pas alors comprendre le suicide à travers les préférences individuelles explicites. Il est par conséquent impossible, selon les théories sociologiques en général, d'examiner le suicide à travers la théorie du choix rationnel. C'est avec la théorie économique qu'on va appliquer le modèle du choix rationnel à la décision du suicide. Le bénéfice de l'acte suicidaire peut apparaître à l'agent économique supérieur aux choix alternatifs, entraînant alors une préférence pour le suicide. Le principe de la maximisation d'utilité ne peut s'appliquer que si l'agent économique peut évaluer les conséquences de ses choix, ce qui est rarement le cas. C'est pourquoi la théorie économique a distingué entre deux cas à savoir la situation de certitude et celle incluant le risque ou l'incertitude (la situation d'information limitée). En situation de risque, le choix est orienté par la maximisation de l'utilité attendue (ou espérée) et l'agent économique choisit l'opportunité que lui offre l'espérance de gain la plus élevée. En situation d'incertitude la maximisation d'utilité est guidée par le principe du *minimax* (minimisation des pertes possibles). Dans cette situation la décision de l'agent

économique prend en considération les croyances qui dépendent de la quantité d'informations disponibles. Les croyances sont parfois cruciales dans la prise de décision en faveur du suicide. Ainsi, c'est à travers l'approche de la théorie des jeux, que la théorie économique va offrir un cadre d'analyse très important pour examiner à la fois la tentative de suicide et la conduite suicidaire.

2.5 L'approche de la théorie des jeux : tentative de suicide

2.5.1 Les modèles de Rosenthal (1993) et Cutler, Glasser et Norberg (2001) : l'approche par les signaux

La distinction entre le suicide et la tentative de suicide s'avère épineuse mais toutefois possible. Le premier modèle sur la tentative de suicide, utilisant la théorie des jeux, a été développé par Rosenthal (1993). Ce dernier a considéré la tentative de suicide comme un « signal » pour susciter la compassion des autres. Ce modèle de signal est composé de deux joueurs à savoir un émetteur du signal et un récepteur. Le premier pourrait être en état de dépression ou normal⁴⁸ et le second ignore le type de celui-ci (normal ou déprimé). Puisque le récepteur préfère répondre par un sentiment de compassion seulement pour un individu déprimé, il doit inciter l'émetteur à révéler sa vraie information privée sur son type. En se basant sur la puissance du signal émis par l'émetteur, le récepteur doit décider de la meilleure façon de répondre à ce signal. Un émetteur en état normal a la volonté de choisir la puissance du signal qu'il veut envoyer pour susciter la compassion du récepteur. Certes, un signal fort est plus crédible mais possède moins de probabilité d'aboutir à la survie de l'émetteur.

Cutler, Glasser et Norberg (2001) ont aussi utilisé le cadre de la théorie des jeux pour élaborer un modèle qui explique l'augmentation du nombre de tentatives de suicide parmi les adolescents aux Etats-Unis. Ils suggèrent que la tentative de suicide d'un adolescent, utilisé comme étant un signal, pourrait réussir à convaincre ses parents qu'il est réellement dans un état de tension, afin que ces derniers décident de lui allouer davantage de ressources comme

⁴⁸ La normalité doit être comprise ici dans un sens « canguilhemien », c'est-à-dire opposable au pathologique.

du temps et de l'argent. Cela est considéré comme la valeur directe liée à un signal du suicide (direct value of a suicide signal).

Pour illustrer formellement cette idée, Cutler *et al.* (2001) ont associé à l'enfant une fonction d'utilité $V(T, Z)$, où T désigne la quantité du temps ou/et d'argent transférée par les parents à leur enfant et Z indique le vecteur des autres facteurs qui affectent le bonheur de l'enfant. La fonction d'utilité des parents dépend de leur propre consommation $U(T - Y)$ ainsi que du bonheur de leur enfant $aV(T, Z)$. Les parents n'ont pas une information claire sur le bonheur de leur enfant (Cette information est connue seulement par l'enfant).

Un enfant malheureux aurait besoin d'une plus grande contribution parentale et la valeur des ressources des parents devient très importante quand l'enfant est exogènement moins heureux (c'est-à-dire $\frac{d^2v}{dTdZ} < 0$). Etant donné que l'utilité de l'enfant est non observable par les parents, la tentative de suicide représente une menace crédible quand les deux conditions suivantes sont satisfaites : (i) il existe une certaine probabilité pour que la tentative réussisse (ii) et la perte d'utilité liée à la mort est très faible. Cutler *et al.* (2001) ont montré que si les parents ne peuvent pas observer le bonheur de l'enfant, alors pour $Z < Z^*$ la tentative de suicide est un équilibre et pour $Z > Z^*$ celle-ci n'est plus un équilibre.

En résumé, ces résultats indiquent qu'un enfant doit communiquer son état de malheur à ses parents, afin qu'il puisse recevoir davantage de ressources comme le temps et l'argent. La tentative de suicide est donc l'un des signaux potentiels parce qu'un enfant malheureux donne moins d'importance au futur comparé à un autre enfant heureux. Toutefois, en admettant que la tentative de suicide peut convaincre les parents du malheur de leur enfant, parfois, ce dernier, tout en essayant de transmettre correctement le signal, risque de mourir.

L'approche de signaux ne fait pas la distinction entre les sexes, c'est pour cette raison qu'il semble difficile d'analyser la différence entre les tentatives de suicide par sexe. Cette hypothèse a été prise en considération par le modèle de Becker-Posner (2006) à travers l'hypothèse de degré de la compassion qu'on accorde à la personne.

2.5.2 Le modèle de Becker-Posner (2006) : la tentative de suicide

Généralement les gens souffrent beaucoup quand un enfant, un parent ou un ami proche se suicide. Un individu malheureux tenterait donc de gagner l'attention ou la compassion des autres de plusieurs façons en l'occurrence la plainte, la visite d'un psychiatre, le refus de manger ou la tentative de suicide. La tentative de suicide pourrait être la meilleure façon pour attirer l'attention et gagner la compassion des autres à condition que la tentative échoue. Cette approche suggère que la tentative de suicide est un «appel à l'aide» urgent du conjoint, des enfants, des parents et des amis. Ainsi, il est important de faire la distinction entre un suicide et une tentative de suicide.

Certains économistes ont considéré la tentative de suicide comme un signal de détresse (Rosenthal, 1993 ; Culter, Glasser et Norberg, 2001). Ce signal ne sera pas crédible si les chances de mettre fin à sa vie sont minimales. Une tentative sérieuse, qui pourrait causer un dommage physique ou voire la mort, fait passer correctement le message et peut opérer à la séparation entre les individus qui sont vraiment en détresse et ceux qui prétendent l'être.

Pour formaliser cette idée, Becker et Posner (2006) ont supposé qu'une personne (appelée S) peut tenter le suicide par une méthode donnée avec une probabilité p de réussite. Le nombre de personnes qui éprouvent un sentiment de compassion pour cet individu augmente s'il a réussi à survivre (avec une probabilité égale à $1-p$). Ainsi, la relation entre la probabilité de survie et le sentiment de compassion est inversement proportionnelle. La probabilité optimale (ou la méthode optimale) choisie par S dépend du degré d'attention qu'il reçoit pour des différentes valeurs de p . Becker et Posner (2006) ont supposé que l'entourage (parents, enfants, amis...), noté C , a la fonction d'utilité suivante :

$$V(x, g, p) = v(x) + h(g, p) \quad (2.2)$$

où v et h sont des fonctions concaves, x est le niveau de consommation associé à C , g est le degré d'attention accordée à S et p est la probabilité pour qu'une tentative de suicide réussisse. Les auteurs supposent aussi que $\frac{\partial^2 h}{\partial g \partial p} > 0$ ⁴⁹. La consommation x , associée à

⁴⁹ Cette hypothèse est cruciale parce qu'une tentative de suicide ayant une probabilité élevée de réussir suscite plus d'attention de la part de C .

l'entourage C , pourrait dépendre de l'utilité de S . L'analyse de Becker et Posner (2006) prend ainsi les sentiments altruistes en considération. En effet, on peut supposer que, pour une probabilité élevée, l'altruisme augmente (qui serait le seul mécanisme par lequel les proches éprouvent un sentiment de compassion).

Supposons que C réalise l'arbitrage entre un niveau élevé de sa propre consommation ou un haut niveau de compassion. Etant donné la probabilité p , C doit choisir les valeurs optimales des x et g . l'hypothèse de la dérivée croisée et l'arbitrage entre x et g impliquent que si p augmente, le niveau de g s'élève selon des valeurs optimales de $g(p)$ en admettant que $g' > 0$ et $g'' < 0$.

L'analyse de Becker-Posner (2006) suppose un jeu en deux étapes où S commence à choisir le niveau de p ensuite, étant donné la valeur de p , C fixe le niveau de g . Ils ont également présumé que C ne peut pas s'engager à l'avance dans le choix d'un niveau particulier de g , il doit donc réagir à la valeur de p choisie par S . Ceci implique que S va définir la valeur optimale de p sachant que la réaction de C conduit à la fonction de compassion $g(p)$. La valeur optimale de p préférée par S dépend de niveau de compassion des autres (notée G^0) et $g(p)$. On suppose que ce sont des substituts comme dans le cas simple de la fonction additive suivante :

$$u(G) = u(G^0 + g(p)) \quad (2.3)$$

Alors S va adopter la valeur p^* qui maximise son niveau d'utilité espérée :

$$V = (1 - p)u(G^0 + g(p)) + pu(0)$$

Où $u(0)$ désigne l'utilité associée à la mort (supposée égale à 0). La dérivée par rapport à p donne la condition de premier ordre suivante :

$$\frac{u'(G^0 + g(p^*))}{u(G^0 + g(p^*))} = \frac{1}{(1 - p^*)g'(p^*)} \quad (2.4)$$

Cette équation détermine la valeur optimale p^* , où $\frac{p^*}{(1-p^*)}$ désigne la probabilité pour qu'une tentative de suicide aboutisse à la mort. Cette formalisation admet qu'une tentative de suicide, avec une probabilité de réussite faible, pourrait générer un niveau de compassion

faible ($g(0)$ est proche de 0), par contre le degré de compassion augmente pour un niveau élevé de p , c'est-à-dire $g'(p) > 0$.

Il est simple de montrer qu'un accroissement dans le niveau de compassion (G^0) par Δ , fait augmenter la probabilité associée à la réussite d'une tentative de suicide ($\frac{p^*}{(1-p^*)}$) :

$$\frac{dp}{d\Delta} = \frac{(1-p)g'u'' - u'}{2u'g' - (1-p)(g')^2u'' - (1-p)u'g''} < 0 \quad (2.5)$$

Parce que $u'', g'' \leq 0$.

Donc, l'individu, qui commence avec un niveau de compassion élevé de la part des autres, utiliserait une méthode moins fatale s'il tente de se suicider. Ainsi, p^* est également un signal qui renseigne sur la situation initiale de l'individu.

Supposons qu'il existe un changement dans la fonction génératrice de compassion $g(p, \beta)$. Si les effets de p et β sur g sont séparables ($g_{p\beta} = 0$), alors :

$$\frac{dp^*}{d\beta} < 0 \quad (2.6)$$

Toutefois, $g_{p\beta} > 0$ implique que la productivité marginale associée à l'utilisation d'une méthode efficace augmente et ceci peut donc conduire l'individu à utiliser des méthodes de suicide fatales. Dans ce cas, l'effet d'un accroissement non compensé de β serait ambigu.

Une hypothèse additionnelle a été avancée par les auteurs à savoir : $\partial V/\partial p < 0$. Ceci signifie qu'une augmentation dans la probabilité de commettre un acte de suicide fait diminuer l'utilité des proches (parents, enfants, amis et toute personne concernée). Ils pourraient se sentir « coupables » si une personne proche d'eux tente de se suicider et le sentiment de culpabilité augmente si la tentative est très grave.

Afin que les auteurs puissent tester les changements dans le comportement de C Becker-Posner ont imposé que le signe de $\partial V/\partial p$ reste inchangé sous une transformation monotone de V . Cette hypothèse implique que le sympathisant C , même s'il ne fait pas preuve d'altruisme, essaierait d'empêcher le suicide de S afin d'éviter la détérioration de son utilité. C va supporter les lois qui font de la tentative de suicide « un crime », ce qui explique l'existence de telles lois dans plusieurs sociétés à travers l'histoire. Selon Becker et Posner (2006), si $\partial V/\partial p < 0$, C pourrait éviter d'être l'ami de celui qui tente de se suicider, puisqu'une telle

compagnie fait baisser son utilité, et il pourrait arriver qu'il arrête son amitié avec les personnes qui veulent pratiquer la tentative de suicide. Toutefois, la question critique est de savoir si les membres de la famille les plus proches (parentèle) peuvent adopter le même comportement.

Finalement, on peut remarquer que le modèle de Becker-Posner (2006) est différent de l'approche par les signaux ce qui nous allons aborder dans la section suivante.

2.5.3 La comparaison entre le modèle de Becker-Posner (2006) et l'approche par les Signaux : le rôle central du sympathisant

Le modèle de Becker et Posner (2006) prédit qu'un sympathisant, C , a intérêt à réduire le nombre de tentatives de suicide afin que son niveau d'utilité augmente (la tentative de suicide fait baisser l'utilité de sympathisant), par contre dans l'approche des signaux le sympathisant a intérêt à avoir plus de tentatives de suicide puisque ça lui permet d'avoir plus d'informations sur le degré de malaise de celui qui tente de se suicider. Bien sûr, parfois on peut se trouver devant la situation où $\frac{\partial V}{\partial p} > 0$, dans ce cas il n'existe pas de différence entre les deux approches.

L'approche des signaux ne donne pas une réponse convaincante à la question suivante : pourquoi le ratio de tentatives de suicides « réussies » est plus élevé chez les hommes que chez les femmes? Est-ce que les sympathisants ne disposent pas des informations suffisantes sur les vrais sentiments des femmes en comparaison avec ce qui est généralement remarqué chez les hommes ? Or, c'est le contraire qui semble être le cas, puisque les hommes, dans la plupart des cultures, ont beaucoup plus de mal que les femmes à extérioriser leurs sentiments. Une explication plus raisonnable, à la différence des ratios entre les sexes, est que les femmes peuvent plus facilement avoir la sympathie des autres en comparaison avec les hommes. La valeur de $g(p)$ est plus élevée chez les femmes parce que les hommes sont censés être plus forts et plus immunisés contre la détresse psychologique.

La première difficulté que l'on rencontre, pour tester empiriquement la validité de ce type de modèle, est l'absence de bases de données individuelles. Malgré une vaste littérature sur l'estimation empirique de la fonction de demande du bien, rien n'a été stipulé sur la « compassion ». Pour contrevenir à cette absence des données individuelles, les économistes

se fondent souvent sur des données agrégées ou des simulations numériques ; ce que nous allons présenter avec le modèle de Mirer (1998) dans la section suivante.

2.5.4 Le modèle de Mirer (1998) : une validation empirique

L'une des solutions proposées également, pour faire face au problème de la rareté des données sur le suicide, est la simulation numérique. Pendant ces simulations le chercheur doit étudier la probabilité qu'un événement se produise à la suite de différentes combinaisons de variables causales. Par exemple, Mirer (1998) a utilisé un modèle de cycle de vie associé à la planification de la retraite. Dans ce modèle, un choix rationnel concernant la durée de vie peut conduire au suicide. Malgré l'hypothèse de l'aversion au risque et le raisonnement en temps discret, ce modèle ressemble à celui de Hamermesh-Soss (1974).

Le modèle de Mirer (1998) s'intéresse à l'allocation d'un niveau donné de richesse initiale sur une durée de vie caractérisée par l'incertitude. L'hypothèse de base est que l'individu adresse un niveau de consommation particulièrement faible, C^* , à l'utilité de la vie comme étant un équivalent à l'utilité de la mort. La méthode de simulation, utilisée par Mirer, est composée de deux étapes. La première étape de simulation consiste à approximer C^* pour des différents niveaux de consommations et la deuxième étape s'efforce de calculer la probabilité expérimentale d'un suicide étant donné certaines circonstances économiquement plausibles. Essentiellement, le modèle attribue le suicide d'une personne en emploi à la crainte d'être en pauvreté durant la période de sa vieillesse, ce qui implique que le chômage pourrait être également une cause de suicide. Si le chômage est considéré comme un problème de long terme aux yeux d'un individu, qui ne dispose actuellement d'aucune source de revenu, alors cette situation pourrait être vue comme une forme de retraite forcée. De même, un grand problème d'endettement qui se produit soudainement, suite à l'effondrement des affaires ou autres causes, pourrait précipiter l'acte du suicide comme conséquence d'un choix rationnel.

Enfin, d'après ce que nous venons d'appréhender au sujet du suicide, d'un point de vue théorie économique, le problème des externalités négatives du suicide n'a pas été abordé. Ce qu'on va évoquer dans la section suivante avec le suicide en tant que phénomène contagieux.

2.5.5 Le suicide : « effet de contagion »

Le « suicide contagion » est un phénomène social où l'acte de suicide d'un individu peut inciter et précipiter d'autres tentatives de suicides. Bien qu'il soit difficile de déterminer si un acte de suicide ait été influencé par un autre (à moins qu'un cas de suicide ait été enregistré), en pratique un groupe de suicidés dans une période temporelle très courte est souvent considéré comme un suicide contagion ou suicide « épidémique ». Pour cette raison, l'Organisation Mondiale de la Santé (2000) a publié des conseils aux médias sur la manière d'apporter des nouvelles sur le suicide⁵⁰.

Sans avoir le besoin de passer par une construction d'un modèle théorique, Cutler *et al.* (2001) ont proposé une explication concernant le suicide contagion. Ils ont spécifié que, suite à un acte de suicide, le groupe social, auquel appartient ce suicidaire, éprouve un grand malheur, et celui-là pourrait précipiter d'autres actes de suicide. De plus, si un tel suicide est devenu très connu, des suicides ou des tentatives de suicides similaires (en termes de la méthode utilisée) pourraient avoir lieu au sein de la communauté. D'un point de vue théorique, le suicide contagion pourrait être modélisé en utilisant le cadre de la modélisation de Hamermesh et Soss (1974) tout en prenant en considération certaines externalités négatives de suicide (comme l'effet d'imitation, Durkheim 1879, p. 107-138). Pareillement, la théorie des jeux pourrait être considérée comme un cadre théorique potentiel pour modéliser le phénomène de suicide contagion. Pour la prévention de ce type de suicide, il est important d'identifier quel est le cas de suicide qui incite le plus d'actes suicidogènes.

2.6 Les travaux empiriques

Cette section passe en revue un certain nombre de travaux empiriques sur le suicide. Puisque les données individuelles sur le suicide sont rarement disponibles, la majorité des études empiriques utilisent des données agrégées (à l'échelle d'un pays, d'une région ou d'un groupe social). Généralement, en utilisant la méthode de régression, le travail empirique tente d'expliquer la relation entre les facteurs socioéconomiques (variables indépendantes) et le

⁵⁰ WHO [2000, pp. 10-12] Preventing Suicide: A Resource for Media Professionals. *World Health Organization* WHO/MNH/MBD/00.2. (http://www.who.int/mental_health/prevention/suicide/resource_media.pdf)

suicide (variable dépendante). La plupart des travaux empiriques prennent le taux de suicide⁵¹ comme étant une variable dépendante.

Différentes sortes de variables socioéconomiques sont utilisées comme étant des variables indépendantes. Toutefois, dans la plupart de cas, les résultats empiriques ne sont pas nécessairement robustes et ils ont présenté des résultats contradictoires en termes de relation entre les variables dépendantes et indépendantes. Une telle contradiction pourrait être les conséquences de l'utilisation de différents ensembles de variables, ou de différentes données et méthodologies.

2.6.1 L'approche macroéconométrique : l'inférence aux comportements agrégés

En ce qui concerne les travaux empiriques, le phénomène du suicide est souvent étudié d'un point de vue macroéconomique. En se basant sur des données agrégées, Brainerd (2001), Yang (2001) et Huang (1996) ont pu démontrer, sur un ensemble de différents pays, que le taux de suicide chez les hommes est plus sensible aux changements macroéconomiques que celui chez les femmes. Morell *et al.* (1993) ont également examiné des données agrégées en Australie entre 1907 et 1990. Ils ont pu confirmer que le taux de suicide chez les hommes augmente nettement avec le chômage. D'une manière générale, la plupart des travaux empiriques enregistrent une corrélation positive entre le taux de chômage et celui du suicide. En Australie du Sud, Hassan (1995) a constaté que sur un nombre de 162 suicides commis en 1982, seulement 29% des suicidés possédaient un emploi. Il semble qu'il existe une relation de cause à effet simple et univoque entre le chômage et le suicide. Cependant, Barraclough et Hughes (1987) ont mené en Angleterre une étude de cas sur neuf suicidés qui étaient au chômage. Ils ont pu conclure qu'ils ont tous perdu leur emploi à cause de l'alcoolisme ou d'une maladie mentale. Cela veut signifier que le chômage et le suicide pourraient provenir d'un facteur commun et que la question de l'endogénéité potentielle, au sens économétrique, de la variable suicide doit être corrigée. Ainsi, on est en droit de se demander si le chômage et d'autres facteurs économiques causent vraiment le suicide.

⁵¹ Il existe différents types de taux : le taux de suicide total, le taux de suicide au sein d'un groupe de sexe, le taux de suicide au sein d'un groupe d'âge et les taux de suicide de différentes régions. Certaines études utilisent le logarithme naturel du taux de suicide par contre d'autres utilisent le taux de suicide par 100 000 habitants.

En se basant également sur des données agrégées dans 15 pays européens, Rodriguez (2005) a examiné les déterminants du taux de suicide par sexe entre 1970 et 1997. Il a pu constater que le divorce, le revenu par tête, le chômage, l'inégalité de revenus et la consommation d'alcool ont des effets significatifs sur les taux de suicide mais les résultats varient selon le groupe d'âge et le sexe. Par exemple, le taux de suicide chez les femmes semble être plus étroitement lié aux variations des niveaux de revenu par tête que celui chez les hommes. Le chômage a un effet positif sur le taux du suicide pour les deux sexes. L'inégalité des revenus semble posséder un impact positif et significatif sur le taux de suicide chez les hommes. Par contre, chez les femmes cette corrélation est plutôt significativement négative. Le divorce semble revêtir un impact significativement positif sur le taux de suicide mais cet effet baisse avec l'âge. Enfin, Rodriguez a enregistré une corrélation significativement positive entre la consommation d'alcool et le taux de suicide pour les deux sexes.

Toutefois, on ne devrait pas conclure automatiquement que la corrélation, statistiquement significative, entre le taux de suicide et le revenu valide les modèles microéconomiques du suicide. Le revenu et le chômage, à un niveau agrégé, pourraient être considérés comme des facteurs de stress parmi d'autres (comme la tension sociale et le divorce). Par exemple, sur le plan de la sensibilité aux variations du revenu agrégé, la différence entre les sexes est expliquée par le fait que l'homme souffre beaucoup plus que la femme suite à la perte de son rôle symbolique en tant que salarié. La baisse du taux de croissance ainsi que l'augmentation du taux du chômage pourraient également créer un milieu social dans lequel les réseaux de soutien disponibles (pour aider les suicidés), sont limités par le manque de ressources financières.

Il est clair que les études empiriques menées par les économistes contiennent des variables non économiques comme l'alcoolisme et le divorce. Ces variables ont toujours été considérées comme des variables auxiliaires (*proxies*) de stress. Les études réalisées par les non-économistes contiennent également ces mêmes variables mais ils interprètent les autres variables économiques (comme le revenu et le chômage) d'une manière différente de celle des économistes⁵².

⁵² Ce qui distingue l'approche économique de l'approche sociologique des mêmes phénomènes c'est le cadre théorique de l'*homo œconomicus* rationnel.

Par les travaux microéconométriques (sur le marché du travail, l'éducation ou la consommation) les économistes offrent un outil économétrique important pour tester le comportement suicidaire qui résulte en premier lieu d'une décision individuelle.

2.6.2 L'approche microéconométrique : l'inférence au comportement individuel

L'approche microéconométrique est définie par l'ensemble des examens empiriques qui se focalisent sur le comportement individuel (consommateurs et producteurs). Cette approche permet d'évaluer l'efficacité des politiques économiques et d'estimer l'impact des chocs exogènes sur le comportement suicidaire de l'agent économique. Cependant, un tel examen nécessite des enquêtes individuelles qui ne sont pas toujours disponibles. C'est pourquoi la plupart des analyses empiriques recensées jusqu'ici, à l'exception des articles de Stack (2000), Daly, Wilson et John (2008) et Daly et Wilson (2009), procèdent par une étude macro-économétrique ou expérimentale du comportement de suicide.

Tout en utilisant le recensement de la population de 1990 pour 21 Etats américains, Stack (2000) a examiné en détail le ratio proportionnel de mortalité (*Proportional Mortality Ratio*)⁵³. Ce ratio est défini par la proportion des décès par suicides, au sein d'un groupe social donné, par rapport au taux national moyen de suicide. Stack a montré que les taux de suicide enregistrés parmi les dentistes, les médecins, les scientifiques, les artistes et les travailleurs sont supérieurs aux scores prévus. Il a mis également en évidence que les agriculteurs ne constituent pas un groupe à haut risque de suicide, bien qu'il existe un facteur de risque élevé associé aux fermiers.

Les chercheurs, qui essaient d'évaluer le risque de suicide selon la catégorie socioprofessionnelle, sont confrontés à deux problèmes. *Primo*, d'après les observations cliniques, le suicide est très répandu chez les chômeurs, les administrateurs dans le secteur privé, les travailleurs agricoles, les professions libérales, les salariés dans le secteur du commerce, les policiers et les militaires. Le suicide est peu élevé chez les travailleurs qualifiés, les enseignants des écoles primaires, les fermiers, les commerçants. Ainsi, lorsqu'on entreprend une étude sur le risque de suicide associé à la catégorie socioprofessionnelle (comme les employés administratifs du secteur privé), il est conseillé préalablement de

⁵³ Les chiffres de Stack (2000) n'ont pas été décomposés par sexe.

discerner si le suicide est lié à la nature de cette profession (stress,...) ou bien si celui-ci relève d'une explication économique liée au fait de la rudesse de la concurrence au sein de cette profession⁵⁴. *Secundo*, la faible taille de l'échantillon implique sempiternellement des conclusions erronées.

Des travaux empiriques récents (Daly et Wilson, 2009 et Daly, Wilson et Johnson, 2012) mettent l'accent sur l'importance de l'utilisation de données sur « le bien-être subjectif » comme un outil qui trace le bien-être individuel (ou agrégé) et qui examine les problèmes liés à la formation des préférences individuelles et de l'utilité (l'économie du bonheur). Daly, Wilson et Johnson (2012) suggèrent l'utilisation des données sur le suicide comme étant une mesure du bien-être *via* les préférences révélées (rappelons que le bien-être subjectif déclaré par les individus est corrélé avec leur comportement et permet parfois de le prédire). En d'autres termes, le suicide représente un choix révélateur qui pourrait être considéré comme une mesure directe du bien-être. Tout en utilisant des données individuelles longitudinales, ils ont trouvé une corrélation négative évidente entre le revenu et le risque de suicide. Daly et Wilson (2009) offrent de pousser plus loin leur analyse en proposant une certaine incertitude sur l'utilité de deux séries de données utilisées à savoir les données sur le bien-être subjectif et celles sur le suicide. Pour ce faire, ils ont utilisé chaque source de données comme un moyen de vérification de la crédibilité de l'autre source (*a cross-validation exercise*). La question est de savoir si les séries peuvent capturer la variable latente sur le bien-être (l'utilité). En d'autres termes, les auteurs veulent déterminer si les séries de données (bien-être subjectif et suicide) peuvent interférer avec les préférences individuelles. Pour comparer ces deux séries de données, Daly et Wilson (2009) opèrent en parallèle deux régressions à savoir une régression pour le risque de suicide et une autre pour le bonheur déclaré. L'analyse est fondée sur deux sources principales d'informations. Les données sur le bien-être subjectif sont tirées de « *General Social Survey* » (GSS)⁵⁵. La régression est fondée sur une large classe de variables (variables démographiques et variables sur le revenu). La deuxième régression sur le risque de suicide est basée sur les données issues du « *National Longitudinal Mortality Study* » (Daly, Wilson et Johnson, 2012). Sur la base d'une analyse multivariée des données individuelles, Daly et Wilson (2009) ont pu observer qu'il existe une relation saisissante entre

⁵⁴ L'évolution démographique de l'effectif des professionnels influence la profession dans son ensemble. Avec l'augmentation du nombre de professionnels, la concurrence sera plus vigoureuse et acharnée que par le passé.

⁵⁵ C'est une enquête sur la démographie, le comportement, l'attitude et l'opinion d'un échantillon représentatif du peuple américain.

les résultats obtenus dans les deux régressions. Ces résultats ajoutent de la crédibilité aux deux bases de données et supportent leur utilisation pour étudier les préférences individuelles.

En résumé, bien que l'approche microéconométrique offre un cadre d'analyse riche pour étudier le comportement suicidaire, la disponibilité des données individuelles reste très limitée dans la majorité des pays. Ceci montre l'insuffisance des études empiriques sur l'échelle micro pour étudier le suicide. Ainsi, cette absence d'une telle base des données ont conduit certains chercheurs à entreprendre des études soit macro-économétriques soit expérimentales. Néanmoins, afin d'examiner au mieux le coût associé au suicide, il est important de clarifier l'ensemble d'informations pertinentes sur le comportement individuel du suicidé. Pour préciser l'importance de cette idée, nous proposons, dans la section suivante, de définir le coût associé au suicide ainsi que les mesures de prévention.

2.7 Les mesures de prévention du suicide et les politiques économiques

La littérature suppose que le seul coût associé au suicide représente la perte des utilités attendues de la survie, y compris les pertes associées à l'impact du suicide sur les membres de la famille. Toutefois, le suicide a des coûts supportés par l'ensemble de la société. Ces coûts pourraient être classés en deux groupes : dépenses observées qui sont associées directement au suicide (coûts directs) et pertes estimées de la valeur de la productivité future (coûts indirects). Ainsi, le suicide implique une perte directe de volume de production *via* la destruction d'une partie du stock de capital humain et qui pourrait donc être un problème économique et social majeur. Le suicide pourrait être assimilé à une guerre qui enlève régulièrement une partie du stock de capital humain. D'autre part, le suicide des personnes âgées ainsi que les chômeurs, va réduire fortement la perte économique associée aux dépenses de soins médicaux et de prestations sociales.

Si le suicide reflète un problème socioéconomique profond, représenté par une baisse du « capital social » (Sobel, 2002), alors toute politique ayant pour but de résoudre ce problème aura certainement des effets très bénéfiques. La première contribution qui a examiné l'efficacité économique de la prévention du suicide est celle de Medoff (1986). Dans son article, Medoff a présenté des résultats très intéressants. En utilisant la méthode des Moindres Carrés Quasi-Généralisés, Medoff a estimé l'équation d'offre de suicide sur les données de 1979 des Etats-Unis (la densité des Centres de Prévention du Suicide dans les états américains). Par comparaison avec d'autres modèles empiriques sur le suicide, Medoff a ajouté une nouvelle variable qui mesure la densité de centres de prévention du suicide par

population. Ces centres, du type « samaritain », sont conçus pour changer le « goût » de ceux qui envisagent le suicide. Les estimations suggèrent que, sur 100.000 individus, un centre additionnel de prévention du suicide pourrait réduire le nombre de suicide par 3.7 hommes blancs et une femme blanche. Ce résultat a été corroboré par Lester (1991, 1993) dans une étude sur le changement du taux de suicide des états américains entre 1970 et 1980.

En utilisant des estimations sommaires de la valeur nette associée à une vie sauvée (calcul basé sur le salaire), Medoff a conclu que le rendement de centres de prévention du suicide, en termes de coût/bénéfice, varie entre 4.96 et 7.10 dollars. Cela suggère que la création de plus de centres pourrait être une politique très efficace, mais on doit garder une certaine prudence sur cette unique étude.

Il est à noter que Medoff a obtenu des résultats inattendus, pour des variables qui sont habituellement incluses dans des modèles empiriques similaires, ce qui jette, d'après nous, un doute sur la validité des estimations. En effet, selon les résultats de Medoff, la corrélation entre le revenu permanent et le taux de suicide des femmes, quelle que soit la catégorie d'âge, est *positive* ce qui est contradictoire avec les prévisions de la théorie économique du suicide. Plus encore, le chômage n'a pas d'effet statistiquement significatif sur le taux du suicide.

Supposons qu'on a la possibilité d'utiliser les dépenses publiques pour réduire le taux de suicides (Minoiu et Andres, 2008), alors on peut toujours faire face à la question ordinaire des finances publiques à savoir l'arbitrage entre l'efficacité et l'équité (voir Fig. 2.5 ci-dessous). Abstraction faite de l'effet de dépenses, associées à la prévention du suicide sur le niveau du PIB, il s'agit d'une analyse d'équilibre stricte. On fait également abstraction de l'effet de toute dimension démographique (la richesse, la résidence, le sexe, etc..) sur la variation du taux de suicides à l'exception de l'effet âge. On suppose aussi que la population est partagée en deux groupes d'âge à savoir les « âgés » et les plus « jeunes » et que le nombre total de jeunes est le même que celui des âgés. La représentation graphique a deux plans soit : (i) une fonction du bien être social exprimant les préférences de la société sur les différentes combinaisons possibles de suicides entre les jeunes et les âgés ; (ii) une courbe de transformation indiquant les niveaux de suicide qui peuvent être obtenus suite à des différentes allocations, par groupe d'âge, d'un budget fixe au « bureau de prévention de suicide ».

La fonction du bien-être social (FBS) possède une pente négative puisqu'elle reflète l'arbitrage entre le suicide d'un jeune et celui d'un âgé. De plus, la pente de cette fonction est

abrupte (le taux marginal de substitution est très élevé) en raison de l'hypothèse suivante : sauver un jeune suicidaire, vaut beaucoup plus que sauver un âgé. Cette hypothèse implique que si on abandonne le sauvetage d'un jeune suicidaire, il faut sauver plusieurs âgés suicidaires afin qu'on puisse établir la situation d'équilibre. La courbe de transformation est décroissante exprimant le nombre de suicidés échangé parmi les âgés contre un suicide d'un jeune et *vice versa*.

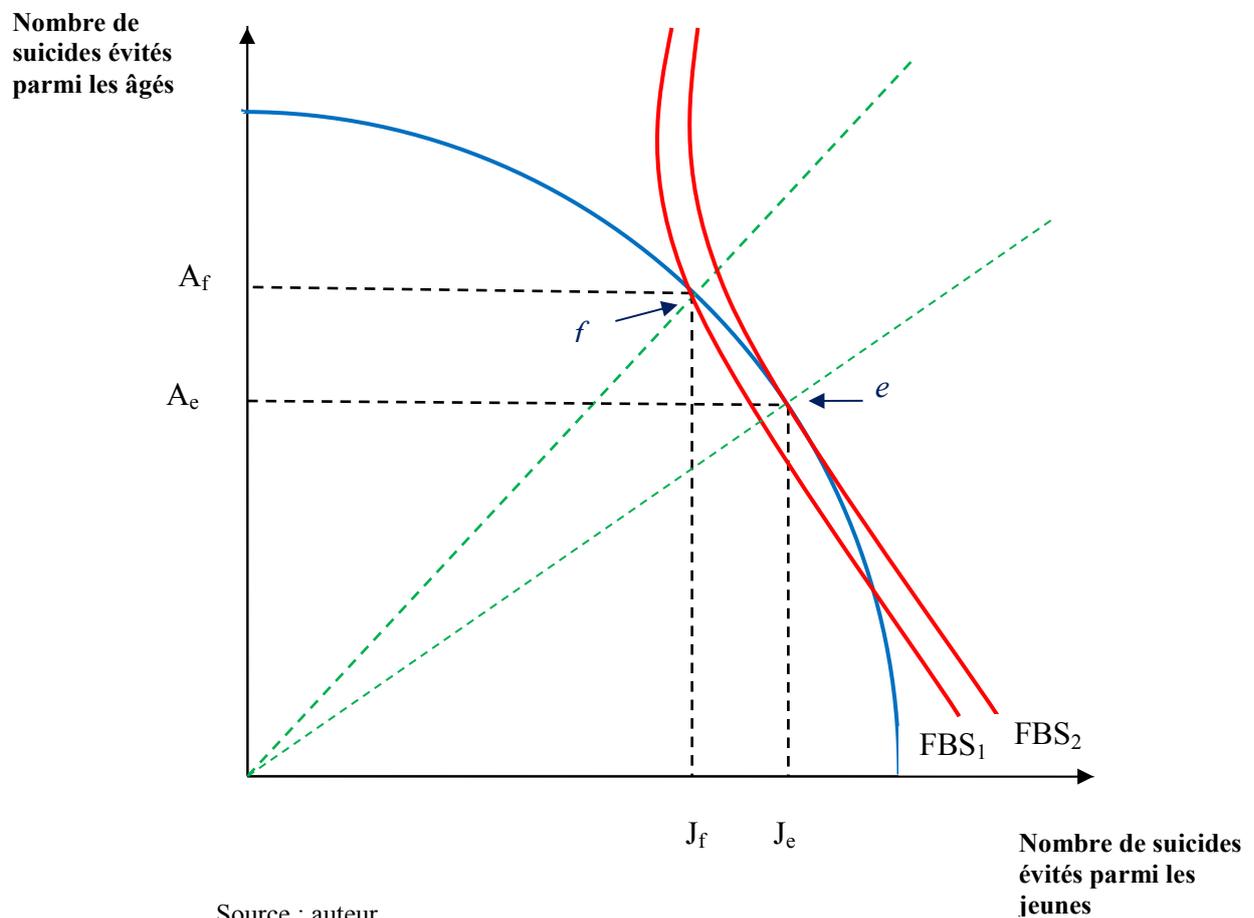


Figure 2.4 : La réduction du suicide et le choix optimal entre les âgés et les jeunes.

La courbe de transformation est concave en raison de l'hypothèse suivante : les taux marginaux de réduction de suicide (*via* les dépenses) ne décroissent pas avec le même taux.

La représentation graphique montre que l'optimum du bien-être social se réalise quand le taux marginal de substitution est égal au taux de transformation technique. C'est le point **e** qui correspond à un ratio du suicide (jeunes/âgés) élevé. Un déplacement du point **e** vers le point **f** entraîne le sacrifice d'un nombre de suicides parmi les jeunes égal à $Y_f - Y_e$ afin de sauver un nombre de suicides, parmi les âgés, égal à $O_f - O_e$.

2.8 Les développements récents dans l'étude économique du suicide

Cette section propose d'étudier les développements récents dans l'étude économique de suicide à savoir le suicide provoqué par les incitations monétaires. Ce type de suicide est très fréquent et même les politiques gouvernementales peuvent provoquer des suicides à travers des transferts monétaires. Par exemple, certains Etats de l'Inde ont enregistré une croissance au travers des taux de suicide suite à la politique de l'Etat qui consiste à compenser les familles affligées quand le soutien de la famille commet un suicide (*The Economist*, 21 juin 2007).

D'un autre côté, Chen *et al.* (2008) ont montré que l'assurance vie représente aussi un facteur potentiel qui provoque le suicide. Les contrats d'assurance vie fournissent une incitation monétaire pour commettre un suicide sachant que le capital-décès soit payé aux bénéficiaires si le suicide a été commis après la période d'exemption (*the suicide exemption period*). En fait, Toyokawa et Shirouzu (1998) et Amamiya (2002) ont enregistré une augmentation dans le nombre de suicides parmi les détenteurs d'une assurance vie juste après la période d'exemption (période d'exonération). Selon un rapport de presse⁵⁶, les paiements de la majorité de compagnies d'assurance vie Japonaises, durant la période 1995-2005, a augmenté de l'ordre de 50% à la suite des suicides. De plus, en 2005, 10% du paiement total effectué par les compagnies d'assurance est affecté aux décès par suicide. Ces résultats montrent que certains cas de suicides ont été provoqués par l'environnement de l'asymétrie d'information (la sélection adverse et/ou l'aléa moral).

⁵⁶ *Mainichi Shinbun*, 4 octobre 2005.

D'après les modèles d'asymétrie d'information (en présence de la sélection adverse et/ou de l'aléa moral), les participants au régime de l'assurance vie enregistrent un taux de suicide élevé en comparaison avec les non participants. Après que Villeneuve (2000) a affirmé qu'aucune étude économique n'a opérée un lien direct entre le suicide et l'assurance vie, Tseng (2006) est le premier économiste à examiner ce lien tout en utilisant les données de « Society of Actuaries (SOA) » sur les mortalités. Ses résultats ont révélé que le taux de suicide chez les assurés a été multiplié par quatre après la période d'exemption. Cependant, contrairement aux prévisions de modèles d'asymétrie d'information, ses estimations montrent que le taux de suicide chez la population totale a été deux jusqu'à trois fois supérieur que celui chez les assurés. Chen *et al.* (2008) ont examiné aussi le lien entre le taux de suicide et l'assurance vie tout en utilisant les données associées aux pays de l'OCDE (entre 1980 et 2002). Etant donné que les facteurs non observables (le type de risque et les préférences) affectent à la fois la participation au régime de l'assurance vie ainsi que le taux de suicide, il est difficile d'identifier une corrélation entre l'assurance vie et le suicide. La nouveauté de leur analyse est liée à l'utilisation de données sur la variabilité, entre les pays, de la durée de la période d'exemption comme un identifiant principal de la densité d'assurance vie. En fait, ils ont trouvé qu'une longue période d'exemption ou le non paiement du capital-décès est associé avec une baisse dans les achats des assurances vies. Puisqu'une courte période d'exemption pourrait provoquer l'auto-sélection des types les plus risqués dans les contrats d'assurances vies, les résultats d'estimation suggèrent la présence d'une sélection adverse.

Après avoir corrigé le biais des variables omises et l'endogénéité des variables explicatives, Chen *et al.* (2008) ont constaté une corrélation positive entre la variable assurance vie et le taux de suicide pour la majorité des observations. Ceci fait penser à la présence de l'aléa moral dans le marché de l'assurance vie. Toutefois, on ne peut pas écarter la possibilité d'une régression fortuite à cause de l'utilisation des données agrégées. Des données individuelles pourraient être utilisées pour tester l'existence de l'asymétrie d'information (Chiappori *et al.*, 2006). De plus, afin de distinguer entre les effets de la sélection adverse et les effets de l'aléa moral sur le taux de suicide, il importe d'élaborer des bases des données dynamiques sur les contrats individuels d'assurances vies (Abbring *et al.*, 2003).

2.9 Conclusion

On peut être surpris d'apprendre que les économistes ont apporté d'importantes contributions à l'étude du suicide⁵⁷. Toutefois, leur approche demeure « traditionnelle », dans la mesure où l'explication de la variation du taux du suicide est fondée sur l'hypothèse du choix rationnel. Les contributions purement théoriques, sur le sujet du suicide, se sont inspirées d'autres modèles économiques ; à savoir l'analyse coût-bénéfice, le modèle offre-demande, l'analogie de la participation au marché du travail et le jeu des signaux.

Les modèles économiques envisagent clairement que la hausse du revenu et l'augmentation de l'âge entraînent respectivement la baisse et l'augmentation des taux de suicide. Les études empiriques ont généralement confirmé ces résultats, mais les principales causes du suicide, jusqu'à présent, constituent encore un défi dans de nombreux pays. A titre d'exemple, le taux de suicide a révélé une tendance à la hausse, notamment pour les jeunes, dans certains pays même en présence d'une augmentation du revenu moyen⁵⁸. La réponse à cette question problématique consiste à intégrer plus de facteurs externes dans le modèle du choix rationnel comme l'influence d'un groupe social ou la société en général. Ainsi, l'évaluation *ex-ante* de l'impact des facteurs socioéconomiques sur le suicide est d'une importance capitale pour la conception d'un cadre réglementaire adéquat.

Pour ce faire, il est possible d'énumérer des remarques importantes qui portent d'une part, sur les insuffisances particulières au niveau des statistiques enregistrées sur le suicide et d'autre part, sur les limites de la plupart des études empiriques :

1. Par comparaison avec les données économiques, malheureusement, les statistiques sur le suicide sont encore sujettes à des difficultés d'interprétation et d'erreurs. Selon le Rapport Mondial sur la Violence et la Santé (2000, p. 209) : « *la façon dont on enregistre tous les types de décès varie beaucoup d'un pays à l'autre, ce qui rend très difficile des comparaisons entre les taux de suicides nationaux* ». La collecte des données sur les suicides tombe dans la catégorie des statistiques démographiques. Ces données sont classées en tant que cause de décès avec les autres causes ; ce qui avorte évidemment toute tentative d'harmonisation des

⁵⁷ Une variété de modèles a été appliquée au comportement suicidogène, dont principalement l'analogie de la participation au marché du travail, l'analyse coût-bénéfice, le jeu des signaux et le modèle offre-demande. En particulier les économistes ont formalisé la notion qui stipule que la maximisation de l'utilité joue un rôle prépondérant dans la formation du comportement suicidaire.

⁵⁸ Le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (2002, p.207) indique que « le taux de suicides chez les jeunes canadiens est le troisième plus élevé parmi les pays industrialisés du monde ». http://www.who.int/violence_injury_prevention/violence/world_report/en/full_fr.pdf.

pratiques d'enregistrement entre les différents pays. Par exemple, certains pays⁵⁹ enregistrent seulement les suicides tandis que d'autres pays⁶⁰ ajoutent à ces chiffres les décès par traumatisme où il n'est pas possible de déterminer si le décès était un objectif ou est survenu par accident⁶¹. De même, les données sur les tentatives de suicide présentent un problème de comparaisons non-cohérentes. En effet, ces données ne sont pas systématiquement enregistrées dans les statistiques démographiques.

D'après la littérature spécialisée, les économistes ont tendance à modéliser le suicide comme une fonction d'offre, qui doit subsumer l'offre totale des actes suicidaires à « un prix » donné du suicide. Ainsi, toute estimation de la courbe d'offre à partir des statistiques existantes sur le suicide sera faussée par deux types d'omission :

- Les données sur certains décès par suicide sont inscrites sous la rubrique « autres cause du décès ». Cette mauvaise répartition est souvent due à la culture d'une région particulière. Dans le cas extrême, dans certains pays, on trouve un nombre nul de suicide (Exemple : Syrie, Jordanie, Iran...).

- La non-inclusion de tentatives de suicides (le nombre de tentatives de suicides dépasse de loin le nombre de suicides).

Les chercheurs peuvent faire des ajustements en déplaçant le nombre de suicides sous la rubrique « décès par suicide » plutôt que sous la catégorie « autres causes de décès ». Ils peuvent ajouter à la catégorie « décès par suicide » les tentatives de suicides échouées.

2. A l'exception d'un certain nombre d'études (Stack, 2000 ; Daly, Wilson et Johnson 2008 et Daly et Wilson, 2009), où les tailles d'échantillon sont souvent limitées, seules les données agrégées ont été prises en considération alors qu'une étude d'impact socio-économique nécessite l'utilisation de données individuelles (données désagrégées). En effet, les données socio-économiques individuelles ne sont pas toujours disponibles sauf s'il existe des études spécifiques. Ces données supposent une stratification de chaque population examinée. Les études socio-économiques permettent aussi de contrôler le biais de sélection.

⁵⁹ Le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (2002, p.63).

⁶⁰ Le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (2002, p.63).

⁶¹ Les exemples classiques sont l'utilisation des armes à feu et une sur-médication.

3. Le cadre de modélisation institutionnelle, qui tient compte des coûts de transaction et de marchés qui fonctionnent de façon non optimale ; ce qui représente une caractéristique de la plupart des économies en voie de développement, n'a pas été encore appliqué.

4. Le risque et l'incertitude, qui caractérisent une activité économique en général, ne sont pas pris en compte.

Pour conclure, nous retiendrons que même si l'on se limite aux résultats présentés par la littérature pour expliquer la relation de cause à effet entre le suicide et les facteurs macroéconomiques, les diverses règles institutionnelles, l'environnement propre de chaque pays, et des multiples considérations particulières font qu'il n'existe pas une réponse définitive et universelle sur les facteurs déterminants du suicide. En effet, selon que le suicide est une conséquence économique ou sociale, selon que le pays est développé ou en voie de développement, selon que la région est urbaine ou rurale, etc... les résultats peuvent être renversés.

CHAPITRE 3

L'ADOPTION DU COTON *BT* ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE : PREMIER ESSAI THÉORIQUE

3.1 Introduction

Le coton, souvent désigné comme « l'or blanc », est la principale récolte commercialisée en Inde. La plus grande quantité de pesticides utilisée dans ce pays (45%) est consacrée à la culture du coton (Mathur, 1999) qui occupe 5% de la superficie agricole totale. Le ver américain de la capsule (*Helicoverpa armigera*) est le ravageur le plus dommageable pour le coton. Cette chenille provoque une baisse considérable du rendement qui varie entre 50% et 60% (Shetty, 2004).

Dans ce contexte, le coton génétiquement modifié est appréhendé sous un angle d'un double dividende. En effet, *primo*, il y aurait, en termes de soutenabilité écologique, à en croire la « firme de Saint Louis »⁶² un réel intérêt à adopter ce type de coton car il permettrait de lutter contre les insectes nuisibles. *Secundo*, en termes de rentabilité, il est prévu dans le rapport annuel de *Monsanto* un rendement technologique optimal pour la filière cotonnière indienne. A cet effet, les variétés de coton *Bt*, résistant aux ravageurs, ont été mis sur le marché indien pour la première fois en 2002 sous le nom commercial *Bollgard-I*®. Ce microbe, appelé *Bacterium thurgiensis* ou *Bt*, contient une protéine nommée *CryIAc* (désignée également sous le nom de toxine *Bt*) qui agit à la place de pesticides pour exterminer l'un des principaux insectes ravageurs du coton : les vers de la capsule du cotonnier.

Selon la multinationale *Monsanto* (le leader mondial des semences OGM), l'utilisation du coton *Bt* permettrait une diminution de la consommation de pesticides et une augmentation de la productivité du coton. Depuis 2002, l'adoption de cette nouvelle technologie en Inde est sans cesse croissante pour remplacer 88% des champs ensemencés avec des graines conventionnelles. En 2011, plus de sept millions d'agriculteurs⁶³ ont déjà adopté le coton *Bt* avec la possibilité de choisir parmi des dizaines de variétés transgéniques.

Les effets positifs de l'utilisation du coton *Bt*, anticipés par la multinationale *Monsanto*, ont été confirmés par les résultats positifs enregistrés par certaines études économiques

⁶² «Biotechnology can be a main instrument in achieving the objective of sustainable development in agriculture. "Monsanto Company activities and the use of its products positively affect agricultural sustainability". Because of this opportunity several GM crops are already produced commercially in large quantities».http://www.monsanto.com/SiteCollectionDocuments/CSR_Reports/MonsantoPledgeReport-2005.pdf
« Monsanto claims that its "GM products will provide consistent and significant economic benefits to both large- and small-holder growers. In many cases, farmers are able to grow higher-quality and better-yielding crops with fewer inputs and less labor." However, it now seems that benefits are significantly less than claimed. », Monsanto, *The Pledge Report* (2006, p.29).
http://www.monsanto.com/SiteCollectionDocuments/CSR_Reports/MonsantoPledgeReport-2006.pdf

⁶³ Nous utilisons comme strictement synonyme les termes agriculteur, fermier et paysans

(Qaim, 2003, Qaim et Zilberman, 2003, Qaim et al., 2006 et Subramanian et Qaim, 2009). Selon ces écrits, l'adoption de la technologie OGM permettrait aux fermiers d'accroître leur rendement tout en réduisant les coûts des intrants notamment le coût d'usage des pesticides⁶⁴. En effet, bien que le prix de semences cotonnières *Bt* soit élevé, les agriculteurs indiens font nonobstant des économies sur le coût des pesticides (Qaim et al., 2008). L'étude de Rao et Dev (2010) a précisé que d'une part, les OGM réduisent l'utilisation des pesticides et d'autre part, que les plantes sont résistantes aux insectes. Leur conclusion est alors que le niveau de vie des fermiers, *in fine*, est amélioré (Rao et Dev, 2009).

Cependant, l'utilisation généralisée du coton *Bt* a entraîné un développement rapide d'une certaine résistance⁶⁵, par les insectes ravageurs cibles, en rendant la nouvelle technologie *Bt* obsolète. Un groupe de recherche de l'Institut central de recherche sur le coton de Nagpur⁶⁶ (Maharashtra), dirigé par Kranthi, a développé un modèle de prévision stochastique, sur l'apparition d'une future résistance chez les insectes nuisibles en Inde⁶⁷. Ce modèle a prédit que la résistance chez les insectes ravageurs pourrait être développée à échéance de 3-4 ans à partir de l'adoption des semences *Bt* si la surface occupée par le coton OGM passe au-delà de 70-80% de la superficie cotonnière totale. En 2009, la multinationale *Monsanto* a rapporté⁶⁸ que les vers de la capsule ont déjà commencé à réagir contre la toxine *Bt* dans les districts de Amreli, Bhavnagar, Junagarh et Rajkot dans l'Etat du Gujarat (Ouest du pays). En effet, lorsque la pression de l'insecte cible (vers de la capsule du coton) devient élevé, le coton *Bt* n'est plus résistant et les agriculteurs reviennent à une utilisation intensive et irraisonnée de pesticides⁶⁹.

Afin de retarder ce phénomène, qui a mis en cause la rentabilité de cette technologie, *Monsanto* a conseillé aux agriculteurs de consacrer 20% de surfaces cultivées en coton pour l'implantation des variétés conventionnelles. Ces « zones refuges » vont empêcher le

⁶⁴ Pour le cas de l'Argentine, Qaim et de Janvry (2003) mettent en évidence aussi que les fermiers argentins ont enregistré des rendements élevés et une baisse du coût de production liés à un usage moindre des pesticides suite à l'adoption du coton *Bt*.

⁶⁵ L'apparition de la résistance à la toxine *Bt* signifie que les insectes ravageurs ne seraient plus détruits et les paysans devraient revenir à l'utilisation de produits phytosanitaires. La résistance est identifiée par l'établissement d'une courbe de toxicité de la toxine *Bt* pour les populations de ravageurs, la perte de la toxicité implique l'évolution de la résistance à la protéine *Bt*.

⁶⁶ Central Institute for Cotton Research (<http://www.cicr.org.in/>).

⁶⁷ Les résultats de ce modèle ont été publiés en 2004 dans la revue scientifique indienne *Current Science*.

⁶⁸ Monsanto, 2009, "Cotton in India" <http://www.monsanto.com/newsviews/Pages/india-pink-bollworm.aspx>.

⁶⁹ Une équipe de recherche franco-chinoise (Yanhui Lu, Kongming Wu, Yuying Jiang, Yuyuan Guo et Nicolas Desneux, 2012) a montré que l'adoption du coton *Bt*, à une grande échelle, en Chine a permis une diminution de l'utilisation d'insecticides. Ce résultat a été publié dans la revue scientifique internationale *Nature*.

développement rapide de résistance aux toxines *Bt*. Cependant, 85% des agriculteurs en Inde possèdent moins que deux hectares (Bennett *et al.*, 2004) ce qui rend difficile le sacrifice de 20% de leurs champs agricoles aux insectes ravageurs.

En Inde « *Monsanto*, leader mondial en biotechnologie agricole, a fini par admettre que son coton *Bt* génétiquement modifié, censé lutter contre les vers de la capsule, est en train de devenir totalement inefficace. De récents rapports indiquent en effet que le ravageur a développé des résistances »⁷⁰. Selon Shiva (2009), l'apparition de résistance chez les insectes nuisibles oblige les paysans à multiplier les épandages d'insecticides, dans certaines régions, jusqu'à 13 fois plus qu'auparavant. Après l'échec de la variété *Bollgard-I*®, *Monsanto* a décidé d'opter pour la seconde génération de coton *Bt* commercialisée depuis 2005 sous le nom de *Bollgard-II*®. Cette nouvelle version de coton *Bt* contient deux gènes, *Cry1Ac* et *Cry2Ab*, qui devraient améliorer le rendement et retarder le développement de la résistance chez les insectes ravageurs. Plus encore, cette nouvelle génération du coton OGM n'est pas soumis à l'exigence de zones refuges. Cependant, Liao *et al.* (2002) ont mis en relief que l'effet de la seconde toxine *Cry2Ab* sur les chenilles de la capsule était trois fois moins toxique que la première protéine *Cry1Ac*. Par conséquent, le recours à la protéine additionnelle *Cry2Ab* dans une plante contenant déjà *Cry1Ac* ne serait pas aussi efficace comme on peut s'y attendre. L'étude réalisée par Kranthi *et al.* (2009) sur l'efficacité des génotypes de *Bollgard-II*® contre les vers de la capsule du cotonnier, précise également que la toxicité relativement faible de *Cry2Ab* pose des problèmes de résistance dans l'avenir. Les chercheurs ont affirmé que la variabilité observée dans la sensibilité aux insectes, bien qu'elle ne soit pas significative, pourrait accélérer le développement de la résistance des insectes nuisibles par rapport à la toxine *Bt*.

L'expérience indienne en matière de diffusion des variétés de coton transgénique a été sibylline. Il semble que l'adoption du coton *Bt* a exacerbé le problème du surendettement des agriculteurs. A cela deux explications en chaîne : tout d'abord, les cultivateurs se sont procurés les semences transgéniques à crédit. Ensuite, leurs revenus générés étaient insuffisants pour rembourser leurs propres dettes issues des crédits. A cela s'ajoute, l'effondrement des cours internationaux du coton brut ; ce qui conduit à une augmentation des coûts de production et une dégradation de la situation financière de petits fermiers. De telles

⁷⁰ Le coton en Inde, *Monsanto* (http://monsanto.fr/actualites/idees_recues/idees_recues27.asp).

Cette nouveauté consiste en la construction d'un modèle dynamique qui prend en compte une caractéristique fondamentale du coton génétiquement modifié à savoir l'évolution de la résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt*.

circonstances ont poussé annuellement des milliers de petits agriculteurs à se suicider (Shah, 2005).

Dans ce contexte, nous tentons de contribuer à la littérature théorique en proposant un modèle innovant⁷¹ qui sonde l'impact de l'adoption de coton transgénique sur l'utilité réelle du fermier indien. Ce modèle sous-tend une extension du modèle de Lichtenberg et Zilberman (1986). Notre apport (modèle dynamique) suggère que la culture du coton *Bt* revêt un impact positif sur la réduction des dommages mais cet effet est décroissant au cours du temps.

Dans ce chapitre nous avançons une explication du comportement suicidaire chez les cultivateurs indiens du coton OGM. Ces cultivateurs seront considérés à la fois comme des producteurs et des consommateurs. Nous signalons que si les insectes ravageurs cibles développent une résistance envers le coton *Bt*, alors le seuil économique de nuisibilité ne sera atteint que s'il existe une relation inversement proportionnelle entre l'efficacité d'utilisation de pesticides et le taux de variation de dommages relatif à l'accroissement de la population d'insectes. Le seuil économique de nuisibilité (seuil de tolérance) est déterminé par le niveau de la population de ravageurs qu'un cultivateur de coton peut admettre pour sa récolte sans un grand risque. Au-delà de ce seuil économique, les dégâts supplémentaires entraîneraient des pertes de rendement significatives et l'utilité du fermier deviendrait négative. Par conséquent, l'agriculteur choisira systématiquement le suicide qui lui rapporte une valeur d'utilité nulle (Hamermesh et Soss, 1974). En effet, si le gène *Bt* est dépossédé de ses capacités de résistance alors l'agriculteur sera dans l'obligation de pulvériser davantage de pesticides pour compenser la diminution de l'efficacité des toxines *Bt* ; ce qui représente ainsi un coût additionnel. Outre le prix démesuré⁷² de semences, les coûts des pesticides, nécessaires pour lutter contre les ravageurs résistants, deviennent plus élevés que ceux payés par le cultivateur de coton conventionnel. Les petits agriculteurs doivent faire face à un niveau très élevé d'endettement ; ce qui entraîne mécaniquement et inexorablement un accroissement régulier du nombre de suicides.

La première section de ce modèle discutera le problème du producteur de coton. La seconde partie sera consacrée à la modélisation du problème du fermier consommateur.

⁷¹ Un modèle de programmation dynamique en temps discret.

⁷² Le prix d'un sac de semences *Bt* est à peu près quatre fois plus cher que celui des semences conventionnelles.

3.2 Présentation du modèle

3.2.1 Le problème du producteur

En se basant sur l'approche de Lichtenberg et Zilberman (1986)⁷³, une fonction de réduction des dommages, causés par les vers de la capsule du cotonnier, pourrait être incorporée dans la fonction de production agricole standard⁷⁴. Selon ces auteurs, il est erroné de traiter les pesticides (agent de contrôle) comme les autres *inputs* «conventionnels» (les fertilisants, le travail, l'eau, etc...) puisqu'ils ne contribuent pas d'une manière directe à une amélioration de la production. En effet, la productivité des pesticides est déterminée selon leur contribution au contrôle des insectes ravageurs⁷⁵.

Nous proposons une extension dynamique du modèle statique de Lichtenberg et Zilberman (1986). On suppose que la culture du coton *Bt* recèle un impact positif sur la réduction des dommages, mais cet effet est décroissant au cours du temps. Le rendement peut se présenter de la façon suivante :

$$y_t = f(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N_t)) \quad (3.1)$$

y_t désigne le rendement par hectare qui s'appréhende sous la forme d'un produit entre la fonction du rendement potentiel $f(L_t, s_t, \epsilon_t)$ et celle des dommages $D(N_t)$ délimitée sur l'intervalle $[0, 1]$. La population de ravageurs est représentée par N_t . Le niveau du rendement potentiel $f(L_t, s_t, \epsilon_t)$ est une fonction croissante des quantités de travail L_t et des semences transgéniques employées s_t ainsi que le paramètre d'hétérogénéité ϵ_t qui caractérise la qualité

⁷³ Lichtenberg et Zilberman (1986) ont montré que les fonctions de production utilisées habituellement ne peuvent pas décrire correctement les effets des pesticides sur les rendements. Ils fournissent également des spécifications de fonction de production adaptées au problème du contrôle des nuisibles qui génèrent des dommages. Cette fonction de production porte la dénomination de « fonction de réduction » (*abatement function*).

⁷⁴ Le recours aux fonctions de réduction des dommages, dans les analyses qui suivent, est une amélioration importante puisque Lichtenberg et Zilberman (1986) reconnaissent que les pesticides constituent un facteur de réduction des dommages plutôt qu'un facteur de production permettant l'amélioration de la productivité.

⁷⁵ Lichtenberg et Zilberman (1986) ont montré que le fait de considérer les pesticides comme étant un *input*, dans une fonction de production de type Cobb-Douglas, entraîne une surestimation de la productivité marginale des pesticides et une sous-estimation de la productivité marginale des autres *inputs* habituels.

de l'exploitation agricole (le capital humain, le climat et la qualité du sol). Par conséquent, la baisse de la production potentielle est due aux conditions climatiques défavorables (zones de basses pressions, vent, précipitation, mousson,...)⁷⁶ et d'autres facteurs comme la mauvaise qualité du sol⁷⁷ et le capital humain qui joue un rôle crucial dans l'efficacité du travail et l'augmentation du rendement.

Hypothèse 3.1 : La fonction f est supposée deux fois continûment différentiables sur IR et concave par rapport à ses arguments.

Hypothèse 3.2 : La fonction des dommages D est supposée croissante par rapport à la taille de la population de ravageurs à un taux croissant. C'est-à-dire :

$$\frac{\partial D(N_t)}{\partial N_t} > 0 \text{ et } \frac{\partial^2 D(N_t)}{\partial N_t^2} \geq 0.$$

La fonction des dommages D , qui est précisée sur l'intervalle $[0,1]$, permet de capter les effets des agents de contrôle (les pesticides et la toxine Bt) qui immunise la culture contre les insectes ravageurs. Ainsi, lorsque $D(.) = 0$ cela signifie que la culture a été protégée parfaitement à l'encontre les insectes destructeurs et l'*output* réalisé sera ainsi maximum⁷⁸ (c'est le rendement potentiel $f(.)$). Lorsque $D(.) = 1$, cela implique que la destruction a été maximale et la protection a été inefficace ou inexistante ; le niveau d'*output* réalisé est par conséquent nul. Le niveau population des ravageurs N_t est défini par l'expression suivante :

$$N_t = N \cdot h(x_t) \delta_t \quad (3.2)$$

N désigne la dimension initiale de la population de ravageurs, $h(x_t)$ la proportion d'insectes survivant l'application des pesticides et δ_t un paramètre technologique exogène qui mesure le taux des insectes ravageurs survivant l'effet de la toxine Bt .

⁷⁶ Il n'est pas rare que l'Inde reçoive des précipitations de l'ordre de 10 000 mm de pluie annuelle ou soit victime d'« effet de foehn » (un vent fort, chaud et sec).

⁷⁷ Le sol indien est largement malmené par une exploitation peu protégée réglementairement. Il n'y a donc pas comme en Europe une directive-cadre sur la protection des sols visant à limiter leur régression et dégradation. Cette entropie étant causée par une exploitation incontrôlée due essentiellement à l'agriculture, archéologie (empreinte animales et végétales), construction (activité humaine dont industrie minière), horticulture, hydrologie, pollution (d'origine naturelle et humaine) et sylviculture.

⁷⁸ En d'autres termes, la capacité destructive des agents annihilateurs est éliminée, les pertes sont nulles et l'*output* réalisé est égale à l'*output* potentiel qui est représenté par $f(.)$.

Hypothèse 3.3 : *Un niveau élevé d'utilisation des pesticides permet de réduire le taux de survie des insectes nuisibles mais son effet est décroissant*⁷⁹.

C'est-à-dire :

$$\frac{\partial h(x_t)}{\partial x_t} < 0 \text{ et } \frac{\partial^2 h(x_t)}{\partial x_t^2} > 0.$$

Les variétés transgéniques, actuellement commercialisées, présentent des traits agronomiques, à savoir la résistance aux insectes ravageurs. L'utilisation généralisée de semences transgéniques conduit au risque de l'adaptation des insectes à la toxine Bt. Pour ralentir l'apparition de résistance, les entreprises semencières, vendant les variétés Bt, exigent des cultivateurs que ceux-ci consacrent 20% de leurs superficies de coton aux variétés conventionnelles. Cependant, cette solution semble ardue à appliquer pour des cultivateurs possédant des petites exploitations agricoles. Les fermiers, qui disposent moins de 2 hectares, représentent près de 80 % des agriculteurs indiens.

Hypothèse 3.4 : *Au début de l'adoption de la technologie Bt, le pourcentage des insectes ravageurs survivant à l'effet de la toxine Bt, δ_t , est proche de 0 mais au cours du temps, les vers de la capsule du cotonnier développent une opiniâtre résistance aux toxines Bt suite à l'utilisation massive du coton génétiquement modifié ; par conséquent δ_t tend vers 1 et la quantité utilisée de pesticides augmente d'une manière substantielle*⁸⁰. *On suppose également que δ_t est proche de 1 pour les semences conventionnelles.*

Le fermier se procure des quantités de semences transgéniques et des pesticides (s_t et x_t) à crédit. Nous émettons l'hypothèse que celui-ci achète les insecticides et les semences respectivement aux prix p_x et p_s qui sont supposés exogènes. On présume que d_t s'apparente au montant de la dette empruntée, D_t s'assimile au montant total que le fermier doit rembourser à la fin de la saison agricole t et r représente le taux d'intérêt. Le montant total de la dette D_t que le fermier doit s'acquitter est alors :

⁷⁹ Par exemple, le taux de survie peut prendre la forme exponentielle.

⁸⁰ La généralisation du coton génétiquement dans les États indiens peut surprendre eu égard à la prescription courante de mise en place de zones refuges pour prévenir la résistance des ravageurs au Coton Génétiquement Modifié. Cette prescription n'a pas lieu en Inde en raison de la petitesse des parcelles (une exigence qui n'a pas été également respectée en Chine pour la même raison). En comparaison avec le cas de la Chine, la résistance était plus rapide et plus violente en Inde par la chute de rendement induite en dépit de l'accroissement du nombre de traitements insecticides réalisés. La résistance des insectes lépidoptères dépend de facteurs édaphiques (facteur écologique lié au sol), climatiques et du milieu.

On peut ainsi réfléchir à l'extension du modèle de la façon suivante : La fonction de dommage est une variable aléatoire et s'écrit sous la forme suivante : $D(N_t) = D(N, h(x_t)\delta_t)$ où δ_t est une variable aléatoire avec moyenne μ_N et variance σ_N^2 .

$$D_t = d_t(1 + r) = (p_x x_t + p_s s_t)(1 + r) \quad (3.3)$$

Le fermier peut maximiser l'espérance de son profit en minimisant les coûts de production. Etant donné le prix de vente de l'*output* p_y , l'équation du profit peut se formuler de la manière suivante :

$$\pi_t = p_y y_t - w L_t - (p_x x_t + p_s s_t)(1 + r) \quad (3.4)$$

L'agriculteur, en maximisant l'espérance de la valeur présente des profits intertemporels pour $t = 0, 1, \dots, \tau$, fait face au programme suivant :

$$\pi = \max_{\{x_t, s_t, L_t\}_{t=0}^{\tau}} \sum_{t=0}^{\tau} \beta^t [p_y y_t - w L_t - (p_x x_t + p_s s_t)(1 + r)] \quad (3.5)$$

Où π représente l'espérance de la valeur présente des profits intertemporels obtenus par l'agriculteur et β désigne le facteur d'actualisation.

Sous la contrainte technologique suivante :

$$y_t = f(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N_t)) \quad (3.5.a)$$

Ainsi que la condition qui résume le niveau de pression exercé par les insectes ravageurs :

$$N_t = N \cdot h(x_t) \delta_t \quad (3.5.b)$$

On peut écrire ainsi le programme de l'agriculteur sous la forme suivante :

$$\pi = \max_{\{x_t, s_t, L_t\}_{t=0}^{\tau}} \sum_{t=0}^{\tau} \beta^t [p_y f(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N \cdot h(x_t) \delta_t)) - w L_t - (p_x x_t + p_s s_t)(1 + r)] \quad (3.6)$$

D'où les conditions du premier ordre pour $t = 0, 1, \dots, \tau$:

$$\begin{cases} -\beta^t \left[p_y f(L_t, s_t, \epsilon_t) \frac{\partial D(N_t)}{\partial N_t} \frac{\partial h}{\partial x_t} N \delta_t - p_x (1 + r) \right] = 0 & (3.7.a) \\ \beta^t [p_y f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N \cdot h(x_t) \delta_t)) - p_s (1 + r)] = 0 & (3.7.b) \\ \beta^t [p_y f_L(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N \cdot h(x_t) \delta_t)) - w] = 0 & (3.7.c) \end{cases} \quad (3.7)$$

Les trois conditions de premier ordre (7) donnent ensemble les quantités optimales des inputs x_t^* , s_t^* et L_t^* en fonction de paramètres du modèle.

$$x_t^* = x_t^*(p_y, p_x, p_s, r, \epsilon_t, \delta_t N)$$

$$s_t^* = s_t^*(p_y, p_x, p_s, r, \epsilon_t, \delta_t N)$$

$$L_t^* = L_t^*(p_y, p_x, p_s, r, \epsilon_t, \delta_t N)$$

De la première condition d'optimalité (7.a) on peut déduire la relation suivante⁸¹ :

$$-p_y f(L_t, s_t, \epsilon_t) \frac{\partial D(N_t)}{\partial N_t} \frac{\partial h}{\partial x_t} N \delta_t = p_x (1 + r)$$

La relation (3.7.a) désigne la condition optimale de pulvérisation de pesticides. Cette condition pourrait être réinterprétée sous la forme suivante :

$$p_y f(L_t, s_t, \epsilon_t) D(N_t) e_{D/N} e_{h/x} = p_x (1 + r) x_t \quad (3.7.a)$$

Où :

$e_{D_t/N_t} = \frac{\partial D(N_t)}{\partial N_t} \frac{N_t}{D(N_t)}$ désigne la variation de dommages par rapport à une variation de la population de ravageurs;

$e_{h_t/x_t} = -\frac{\partial h}{\partial x_t} \frac{x_t}{h}$ est une mesure de l'efficacité d'utilisation de pesticides (c'est la variation relative de la population d'insectes survivant à l'utilisation de pesticides par rapport à la variation relative des quantités de pesticides appliquées).

a) *Seuil économique de nuisibilité*

Un niveau d'utilisation de pesticides conforme à la rationalité économique a pour objectif non seulement l'augmentation du rendement mais aussi la minimisation du risque et la maximisation de l'efficacité économique. Ainsi, la notion de « seuil économique de nuisibilité » est fondamentale pour déterminer la décision du fermier tant pour l'application de pesticides que pour son niveau d'usage (Sexton et al. 2007).

Définition : Seuil de nuisibilité économique (Mariyono 2007, p. 83)⁸² : « *Quelque soit le niveau d'attaque de ravageurs, il existe un seuil d'infestation par les nuisibles, constituant le*

⁸¹ D'après les hypothèses 1 et 2, on peut déduire que la dérivée seconde est négative (condition suffisante).

niveau maximum tolérable, tel que la valeur des pertes de rendement estimée, causés par les ravageurs, est égale aux coûts associés au traitement par de pesticides. Le niveau maximum acceptable d'attaque de ravageurs, N_t^* , est appelée seuil de nuisibilité économique ».

La dimension acceptable de la population de ravageurs s'appelle le « seuil économique de nuisibilité »⁸³. Ce seuil de tolérance prend en considération les pertes de rendement résultant de dégâts causés par les insectes et les dépenses en pesticides nécessaires pour éviter des dommages intolérables. Autrement, le seuil économique de nuisibilité s'apparente à la densité de la population d'insectes à partir duquel on doit prendre en compte le coût de traitement des pesticides. C'est un seuil en deçà duquel la présence des insectes ravageurs est tolérée par l'agriculteur. Ce n'est que si les dégâts dépassent le seuil que des mesures doivent être prises. (cf. Fig. 3.1). Toutefois, le niveau maximum acceptable de ravageurs n'est pas statique. Il dépend des prix de l'*output* et des pesticides. Ainsi, toute variation de prix entraîne un changement dans le niveau de tolérance d'insectes ravageurs. Lorsque le niveau du seuil de tolérance est élevé, il est fort probable que le degré d'infestation observable soit au-dessous de ce seuil. Par contre, quand le niveau du seuil économique de nuisibilité est faible, il est grandement plausible que le degré d'infestation observable soit au-dessus du seuil de tolérance.

Proposition 3.1

Le niveau d'utilisation optimal de pesticides dépend du seuil économique de nuisibilité. Ce dernier est atteint, si et seulement si, $e_{D/N}e_{h/x} = 1$.

Preuve (on peut vérifier aisément cette proposition à partir de la condition de premier ordre (3.7.a) et la définition du seuil économique de nuisibilité).

⁸² “For any level of pest attack, there exists a maximum acceptable level of pest attack such that the expected value of yield loss associated with the pest is equal to the cost of pest control using pesticides. The maximum acceptable level of pest attack is called economic threshold.” (Mariyono 2007, p.83)

⁸³ Le terme « seuil économique de nuisibilité » est employé pour désigner le niveau de population de nuisibles ou de dommages en dessous duquel les mesures de lutte sont inutiles. Le seuil économique est aussi parfois appelé « seuil d'action » puisqu'il représente le point à partir duquel des actions ou mesures sont enclenchées.

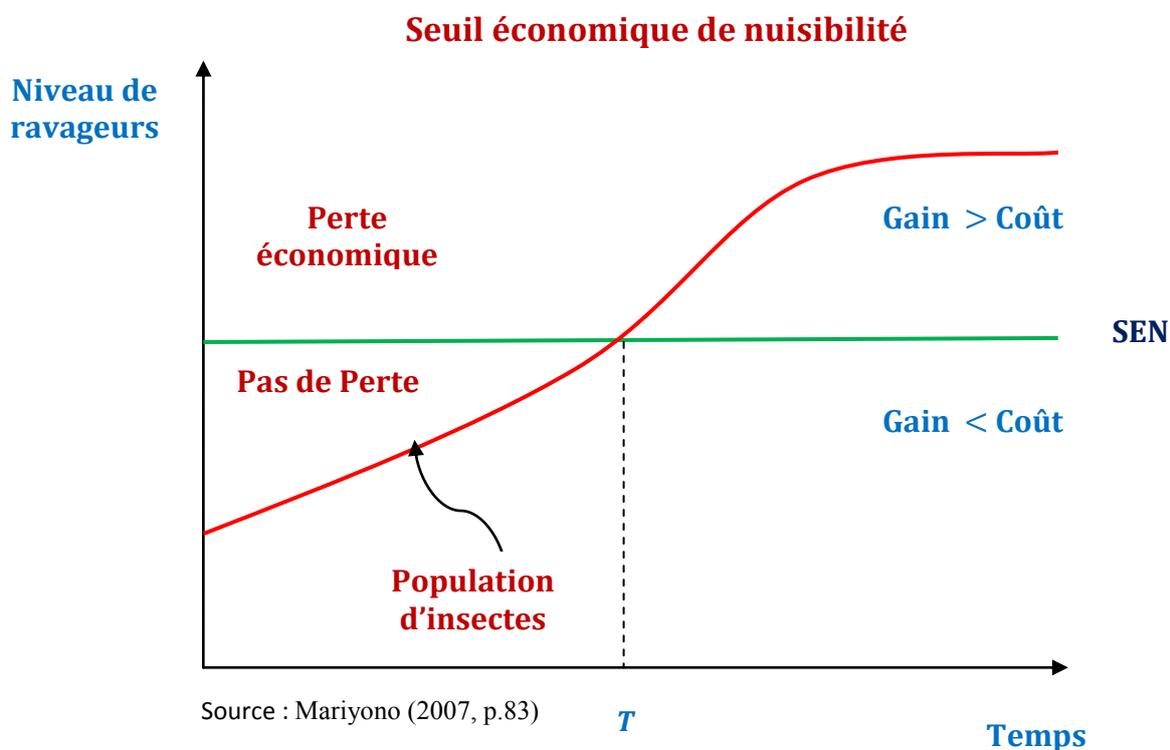


Figure 3.1 : Le seuil économique de nuisibilité.

D'après la proposition 3.1, l'agriculteur commence à pulvériser les pesticides lorsque la densité d'insectes nuisibles ciblés a atteint le seuil économique de nuisibilité (noté SEN). Il est déterminé par la densité d'insectes nuisibles pour lequel la valeur des pertes de rendement estimée, causés par les ravageurs, est égale aux coûts associés au traitement par des pesticides (condition 3.7.a). Ainsi, le recours aux pesticides, pour détruire les insectes ravageurs, ne doit s'opérer qu'en fonction du seuil de nuisibilité économique. L'utilisation rationnelle de pesticides conçoit que les cultivateurs doivent épandre en fonction du seuil du dommage acceptable (seuil économique) tout en tenant compte de la densité d'insectes. Ce seuil de tolérance est atteint quand la variation de dommages par rapport à une variation de la population d'insectes est inversement proportionnelle à la mesure d'efficacité d'utilisation de pesticides e_{h_t/x_t} (cf. Fig. 3.2). Ainsi, lorsque le seuil économique de nuisibilité est élevé, le niveau d'utilisation effective des pesticides est faible. Autrement dit, si le taux d'efficacité de pesticides baisse alors le taux de variation relative de dommages par rapport à une variation de population d'insectes, s'accroît dans la même proportion.

Seuil économique de nuisibilité

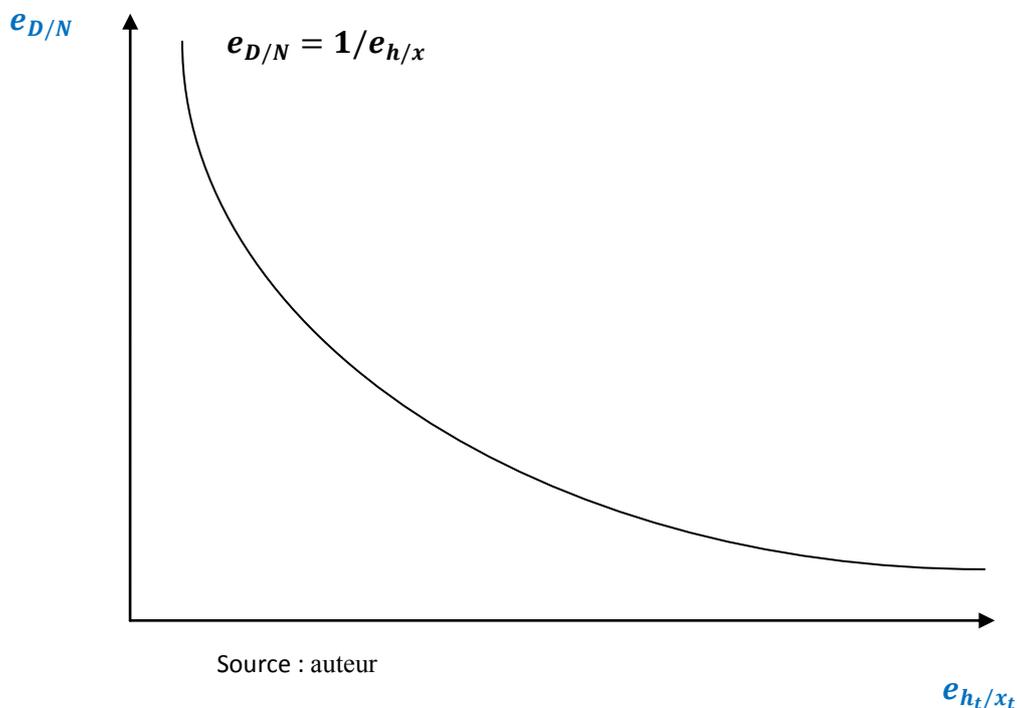


Figure 3.2 : Le seuil économique de nuisibilité est atteint si et seulement si $e_{D/N}e_{h_t/x_t} = 1$

La relation inversement proportionnelle entre l'efficacité d'utilisation de pesticides et l'élasticité de dommages, par rapport à la population d'insectes ravageurs, laisse envisager que le risque associé à l'augmentation du nombre d'applications de pesticides dépend du degré de résistance dans une population de ravageurs.

b) L'indicateur de l'évolution de la résistance chez les lépidoptères

La variation de dommages par rapport à la variation de la population de ravageurs e_{D_t/N_t} pourrait être assimilée à un indicateur d'évolution de la résistance (élasticité de dommages) qui s'interprète de la manière suivante :

- à court terme le dommage est inélastique à la hausse ($e_{D_t/N_t} = 0$) alors la toxine *Bt* est encore efficace contre les lépidoptères.
- à moyen terme le dommage est élastique à la hausse ($e_{D_t/N_t} > 0$) alors les ravageurs commencent à développer une certaine résistance.

En effet, durant les premières années d'adoption de la technologie OGM (lorsque le coton *Bt* assujettissait encore les vers de la capsule du cotonnier, les agriculteurs pouvaient modérer l'usage de pesticides à large spectre, réduisant ainsi leurs coûts et augmentant leurs revenus). Mais, au cours du temps, semble-t-il, le coton *Bt* n'apporta qu'un faible contrôle sur les vers de la capsule du coton, ces derniers pouvant développer une résistance accrue et les agriculteurs, résignés finissant sempiternellement à appliquer les pesticides.

À la suite d'une étude⁸⁴ effectuée dans l'Etat du Gujarat (situé dans l'ouest du pays), la multinationale *Monsanto* a révélé que ses semences transgéniques *Bollgard® I* ne sont guères efficaces. Les insectes ravageurs cibles ont développé des combativités à la toxine *Bt*. L'utilisation de quantités croissantes de pesticides représente un danger pour l'environnement puis demeure dispendieux. Plus encore, l'autre problème des OGM, qui se greffe, c'est le développement d'une autre forme de résistance contre les pesticides suite à l'utilisation massive de ces substances chimiques. En fait, si les insectes ravageurs manifestent une rébellion contre les pesticides (e_{h_t/x_t} s'approche de 0), alors la valeur de dégâts causés par ces insectes peut considérablement décupler (e_{D_t/N_t} tend vers l'infini) et le rendement devient ainsi quasi-nul.

c) *La quantité optimale de pesticides utilisée*

Il est possible de déduire la quantité optimale utilisée de pesticides, à partir de la relation (3.7.a) :

$$x_t^* = e_{D_t/N_t} e_{h_t/x_t} \frac{p_y f(L_t^*, s_t^*, \epsilon_t) D(N_t^*)}{p_x (1 + r)} \quad (3.7.a')$$

Les effets de la variation de prix de pesticides, le prix de l'*output* et le niveau du rendement potentiel sur la quantité employée de pesticides sont déduits de la condition d'optimalité et résumés dans la proposition 2. La quantité de pesticides consacrée augmente également suite à l'accroissement de la population d'insectes ravageurs et à l'augmentation de la proportion d'insectes survivant à la dose létale des toxines *Bt* (δ s'approche de 1).

⁸⁴ "Bt cotton has failed admits Monsanto", Sharma, India Today, 6 Mars 2010. <http://indiatoday.intoday.in/site/Story/86939/India/Bt+cotton+has+failed+admits+Monsanto.html>.

d) *La relation entre l'indicateur de la résistance et le seuil économique de nuisibilité*

On peut déduire à partir de la quantité optimale de pesticides une relation entre le seuil économique de nuisibilité et l'indicateur de la résistance. Pour ce faire, on suppose que la fonction de réduction de dommages est un monôme de degré n :

$$D(N_t^*) = (N_t^*)^n$$

Alors l'expression du seuil économique de nuisibilité s'écrit de la façon suivante :

$$N_t^* = \sqrt[n]{\frac{p_x x_t^* (1+r)}{(e_{D_t/N_t} e_{h_t/x_t}) p_y f(L_t^*, S_t^*, \epsilon_t)}} \quad (3.7.a'')$$

Ainsi, il existe une relation inverse entre l'indicateur de la résistance et le seuil économique de nuisibilité.

Proposition 3.2

Si on suppose que la fonction de réduction de dommages soit définie par un monôme de degré n , alors la relation entre le seuil économique de nuisibilité et l'indicateur de la résistance est négative.

(On peut vérifier aisément cette proposition à partir de la quantité optimale de pesticides (3.7.a''))

La proposition 3.2 consiste à mettre en évidence la relation négative entre le seuil économique de nuisibilité et l'indicateur de la résistance aux toxines *Bt*. Durant la première phase de l'adoption du coton OGM la perte de rendement marginale, occasionnés par les ravageurs, est inférieure au coût marginal associé à l'utilisation de pesticides. Dans ce cas, la technologie *Bt* continue à fournir un niveau de contrôle assez élevé auprès des ravageurs et l'utilisation de produits phytosanitaires n'est pas obligatoire (le niveau du seuil économique de nuisibilité est élevé). Par contre, si les ravageurs ciblés développent une résistance à la toxine *Bt*, alors la valeur des pertes de rendement estimée devient supérieure aux coûts du contrôle des ravageurs par les pesticides. Ainsi, les dégâts entraînent des pertes de rendement significatives et le recours aux pesticides s'avère incontournable. Durant cette seconde phase, le niveau d'infestation observable excèdera le seuil économique de nuisibilité et la séquence des événements, menant à l'application de pesticides, sera déclenchée rapidement (le niveau

de seuil économique de nuisibilité baisse). De ce fait, les milliers de fermiers indiens sont désormais contraints d'employer une quantité sans cesse croissante de pesticides pour se débarrasser des insectes ayant développé une résistance aux protéines *Bt*. Ainsi, pour limiter la perte considérable de rendement, les produits phytosanitaires pourraient être utilisés massivement malgré l'augmentation de prix. Ces résultats ont été corroborés par une étude empirique récente menée par Swaminathan et Rawal (2011) dans la région du Vidarbha, dans l'Est de l'état du Maharashtra. Les auteurs ont montré que les dépenses totales en pesticides étaient plus élevées pour le coton *Bt* que pour les variétés conventionnelles.

c) *La quantité optimale de semences Bt utilisée*

Concernant l'adoption de semences *Bt*, on peut déduire, de la seconde équation des conditions du premier ordre, la relation suivante :

$$p_y f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N \cdot h(x_t)\delta_t)) = p_s(1 + r) \quad (3.7.b)$$

Le terme à gauche désigne la valeur de la productivité marginale de la variété transgénique et le terme à droite indique le prix de semences OGM. Ainsi, pour que l'exploitation de semences transgéniques engendre un gain de rendement et une réduction de dommages, le prix de la nouvelle technologie devrait être compensé par sa valeur de productivité marginale. L'effet de la variation de la productivité marginale de semences *Bt* par rapport à un changement de l'efficacité de la toxine *Bt*, est résumé par la proposition suivante :

Proposition 3.3

Si les ravageurs développent une résistance aux toxines Bt, alors la baisse du taux de réduction de dommages engendre une diminution proportionnelle de la productivité marginale de la variété Bt. Soit : $e_{(1-D)/N} = -e_{f_s/\delta}$

Preuve (cf. annexe A.3.1).

Le coton transgénique a pour caractéristique la résistance génétique aux insectes parasitoïdes. Les agriculteurs peuvent atténuer la quantité de pesticides appliquée et réduire ainsi leurs dépenses ; ce qui consolidera par conséquent leurs gains de rendement. Cependant,

l'efficacité de cette technologie pourrait diminuer si une certaine résistance aux toxines *Bt* se développe au cours du temps. Le niveau d'efficacité de la technologie *Bt* est une fonction du degré de sensibilité de la population d'insectes cibles aux toxines transgéniques et de la vitesse de l'évolution de la résistance des parasites à la toxine *Bt*. Selon la proposition 3.3, un déclin du taux de réduction des dommages, résultant de l'apparition d'insectes résistants, implique un fléchissement proportionnel de la productivité marginale de semences transgéniques relative à une diminution de l'efficacité des toxines *Bt*. Ainsi, une réduction stable des dégâts ne pourra avoir lieu que dans la mesure où l'efficacité des toxines *Bt* sera immuable au cours du temps.

Pendant les premières années de l'adoption de plantes transgéniques, les petits paysans indiens peuvent générer des avantages économiques mais seulement à court terme. En effet, le savoir faire *Bt* peut fournir au début de son adoption un niveau de contrôle assez élevé de toute espèce lépidoptère mais les vers de capsule deviennent par la suite immunisés aux toxines *Bt*⁸⁵ et les dommages peuvent atteindre des niveaux qui justifient l'application de quantités supplémentaires de pesticides. Ainsi, l'agriculteur sera préoccupé par les pertes de récoltes et aura une tendance à utiliser des quantités additionnelles de pesticides (pour compenser les pertes causées par la baisse de l'efficacité des toxines *Bt*) ; ce qui représente d'ailleurs un coût supplémentaire. De ce fait, la technologie génétiquement modifiée n'offre aucune exception à la dépendance aux pesticides. La mauvaise performance d'une variété transgénique a provoqué l'endettement de certains agriculteurs pauvres. Plus encore, les semences génétiquement modifiées doivent être rachetées chaque année à des prix exorbitants. A cet effet, de nombreux paysans se sont fortement surendettés, ce qui pourrait être la cause de plusieurs cas des suicides. Nous argumentons dans ce sens dans la section suivante.

⁸⁵ Sharma, Dinesh, 6 March 2010. "Bt Cotton Has Failed Admits Monsanto." *India Today*. Available at <http://indiatoday.intoday.in/site/Story/86939/India/Bt+cotton+has+failed+admits+Monsanto.html>

3.2.2 La fonction d'utilité aléatoire (problème du consommateur)

Pour expliquer le comportement suicidaire des cultivateurs de coton *Bt* en Inde, nous recourons à la théorie d'utilité aléatoire⁸⁶. Dans le cadre de ces modèles, la décision du fermier consiste à opter entre se supprimer ou continuer à vivre⁸⁷. Une telle décision est souvent fondée sur un processus de comparaison entre l'utilité associée au suicide⁸⁸ et la somme de l'utilité présente avec la valeur actualisée de son flux d'espérance d'utilités futures. Cet arbitrage pourrait être décrit par ce modèle général en vertu de deux hypothèses de base :

- (1) le fermier doit comparer entre la somme de l'utilité présente avec la valeur actualisée de son flux d'espérance d'utilités futures et l'utilité associée au suicide.
- (2) Il existe une composante stochastique θ_t qui dépend d'un facteur de risque exogène en l'occurrence l'apparition de résistance des insectes du coton aux toxines *Bt* aux. Ainsi, on ne peut pas observer l'évolution attendue du profit due à la technologie (Qaim et de Janvry, 2003). Un niveau élevé de résistance chez les ravageurs nécessite des quantités additionnelles de pesticides, ce qui implique une réduction de l'utilité et par conséquent un accroissement de la probabilité de se suicider⁸⁹.

On suppose que les préférences de l'agriculteur sont représentées par la fonction d'utilité aléatoire intertemporelle suivante :

$$E_t \sum_{t=0}^{\tau} \beta^t [U(\pi_t) - \theta_t] \quad (3.8)$$

Le terme E_t désigne l'opérateur d'espérance mathématique conditionnelle sur l'ensemble d'informations disponibles à la saison agricole t . Le paramètre $\beta \in [0,1]$ représente le facteur d'actualisation. $U(\pi_t)$ est le terme déterministe de la fonction d'utilité aléatoire qui dépend du π_t (le profit présent). La fonction $U(.)$ est supposée monotone, concave et deux fois

⁸⁶ Le modèle d'utilité aléatoire se fonde sur le principe de préférences révélées permettant de déduire les caractéristiques de la fonction d'utilité.

⁸⁷ Ce choix s'ancre sur la *théorie de l'utilité aléatoire* (Thurstone, 1927; McFadden, 1974 ; Manski, 1977). Dans la théorie microéconomique, le consommateur maximise son utilité sous contrainte budgétaire. Par contre, la fonction d'utilité aléatoire possède un terme stochastique (distribué selon une loi de probabilité) non observable par les économistes.

⁸⁸ L'utilité associée au suicide est supposée nulle.

⁸⁹ Notre modélisation est une simple abstraction de la réalité parce que le suicide dépend de plusieurs variables socio-économiques complexes.

continûment différentiable sur IR par rapport à π_t . Le terme θ_t est une composante aléatoire temporelle qui relève des facteurs de risque exogènes⁹⁰ (les raisons de l'échec du coton *Bt*). En effet, la généralisation de la culture du coton *Bt* a fait émerger la nuisibilité économique à travers de l'apparition de résistance chez les insectes ravageurs ciblés par les toxines *Bt*. Un niveau faible de degré de résistance de la protéine *Bt* aux ravageurs entraîne donc une diminution de l'utilité et un accroissement de la probabilité de suicide.

Si les ravageurs, ciblés par le coton génétiquement modifié, stimulent une résistance, alors l'agriculteur se trouve désormais contraint d'utiliser les pesticides d'une manière intensive ce qui l'oblige à s'endetter encore davantage pour acquérir les quantités de pesticides inévitables⁹¹. Ainsi, l'incertitude liée au rendement de la technologie *Bt* et le niveau du crédit demandé peuvent être à l'origine d'une spirale d'endettement qui provoque une vague de suicides chez les fermiers indiens. Selon le *Center for Human Rights and Global Justice & International Human Rights Clinic*, les taux de suicide les plus élevés correspondent aux Etats indiens qui produisent les plus grandes quantités de coton⁹².

Formalisation du problème :

La décision suicidaire, prise par le cultivateur de coton *Bt*, est fondée sur la comparaison entre la somme de la valeur d'utilité présente avec la valeur actuelle de son flux d'espérance d'utilités futures et la valeur d'utilité associée au suicide. Le sentier de décision optimale pourrait être déterminé par le principe d'optimalité proposé par Bellman (1957).

Définition : *Le principe d'optimalité de Bellman* (Dixit et Pindyck, 1994, p. 100)⁹³ :

« Une politique optimale possède la propriété telle que, quelque soit l'action initiale, les choix qui restent constituent une politique optimale par rapport au sous-problème commençant à l'état qui résulte des actions initiales ».

⁹⁰ Les mauvaises conditions climatiques, la résistance des insectes aux toxines *Bt* et les insectes ravageurs secondaires non ciblés pourraient être également des vrais problèmes.

⁹¹ Les coûts des semences ont alourdi aussi l'endettement des paysans. En effet, Monsanto, impose aux fermiers de racheter les semences *Bt* chaque année. Monsanto impose aux cultivateurs procurant son coton *Bt* à signer une clause leur empêchant de garder les semences et de les replanter l'année suivante. Celui qui ne respecte pas cet engagement il sera poursuivi judiciairement.

⁹² *Center for Human Rights and Global Justice & International Human Rights Clinic*, "Every Thirty Minutes: Farmer Suicides, Human Rights, and the Agrarian Crisis in India", New York: NYU School of Law, 2011: <http://www.chrgj.org/publications/docs/every30min.pdf>

⁹³ "Bellman's principle of optimality: An optimal policy has the property that, whatever the initial action, the remaining choices constitute an optimal policy with respect to the subproblem starting at the state that results from the initial actions" (Dixit et Pindyck, 1994, p. 100).

Le problème d'optimisation dynamique de l'agriculteur sera donc résolu en utilisant l'approche de Bellman⁹⁴. La fonction de Bellman peut se retranscrire de la façon suivante :

$$V(\pi_t/\theta_t) = \max_{K_t} \{(1 - K_t)[U(\pi_t) - \theta_t + \beta E_t V(\pi_{t+1}/\theta_{t+1})]\} \quad (3.9)$$

Sous contrainte les conditions de borne suivantes :

$$V(\pi_\tau/\theta_\tau) = 0 ; K_\tau = 1 \Rightarrow V(\pi_{\tau+i}/\theta_{\tau+i}) = 0 \quad \forall i > 0.$$

K_t est une variable binaire qui prend la valeur 1 quand l'agriculteur se suicide à la période t et 0 sinon. La première condition de borne, $V(\pi_\tau/\theta_\tau) = 0$, indique que la fonction valeur V égale à 0 pour la période finale τ (un décès naturel). La seconde condition, $K_t = 1 \Rightarrow V(\pi_{t+i}/\theta_{t+i}) = 0 \quad \forall i > 0$, précise que la décision de suicide est irréversible.

Avant d'arriver à la résolution proprement dite de notre programme d'optimisation intertemporel, il est important d'analyser la logique de ce problème d'optimisation à grands traits. La « fonction objectif » ci-dessus suppose que l'agriculteur reçoit une utilité instantanée égale à zéro s'il opte en faveur du suicide. Le terme $E_t V(\pi_{t+1}/\theta_{t+1})$ désigne la valeur actuelle de son flux d'espérance d'utilités futures, associés à l'utilisation de semences transgéniques, étant donnée la décision K_t prise à la période t . En d'autres termes, c'est la moyenne des utilités futures possibles pondérées par leurs probabilités d'occurrence (c'est-à-dire les probabilités de ne pas commettre un suicide pour chaque période).

On nomme V_{t+1}^* la valeur maximale possible de l'utilité associée à la période $t+1$ sachant que $K_t = 0$. $K_{t+1,t} = E_t[K_{t+1}/K_t = 0]$ renvoie à la probabilité, évaluée par l'agriculteur, de commettre un suicide à la période $t+1$. Maintenant le problème consiste à déterminer dans l'ensemble des réponses possibles celles qui correspondent aux décisions optimales de l'agriculteur lorsqu'il fait face à un risque θ_t (associé à la culture des semences transgéniques) étant donné la valeur du profit π_t . Ainsi, pour toute période $t < \tau$, la solution du problème (8), est donnée comme suit :

⁹⁴ La nature récursive du modèle permet l'utilisation de cette approche.

$$K_t^* = \begin{cases} 1 & \text{si } U(\pi_t) - \theta_t + \beta E_t V^*(\pi_{t+1}/\theta_{t+1}) < 0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.10)$$

où

$$E_t V^*(\pi_{t+1}/\theta_{t+1}) = E_t \left\{ \sum_{i=0}^{\tau-(t+1)} \beta^i U_{t+1+i}(\pi_{t+1+i}) + \theta_{t+1+i} \right\} (1 - K_{t+1+i,t+i}) \quad (3.11)$$

L'expression (3.11) désigne les relations fonctionnelles récursives reliant les fonctions valeurs aux dates successives. Ainsi, la décision de l'agriculteur sera résumée par la proposition suivante :

Proposition 3.4 :

Sachant que la fonction de valeur V est continue et décroissante en θ_t , il existe un unique θ_t^ satisfaisant la relation $V(\pi_t/\theta_t^*) = 0$ tel que :*

1. *si $\theta_t > \theta_t^*$ alors $V(\pi_t/\theta_t) < 0$ et l'agriculteur choisira de se suicider ($K_t = 1$).*
2. *si $\theta_t < \theta_t^*$ alors $V(\pi_t/\theta_t) > 0$ et l'agriculteur décidera de ne pas attenter à sa vie ($K_t = 0$).*

Preuve (cf. annexe A.3.2)

Corollaire :

Pour un θ_t^ (une réalisation de la variable aléatoire θ_t), il existe un seuil économique de nuisibilité \bar{N}_t^* en dessous duquel l'agriculteur choisira le suicide.*

La composante aléatoire de l'utilité θ_t dépend du degré de résistance à la toxine Bt^{95} (la statique comparative est fournie en annexe 4). Etant donné le niveau critique $\theta_t^* = \theta(\bar{N}_t^*)$, il existe un seuil de tolérance économique \bar{N}_t^* telle que la valeur d'utilité associée au suicide est égale à la valeur de la somme entre l'utilité présente et le flux d'utilités futures espérées, soit $U(\pi_t) + \beta E_t V(\pi_{t+1}/\theta_{t+1})$. Ainsi, le cultivateur du coton Bt ne va pas atteindre à ses jours tant que le niveau de population de ravageurs cibles n'a pas dépassé un seuil de tolérance économique \bar{N}_t^* . A cet effet, si le niveau de la population d'insectes cibles est poussé au-delà du seuil de tolérance, le niveau d'utilité espérée devient négative et par conséquent

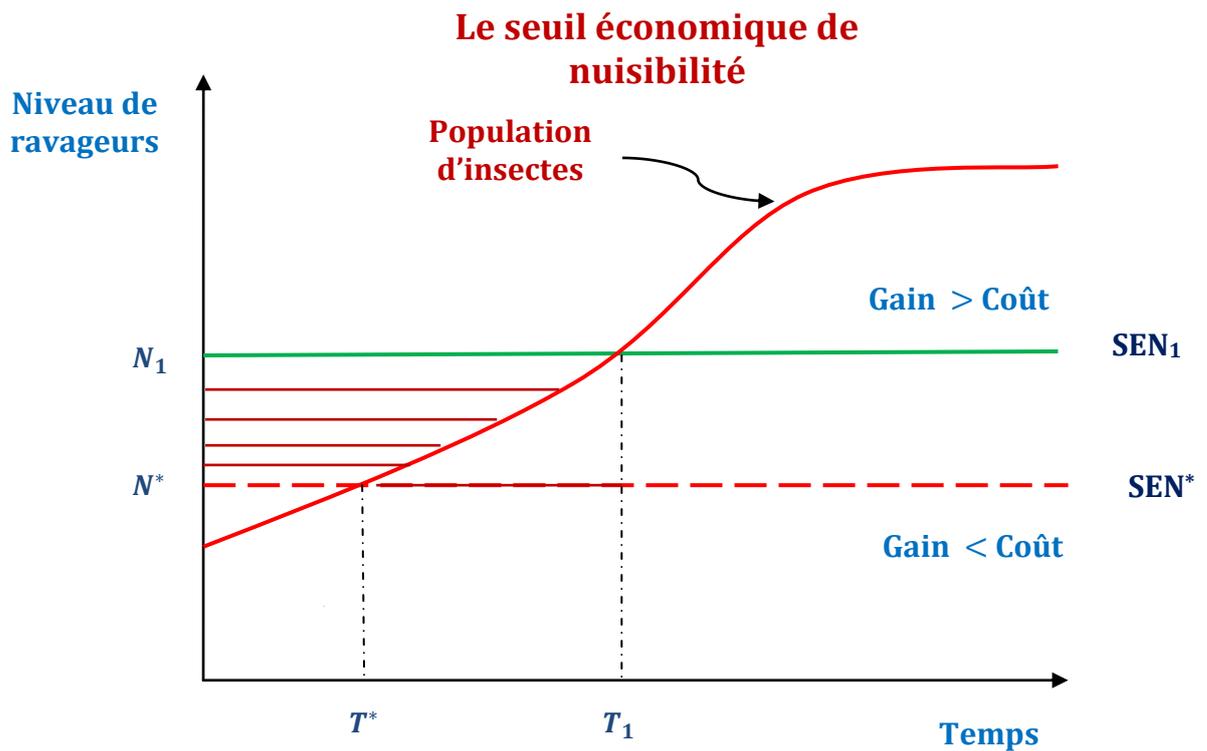
⁹⁵ L'accroissement de N_t (le niveau de pression exercé par les insectes ravageurs).

l'agriculteur choisira le suicide qui lui rapporte une valeur d'utilité nulle⁹⁶. En effet, à mesure que la population d'insectes développe une résistance aux toxines *Bt*, la pression exercée par ces ravageurs sur la récolte provoque des pertes considérables de rendements et les agriculteurs seront désormais contraints de recourir à une quantité sans cesse croissante de pesticides. Ainsi, la décision d'opter en faveur des pesticides doit être économiquement justifiée et fondée sur le seuil de nuisibilité économique (Proposition 3.1). En Inde, l'efficacité et la rentabilité du coton *Bt* sont remises en cause parce que la taille de la population de ravageurs, qui deviennent résistants aux toxines *Bt*, a franchi le seuil de nuisibilité économique et le prix des semences a fortement crû (cf. Fig. 3.3).

En effet, l'exposition prolongée de ces insectes à la protéine *Bt* stimule le développement de résistance chez les ravageurs. La baisse de l'efficacité de ces toxines entraîne l'emploi de quantités intensives de pesticides ce qui renforce la dépendance à l'égard des produits chimiques et génère ainsi des coûts économiques et écologiques considérables. En fait, les dépenses en pesticides, pour contrer les insectes résistants, peuvent coûter plus cher comparées à la situation où l'agriculteur recourt à des semences conventionnelles, en particulier si on examine les prix élevés des variétés transgéniques⁹⁷. Les petits paysans se retrouvent ainsi pris dans une véritable spirale infernale d'endettement, ce qui entraîne un accroissement régulier du nombre de suicides parmi eux.

⁹⁶ Notre modèle ne prend pas en considération les motivations philosophiques, autopsies psychologiques et autres données biopsychosociales du suicide comme la peine, la dépression, le stress. Pour un panorama complet sur la question, cf. Appleby et al. (1999).

⁹⁷ L'étude menée par Qayum et Sakhari (2005), durant la période 2002-2005, conclut qu'après trois ans d'adoption du coton OGM, les dépenses en pesticides s'élèvent à Rs. 1351 par acre pour les cultivateurs du coton transgénique contre Rs. 1311 pour les producteurs du coton conventionnel.



Source : auteur

Figure 3.3 : La perte en usage de pesticides suite au développement de résistance

SEN_1 : désigne le seuil économique de nuisibilité avant l'apparition de la résistance aux toxines *Bt* (la taille de la population de lépidoptères correspondante est égale à N_1).

SEN^* : renvoie au seuil économique de nuisibilité après l'apparition de la résistance aux toxines *Bt* (la taille de la population de lépidoptères correspondante est égale à N^*).

T_1 et T^* s'apparentent aux dates d'utilisation de pesticides sachant que $T^* < T_1$.

3.3 Conclusion

La technologie transgénique est associée à un facteur de risque qui dépend du degré de résistance de l'insecte ravageur du coton à la toxine *Bt*. Ainsi, à mesure que la population d'insectes développe une résistance contre ces toxines, la pression exercée par ces ravageurs sur la récolte provoque des pertes considérables de rendements. Afin de répondre à cette problématique, nous avons tenté de formuler un modèle théorique décrivant le comportement du cultivateur de coton qui est à la fois producteur et consommateur⁹⁸. Cette modélisation a révélé quatre principaux résultats.

Primo, quand les insectes ravageurs, ciblés par les semences transgéniques, développent une résistance à la toxine transgénique, le cultivateur peut retarder l'application des doses supplémentaires des pesticides, tant que la taille de la population de ravageurs n'a pas atteint un seuil économique de nuisibilité. Ce seuil de tolérance (*cf.* Fig.3.1) est représenté par la taille de la population de ravageurs qu'un agriculteur peut admettre sans un grand risque pour sa récolte. Au-dessous du seuil économique de nuisibilité les dégâts sont généralement acceptables et les dommages observés n'entraînent pas indubitablement une perte de rendement. En effet, la présence d'une certaine densité d'insectes ravageurs n'empêche pas d'obtenir un rendement conséquent. Bien que les dégâts causés par les ravageurs paraissent, au début, significatifs, les véritables pertes de rendement peuvent être faibles et ne nécessitent pas des mesures de lutte chimiques tant que le niveau des dommages suscités par les insectes n'a pas atteint le seuil économique de nuisibilité. Ce seuil est atteint si la variation du taux d'efficacité des pesticides (la réduction relative dans la population de ravageurs suite à une augmentation de la quantité des pesticides utilisée) est inversement proportionnelle à l'amplitude de la variation des dommages, causés par les insectes ravageurs, suite à une augmentation de la taille de la population d'insectes (*cf.* Fig. 3.2).

Secundo, tant que les insectes ravageurs n'ont pas atteint le seuil économique de nuisibilité, les quantités de pesticides augmentent avec l'accroissement respectif du prix de l'*output* et du rendement potentiel ; par contre lorsque le prix de pesticides est à la hausse alors les quantités de produits chimiques utilisées décroissent. Ces propriétés restent valables uniquement durant la première phase de l'adoption du coton *Bt*.

Tertio, une baisse de la productivité marginale de semences transgéniques implique une baisse proportionnelle du taux de réduction des dommages. En d'autres termes, la réduction

⁹⁸ Le modèle producteur/consommateur offre un cadre commode pour étudier l'impact de développement de résistance chez les insectes sur l'utilité de l'agriculteur.

de l'efficacité du coton transgénique induit une augmentation proportionnelle du niveau des dégâts causés par les insectes et les fermiers finissent par employer des quantités supplémentaires de pesticides. La baisse rapide de la rentabilité économique de la culture du coton *Bt* est due à l'augmentation des coûts d'exploitation.

Enfin, le modèle semble fournir une explication décrivant le comportement de cultivateur du coton *Bt* vis-à-vis d'un facteur de risque qui spécifie la prédisposition de l'agriculteur au suicide. Ce facteur de risque varie en fonction du degré de résistance des insectes ravageurs aux protéines *Bt*. La rationalité qui incite l'agriculteur à choisir entre le suicide ou continuer de vivre dépend essentiellement d'un seuil critique de risque qui résulte à son tour du seuil économique de nuisibilité. Si le niveau de la population d'insectes arrive au-delà du seuil de tolérance, l'utilité devient négative et par conséquent l'agriculteur choisira le suicide qui lui rapporte une valeur d'utilité nulle, *ad vitam aeternam*.

ANNEXES DU CHAPITRE 3

A.3.1 : La démonstration de la proposition 3.3

$$p_y f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)(1 - D(N_t)h(x_t)\delta_t) = p_s(1 + r)$$

$$p_y \frac{\partial f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)}{\partial \delta_t} (1 - D(N_t)h(x_t)\delta_t) - p_y f_s(L_t, s_t, \epsilon_t) \frac{\partial D(N_t)}{\partial N_t} N_t h(x_t) = 0$$

$$\frac{\frac{\partial f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)}{\partial \delta_t}}{f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)} = \frac{\frac{\partial D(N_t)}{\partial N_t} N_t h(x_t)}{(1 - D(N_t)h(x_t)\delta_t)}$$

En multipliant les deux termes par δ_t on aura :

$$\frac{\frac{\partial f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)}{\partial \delta_t}}{f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)} \frac{\delta_t}{f_s(L_t, s_t, \epsilon_t)} = - \frac{\frac{\partial (1 - D(N_t))}{\partial N_t} N_t}{(1 - D(N_t))}$$

$$e_{f_s/\delta} = -e_{(1-D)/N}$$

Le terme à gauche désigne le taux de variation de la productivité marginale des semences *Bt* suite à un accroissement δ_t et le terme à droite indique le taux de variation de réduction des dommages par rapport à un accroissement du niveau de pression exercée par les ravageurs.

A.3.2 : La démonstration de la proposition 3.4

Le signe de la quantité $H = [U(\pi_t, x_t) - \theta_t + \beta E_t V^*(x_{t+1}/\theta_{t+1})]$, qu'il soit positif ou négatif, est entièrement déterminé par la valeur de θ_t (la composante de risque). Sachant que H est une fonction continue et monotone décroissante en θ_t , pour un x_t donné, il existe ainsi une valeur critique θ_t^* tel que pour tout $\theta_t > \theta_t^*$ la valeur de $[U(\pi_t, x_t) - \theta_t + \beta E_t V^*(x_{t+1}/\theta_{t+1})]$ devient négative et l'agriculteur peut choisir de commettre un acte de suicide.

A.3.3 : Statique comparative

La question posée est : quelle est la sensibilité du choix optimal aux paramètres ? On parle d'analyse de sensibilité ou de statique comparative : elle a pour objet de comparer les choix optimaux suite à une modification marginale des paramètres du problème. En d'autres termes, comme son nom l'indique, la statique comparative consiste à comparer une situation d'équilibre par rapport comparée à la situation résultant d'un changement dans la valeur d'une variable exogène.

Les résultats de statique comparative sur la décision du suicide reposent sur l'utilisation du théorème des fonctions implicites à la réalisation de la variable aléatoire $\theta(N_t)$ appelée $\theta^*(N_t)$. On définit l'équation $F(x_t, \theta^*) = U(\pi_t, x_t) - \theta_t^* + \beta E_t V^*(x_{t+1}/\theta_{t+1}^*) = 0$ de classe C^1 qui admet la solution unique $\theta_t^* = \varphi(N_t)$. La fonction implicite $\theta_t^* = \varphi(N_t)$ est de classe C^1 et a une dérivée partielle égale à :

$$\frac{\partial \theta_t^*}{\partial N_t} = -\frac{\partial F / \partial N_t}{\partial F / \partial \theta_t^*} = -\left[\frac{\partial U(\pi_t, x_t)}{\partial N_t} + \beta \frac{\partial E_t V^*(x_{t+1}/\theta_{t+1}^*)}{\partial N_t} \right] \frac{1}{\partial F / \partial \theta_t^*}$$

Sachant que :

$$\frac{\partial E_t V^*(\pi_{t+1}/\theta_{t+1}^*)}{\partial N_t} = \sum_{i=0}^{\tau-(t+1)} \beta^i \left[\frac{\partial U(\pi_{t+1+i}, x_{t+1+i})}{\partial N_t} (1 - K_{t+1+i, t+i}) - \frac{\partial K_{t+1+i, t+i}}{\partial N_t} U(\pi_{t+1+i}, x_{t+1+i}) \right]$$

Il est clair que $\frac{\partial F}{\partial \theta_t^*} = -1$ et le signe de $\frac{\partial \theta_t^*}{\partial N_t}$ dépend ainsi de signe de $\frac{\partial U(\pi_t, x_t)}{\partial N_t} + \beta \frac{\partial E_t V^*(x_{t+1}/\theta_{t+1}^*)}{\partial N_t}$. On a donc :

$$\frac{\partial \theta_t^*}{\partial N_t} = \frac{\partial U(\pi_t, x_t)}{\partial N_t} + \beta \frac{\partial E_t V^*(x_{t+1}/\theta_{t+1}^*)}{\partial N_t}$$

Où $\frac{\partial U(\pi_t)}{\partial N_t}$ et $\frac{\partial E_t V^*(\pi_{t+1}/\theta_{t+1}^*)}{\partial N_t}$ désignent l'effet de l'évolution de la résistance des insectes cibles aux toxines *Bt* respectivement sur l'utilité présente et sur les utilités futures de l'agriculteur. Il en découle que l'équation (12) peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{\partial \theta_t^*}{\partial N_t} = \frac{\partial U(\pi_t, x_t)}{\partial N_t} + \sum_{i=0}^{\tau-(t+1)} \beta^i \left[\frac{\partial U(\pi_{t+1+i}, x_{t+1+i})}{\partial N_t} (1 - K_{t+1+i, t+i}) - \frac{\partial K_{t+1+i, t+i}}{\partial N_t} U(\pi_{t+1+i}, x_{t+1+i}) \right]$$

Il est simple de vérifier que le signe de $\frac{\partial \theta_t^*}{\partial N_t}$ soit négatif.



La carte administrative de l'Inde (source : l'Encyclopédie Universalis, 2008)

CHAPITRE 4

L'ADOPTION DU COTON *BT* ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE : SECOND ESSAI THÉORIQUE

4.1 Introduction :

En 2002, le gouvernement indien a autorisé l'utilisation du coton génétiquement modifié. Aujourd'hui, cette culture occupe environ 90% de la superficie totale du coton. Ces variétés biotechnologiques contiennent des bactéries produisant la toxine *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) qui semble très efficace contre certains lépidoptères. Bien que les variétés *Bt* coûtent deux à trois fois plus chères que le coton conventionnel, les agriculteurs peuvent gagner plus avec la technologie *Bt* grâce à des économies sur les dépenses en pesticides (Qaim et Zilberman, 2003). Dans ce contexte, le coton transgénique est considéré comme une solution intéressante pour réduire les quantités utilisées en pesticides et produire un gain de rendement. Cependant, contre toute attente, l'efficacité de cette technologie a diminué, au cours du temps, à cause des insectes qui ont développé une résistance⁹⁹ aux toxines *Bt*.

En 2009, les chercheurs de la multinationale d'agbiothec *Monsanto* ont découvert dans certaines régions de l'Etat du Gujarat (Amreli, Bhavnagar, Junagarh et Rajkot) que le ver du cotonnier est devenu résistant au coton génétiquement modifié et par conséquent la technologie *Bt* n'est plus efficace pour détruire les vers de la capsule du coton. C'est le premier exemple de la résistance au gène *Bt* qui a été confirmé par *Monsanto* dans le monde entier¹⁰⁰. La capacité des toxines *Bt* à éliminer le ver du coton peut donc diminuer au cours du temps, ce qui oblige l'agriculteur à augmenter les doses de pesticides. Afin de lutter contre ce type de ravageurs, les coûts des pesticides, peuvent de loin dépasser les dépenses en produits phytosanitaires associées aux variétés conventionnelles, en particulier si on prend en considération les prix élevés du coton *Bt*. Les petits agriculteurs se retrouvent dans un grave problème d'endettement, ce qui entraîne un accroissement régulier du nombre de suicides parmi eux.

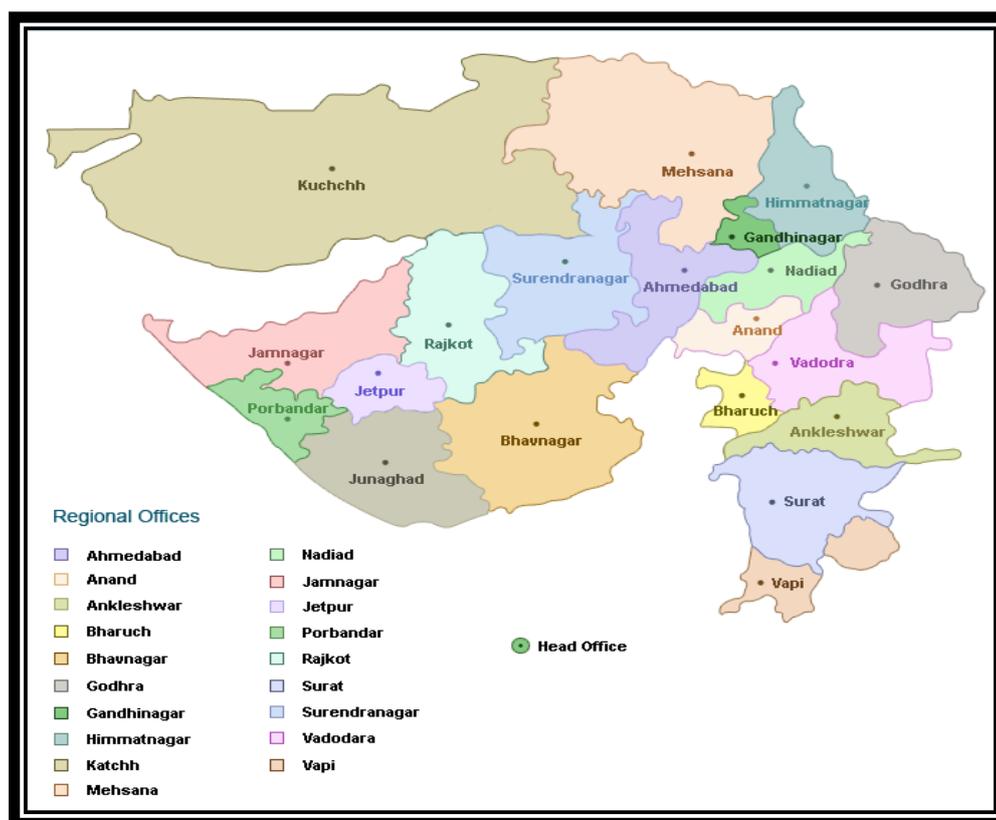
Le deuxième problème des variétés *Bt* qui vient d'émerger, c'est l'apparition des insectes nuisibles secondaires tels les punaises¹⁰¹ (*Creontides biseratence*). En se débarrassant des ravageurs primaires (les vers de la capsule du cotonnier), le coton génétiquement modifié leur laisse place nette. Wang *et al.* (2008) ont confirmé que la culture de coton *Bt* sur une large

⁹⁹ The buildup of resistance in the pest population.

¹⁰⁰ Cotton in India (<http://www.monsanto.com/newsviews/Pages/india-pink-bollworm.aspx>)

¹⁰¹ La punaise terne est parmi les insectes nuisibles du coton. Les agriculteurs ont utilisés les insecticides pour lutter contre la punaise terne et d'autres ravageurs comme le ver de la capsule. Selon des entomologistes de l'université américaine *Mississippi State University*, depuis la généralisation de la culture du coton *Bt* et la réduction des quantités de pesticides utilisées, la punaise terne est devenue le plus important insecte nuisible du coton.

superficie entraîne l'émergence rapide de ravageurs secondaires, ce qui augmente l'utilisation de pesticides et engendre ainsi des coûts supplémentaires pour les paysans. Les ravageurs secondaires, contre lesquels la protéine *Bt* reste inefficace, sont devenus un sérieux problème. Les agriculteurs doivent donc pulvériser encore plus de pesticides pour contrôler ces insectes qui n'étaient pas un réel problème avant (ces insectes secondaires ne nécessitaient pas de traitement chimique avant l'avènement du coton-*Bt*).



Source : <http://www.mapsofindia.com/maps/gujarat/gujarat.htm>

Figure 4.1 : Les districts de l'Etat de Gujarat

Notre objectif dans ce chapitre est de mettre en avant un problème systématiquement occulté dans la littérature portant sur les suicides des agriculteurs du coton *Bt* en Inde. En effet, les insectes ravageurs peuvent développer au cours du temps une certaine résistance contre la toxine *Bt*. Ainsi, la capacité des toxines *Bt* à éliminer les vers de la capsule du coton baisse graduellement, ce qui oblige l'agriculteur à augmenter les doses de pesticides appliquées. Ainsi, les dépenses du paysan augmentent en diminuant sa capacité pour rembourser le crédit et ses intérêts. Ce qui entraîne le suicide des agriculteurs en raison de leur surendettement.

Dans une première section nous proposons de reprendre la fonction de réduction de dommages (*abatement function*) proposée par Lichtenberg et Zilberman (1986). Ces auteurs affirment qu'il serait possible de mieux comprendre la contribution des agents de contrôle (pesticides, semences transgéniques...) à la production si l'on considère *l'output* réalisé comme étant une combinaison de *l'output* potentiel (la quantité maximale de produits qu'il est possible d'obtenir) et des dommages causés par les insectes ravageurs présents dans l'environnement. Ces auteurs concluent, qu'il est inexact d'introduire directement les agents de contrôle à l'intérieur de la fonction de production car ils ne contribuent pas à l'augmentation de la production de manière directe comme les *inputs* traditionnels. Ainsi, la productivité des agents de contrôle ne doit pas être définie en termes de leur apport à la production mais plutôt en termes de leur contribution dans l'effort de réduction des dommages.

Dans ce contexte, nous contribuons à la littérature en proposant un modèle d'optimisation dynamique qui cherche à déterminer les conditions optimales d'utilisation des pesticides et les semences transgéniques par le cultivateur du coton *Bt*. En effet, la condition optimale d'utilisation de pesticides doit prendre en considération la résistance des insectes ravageurs aux pesticides au cours du temps. Pareillement pour l'utilisation des semences transgéniques, la condition d'optimalité doit tenir compte de la résistance des insectes cibles aux toxines *Bt*. Nous proposons ensuite un exercice de statique comparative¹⁰² en analysant l'impact de la variation de degré de résistance des insectes ravageurs aux pesticides et à la toxine *Bt* sur les quantités utilisées (de semences transgéniques et de pesticides).

En outre, le chapitre contribue également à la littérature portant sur l'impact de l'adoption du coton *Bt* sur le suicide des agriculteurs en Inde. La théorie du choix rationnel postule que les individus seraient davantage poussés à se suicider à mesure que la valeur présente de son utilité intertemporelle durant sa vie active baisse en dessous d'un certain seuil (Hamermesh et Soss, 1974). On a proposé une extension du modèle de Hamermesh et Soss (1974) en déterminant le gain net du seuil (le gain net minimum) au-dessous duquel le suicide devient un choix optimal. Tout en supposant que le gain net suit un processus de Wiener, le seuil est calculé en fonction des paramètres associés à ce processus stochastique. Ces paramètres sont la valeur espérée du taux de croissance du gain net relatif à la culture du coton *Bt*, sa variance

¹⁰² La statique comparative est utilisée pour mesurer l'évolution des variables du modèle à l'équilibre suite à des changements de paramètres auxquels dépendent ces variables.

et la probabilité de saut du gain net vers le bas associé à l'apparition du phénomène de résistance des insectes aux toxines *Bt* et/ou le problème de la multiplication des ravageurs secondaires. Enfin, on calcule l'impact des changements de ces paramètres sur la décision de suicide de l'agriculteur.

4.2 Présentation du modèle :

4.2.1 Le problème du producteur de coton

Considérons un agriculteur qui utilise les pesticides et les semences pour produire le coton. On suppose qu'il est placé dans une situation d'un preneur de prix du coton désigné par p . L'agriculteur décide d'adopter les semences du coton génétiquement modifié (le coton *Bt*) et par conséquent le choix technologique est une décision jointe sur les quantités utilisées des semences et des pesticides. Soient x_t et z_t respectivement les quantités de pesticides¹⁰³ et de semences transgéniques utilisées par le cultivateur de coton. Les prix des semences génétiquement modifiées sont supposés exorbitants et par conséquent le fermier n'a pas les moyens pour acquérir les nouvelles semences et les pesticides que par le biais d'un crédit. Etant donné ces coûts, l'agriculteur décide de contracter un emprunt L_t pour la saison agricole t à un taux d'intérêt r . On suppose que les prix des semences transgéniques et des pesticides sont donnés respectivement par c et w . Ainsi, $L_t = cz_t + wx_t$ et à la fin de la saison agricole l'agriculteur doit rembourser le montant $(1 + r)L_t$.

Puisque le modèle de Lichtenberg et Zilberman (1986)¹⁰⁴ traduit bien l'effet des intrants de contrôle (semences et pesticides) sur la culture¹⁰⁵, nous utiliserons donc l'idée principale de leur modèle dans la présente étude. Ainsi, y_t qui désigne le rendement par unité de la terre, plantée par la nouvelle variété des semences, sera donné par la forme suivante :

$$y_t = \epsilon_t y_t^0 [1 - D(N_{1t}, N_{2t})] \quad \text{Pour } t = 1, \dots, \tau \quad (4.1)$$

¹⁰³ La quantité des pesticides utilisée vise à la fois les deux types de pestes (primaires et secondaires)

¹⁰⁴ Lichtenberg et Zilberman (1986) discutent de la modélisation des moyens de contrôle du dommage et de leur efficacité et fournissent également des spécifications de fonction de production adaptées au problème du contrôle des nuisibles (qui peut s'apparenter à celui des espèces invasives générant des dommages).

¹⁰⁵ Leur modèle évite également de créer un biais au niveau de la productivité marginale des intrants.

Où y_t^Q s'apparente au niveau d'output maximal potentiel¹⁰⁶ que l'agriculteur peut réaliser avec les semences transgéniques durant la saison agricole¹⁰⁷ t . L'agriculteur encourt un risque de production parce que le rendement de la culture est affecté par les conditions climatiques incertaines (comme les conditions météorologiques). Ce risque est représenté par une variable aléatoire ϵ_t définie par une fonction de répartition $F(\cdot)$.

La fonction de production est supposée deux fois continument différentiables et concave par rapport à ses arguments (les pesticides et les semences Bt). La fonction $D(N_{1t}, N_{2t})$ désigne la proportion de dommage provoqué par la population de ravageurs primaires N_{1t} et secondaires N_{2t} après l'utilisation des pesticides et/ou les semences Bt . La fonction de dommage est contrainte dans l'intervalle $[0, 1]$ et elle possède les mêmes propriétés qu'une distribution de probabilité cumulative. Par conséquent, lorsque $N = 0$ alors $D(N) = 0$ et le rendement potentiel y^Q est réalisé, par contre lorsque $N \rightarrow \infty$ alors $D(N) \rightarrow 1$ et le niveau du rendement réalisé est presque nul ($y \rightarrow 0$). La fonction de dommage est supposée croissante par rapport à la population d'insectes (primaire et secondaire) à un taux croissant ($\frac{\partial D}{\partial N_t} > 0, \frac{\partial^2 D}{\partial N_t^2} \geq 0$). La population d'insectes primaires (les vers de la capsule du cotonnier) s'écrit sous la forme suivante :

$$N_{1t} = N_1^0 h(x_t, z_t) \quad (4.2)$$

$$\text{où : } X_{1t} = \frac{\partial h(x_t, z_t)}{\partial x_t} \text{ et } B_t = \frac{\partial h(x_t, z_t)}{\partial z_t}$$

Où N_1^0 désigne la population initiale des ravageurs primaires¹⁰⁸. X_{1t} s'assimile à la fraction des insectes ravageurs primaires survivants après l'utilisation des pesticides. B_t mesure le pourcentage des insectes ravageurs primaires qui *résistent* les toxines Bt , avec $0 \leq B_t \leq 1$.

En effet, les variétés Bt ne peuvent pas lutter, à elles seules, contre tous les insectes, car ces semences restent relativement efficaces seulement contre les principaux insectes ravageurs du coton (les vers de la capsule du coton). Un taux d'application élevé des

¹⁰⁶ Le rendement maximal potentiel est celui obtenu à partir des cultures produites dans des parcelles et dans des conditions expérimentales, avec recours maximum aux dernières technologies et ressources. C'est le rendement le plus élevé envisageable pour une variété donnée, cultivée dans les conditions idéales.

¹⁰⁷ Qui dit agricole dit saison et qui dit saison dit une année solaire.

¹⁰⁸ La taille de la population de peste non traité (Litchenberg et Zilberman, 1986)

pesticides est supposé réduire le taux de survie des insectes ravageurs mais son impact est décroissant, ainsi la productivité marginale des pesticides est décroissante :

$$\frac{\partial X_t}{\partial x_t} < 0 \text{ et } \frac{\partial^2 X_t}{\partial x_t^2} < 0.$$

Biologiquement, les insectes ravageurs primaires croissent à un taux naturel. Ces insectes nuisibles sont supprimés par l'utilisation des pesticides et/ou des semences *Bt*. Ainsi, l'évolution de la taille des ravageurs primaires dans le temps pourrait être exprimée comme suit :

$$\dot{N}_{1t} = \frac{dN_{1t}}{dt} = \varphi_1 + \alpha_1 N_{1t} + \eta_1 x_t + \gamma z_t \quad (4.1.a)$$

Où \dot{N}_{1t} représente le taux de croissance net des ravageurs primaires (les vers de la capsule du cotonnier), le taux de croissance constant de la population des ravageurs est nommé φ_1 , α_1 indique le taux de croissance naturel des ravageurs, η_1 et γ mesurent respectivement les impacts de l'utilisation des pesticides et des semences *Bt* sur le taux de croissance des insectes ravageurs. α_1 est positif parce que la population des insectes s'accroît, η_1 est négatif parce que les pesticides permettent de combattre les insectes ravageurs et les maladies qui affectent chaque saison la récolte et γ est négatif parce que la technologie *Bt* permet de produire des toxines nocives contre les insectes d'ordre lépidoptères.

Plus les semences transgéniques sont utilisées, plus fort sera le risque de développement d'une résistance aux toxines *Bt*. Ainsi, la capacité de la protéine *Bt* à éliminer les vers de la capsule du coton diminue après quelque temps, ce qui oblige l'agriculteur à augmenter les doses de pesticides. L'utilisation de la technologie *Bt* est donc censée aider le fermier du coton en lui permettant de réduire les quantités des pesticides utilisées et par conséquent d'abaisser ses coûts. Cependant, l'impact de l'adoption des semences *Bt* sur l'utilisation des pesticides est décroissant à travers le temps (cf. Fig. 4.1).

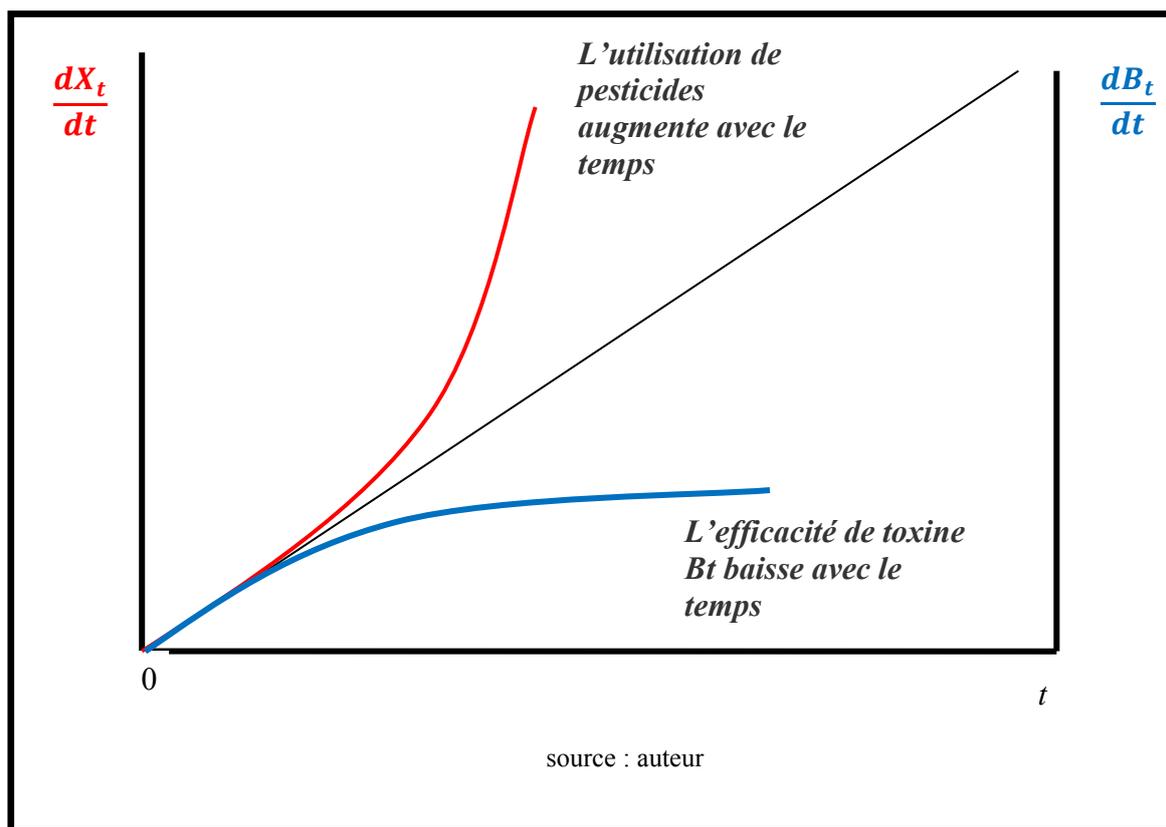


Figure 4.2 : L'évolution de quantités de pesticides et de l'efficacité de la toxine de Bt au cours du temps

De même, l'utilisation généralisée de semences *Bt* a entraîné un dommage économique provoqué par des insectes ravageurs qui étaient secondaires au moment où l'agriculteur utilisait les variétés conventionnelles car ils n'engendrent pas des pertes conséquentes (Wang *et al.*, 2008). Les coûts additionnels pour lutter contre les ravageurs secondaires peuvent dépasser les économies sur les pesticides réalisées avec les semences transgéniques.

Les insectes secondaires nuisibles sont supprimés par l'utilisation des pesticides parce que le coton *Bt* n'apporte aucun contrôle sur ce type d'insectes. Ces derniers ont pris la place des vers du coton. Ainsi, l'évolution de la taille des ravageurs secondaires au cours du temps, qui croissent à un taux naturel, pourrait être exprimée comme suit :

$$\dot{N}_{2t} = \varphi_2 + \alpha_2 N_{2t} + \eta_2 x_t \quad (4.1.b)$$

Où \dot{N}_{2t} représente le taux de croissance net des insectes ravageurs secondaires (la punaise terne), φ_2 désigne le taux de croissance constant de la population des ravageurs, α_2 indique le

taux de croissance naturel des ravageurs, η_2 mesure l'impact de l'application des pesticides sur le taux de croissance des insectes ravageurs.

α_2 est positif parce que la taille de la population des insectes secondaires s'accroît après l'adoption du coton Bt (suite à la diminution de l'utilisation de pesticide), η_2 est négatif parce que les pesticides permettent de détruire les ravageurs secondaires. La taille de la population d'insectes secondaires s'écrit sous la forme suivante :

$$N_{2t} = N_2^0 g(x_t) \quad (4.3)$$

avec : $X_{2t} = \frac{\partial g(x_t)}{\partial x_t}$

Où N_2^0 désigne la population initiale des ravageurs secondaires et X_{2t} définit la fraction des ravageurs secondaires survivants après l'utilisation des pesticides.

Soit π_t le profit par hectare associé à l'utilisation de la technologie Bt durant la saison agricole t :

$$\pi_t = p\epsilon_t y_t^Q [1 - D(N_{1t}, N_{2t})] - (cz_t + wx_t) \quad (4.4)$$

On désigne par E_ϵ l'espérance mathématique de la variable aléatoire ϵ_t . L'espérance du gain net pourrait donc s'écrire de la manière suivante :

$$E_\epsilon \left\{ \int_0^\tau [\pi_t - rL_t] e^{-\delta t} dt \right\} \quad (4.5)$$

Le fermier, qui est supposé neutre vis-à-vis du risque, maximise l'espérance de la valeur actuelle de revenu net avec un taux d'actualisation arbitraire $\delta > 0$ sous contrainte des équations du mouvement de l'évolution des tailles des insectes (primaires et secondaires).

Ainsi, le programme d'optimisation pourrait s'écrire de la façon suivante :

$$\max_{\{x_t, z_t\}} E_\epsilon \left\{ \int_0^\tau [\pi_t - rL_t] e^{-\delta t} dt \right\} \quad (4.6)$$

Sous contraintes :

$$\dot{N}_{1t} = \varphi_1 + \alpha_1 N_{1t} + \eta_1 x_t + \gamma z_t$$

$$\dot{N}_{2t} = \varphi_2 + \alpha_2 N_{2t} + \eta_2 x_t$$

$$N_1(0) = N_0^1$$

$$N_2(0) = N_0^2$$

L'objectif consiste à maximiser, sur un horizon fini, la somme actualisée des bénéfices courants π procurés par l'exploitation du coton Bt, nets des intérêts de la dette, tels que définis par le programme (4.6) supra. Le programme (4.6) est un problème du contrôle optimal (cf. Annexe A.4.1). Ainsi, il consiste à chercher le maximum de la fonction $H(t)$ dite l'Hamiltonien en valeur courante qui s'écrit sous cette forme :

$$H(t, N_t, z_t, \lambda_t) = E_\varepsilon[\pi_t - rL_t] + \lambda_t(\varphi_1 + \alpha_1 N_{1t} + \eta_1 x_t + \gamma z_t) + \phi_t(\varphi_2 + \alpha_2 N_{2t} + \eta_2 x_t) \quad (4.7)$$

N_{1t} et N_{2t} sont appelées variables d'état, par contre x_t et z_t représentent les variables de contrôle. λ_t et ϕ_t sont les multiplicateurs de Pontryagin associées respectivement aux variables d'état N_{1t} et N_{2t} . λ_t et ϕ_t sont continument différentiables sur $[0, \tau]$. La variable λ_t représente la valeur du dommage marginal subi par l'agriculteur (associé à l'augmentation de la taille de la population d'insectes primaires en t). De façon analogue, ϕ_t peut s'interpréter comme la valeur du dommage marginal subi par le fermier (associé à l'augmentation de la taille de la population d'insectes secondaires en t). L'évolution des variables adjointes courantes λ_t et ϕ_t au cours du temps est donnée par les dérivées du Hamiltonien courant par rapport aux variables d'état N_{1t} et N_{2t} . Compte tenu des contributions respectives de N_{1t} et N_{2t} à la fonction objectif, on a normalement $\lambda_t \leq 0$ et $\phi_t \leq 0$ (cf. annexe A.4.5). La solution de ce système est décrite par les conditions, nécessaires et suffisantes, résultants de l'Hamiltonien en valeur courante (cf. annexes A.4.2 et A.4.3).

Solution du programme :

Les conditions nécessaires sont déduites de la maximisation du Hamiltonien courant :

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial x_t} = 0 \Rightarrow E_\varepsilon \left[\frac{\partial \pi(x_t, z_t)}{\partial x_t} \right] - r \frac{\partial L(x_t, z_t)}{\partial x_t} + \lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2 = 0 \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial z_t} = 0 \Rightarrow E_\varepsilon \left[\frac{\partial \pi(x_t, z_t)}{\partial z_t} \right] - r \frac{\partial L(x_t, z_t)}{\partial z_t} + \lambda_t \gamma = 0 \quad (4.9)$$

$$\dot{\lambda}_t - \delta \lambda_t = -\frac{\partial H(\cdot)}{\partial N_{1t}} = -E_\varepsilon \left[\frac{\partial \pi(\cdot)}{\partial N_{1t}} \right] - \lambda_t \alpha_1 \quad (4.10)$$

$$\dot{\phi}_t - \delta \phi_t = -\frac{\partial H(\cdot)}{\partial N_{2t}} = -E_\varepsilon \left[\frac{\partial \pi(\cdot)}{\partial N_{2t}} \right] - \phi_t \alpha_2 \quad (4.11)$$

$$\dot{N}_{1t} = \varphi_1 + \alpha_1 N_{1t} + \eta_1 x_t + \gamma z_t \quad (4.12)$$

$$\dot{N}_{2t} = \varphi_2 + \alpha_2 N_{2t} + \eta_2 x_t \quad (4.13)$$

Auxquelles s'ajoutent également les conditions initiales : $N_1(0) = N_0^1$ et $N_2(0) = N_0^2$ ainsi que celles de la transversalité : $\lambda(\tau) = 0$ et $\phi(\tau) = 0$ (autrement dit le Hamiltonien s'annule au temps final). La solution du système dynamique sera représentée par la suite $\{x_t^*, z_t^*\}$. En cas d'existence d'une solution intérieure, la condition du second ordre nécessite que le déterminant de la Hessienne soit positif (*cf.* annexe A.4.3).

L'équation (4.8) peut-être réécrite comme suit (voir annexe 4.2) :

$$\lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2 = (1 + r)w + E(\varepsilon_t) p y_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 X_{1t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} N_2^0 X_{2t} \right] \quad (4.8.a)$$

L'équation précédente implique que la quantité optimale de pesticides soit déterminée par l'égalité entre la somme de coût marginal des pesticides et celui subit par le fermier suite à une résistance naissante des ravageurs aux pesticides (le terme de droite) et la somme des bénéfices marginaux associés à l'application des pesticides contre les insectes primaires et secondaires (le terme de gauche). Autrement dit, le terme de gauche $\lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2$ désigne le gain marginal réalisé suite à l'utilisation de pesticides (la diminution de la taille des ravageurs à la fois primaires et secondaires). Le terme de droite est composé par le coût marginal associé à l'application de pesticides, $(1 + r)w$, et le coût relatif à la résistance aux pesticides

$$E(\varepsilon_t) p y_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 X_{1t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} N_2^0 X_{2t} \right].$$

Nous tenons à signaler que nous avons pris en considération : 1) la détérioration possible de la résistance des toxines *Bt* aux insectes primaires au cours du temps et 2) l'augmentation potentielle de la population de ravageurs secondaires qui peuvent causer de sérieux dommages. Les dégâts économiques provenant de l'apparition de ravageurs secondaires peuvent être assez graves pour inciter les producteurs à procéder à leur contrôle par la pulvérisation de quantités supplémentaires de pesticides.

La résistance aux pesticides¹⁰⁹ et la multiplication des ravageurs secondaires devraient être reconnues comme des problèmes réels et sérieux pour la réussite de la production du coton transgénique en Inde. L'utilisation excessive de pesticides a pour conséquence la baisse des rendements à cause des résistances des ravageurs aux produits chimiques et par conséquent une réduction considérable des revenus des producteurs de coton.

Le renforcement de la résistance des ravageurs pourrait être considéré comme « une externalité négative » due à l'utilisation intensive des pesticides au cours du temps. Autrement dit, l'externalité négative est liée à l'épuisement de la sensibilité¹¹⁰ aux pesticides dans la population des insectes ravageurs. Selon Jean-Jacques Laffont (1987, p. 263)¹¹¹ : « l'externalité se définit comme l'effet indirect d'une activité de consommation ou de production sur l'ensemble de consommation, la fonction d'utilité d'un consommateur ou l'ensemble des productions d'un producteur. Par indirect, nous entendons que cet effet concerne un agent autre que celui qui exerce l'activité économique et que cet effet ne passe pas par le système de prix ». L'effet est ainsi externe au système de prix et externe aux décisions rationnelles des agents qui le subissent. Dans le cadre de notre modèle, l'externalité est intertemporelle dans le sens où l'utilisation intensive des pesticides et l'introduction de variétés transgéniques aujourd'hui peuvent avoir des effets négatifs en termes des coûts indirects sur son profit futur si des résistances (aux pesticides et/ou aux variétés transgéniques) se développent. Généralement, les coûts supplémentaires, qui seront supportés par les agriculteurs¹¹², ne sont pas prévus par les adoptants de la nouvelle technologie.

¹⁰⁹ La résistance aux pesticides est le résultat de la sélection d'individus génétiquement prédisposés à survivre aux pesticides.

¹¹⁰ La sensibilité au pesticide varie d'une saison à l'autre selon l'évolution de la population des ravageurs et de son patrimoine génétique.

¹¹¹ Cette définition est mentionnée dans le *New Palgrave*.

¹¹² L'apparition d'une épizootie de ravageurs due à l'utilisation excessive de pesticides peut affecter l'ensemble des agriculteurs voisins, même ceux qui n'utilisent pas de tels produits.

Dans le contexte de notre modèle, le revenu marginal résultant de l'utilisation de pesticides est égal au coût marginal de pesticides (coûts directs) plus les coûts associés à la résistance des ravageurs aux pesticides (coûts indirects). Ainsi, le terme $E(\epsilon_t)py_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 X_{1t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} N_2^0 X_{2t} \right]$ désigne l'augmentation des coûts relatifs à la résistance des ravageurs aux pesticides. Ces coûts supplémentaires des pesticides dépendent : *i*) des tailles des insectes ravageurs (primaires et secondaires) résistant l'application des pesticides, *ii*) la variation des dommages à la suite du changement des tailles des insectes (primaires et secondaires), le prix de coton et le risque moyen associé à la récolte du coton *Bt* (risque relatif au développement des résistances aux toxines *Bt* par les insectes ravageurs). Ainsi, en absence du phénomène de la résistance des ravageurs la productivité marginale des pesticides sera égale à son prix $[\lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2 = (1 + r)w]$.

Lemme 4.1 :

Si le fermier prend en compte la contrainte intertemporelle de la résistance des insectes aux pesticides alors le revenu marginal résultant de l'utilisation de pesticides est égal au coût marginal de l'utilisation des pesticides (coûts directs) plus les coûts associés à la résistance des ravageurs aux pesticides (coûts indirects).

$$\underbrace{\lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2}_{\text{le produit marginal}} = \underbrace{(1 + r)w}_{\text{le prix}} + \underbrace{E(\epsilon_t)py_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 X_{1t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} N_2^0 X_{2t} \right]}_{\text{le coût associé à la résistance des ravageurs aux pesticides}}$$

Preuve : résultat direct de la maximisation du programme (4.7) (la condition du premier ordre).

D'autre part, l'équation (4.9) pourrait être réécrite sous la forme suivante (cf. annexe A.4.4) :

$$\lambda_t \gamma = c(1 + r) + pE(\epsilon_t)y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 B_t \quad (4.9.a)$$

La condition (4.9.a) implique que la quantité optimale des semences transgéniques est déterminée par l'égalité entre le revenu marginal des semences *Bt* $[\lambda_t \gamma]$ et la somme du coût marginal des semences transgéniques et le coût associé à la résistance des ravageurs aux

toxines Bt $[c(1+r) + pE(\epsilon_t)y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 B_t]$. L'efficacité de la technologie Bt tend à décroître à travers le temps. Par conséquent, l'évolution de la résistance chez les ravageurs ciblés par les cultures Bt entraîne une utilisation supplémentaire de pesticides afin qu'on puisse contrôler : *primo* les insectes primaires résistants aux toxines Bt ; *secundo* les ravageurs secondaires émergents. L'apparition de cette résistance chez les ravageurs primaires pourrait être qualifiée également comme étant une externalité négative intertemporelle. Ainsi, le terme $pE(\epsilon_t)y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 B_t$ désigne les coûts supplémentaires que le fermier doit subir à la suite du développement d'une résistance à la toxine Bt chez les ravageurs primaires. Ces coûts dépendent de la taille de la population des insectes primaires résistants la toxine Bt, la variation marginale des dommages à la suite de l'évolution de la taille des ravageurs primaires, le prix de l'*output* et le risque moyen associé à la récolte du coton Bt (risque relatif au développement des résistances aux toxines Bt chez les insectes ravageurs). Ainsi, en absence du phénomène de la résistance des insectes ravageurs aux toxines Bt, la productivité marginale des semences transgéniques sera égale à son coût marginal $[\lambda_t \gamma = c(1+r)]$.

Lemme 4.2 :

Si le fermier prend en compte la contrainte intertemporelle de la résistance des insectes à la toxine Bt alors la productivité marginale des semences transgéniques est égale au coût marginal de l'utilisation des semences Bt (coût direct) plus le coût associé à la résistance des ravageurs à la toxine Bt (coût indirect).

$$\underbrace{\lambda_t \gamma}_{\text{le produit marginal}} = \underbrace{c(1+r)}_{\text{le coût marginal}} + \underbrace{pE(\epsilon_t)y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 B_t}_{\text{le coût associé à la résistance des ravageurs aux toxines Bt}}$$

Preuve : résultat direct de la maximisation du programme (4.7) (la condition du premier ordre).

Statique comparative :

En utilisant la statique comparative¹¹³, on peut déterminer comment les changements marginaux dans certaines variables (la résistance des ravageurs ciblés aux toxines *Bt* et aux pesticides) peuvent affecter les variables clés relatives à la production du coton (les semences transgéniques et les pesticides). Pour ce faire, il suffit donc de calculer les différentielles totales des conditions du premier ordre. On commence tout d'abord par arranger les conditions du premier ordre, en remplaçant les variables λ_t et ϕ_t par leurs valeurs.

Les solutions des équations différentielles (4.10) et (4.11) s'écrivent comme suit (cf. annexe A.4.5)

$$\lambda_t = -\frac{1}{(\delta-\alpha_1)} pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \quad (4.10.a)$$

$$\phi_t = -\frac{1}{(\delta-\alpha_2)} pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \quad (4.11.a)$$

En remplaçant λ_t et ϕ_t par leurs valeurs dans les équations (4.8.a) et (4.9.a) on aura :

$$-E(\epsilon_t) p y_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} + \frac{\eta_1}{(\delta-\alpha_1)} \right) + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \left(\frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} + \frac{\eta_2}{(\delta-\alpha_2)} \right) \right] = (1+r)w \quad (4.14)$$

$$-pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} + \frac{\gamma}{(\delta-\alpha_1)} \right) = c(1+r) \quad (4.15)$$

On pose :

$\varphi_t = \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} X_{1t}$ désigne le taux de la résistance des insectes primaires aux pesticides.

$\psi_t = \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} X_{2t}$ indique le taux de la résistance des insectes secondaires aux pesticides.

$\omega_t = \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} B_t$ renseigne le taux de la résistance des insectes primaires aux toxines *Bt*.

Sans perte de généralité, on s'intéresse principalement aux variables ψ_t et ω_t (parce qu'au départ quand l'agriculteur adopte les semences transgéniques le taux de la résistance des insectes primaires aux pesticides est presque nul).

¹¹³ La statique comparative est l'analyse de ce qui arrive aux variables endogènes d'un modèle lorsque les variables exogènes se modifient. Il s'agit d'une question essentielle de l'économie politique.

On peut réécrire, ainsi, les deux équations (4.14) et (4.15) comme suit :

$$-E(\epsilon_t)py_t^Q \left[\varphi_t N_1^0 + \psi_t N_2^0 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \frac{\eta_2}{(\delta - \alpha_2)} \right] = \quad (4.18)$$

$$(1 + r)w$$

$$-pE(\epsilon_t)y_t^Q (\omega_t N_1^0 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)}) = c(1 + r) \quad (4.19)$$

La différentiation totale des deux équations précédentes (par rapport aux variables du contrôle) donne :

$$\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} dx_t + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2}{(\delta - \alpha_2)} dx_t + \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} dz_t = -d\psi_t N_2^0$$

$$\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} dx_t + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} dz_t = -d\omega_t N_1^0 \quad (4.17)$$

On résout ce système pour exprimer dx_t et dz_t en fonction de $d\psi_t$ et $d\omega_t$ (cf. annexe A.4.6) :

$$dx_t = \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} d\omega_t - \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)} d\psi_t \quad (4.18)$$

$$dz_t = - \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2 N_1^0}{(\delta - \alpha_2)} \right] d\omega_t \quad (4.19)$$

$$+ \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)} d\psi_t$$

Proposition 4.1 :

Si $\delta > \alpha_1$ et $\delta > \alpha_2$, alors :

1. $\frac{dx_t}{d\omega_t} \geq 0$ et $\frac{dx_t}{d\psi_t} \leq 0$.
2. $\frac{dz_t}{d\omega_t} \leq 0$ et $\frac{dz_t}{d\psi_t} \geq 0$.

Preuve (cf. annexe A.4.7)

$\frac{dx_t}{d\omega_t} \geq 0$: signifie que si le taux de résistance des insectes primaires au gène *Bt* s'accroît, la quantité consommée des pesticides augmente.

$\frac{dx_t}{d\psi_t} \leq 0$: indique que le taux des insectes ravageurs secondaires et la quantité des pesticides pulvérisés évoluent dans un sens opposé. En effet, les toxines *Bt* sont censées résister aux insectes primaires et des ravageurs secondaires peuvent apparaître à la suite de la baisse des quantités utilisées de pesticides (le coton *Bt* est censé réduire les applications de pesticides).

$\frac{dz_t}{d\omega_t} \leq 0$: montre que si le taux de résistance des insectes primaires à la toxine *Bt* s'accroît, l'utilisation des semences transgénique baisse.

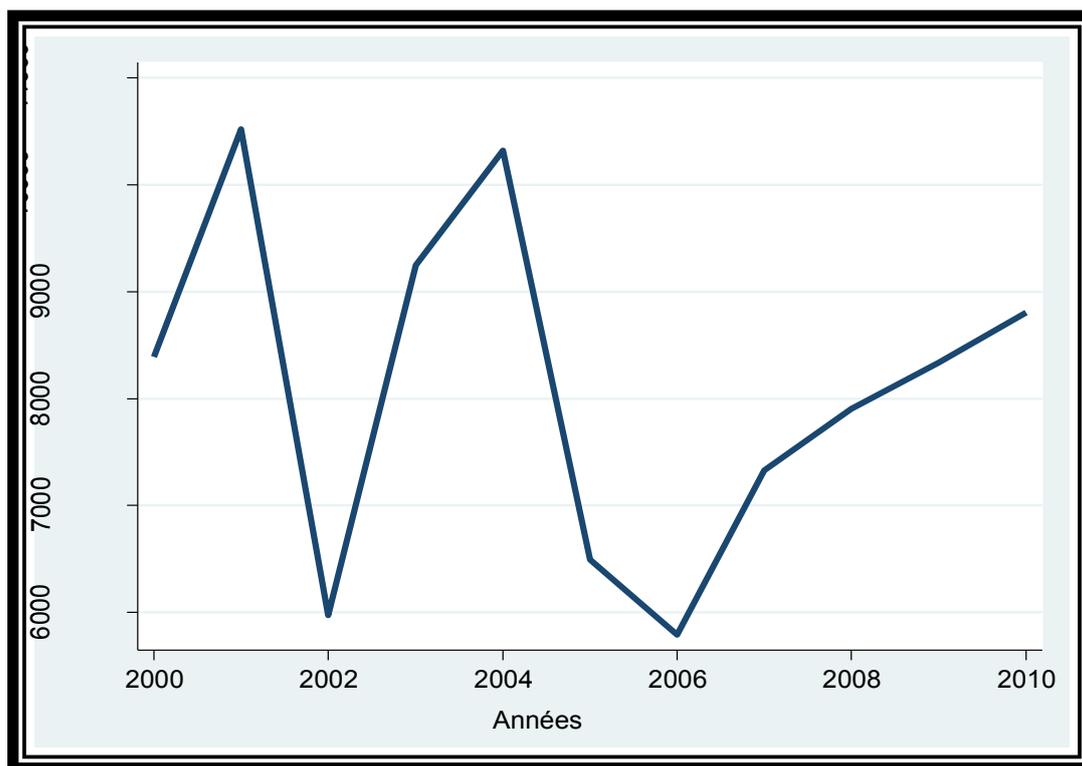
$\frac{dz_t}{d\psi_t} \geq 0$: désigne que le risque d'infestation par des ravageurs secondaires devient très élevé avec la généralisation de l'usage des semences transgéniques.

L'intuition derrière cela est que l'adoption des semences *Bt* permettra aux agriculteurs de coton de lutter contre les ravageurs primaires et par conséquent les pesticides seront utilisés d'une manière nettement moins fréquente. L'adoption à grande échelle du coton *Bt* va entraîner une sérieuse épidémie des insectes secondaires si ce type des ravageurs n'a pas été aussi ciblé (l'agriculteur doit retourner aux pesticides pour détruire les ravageurs secondaires). Au moment où l'agriculteur découvre les dégâts causés par les ravageurs secondaires, il sera amené à pulvériser des quantités excessives de pesticides pour contrôler ce problème. Cette épidémie pourrait entraîner ainsi des pertes qui contrebalancent une partie, ou la totalité, du gain de rendement résultant de l'adoption de la technologie *Bt* (Swaminathan et Rawal, 2011).

Le graphique 4.2 démontre les effets non évidents de cette technologie en termes de réduction de l'utilisation des insecticides. La consommation des insecticides dans le secteur du coton a connu une baisse importante entre 2001 et 2002 (l'année de l'introduction des semences *Bt* en Inde), ensuite celle-ci devient substantiellement plus élevée entre 2002 et 2004

pour baisser une autre fois entre 2004 et 2006¹¹⁴. Enfin, à partir de 2006, la consommation des insecticides est sans cesse croissante. À la suite d'un examen¹¹⁵ réalisé sur les cultures de coton transgénique dans l'Etat de Gujarat, la multinationale *Monsanto* informait que le ver du coton a développé une résistance aux toxines de *Bt*. Ainsi, les agriculteurs sont désormais obligés de pulvériser une quantité croissante de pesticide.

Un second résultat de notre modèle concerne le taux d'escompte (ou d'actualisation) δ . Ce dernier doit tenir compte de la tendance de l'agriculteur en faveur du présent. Si le taux d'escompte s'accroît, les pertes futures anticipées par les agriculteurs sont moins significatives et les agriculteurs choisissent donc d'adopter rapidement la technologie *Bt*. En d'autres termes, il est certainement efficace d'adopter aujourd'hui les semences transgéniques, si l'agriculteur anticipe que les coûts associés (directs et indirects) seront moins significatifs demain.



Source : Central Institute for Cotton Research (2011)

Figure 4.3 : L'évolution de l'utilisation des insecticides dans la culture de coton en Inde entre 2000 et 2010 (en million de roupies)

¹¹⁴ En mai 2006, l'autorité de l'Andhra Pradesh a imposé à *Mosanto-Mahyco* un prix plafond de l'ordre de 750 roupies pour le sac de coton transgénique. Pareillement, le Maharashtra et le Gujarat ont fixé un prix maximum pour les semences de coton génétiquement modifié de l'ordre de 450 roupies.

¹¹⁵ La nouvelle a été publiée le 06 Mars 2010 dans un article du journal indien «The Hindu» (<http://www.thehindu.com/news/national/article183353.ece>).

4.2.2 Le suicide des cultivateurs du coton Bt

Afin de prendre en compte *l'incertitude* sur le rendement du coton transgénique, cette section suit les suggestions affirmées par Dixit et Pindyck (1994). En élaborant la théorie de l'investissement en cas d'incertitude, les auteurs ont insisté sur la possibilité de procéder à l'analogie avec la théorie des options financières américaines pour déterminer : comment des choix d'investissement, en partie irréversibles, sont développés lorsque l'avenir est incertain. Les auteurs ont affirmé que les deux théories possèdent trois caractéristiques en commun. *Primo*, les rendements futurs sont incertains. *Secundo*, la décision est irréversible. *Tertio*, il existe une flexibilité concernant *le timing* de la décision d'investissement (la possibilité d'échelonner, de reporter ou d'abandonner cette décision au cours du temps). En raison de la ressemblance entre les deux théories (théorie de l'investissement et théorie des options financières américaines), les auteurs ont suggéré que la décision de l'investisseur soit analysée dans un cadre d'un modèle d'évaluation des options (*option-pricing model*). C'est l'approche des «options réelles» qui correspond à l'application de la théorie des options financières à des actifs réels. Ainsi, le détenteur d'une option réelle dispose, en toute souveraineté, du droit : (i) de faire ou de ne pas faire un acte futur ; (ii) de prendre ou de ne pas prendre une certaine décision à une date ou avant une date future (McGrath, 1999). En d'autres termes, tout en prenant en compte le rôle de l'incertitude dans les décisions d'investissement, les modèles d'options réelles insistent sur l'importance accordée à la flexibilité par les décideurs pour ajuster leur comportement au fur et à mesure que les incertitudes se résolvent.

Selon Dixit et Pindyck (1994), l'approche des options réelles est bien adaptée à la modélisation de la décision de suicide qui présente également les mêmes caractéristiques :

- i) les flux des rendements futurs de la culture du coton Bt sont incertains ;
- ii) le suicide est un acte absolument irréversible ;
- iii) il existe une flexibilité concernant le choix du moment du suicide.

Le raisonnement par les options réelles offre ainsi une vision enrichie des stratégies suivies par l'agriculteur lorsque celui-ci doit procéder à un arbitrage entre la flexibilité et l'irréversibilité de sa décision (continuer à vivre ou se supprimer) en présence d'incertitudes relatives au choix sur les rendements futurs de la technologie Bt.

Généralement, l'approche des options réelles commence avec l'approximation de l'évolution temporelle de la variable d'intérêt par un processus stochastique. Le *Mouvement Brownien Géométrique* (cf. annexe A.4.8) est un processus stochastique en temps continu qui est très utilisé dans la littérature économique récente. Pour prendre en compte l'hypothèse de l'incertitude qui caractérise le rendement des cultures de coton Bt, on a choisi d'approximer le gain net par un processus stochastique qui se décompose en deux éléments distincts¹¹⁶ :

- un mouvement brownien géométrique expliquant l'évolution, en temps continu, du gain net relatif à la culture du coton Bt. Ce processus s'écrit de la manière suivante :

$$\alpha(\pi - l)dt + \sigma(\pi - l)dz$$

avec

- α : l'espérance du gain net relatif à la culture du coton Bt (appelé aussi le trend ou le drift réel).
 - σ : l'écart-type du gain net relatif à la culture du coton Bt (appelé aussi la volatilité du gain net).
 - dt : un intervalle du temps très petit.
 - dz : l'incrément d'un processus de Wiener. La relation entre dz et dt est donné par $dz = \mu_t \sqrt{dt}$ avec $\mu_t \sim i. i. d. N(0,1)$ et $E(dz^2) = dt$.
- un processus du Poisson continu avec sauts vers le bas (*Poisson Jump downward*) d'intensité λ . Autrement, il existe une probabilité λdt pour que le gain net effectue un saut vers le bas entre les dates t et $t + dt$ d'une proportion égale à ϕ (suite à l'apparition d'une résistance, chez les insectes, à la toxine Bt).

Ainsi, l'évolution de $(\pi - l)$ ¹¹⁷ s'écrit sous une forme d'une combinaison d'un mouvement brownien géométrique et un processus de Poisson (Dixit et Pindyck, 1994, p.167). On aura ainsi un processus mixte de la forme suivante :

¹¹⁶ Cette décomposition est gouvernée par l'hypothèse de l'indépendance entre le mouvement brownien géométrique et le processus de poisson avec saut (c'est-à-dire les incréments dq et dz sont non corrélés).

¹¹⁷ On pose $l = rL = r(cz + wx)$. C'est l'intérêt de crédit que l'agriculteur doit rembourser.

$$d(\pi - l) = \underbrace{\alpha(\pi - l)dt + \sigma(\pi - l)dz}_{\text{un mouvement brownien géométrique}} - \underbrace{(\pi - l)dq}_{\text{un processus de Poisson}} \quad (4.20)$$

avec :

$$dq = \begin{cases} 0 & \text{avec probabilité } 1 - \lambda dt \\ \phi & \text{avec probabilité } \lambda dt \end{cases} \quad (4.21)$$

dq est l'incrément d'un processus de Poisson sachant que dq et dz sont indépendants. λ désigne l'intensité du processus de poisson et ϕ représente le coût, exprimé en pourcentage de gain net $(\pi - l)$, associé au phénomène de résistance.

Sous l'hypothèse que la fonction du gain net suit un mouvement brownien géométrique combiné avec un processus de poisson, la valeur espérée du profit à une période future s est proposée par :

$$E(\pi_s - l_s) = (\pi_0 - l_0)e^{(\alpha - \lambda\phi)s} \text{ où } (\pi_0 - l_0) \text{ désigne la valeur initiale}^{118}.$$

Ainsi, la valeur espérée du gain net à une période future s , sachant la valeur présente $(\pi_t - l_t)$, est suggérée par la formule suivante :

$$E[(\pi_s - l_s)/(\pi_t - l_t)] = (\pi_t - l_t)e^{(\alpha - \lambda\phi)(s-t)} \text{ pour } s > t \quad (4.22)$$

Soit G la valeur présente du gain net total associé au cultivateur du coton Bt (sur le reste de sa *vida activa*). Ainsi, la valeur espérée de G sera exprimée comme suit :

$$E[G_t/(\pi_t - l_t)] = \int_t^{+\infty} E[(\pi_s - l_s)/(\pi_t - l_t)]e^{-\rho(s-t)} ds$$

¹¹⁸ En effet, pour une période t , l'expression (4.20) pourrait être réécrite sous forme d'une équation différentielle linéaire du premier ordre :

$$\frac{d(\pi_t - l_t)}{(\pi_t - l_t)} = \alpha dt + \sigma dz - dq$$

L'espérance de l'équation précédente se comprend comme suit :

$$E\left(\frac{d(\pi_t - l_t)}{(\pi_t - l_t)}\right) = \alpha dt - \phi\lambda dt = (\alpha - \phi\lambda)dt$$

La solution générale de cette équation est :

$$E(\pi_t - l_t) = Ae^{(\alpha - \phi\lambda)t}$$

La constante A est déterminée par la valeur initiale $(\pi_0 - l_0)$ de $(\pi_t - l_t)$, d'où :

$$E(\pi_t - l_t) = (\pi_0 - l_0)e^{(\alpha - \phi\lambda)t}$$

$$E[G_t/(\pi_t - l_t)] = \int_t^{+\infty} (\pi_t - l_t) e^{-\{\rho - (\alpha - \lambda\phi)\}(s-t)} ds$$

$$E[G_t/(\pi_t - l_t)] = \frac{(\pi_t - l_t)}{\rho - (\alpha - \lambda\phi)} \quad (4.23)$$

Où ρ désigne le taux d'escompte qui est supposé supérieur à $(\alpha - \lambda\phi)$.

Si l'agriculteur se donne la mort à la date T^{119} , alors l'expression (4.23) sera définie de la manière suivante :

$$E[G_T/(\pi_T - l_T)] = 0$$

L'hypothèse d'irréversibilité de l'acte de suicide sera donc exprimée comme suit :

$$E[G_T/(\pi_T - l_T)] = 0 \Rightarrow E[G_{T+i}/(\pi_{T+i} - l_{T+i})] = 0 \forall i > 0$$

Pour le moment on ignore que l'agriculteur commet un acte de suicide. La fonction d'utilité du paysan dépend de la consommation c qui se définit à son tour en fonction de l'espérance du gain conditionnel. Le fermier doit donc trouver une solution pour le problème suivant (basé sur la valeur actualisée du gain net total attendu associée au reste de sa vie active) :

$$\max \int_t^{+\infty} u(c_s(E[G_t/(\pi_t - l_t)])) e^{-\rho(s-t)} ds$$

Soit V la valeur présente de l'utilité de l'agriculteur à maximiser sur l'horizon de son cycle de vie active. Donc, V s'écrit comme suit :

$$V = \max \int_t^{+\infty} u(c_s(E[G_t/(\pi_t - l_t)])) e^{-\rho(s-t)} ds \quad (4.24)$$

¹¹⁹ Si le temps déterministe T est remplacé par un temps aléatoire tel que pour tout $t \geq 0$, l'événement $\{T < t\}$ appartient à une filtration \mathcal{F}_t alors T sera appelé *un temps d'arrêt*. Une filtration \mathcal{F}_t est définie par l'ensemble des informations accessibles avant ou jusqu'à la date $t \geq 0$. Un temps d'arrêt est donc un temps aléatoire qui dépend seulement de ce qui s'est passé avant t . Notre modèle ne tiendra en compte de la notion du temps d'arrêt malgré son utilité puisque notre objectif est de déterminer le gain net du seuil (en dessous duquel un agriculteur se donne la mort) en fonction de paramètres du processus stochastique. Les impacts des changements de ces paramètres sur la valeur du seuil seront également calculés.

C'est un programme d'optimisation dynamique où V désigne la fonction de valeur¹²⁰. Celle-ci dépend du gain net présent $(\pi_t - l_t)$. L'équation de Bellman¹²¹ s'écrit ainsi comme suit :

$$V[(\pi - l)] = v[(\pi - l)]dt + \frac{1}{1+\rho dt} E[V((\pi - l) + d(\pi - l))] \quad (4.25)$$

Supposons que l'agriculteur se donne la mort quand la valeur actualisée de son utilité, pendant toute la durée de sa vie active, baisse en dessous d'un certain seuil (Hamermesh et Soss, 1974). Ainsi, on désigne par S le seuil d'utilité en dessous duquel le suicide devient un choix optimal. L'équation de Bellman s'écrit alors comme suit :

$$V[(\pi - l)] = \max \left\{ S, v[(\pi - l)]dt + \frac{1}{1+\rho dt} E[V((\pi - l) + d(\pi - l))] \right\} \quad (4.26)$$

Proposition 4.2 :

Soit $(\pi^* - l^*)$ le seuil de gain net (le gain net minimum associé à la culture de coton Bt) au dessous duquel le suicide devient un choix optimal pour un agriculteur neutre vis-à-vis du risque. Ce seuil est donné par l'expression suivante :

$$(\pi^* - l^*) = \frac{1}{\theta} \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right) \left[S(\rho + \lambda\phi) + \frac{1}{(\rho + \lambda\phi)} \left(\frac{1}{2} \sigma^2 - \alpha \right) \right] \quad (4.27)$$

avec

$$B_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2(\rho + \lambda\phi)}{\sigma^2}} \quad (4.28)$$

Preuve (cf. annexe A.4.9).

¹²⁰ V désigne également la fonction d'utilité indirecte dans le sens que le niveau maximum d'utilité est atteint pour un niveau déterminé de gain net $(\pi - l)$. Ainsi, la valeur actualisée des gains nets attendus sur la durée de vie d'un agriculteur est égale à zéro si $(\pi - l) = 0$. Autrement, $V(0) = 0$.

¹²¹ On peut obtenir l'équation de Bellman caractérisant la fonction valeur (24) de la manière suivante (Dixit et Pindyck, 1994, p. 104-106):

Divisons la période $[t, +\infty[$ en deux parties : l'instant présent et les périodes futures. Sur un intervalle du temps très court dt , la variable d'état gain net $(\pi - l)$ se déplace vers $(\pi - l) + d(\pi - l)$ entre les dates t et $t + dt$ et par conséquent la valeur du gain net sera changée en $V[(\pi - l) + d(\pi - l)]$. L'utilité du gain net présent (l'utilité instantanée) sur une période de longueur dt est notée par $v((\pi - l))dt = u(c_t(E[G_t/(\pi_t - l_t)]))dt$. Si ρ désigne le taux d'escompte par unité du temps, alors le taux d'actualisation de la période future, sur l'intervalle dt , sera le facteur $\frac{1}{1+\rho dt}$.

L'expression (4.27) montre :

1. Une relation négative entre α et $(\pi^* - l^*)$. Cela signifie que le cultivateur du coton Bt a une tendance de ne pas se suicider, s'il estime que le taux de croissance du gain net sera élevé dans le futur.
2. Une relation positive entre σ et $(\pi^* - l^*)$. Une valeur élevée de σ indique une grande incertitude autour du gain net associé à la culture de coton transgénique. Ainsi, la relation entre ces deux paramètres signifie que l'agriculteur a tendance de se suicider quand l'incertitude autour du gain net augmente.
3. Une relation indéterminée entre $(\pi^* - l^*)$ et la probabilité de sauts vers le bas λ (cf. annexe A.4.10). La relation entre les deux paramètres pourrait être positive ou négative (elle dépend des valeurs prises par les paramètres spécifiques). On a supposé que les sauts du gain net vers le bas se manifestent lorsqu'il existe un problème d'émergence de ravageurs résistants aux toxines Bt. Une relation positive signifie que l'agriculteur a tendance de se suicider quand il fait face à une probabilité élevée d'apparition rapide d'une certaine résistance, chez les ravageurs cibles, aux toxines Bt. Le problème de résistance chez les insectes ravageurs devrait contribuer à l'application des doses supplémentaires des pesticides ce qui engendre en conséquence un coût additionnel pour l'agriculteur qui se retrouve face à un sérieux problème d'endettement. Ainsi, l'incertitude liée au rendement de la technologie utilisée et le niveau du crédit demandé peuvent être à l'origine d'un surendettement qui pourrait être la cause du suicide des fermiers. Si la relation entre $(\pi^* - l^*)$ et λ est négative, alors l'agriculteur a tendance de retarder le suicide même s'il estime qu'un problème de résistance à la toxine Bt s'aggraverait au cours du temps. Cette constatation est cohérente avec l'argument de Dixit et Pindyck (1994). Les deux auteurs affirment que l'incertitude crée une « valeur à l'attente » (*a value to waiting*). L'argument de Dixit et Pindyck (1994) implique que l'agriculteur a tendance de retarder l'acte de suicide même en présence d'une incertitude croissante sur la rentabilité des semences transgéniques. Cela pourrait être vrai dans le sens que l'agriculteur a mobilisé des instruments pour retarder le phénomène de résistance chez les ravageurs cibles (*Bollguard-II*¹²² et zones refuges).

¹²² Monsanto a conseillé les agriculteurs concernés d'utiliser son nouveau produit nommé *Bollguard-II*, qui permettrait de retarder l'apparition de la résistance chez insectes ravageurs.

4.3 Conclusion

Le but de ce chapitre est d'expliquer le comportement suicidaire de cultivateur du coton *Bt* en Inde lorsqu'on prend en compte le phénomène de résistance observé chez les insectes ravageurs aux toxines *Bt* et le problème lié à l'émergence des ravageurs secondaires. L'extension dynamique de l'approche de contrôle des dommages (Lichtenberg et Zilberman, 1986) a permis de relâcher l'argument classique (le revenu marginal est égal au coût marginal) qui justifie l'utilisation optimale des semences *Bt* et des pesticides. En effet, le renforcement de la résistance des ravageurs aux toxines *Bt* et/ou pesticides pourrait être considéré comme une forme d'externalité négative intertemporelle. Donc, le coût réel associé à l'utilisation des semences transgéniques (respectivement les pesticides) est composé d'un coût direct à savoir le coût marginal d'utilisation du coton *Bt* (respectivement des pesticides) et d'un coût indirect soit le coût relatif à la résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt* (respectivement aux pesticides). Par conséquent, si l'agriculteur prend en compte la contrainte intertemporelle de la résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt* (respectivement aux pesticides), le revenu marginal, associé à l'utilisation des semences transgéniques (respectivement des pesticides), est égal au coût marginal plus le coût associé au phénomène de résistance des insectes ravageurs.

Un exercice de statique comparative, sur les quantités utilisées des pesticides et des semences transgéniques, permettrait de déduire, d'une part, qu'une augmentation du taux de résistance des insectes ravageurs cibles aux toxines *Bt* augmentera la quantité utilisée des pesticides afin de contrôler à la fois la résistance des insectes primaires et l'émergence de ravageurs secondaires et, d'autre part, la généralisation de l'utilisation des semences transgéniques engendre une augmentation du taux de résistance des insectes cibles aux toxines *Bt* et l'émergence rapide des insectes secondaires.

Ce chapitre met également en évidence le phénomène de suicides chez les cultivateurs du coton en Inde. La décision du suicide a été formalisée dans le cadre d'un modèle de maximisation d'utilité. Conformément à la littérature sur l'économie de suicide, un individu est censé se suicider si la valeur présente de son utilité intertemporelle durant sa vie active baisse en dessous d'un certain seuil (Hamermesh et Soss, 1974). L'apport de notre modèle consiste à introduire l'incertitude sur le gain net associé à la culture du coton *Bt* en supposant que le gain net évolue selon un processus stochastique (un mouvement Brownien géométrique avec un processus des sauts qui obéit à une loi de Poisson). Le modèle est résolu

analytiquement pour déterminer le gain net du seuil au-dessous duquel un cultivateur du coton *Bt* se suicide. Ce gain net minimum est exprimé en fonction des paramètres du processus stochastique à savoir la valeur espérée du taux de croissance du gain net associé au coton *Bt*, sa variance et la probabilité de saut du gain net vers le bas (à la suite de l'apparition du phénomène de résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt*). Les impacts de changements de ces paramètres sur la valeur du seuil sont calculés pour montrer comment l'incertitude au niveau du gain net peut influencer la décision de suicide chez les cultivateurs du coton *Bt*.

Primo, il existe une relation négative entre le gain net minimum et le taux de croissance attendu du gain net associé à l'utilisation du coton *Bt*. Cela signifie que le cultivateur du coton *Bt* a une tendance de ne pas se suicider, s'il estime que le taux de croissance du gain net sera élevé dans le futur.

Secundo, la relation entre la valeur du seuil et la volatilité associée au gain net est négative. Une volatilité élevée indique une grande incertitude autour du gain net associé à la culture de coton transgénique. Ainsi, la relation entre ces deux paramètres signifie que l'agriculteur a tendance de se suicider quand l'incertitude autour du gain net augmente.

Tertio, une relation indéterminée (positive ou négative) entre la valeur du seuil et la probabilité de saut du gain net vers le bas relative à l'émergence du phénomène de résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt*. Si la relation est positive, cela signifie que l'agriculteur a tendance de se suicider à la suite de l'apparition du problème de résistance chez les insectes ravageurs. Par contre, si la relation est négative, l'agriculteur va choisir de reporter la décision de suicide et par conséquent l'incertitude sur le gain net crée « une valeur à l'attente » (*a value to waiting*).

ANNEXES DU CHAPITRE 4

A.4.1 : La théorie du contrôle optimal

Cette annexe passe en revue quelques éléments de la théorie du contrôle optimal¹²³ qui a été développée en 1952 par le mathématicien russe Lev Semenovich Pontryagin¹²⁴. Au début les techniques de contrôle optimal ont été développées pour résoudre des problèmes dynamiques liés à la science physique. Plus tard, leur utilisation a été généralisée à d'autres domaines comme l'économie (l'économie des ressources naturelles, la macroéconomie dynamique, la théorie de la croissance, l'économie de l'information...).

a. La présentation du problème et les conditions nécessaires

Un problème de contrôle optimal se décompose en deux parties : pour déterminer une trajectoire optimale joignant un ensemble initial à une cible, il importe d'abord de savoir si cette cible est atteignable. C'est le problème de contrôlabilité. Ensuite, une fois ce problème résolu, il faut chercher parmi toutes ces trajectoires possibles celles qui le font dans un temps minimal.

De manière générale, le problème le plus simplifié du contrôle optimal s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \max_{x(t), w(t)} \int_a^b f(t, x(t), w(t)) \\ \text{s/c } \dot{x} = g(t, x(t), w(t)) \end{aligned} \quad (\text{a.1})$$

$$x(a) = x_0$$

La particularité du programme ci-dessus, par rapport aux problèmes d'optimisation non-linéaire et au calcul de variation, est l'existence d'une équation différentielle parmi les contraintes. Dans la classe des problèmes du contrôle optimal, le problème ci-dessus est

¹²³ Un exposé détaillé de la théorie du contrôle optimal peut être trouvé dans Long et Vousden (1977), Leonard et Long (1992) et Kamien et Schwartz (1995).

¹²⁴ Lev Semenovich Pontryagin (1908-1988) est un mathématicien russe qui a contribué à la théorie du contrôle optimal, aux équations différentielles et à la théorie des ensembles topologiques. En 1962, il a publié un livre qui s'intitule « Théorie mathématique des processus optimaux » avec Boltyanskii V.G., Gamrelidze R.V. et Mishchenko E.F. Cet ouvrage pionnier va devenir par la suite un livre de référence dans la théorie du contrôle optimal.

considéré comme le plus simple car a et b sont finis, il n'existe pas de contraintes sur la valeur que $x(t)$ doit prendre à la borne supérieure de l'intervalle de l'intégration et il n'y a aucune contrainte de limite supérieure ou inférieure sur $w(t)$. La théorie du contrôle optimal est définie par deux types de variables : la variable d'état $x(t)$ et la variable de contrôle $w(t)$. La contrainte $\dot{x} = g(t, x(t), w(t))$ dans le problème (a.1), que l'on dérive par rapport à t , est appelée équation d'état.

On peut résoudre le problème (a.1) en posant l'Hamiltonien qui s'écrit de la manière suivante :

$$H(t, x(t), w(t), \psi(t)) = f(t, x(t), w(t)) + \psi(t)g(t, x(t), w(t)) \quad (\text{a.2})$$

Où $\psi(t)$ est continument différentiable sur l'intervalle $[a, b]$. $\psi(t)$ désigne le multiplicateur de Pontryagin (appelé aussi variable de co-état). Ce paramètre s'interprète comme le prix implicite de la variable d'état. Dans un problème du contrôle optimal on doit faire associer un multiplicateur de Pontryagin à chaque équation d'état. Si pour un problème de Lagrangien le multiplicateur représente le prix implicite de la ressource ou sa valeur marginale étant donné les contraintes, pour l'Hamiltonien, pour tout t de $[a, b]$, le multiplicateur est plutôt associé à la variable d'état et représente la valeur marginale de cette variable, il est la contribution marginale de x à la valeur objective.

On dérive ainsi les conditions nécessaires d'optimalité pour (a.2) :

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial w} = 0 \Rightarrow f_w + \psi g_w = 0 \quad (\text{a.3})$$

$$-\frac{\partial H(\cdot)}{\partial x} = \dot{\psi} \Rightarrow \dot{\psi} = -(f_x + \psi g_x) \quad (\text{a.4})$$

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial \psi} = \dot{x} \Rightarrow \dot{x} = \frac{\partial H(\cdot)}{\partial \psi} = g(\cdot) \quad (\text{a.5})$$

En plus de la condition initiale $x(a) = x_0$ et celle de la transversalité $\psi(b) = 0$. L'absence des bornes sur $x(b)$ implique le choix d'une valeur optimale $x(b)$ qui possède une contribution marginale nulle à la fonction objectif, exprimée par $\psi(b) = 0$. Cela signifie

qu'une variation marginale exogène de $x(t)$ au point $t = b$ n'a aucun effet sur la valeur de la fonction objectif, après un ajustement optimal pour les autres variables.

Le système d'équations (a.3)-(a.5) sera résolu en remplaçant $w(t)$ dans (a.4) et (a.5) par sa valeur tirée de (a.3) pour trouver enfin le système d'équations différentielles suivant, en $x(t)$ et $\psi(t)$:

$$\begin{cases} \int_t^b \dot{w}(v) dv = \int_t^b -(f_x + \psi g_x) dv \text{ avec } \psi(b) = 0 \\ \int_a^t \dot{x}(v) dv = \int_a^t g(v, x(v), w(v)) dv \text{ avec } x(a) = x_0 \end{cases} \quad (\text{a.6})$$

Une fois le système d'équations (a.6) est solutionné, la valeur de $w(t)$ peut être obtenue à partir de (a.3).

Une extension possible du problème (a.1) consiste à introduire une borne supérieure sur la variable de contrôle $w(t)$ pour avoir le problème suivant :

$$\begin{aligned} \max_{x(t), w(t)} \int_a^b f(t, x(t), w(t)) \\ \text{s/c } \dot{x} = g(t, x(t), w(t)) \\ w(t) \leq \bar{w} \\ x(a) = x_0 \end{aligned} \quad (\text{a.7})$$

Pour résoudre le problème (a.7), il faut d'abord définir l'Hamiltonien exactement comme dans (a.2) :

$$H(t, x(t), w(t), \psi(t)) = f(t, x(t), w(t)) + \psi(t)g(t, x(t), w(t)) \quad (\text{a.8})$$

Ensuite, avec le multiplicateur de Lagrange $\mu(t)$, on définit le lagrangien de la manière suivante:

$$L(t, x(t), w(t), \psi(t), \mu(t)) = H(t, x(t), w(t), \psi(t)) + \mu(t)(\bar{w} - w(t)) \quad (\text{a.9})$$

Les conditions de premier ordre pour le problème (a.7) sont les suivantes :

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial w} = 0 \Rightarrow f_w + \psi g_w - \mu = 0 \quad (\text{a.10})$$

$$-\frac{\partial H(\cdot)}{\partial x} = \dot{\psi} \Rightarrow \dot{\psi} = -(f_x + \psi g_x) \quad (\text{a.11})$$

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial \psi} = \dot{x} \Rightarrow \dot{x} = \frac{\partial H(\cdot)}{\partial \psi} = g(\cdot) \quad (\text{a.12})$$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \mu} \geq 0 \Rightarrow \bar{w} - w(t) \geq 0; \mu(t)(\bar{w} - w(t)) = 0; \mu(t) \geq 0 \quad (\text{a.13})$$

Avec la condition de borne $x(a) = x_0$ et celle de la transversalité $\psi(b) = 0$. Les équations (a.13) résument les conditions de Kuhn-Tucker.

Si le problème (a.7) possède une solution, alors celle-ci est complètement caractérisée par les équations (a.10) jusqu'à (a.13) ainsi que par les conditions de borne et de transversalité. La solution $(x^*(t), w^*(t), \psi^*(t), \mu^*(t))$ pourrait être trouvée de la même façon que le problème (a.1), on remplace $w(t)$ par sa valeur de (a.10) dans (a.11) jusqu'à (a.13) et ensuite on doit résoudre le système obtenu sachant que le nombre d'équations doit être égal au nombre d'inconnus.

b. Les conditions suffisantes et l'existence d'une solution :

Dans les deux cas du problème de contrôle optimal que nous avons vu jusqu'à maintenant, nous n'avons pas discuté ni les conditions du second ordre ni le problème d'existence d'une solution. Dans cette section nous allons étudier les conditions suffisantes et celle de l'existence d'une solution pour le problème (a.7) qui représente un modèle général dans la théorie de contrôle optimal.

La vérification à la fois de la concavité¹²⁵ de f et g en $(x(t), w(t))$ n'est pas une mince tâche. Les conditions suffisantes du problème (a.7) sont données par le théorème d'Arrow

¹²⁵ La concavité de f et g est vérifiée si la matrice Hessienne est définie négative.

(1968)¹²⁶ ; soit $w(t) = W(t, x(t), \psi(t), \mu(t))$ la valeur de la variable de contrôle qui maximise le problème (a.7) et soit le Lagrangien maximisé :

$$\begin{aligned} L^0(t, x(t), \psi(t), \mu(t)) &= \max_{w(t)} L(t, x(t), w(t), \psi(t), \mu(t)) \\ &= f(t, x(t), W(t, x(t), \psi(t), \mu(t))) + \\ &\psi(t)g(t, x(t), W(t, x(t), \psi(t), \mu(t))) + \quad (a.14) \\ &\mu(t)(\bar{w} - W(t, x(t), \psi(t), \mu(t))) \end{aligned}$$

Théorème 1 : si $L^0(t, x(t), \psi(t), \mu(t))$ est concave en $x(t)$ et étant donné $\mu(t)$ et $\psi(t)$, alors, $\forall t \in [a, b]$, il existe $(x^*(t), w^*(t), \psi^*(t), \mu^*(t))$ telles que $x^*(t), \psi^*(t)$ et $\mu^*(t)$ sont continues et vérifient les relations suivantes:

$$w(t) = W(t, x(t), \psi(t), \mu(t)) \quad (a.15)$$

$$\dot{x} = g(t, x(t), w(t)) \quad (a.16)$$

$$\dot{\psi} = -(f_x + \psi g_x) \quad (a.17)$$

$$f_w + \psi g_w - \mu = 0 \quad (a.18)$$

$$\mu(t)(W(t, x(t), \psi(t), \mu(t)) - \bar{w}) = 0 \quad (a.19)$$

$$\bar{w} - W(t, x(t), \psi(t), \mu(t)) \geq 0 \quad (a.20)$$

$$\mu(t) \geq 0 \quad (a.21)$$

$$x(a) = x_0 \quad (a.22)$$

$$\psi(b) = 0 \quad (a.23)$$

Donc $(x^*(t), w^*(t), \psi^*(t), \mu^*(t))$ sera la solution du problème (a.7).

¹²⁶ Le théorème d'Arrow remplace l'hypothèse de la concavité du Lagrangien (Seierstad, A. et Sydsæter, K., 1987).

A la place de la concavité de f et g en $(x(t), w(t))$, Arrow s'est basé sur la condition faible de la concavité de $L^0(t, x(t), \psi(t), \mu(t))$ en $x(t)$. Si les fonctions f et g sont concaves chacune en $x(t)$ et $w(t)$, le lemme suivant assure la concavité de $L^0(t, x(t), \psi(t), \mu(t))$.

Lemme : si la fonction $G(x, w)$ est concave en x et w alors $\max_w G(x, w)$ est concave en x .

A moins que des solutions pour un problème du contrôle optimal existent, la question de l'existence persiste. En effet, un problème du contrôle optimal remplissant les conditions du premier et du second ordre ne donne pas nécessairement une solution quand la valeur de f importe. Afin d'assurer l'existence d'une solution, le théorème suivant doit être vérifié :

Théorème 2 : Pour que $x^*(t)$ et $w^*(t)$ soient des solutions optimales pour le problème (a.7), il doit exister une constante ψ_0 et deux fonctions continues $\psi^*(t)$ et $\mu^*(t)$ tel que $\forall t \in [a, b]$, on a $(\psi_0, \psi(t), \mu(t)) \neq (0, 0, 0)$.

Pour tout $t \in [a, b]$,

$$L(t, x^*(t), w(t), \psi^*(t), \mu^*(t)) \leq L(t, x^*(t), w^*(t), \psi^*(t), \mu^*(t)) \quad (\text{a.24})$$

Tel que le Lagrangien est défini par

$$\begin{aligned} L(t, x(t), w(t), \psi(t), \mu(t)) & \quad (\text{a.25}) \\ &= \psi_0 f(t, x(t), w(t)) + \psi(t) g(t, x(t), w(t)) + \\ & \quad \mu(t) (\bar{w} - w(t)) \end{aligned}$$

Avec :

$$\dot{\psi}^*(t) = - \frac{\partial L(t, x^*(t), w(t), \psi^*(t), \mu^*(t))}{\partial x^*(t)} \quad (\text{a.26})$$

$$\frac{\partial L(t, x^*(t), w(t), \psi^*(t), \mu^*(t))}{\partial \mu^*(t)} \geq 0 \quad (\text{a.27})$$

$$\mu^*(t) \left(\frac{\partial L(t, x^*(t), w(t), \psi^*(t), \mu^*(t))}{\partial \mu^*(t)} \right) = 0 \quad (\text{a.28})$$

$$\psi_0^* \in \{0, 1\}, \psi^*(b) = 0 \text{ et } \mu^*(t) \geq 0$$

Bien qu'on suppose toujours que $\psi_0 = 1$, une solution pourrait se manifester pour $\psi_0 = 0$, ce qui signifie que la solution est déterminée par les contraintes. Cela pourrait se produire si nous avons un problème du contrôle optimal avec plus d'une équation de transition (contrainte) et certaines contraintes sur les variables du contrôle où la satisfaction de toutes les contraintes pourrait réduire le nombre des solutions réalisables ou pas de solutions.

Ainsi, dans cette annexe on a présenté la technique du contrôle optimal qui contribuera à la formalisation et la résolution de notre modèle.

A.4.2: Les conditions nécessaires

On a :

$$\frac{\partial H(.)}{\partial x_t} = 0 \Rightarrow E_\varepsilon \left[\frac{\partial \pi(x_t, z_t)}{\partial x_t} \right] - r \frac{\partial L(x_t, z_t)}{\partial x_t} + \lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2 = 0 \quad (4.8)$$

Or $\pi_t = p \varepsilon_t y_t^Q [1 - D(N_{1t}, N_{2t})] - (cz_t + wx_t)$ et $L_t = cz_t + wx_t$

Donc :

$$\frac{\partial \pi(x_t, z_t)}{\partial x_t} = -p \varepsilon_t y_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \right] - w$$

$$\frac{\partial L(x_t, z_t)}{\partial x_t} = w$$

Ce qui donne ainsi :

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(.)}{\partial x_t} = 0 \Rightarrow & -E(\varepsilon_t) p y_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \right] - w - rw + \lambda_t \eta_1 \\ & + \phi_t \eta_2 = 0 \end{aligned}$$

On a également :

$$N_{1t} = N_1^0 h(x_t, z_t) \text{ avec } X_{1t} = \frac{\partial h(x_t, z_t)}{\partial x_t} \text{ et } N_{2t} = N_2^0 g(x_t) \text{ avec } X_{2t} = \frac{\partial g(x_t)}{\partial x_t}$$

On aura donc:

$$\lambda_t \eta_1 + \phi_t \eta_2 = (1 + r)w + E(\varepsilon_t) p y_t^Q \left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 X_{1t} + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} N_2^0 X_{2t} \right]$$

A.4.3: Les conditions suffisantes

$$\frac{\partial^2 \pi(x_t, z_t)}{\partial x_t^2} = -p\epsilon_t y_t^Q \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \right)^2 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial^2 N_{1t}}{\partial x_t^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \left(\frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \right)^2 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \frac{\partial^2 N_{2t}}{\partial x_t^2} \right]$$

$$\frac{\partial^2 \pi(x_t, z_t)}{\partial x_t \partial z_t} = \frac{\partial^2 \pi(x_t, z_t)}{\partial z_t \partial x_t} = -p\epsilon_t y_t^Q \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \right]$$

$$\frac{\partial^2 \pi(x_t, z_t)}{\partial z_t^2} = -p\epsilon_t y_t^Q \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \right)^2 \right]$$

Le déterminant de l'Hessienne s'écrit comme suit :

$$\text{Det H} = (p\epsilon_t y_t^Q)^2 \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \right)^2 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial^2 N_{1t}}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \left(\frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \frac{\partial^2 N_{2t}}{\partial x_t^2} \right] \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \right)^2 \right] \\ - (p\epsilon_t y_t^Q)^2 \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \right)^2 \right]^2$$

$$\text{Det H} = (p\epsilon_t y_t^Q)^2 \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \right)^2 \right] \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \right)^2 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial^2 N_{1t}}{\partial x_t^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \left(\frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \right)^2 + \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}} \frac{\partial^2 N_{2t}}{\partial x_t^2} - \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \left(\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \right)^2 \right]$$

On aura ainsi : Det H > 0.

A.4.4 : La démonstration du lemme 4.1

On a :

$$\frac{\partial H(.)}{\partial z_t} = 0 \Rightarrow E_\epsilon \left[\frac{\partial \pi(x_t, z_t)}{\partial z_t} \right] - r \frac{\partial L(x_t, z_t)}{\partial z_t} + \lambda_t \gamma = 0$$

Or $\pi_t = p\epsilon_t y_t^Q [1 - D(N_{1t}, N_{2t})] - (cz_t + wx_t)$ et $L_t = cz_t + wx_t$

Donc :

$$E_{\varepsilon}\left[\frac{\partial\pi(x_t, z_t)}{\partial z_t}\right] = -p\varepsilon_t y_t^Q E_{\varepsilon}\left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t}\right] - c$$

Ce qui implique :

$$-p\varepsilon_t y_t^Q E_{\varepsilon}\left[\frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t}\right] - c + rc + \lambda_t \gamma = 0$$

On a également :

$$N_{1t} = N_1^0 h(x_t, z_t) \text{ avec } B_t = \frac{\partial h(x_t, z_t)}{\partial z_t}$$

On aura donc :

$$\lambda_t \gamma = c(1 + r) + pE(\varepsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} N_1^0 B_t$$

A.4.5 : Les solutions des équations différentielles

L'équation (10) des conditions du premier ordre est une équation différentielle du premier ordre avec second membre :

$$\dot{\lambda}_t - \delta \lambda_t = -\frac{\partial H(.)}{\partial N_{1t}} = -E_{\varepsilon}\left[\frac{\partial\pi(.)}{\partial N_{1t}}\right] - \lambda_t \alpha_1$$

Cette équation s'écrit comme suit :

$$\dot{\lambda}_t - (\delta - \alpha_1) \lambda_t = pE(\varepsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}}$$

Une solution est somme d'une solution générale et d'une équation particulière. Tout d'abord, déterminons la solution générale sans second membre :

$$\dot{\lambda}_t - (\delta - \alpha_1) \lambda_t = 0$$

Cette équation pourrait être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{\dot{\lambda}_t}{\lambda_t} = (\delta - \alpha_1)$$

$$\ln \lambda_t = (\delta - \alpha_1)t$$

La solution générale de l'équation sans second membre est :

$$\lambda_t = k_1 e^{(\delta - \alpha_1)t}$$

Où k_1 est une constante réelle quelconque. Cherchons maintenant une solution de l'équation de départ, en remplaçant k_1 par une fonction $k_1(t)$ dans la solution générale de l'équation sans second membre.

$$\lambda_t = k_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t}$$

$$\dot{\lambda}_t = (\delta - \alpha_1)k_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t} + \dot{k}_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t}$$

$$\dot{\lambda}_t - (\delta - \alpha_1)\lambda_t = (\delta - \alpha_1)k_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t} + \dot{k}_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t} - (\delta - \alpha_1)k_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t}$$

$$\dot{\lambda}_t - (\delta - \alpha_1)\lambda_t = \dot{k}_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t} = pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}}$$

$$\dot{k}_1(t) e^{(\delta - \alpha_1)t} = pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}}$$

$$\dot{k}_1(t) = pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} e^{-(\delta - \alpha_1)t}$$

$$k_1(t) = -\frac{1}{(\delta - \alpha_1)} pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} e^{-(\delta - \alpha_1)t} + k_1(0)$$

$$k_1(t) = -\frac{1}{(\delta - \alpha_1)} pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}} e^{-(\delta - \alpha_1)t} + k_1$$

La solution générale de l'équation avec second membre est :

$$\lambda_t = k_1 e^{(\delta - \alpha_1)t} - \frac{1}{(\delta - \alpha_1)} pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}}$$

Sans perte de généralité, on peut poser $k_1(0) = 0$, on aura ainsi :

$$\lambda_t = -\frac{1}{(\delta - \alpha_1)} pE(\epsilon_t) y_t^Q \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}}$$

La résolution de l'équation (11) des conditions du premier ordre est identique. La solution générale s'écrit comme suit :

$$\emptyset_t = k_2 e^{(\delta - \alpha_2)t} - \frac{1}{(\delta - \alpha_2)} pE(\epsilon_t) y_t^0 \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}}$$

Sans perte de généralité, on peut poser $k_2(0) = 0$, on aura ainsi :

$$\emptyset_t = -\frac{1}{(\delta - \alpha_2)} pE(\epsilon_t) y_t^0 \frac{\partial D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}}$$

A.4.6 : les solutions du système différentiel

La différentiation totale de deux équations des conditions du premier ordre par rapport aux variables du contrôle donne :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} dx_t + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2}{(\delta - \alpha_2)} dx_t \\ + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} dz_t = -d\psi_t N_2^0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} dx_t + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} dz_t = -d\omega_t N_1^0$$

L'écriture matricielle du système précédent sera énoncée comme suit :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2}{(\delta - \alpha_2)} & \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} \\ \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} & \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx_t \\ dz_t \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 0 & -N_2^0 \\ -N_1^0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\omega_t \\ d\psi_t \end{pmatrix}$$

$$\text{On pose } A_t = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2}{(\delta - \alpha_2)} & \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} \\ \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} & \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} \end{pmatrix}$$

On a ainsi :

$$\begin{pmatrix} dx_t \\ dz_t \end{pmatrix} = \frac{1}{\det A_t} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} & -\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} \\ -\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma}{(\delta - \alpha_1)} & \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2}{(\delta - \alpha_2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -N_2^0 \\ -N_1^0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\omega_t \\ d\psi_t \end{pmatrix}$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} dx_t \\ dz_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} & \frac{-\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)} \\ -\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} - \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2 N_1^0}{(\delta - \alpha_2)} & \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\omega_t \\ d\psi_t \end{pmatrix}$$

Enfin, on a :

$$dx_t = \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} d\omega_t - \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)} d\psi_t$$

$$dz_t = - \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2 N_1^0}{(\delta - \alpha_2)} \right] d\omega_t + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)} d\psi_t$$

A.4.7 : La démonstration de la proposition 4.1

$$\frac{dx_t}{d\omega_t} = \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)}$$

On a :

- $\eta_1 \leq 0$ (voir l'équation du mouvement (3) relative a l'évolution au cours du temps des insectes primaires).
- $\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \geq 0$ (La fonction de dommage est supposée croissante par rapport à la population d'insectes à un taux croissant).
- $\frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \leq 0$ (la taille de la population d'insectes primaires diminue avec une augmentation marginale de la quantité des semences transgéniques).
- $N_1^0 \geq 0$.

Ainsi, si le taux d'actualisation est strictement supérieur au taux des insectes ravageurs primaires éliminés par les pesticides ($\delta > \alpha_1$), alors $\frac{dx_t}{d\omega_t} \geq 0$.

$$\frac{dx_t}{d\psi_t} = - \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial z_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)}$$

- $\gamma \leq 0$ (voir l'équation du mouvement (3) relative a l'évolution au cours du temps des insectes primaires).
- $N_2^0 \geq 0$.

De ce fait, si le taux d'actualisation est strictement supérieur au taux des insectes ravageurs primaires éliminés par les pesticides ($\delta > \alpha_1$), alors $\frac{dx_t}{d\psi_t} \leq 0$.

$$\frac{dz_t}{d\omega_t} = - \left[\frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\eta_1 N_1^0}{(\delta - \alpha_1)} + \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{2t}^2} \frac{\partial N_{2t}}{\partial x_t} \frac{\eta_2 N_1^0}{(\delta - \alpha_2)} \right]$$

Ainsi, si le taux d'actualisation est strictement supérieur au taux des insectes ravageurs primaires éliminés par les pesticides et strictement supérieur au taux des insectes ravageurs secondaires éliminés par les pesticides ($\delta > \alpha_1$ et $\delta > \alpha_2$), alors $\frac{dz_t}{d\omega_t} \leq 0$.

$$\frac{dz_t}{d\psi_t} = \frac{\partial^2 D(N_{1t}, N_{2t})}{\partial N_{1t}^2} \frac{\partial N_{1t}}{\partial x_t} \frac{\gamma N_2^0}{(\delta - \alpha_1)}$$

Donc, si le taux d'actualisation est strictement supérieur au taux des insectes ravageurs primaires éliminés par les pesticides ($\delta > \alpha_1$), alors $\frac{dz_t}{d\psi_t} \geq 0$.

A.4.8 : Le mouvement brownien : rappel et définitions¹²⁷

1. Mouvement brownien (ou processus de Wiener)

Le mouvement Brownien avec drift est un processus stochastique $\{X_t; t \geq 0\}$ qui vérifie les propriétés suivantes :

¹²⁷ Cf. Malliaris et Brock (1982).

- i) Chaque variation $(X_{t+s} - X_s)$ du processus $\{X_t; t \geq 0\}$, entre les instants s et $s + t$, suit une loi normale de moyenne αt et de variance $\sigma^2 t$ où α et σ sont des paramètres constants.
- ii) Pour les instants $(t_1 < t_2 < \dots < t_n)$, les variations $(X_{t_2} - X_{t_1})$, $(X_{t_3} - X_{t_2})$, ..., $(X_{t_n} - X_{t_{n-1}})$ sont indépendantes et suivent la loi normale, comme précisé en (i).
- iii) $X_0 = 0$ et $\{X_t; t \geq 0\}$ est continue par rapport au temps.

Il est à noter que dans le cas où $\alpha = 0$, le mouvement brownien est appelé mouvement Brownien standard qui sera noté: $\{Z_t; t \geq 0\}$. On peut écrire le processus $\{X_t; t \geq 0\}$ en fonction de $\{Z_t; t \geq 0\}$ sous la forme suivante :

$$dX_t = \alpha dt + \sigma dZ_t$$

Où :

- dZ_t est une variable aléatoire qui suit une loi normale.
- L'espérance mathématique de dZ_t est égale à zero ($E(dZ_t) = 0$).
- La variance de dZ_t est égale a dt ($V(dZ_t) = dt$).
- Les valeurs de dZ_t , relatives à des intervalles de temps courts dt quelconques sont indépendantes.

Le drift réel α et la volatilité σ sont deux paramètres qu'on peut estimer à partir de l'historique du prix de l'actif dont le prix suit le processus X_t .

Le processus dZ_t peut s'écrire $dZ_t = \mu\sqrt{dt}$ où μ est une variable aléatoire qui suit une loi normale centrée réduite. La variable aléatoire μ^2 suit donc une loi du Khi-deux de degré 1, tel que $E(\mu^2) = 1$ et $V(\mu^2) = 2$. Or on a : $dZ_t^2 = \mu^2 dt$, on en déduit de ce qui précède que $E(dZ_t^2) = dt$ et $V(dZ_t^2) = 2dt^2$.

On peut donc affirmer que lorsque $dt \rightarrow 0$, le processus dZ_t^2 devient équivalent à dt , soit $dZ_t^2 \approx dt$.

2. *Mouvement brownien géométrique :*

Soit un processus $\{X_t; t \geq 0\}$ qui suit un mouvement brownien avec drift $\alpha \geq 0$ et une variance constante égale à σ^2 . Le processus stochastique défini par $\{Y_t = e^{X_t}; t \geq 0\}$ est appelé Mouvement Brownien Géométrique. Ce processus $\{Y_t; t \geq 0\}$ est donc toujours positif. On dit que ce processus suit à chaque instant t une loi Log-Normale dont les paramètres dépendent du temps t . L'espérance et la variance de ce processus peuvent être déduites de la loi Log-Normale.

En temps continu, un mouvement brownien géométrique s'écrit en fonction du mouvement brownien standard $\{Z_t; t \geq 0\}$ de la manière suivante :

$$\frac{dY_t}{Y_t} = \alpha dt + \sigma dZ_t$$

3. *Lemme d'Itô*¹²⁸ :

La valeur d'une option est une fonction du cours de l'action sous-jacente. De façon plus générale, la valeur d'un produit dérivé est une fonction des variables aléatoires sous-jacente au produit dérivé et du temps.

Une analyse robuste des actifs dérivés nécessite donc une complète compréhension du comportement des fonctions de variables aléatoires.

Un résultat important dans ce domaine a été établi par le mathématicien japonais *Kiyosi Itô* en 1951. Ce résultat est connu sous le nom de "*lemme d'Itô*".

Enoncé de lemme d'Itô :

Supposons que la valeur d'une variable stochastique x suive un processus d'Itô de paramètres $\alpha(x, t)$ et $\sigma(x, t)$ défini par :

$$dx = \alpha(x, t)dt + \sigma(x, t)dz$$

Le lemme d'Itô montre qu'une fonction G de x et de t est caractérisée par le processus suivant :

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial x} \alpha(x, t) + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} \sigma^2(x, t) \right) dt + \frac{\partial G}{\partial x} \sigma(x, t) dz$$

¹²⁸ Kiyoshi Itô (1915-2008) est un mathématicien japonais.

Où z est un processus de Wiener standard. Ainsi, G suit également un processus d'Itô de paramètres $\left(\frac{\partial G}{\partial x}\alpha(x, t) + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\sigma^2(x, t)\right)$ et $\frac{\partial G}{\partial x}\sigma(x, t)$.

Démonstration :

Développement de Taylor en utilisant le fait que $dz = \mu\sqrt{dt}$.

Soit $G(x, t)$ une fonction de x et du temps t . Soit le développement de Taylor de la fonction $G(x, t)$ par rapport à x et au temps t :

$$dG = \frac{\partial G}{\partial x}dx + \frac{\partial G}{\partial t}dt + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}dx^2 + \frac{\partial^2 G}{\partial x\partial t}dxdt + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 G}{\partial t^2}dt^2 + \dots$$

A l'ordre dt , on a :

$$dx^2 = (\alpha(x, t)dt + \sigma(x, t)dz)^2 \approx \sigma^2 dt \mu^2$$

Avec $\mu^2 \rightarrow \chi^2(1)$. On a donc : $E(\mu^2) = 1$ et $V(\mu^2) = 2$. On aura par conséquent :

$$E(dx^2) = \sigma^2 dt \text{ et } V(dx^2) = 2\sigma^4 dt^2$$

A l'ordre dt , on peut considérer que $V(dx^2) \approx 0$ et que dx^2 se comporte comme une constante tel que $dx^2 \approx \sigma^2 dt$. Par ailleurs, le produit de dx par dt est fournie par l'équation suivante :

$$dxdt = (\alpha(x, t)dt + \sigma(x, t)\mu\sqrt{dt})dt = \alpha dt^2 + \sigma dt^{\frac{3}{2}}$$

On peut donc penser qu'à l'ordre dt ce produit est nul : $dxdt \approx 0$.

Par conséquent, la différentielle de la fonction G peut donc s'interprète de la façon suivante :

$$dG = \frac{\partial G}{\partial x}dx + \frac{\partial G}{\partial t}dt + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\sigma^2 dt + \dots$$

Soit, en remplaçons dx par son expression, dans cette équation, on obtient l'expression de la différentielle d'une fonction G du temps et d'une variable d'état x suivant le processus prédéfini :

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial x}\alpha(x, t) + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\sigma^2(x, t)\right)dt + \frac{\partial G}{\partial x}\sigma(x, t)dz$$

A.4.9 : La démonstration de la proposition 4.2

Pour trouver le gain net seuil $(\pi^* - l^*)$ qui vérifie le principe d'optimalité de Bellman (4.26), on suppose tout d'abord que le gain net présent $(\pi - l)$ est suffisamment supérieur à celui du seuil $(\pi^* - l^*)$. Ainsi, l'équation de Bellman (4.26) se ramène à celle de (4.25). Multiplions les deux termes de l'équation (4.25) par $1 + \rho dt$, pour obtenir :

$$(1 + \rho dt)V[(\pi - l)] = (1 + \rho dt)v[(\pi - l)]dt + E[V((\pi - l) + d(\pi - l))] \quad (4.25.a)$$

Pour un dt proche de zéro, l'équation précédente sera :

$$\rho dt V[(\pi - l)] = v[(\pi - l)]dt + E[dV] \quad (4.25.b)$$

$$\text{Où } dV = V[(\pi - l) + d(\pi - l)] - V[(\pi - l)]$$

Le problème de résistance des ravageurs aux toxines *Bt* est considéré et défini comme un pourcentage ϕ de $(\pi - l)$ qui suit un processus stochastique mixte (mouvement brownien géométrique avec un processus de sauts qui obéit à une loi de Poisson). Le processus $(\pi - l)$ s'énonce tel que :

$$d(\pi - l) = \alpha(\pi - l)dt + \sigma(\pi - l)dz - (\pi - l)dq \quad (4.20)$$

dz est l'incrément d'un processus de Wiener et dq représente l'incrément d'un processus de Poisson. Le processus dz s'expose sous la forme $dz = \mu_t \sqrt{dt}$ et $\mu_t \sim i. i. d. N(0,1)$ avec $E(dz^2) = dt$. α désigne le trend (ou le drift réel) et σ indique la volatilité. Le troisième terme de membre à droite de l'équation (20) représente le risque d'un saut dans le profit quand l'agriculteur rencontre un problème de la résistance des insectes au coton *Bt*. Plus précisément :

$$dq = \begin{cases} 0 & \text{avec probabilité } 1 - \lambda dt \\ \phi & \text{avec probabilité } \lambda dt \end{cases} \quad (4.21)$$

λ désigne l'intensité du processus de poisson et ϕ dénote les coûts associés au phénomène de la résistance exprimés en pourcentage de gain net $(\pi - l)$.

En utilisant le *lemme d'Itô* (voir annexe 4.8), pour calculer le deuxième terme de membre à droite de l'équation (4.25.b) :

$$E[dV] = \frac{1}{2}\sigma^2(\pi - l)^2V''[(\pi - l)]dt + \alpha(\pi - l)V'[(\pi - l)]dt + \lambda\{V[(\pi - l) - \phi(\pi - l)] - V[(\pi - l)]\} \quad (4.25.c)$$

Remplaçons $E[dV]$ par sa valeur dans l'équation de Bellman (4.25.b) :

$$\begin{aligned} \rho dt V[(\pi - l)] &= v[(\pi - l)]dt + \frac{1}{2}\sigma^2(\pi - l)^2V''[(\pi - l)]dt + \alpha(\pi - l)V'[(\pi - l)]dt \\ &+ \lambda\{V[(\pi - l) - \phi(\pi - l)] - V[(\pi - l)]\}dt \end{aligned} \quad (4.25.d)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\sigma^2(\pi - l)^2V''[(\pi - l)] + \alpha(\pi - l)V'[(\pi - l)] - (\rho + \lambda\phi)V[(\pi - l)] \\ + \lambda V[(1 - \phi)(\pi - l)] + v[(\pi - l)] = 0 \end{aligned}$$

Une fonction d'utilité est homogène de degré un implique que l'agriculteur est neutre vis-à-vis du risque¹²⁹. Si la fonction d'utilité est homogène de degré un alors la fonction de demande *Walrassienne* et la fonction d'utilité indirecte V sont homogènes de degré un. Ainsi, l'équation précédente devient :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\sigma^2(\pi - l)^2V''[(\pi - l)] + \alpha(\pi - l)V'[(\pi - l)] - (\rho + \lambda\phi)V[(\pi - l)] + \\ v[(\pi - l)] = 0 \end{aligned} \quad (4.25.d)$$

¹²⁹ Un agriculteur neutre au risque a une fonction d'utilité linéaire.

La relation (4.25.d) est une équation différentielle de second ordre avec second membre. La solution générale de cette équation est la somme de la solution de l'équation homogène et de la solution particulière.

Commençons par donner la solution de l'équation homogène suivante :

$$\frac{1}{2}\sigma^2(\pi - l)^2 V''[(\pi - l)] + \alpha(\pi - l)V'[(\pi - l)] - (\rho + \lambda\phi)V[(\pi - l)] = 0$$

On cherche une solution de la forme $A(\pi - l)^B$, où A désigne une constante à déterminer et B la racine de polynôme caractéristique suivant :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 B(B - 1) + \alpha B - (\rho + \lambda\phi) = 0$$

On peut arranger le polynôme caractéristique ainsi :

$$\frac{1}{2}\sigma^2 B^2 + \left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)B - (\rho + \lambda\phi) = 0 \quad (4.25.e)$$

Le discriminant de ce polynôme sera donné comme suit :

$$\Delta = \left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)^2 + 2\sigma^2(\rho + \lambda\phi)$$

ρ , λ et ϕ sont positifs et par conséquent Δ est positif ce qui implique l'existence de deux racines distinctes. Le terme $(\rho + \lambda\phi)$ est positif, alors il existe une racine positive et une autre négative. On désigne par B_1 et B_2 les deux racines respectivement positive et négative. On obtient :

$$B_1 = \frac{\left(\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha\right) + \sqrt{\left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)^2 + 2\sigma^2(\rho + \lambda\phi)}}{\sigma^2} > 0$$

$$B_2 = \frac{\left(\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha\right) - \sqrt{\left(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2\right)^2 + 2\sigma^2(\rho + \lambda\phi)}}{\sigma^2} < 0$$

La solution générale de l'équation homogène peut s'interpréter telle que :

$$V(\pi - l) = A_1(\pi - l)^{B_1} + A_2(\pi - l)^{B_2}$$

Il reste encore à déterminer les constantes A_1 et A_2 . Si $(\pi - l) \rightarrow 0$ alors $(\pi - l)^{B_2} \rightarrow \infty$. Donc, A_2 doit s'annuler pour que la condition $V(0) = 0$ reste vérifiée. Par conséquent, la solution générale sera simplifiée comme suit :

$$V(\pi - l) = A_1(\pi - l)^{B_1} \quad (4.25.f)$$

B_1 s'apparente à la racine positive du polynôme caractéristique. Pour déterminer le gain net qui correspond à un certain seuil au dessous duquel le suicide devient un choix optimal, on ajoute les contraintes suivantes :

$$V(\pi^* - l^*) = S \quad (4.25.g)$$

$$V'(\pi^* - l^*) = 0 \quad (4.25.h)$$

La condition (25.g) signifie que la valeur associée à « poursuivre la vie » devrait être égale à celle associée au « suicide » à un certain seuil $(\pi^* - l^*)$. La condition (25.h) signifie qu'à l'optimum le gain marginal associé à « poursuivre la vie » devrait être égal au gain marginal associé au suicide.

Afin de calculer $(\pi^* - l^*)$ et A_1 , on doit spécifier la forme fonctionnelle au $v[(\pi - l)]$. Pour cela on énonce la forme linéaire suivante :

$$v[(\pi - l)] = \theta(\pi - l)$$

Ou θ désigne une constante positive.

La solution de l'équation différentielle (25.d) prend la forme :

$$V(\pi - l) = A_1(\pi - l)^{B_1} + \frac{\theta}{(\rho + \lambda\phi)}(\pi - l) - \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{(\rho + \lambda\phi)^2} + \frac{\alpha}{(\rho + \lambda\phi)^2} \quad (4.25.i)$$

Remplaçons l'équation (4.25.i) dans les conditions (4.25.g) et (4.25.h), on aura :

$$A_1(\pi^* - l^*)^{B_1} + \frac{\theta}{(\rho + \lambda\phi)}(\pi^* - l^*) - \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{(\rho + \lambda\phi)^2} + \frac{\alpha}{(\rho + \lambda\phi)^2} = S$$

$$A_1 B_1 (\pi^* - l^*)^{B_1 - 1} + \frac{\theta}{(\rho + \lambda\phi)} = 0$$

Des deux équations précédentes on peut déduire ainsi la valeur de $(\pi^* - l^*)$:

$$(\pi^* - l^*) = \frac{1}{\theta} \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right) \left[S(\rho + \lambda\phi) + \frac{1}{(\rho + \lambda\phi)} \left(\frac{1}{2} \sigma^2 - \alpha \right) \right]$$

avec :

$$B_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2(\rho + \lambda\phi)}{\sigma^2}}$$

A.4.10 : Statique comparative

$$(\pi^* - l^*) = \frac{1}{\theta} \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right) \left[S(\rho + \lambda\phi) + \frac{1}{(\rho + \lambda\phi)} \left(\frac{1}{2} \sigma^2 - \alpha \right) \right] \quad (4.27)$$

avec

$$B_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2(\rho + \lambda\phi)}{\sigma^2}} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial \lambda} = \frac{\phi / \sigma^2}{\sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2(\rho + \lambda\phi)}{\sigma^2}}} > 0$$

$$\frac{\partial \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right)}{\partial \lambda} = \frac{\frac{\partial B_1}{\partial \lambda} (B_1 - 1) - B_1 \frac{\partial B_1}{\partial \lambda}}{(B_1 - 1)^2} = \frac{\frac{\partial B_1}{\partial \lambda} (B_1 - 1 - B_1)}{(B_1 - 1)^2} = \frac{-\frac{\partial B_1}{\partial \lambda}}{(B_1 - 1)^2} < 0$$

$$\frac{\partial \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right)}{\partial \lambda} = \frac{1}{(B_1 - 1)^2} \frac{-\phi / \sigma^2}{\sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2(\rho + \lambda\phi)}{\sigma^2}}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\pi^* - l^*)}{\partial \lambda} &= \frac{1}{\theta} \frac{\partial \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right)}{\partial \lambda} \left[S(\rho + \lambda\phi) + \frac{1}{(\rho + \lambda\phi)} \left(\frac{1}{2} \sigma^2 - \alpha \right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{\theta} \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right) \left[S\phi - \frac{\phi}{(\rho + \lambda\phi)^2} \left(\frac{1}{2} \sigma^2 - \alpha \right) \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\pi^* - l^*)}{\partial\lambda} = \frac{1}{\theta} \frac{1}{(B_1 - 1)^2} \frac{-\phi/\sigma^2}{\sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2(\rho + \lambda\phi)}{\sigma^2}}} (\rho + \lambda\phi) \left[\mathbf{S} + \frac{1}{(\rho + \lambda\phi)^2} \left(\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha \right) \right]$$

$$+ \frac{\phi}{\theta} \left(\frac{B_1}{B_1 - 1} \right) \left[\mathbf{S} - \frac{1}{(\rho + \lambda\phi)^2} \left(\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha \right) \right]$$

Le signe est indéterminé (il pourrait être positif ou négatif) et il dépendra des valeurs prises par les paramètres spécifiques.

CHAPITRE 5

L'ADOPTION DU COTON BT ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE : UN ESSAI EMPIRIQUE

(Une approche semiparamétrique bayésienne)

5.1 Introduction

L'Inde est le deuxième producteur mondial de coton ; après la Chine, avec environ 12,1 millions d'hectares en 2011, soit un tiers de la superficie mondiale. La production de coton a atteint un record de 34 millions de balles¹³⁰ (5,8 millions de tonnes) en 2011/12, soit une augmentation de 4,6% par rapport à la saison précédente¹³¹. Cette plante est cultivée par environ 6,3 millions d'agriculteurs (2009-2010) avec une contribution de 30% dans le PIB agricole.

Cependant, la culture du coton souffre de l'attaque des insectes nuisibles. Le ver américain de la capsule (*Helicoverpa armigera*), est le ravageur le plus destructeur du coton en Inde causant une perte annuelle d'environ 300 millions de dollars. Cet insecte, ayant la capacité de développer des gènes résistants contre les différents types d'insecticides recommandés, a obligé les agriculteurs de pulvériser entre 10 et 16 fois durant une seule saison agricole (Kranthi *et al*, 2001; Ramasubramanyam, 2004). Pour faire face aux pertes de rendement, les efforts en Inde sont tournés ainsi vers l'exploitation de la technologie *Bt*. Aujourd'hui, la culture de coton *Bt* est répartie entre neuf Etats indiens : Andhra Pradesh, Gujarat, Haryana, Karnataka, Madhya Pradesh, Maharashtra, Rajasthan, et Tamil Nadu. La diffusion de semences transgéniques a été rapide au point qu'elles ont remplacé en majorité les variétés conventionnelles (*cf.* Tab 5.1).

Saison des récoltes	La superficie du coton <i>Bt</i> (Million Hectare)	% de la superficie cotonnière totale	Nombre d'agriculteurs (Million)
2002/2003	0,0445	0.58	0,054
2003/2004	0,1	1.31	0,23
2004/2005	0,5	5.57	0,3
2005/2006	1,3	14.38	1
2006/2007	3,8	41.27	2,3
2007/2008	6,2	68.88	3,8
2008/2009	7,6	82	5
2009/2010	9,4	86	6,3

Source : ISAAA (2010)

Tableau 5.1 : La commercialisation du coton *Bt* en Inde

¹³⁰1 balle \cong 170,5 kg.

¹³¹Directorate of Economics and Statistics, Department of Agriculture and Cooperation, Ministry of Agriculture, Government of India.

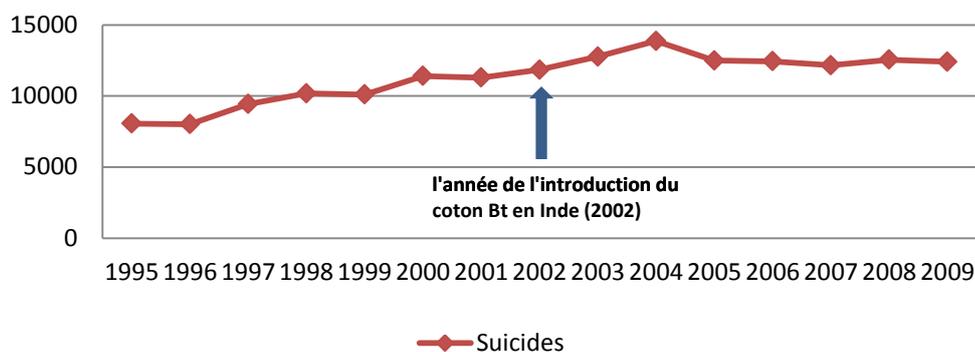
En dépit des résultats initiaux globalement favorables de l'utilisation du coton *Bt*, la culture des semences transgéniques a suscité beaucoup de controverses après son adoption en Inde. Certains militants sociaux, en particulier Vandana Shiva, affirment que les variétés transgéniques sont des « *seeds of suicide* ». Le coton transgénique a en effet provoqué l'apparition d'autres ravageurs et la plante se retrouve de nouveau menacée par ces parasites potentiellement destructeurs. Plus encore, le principal insecte ciblé, le ver de la capsule du cotonnier, a développé actuellement une résistance¹³². Selon Shiva (2009)¹³³, "*Bt-cotton, even though promoted as resistant to the bollworm, has created new pests, and to control these new pests, farmers are using 13 times more pesticides than they were using prior to introduction of Bt-cotton.*". De ce fait, l'utilisation intensive de pesticides, souvent dangereux, a aggravé les situations financières des fermiers. De même, l'achat des semences *Bt*, dont le prix est plus élevé que celui des semences conventionnelles, a contribué à l'augmentation de l'endettement, et ce d'autant plus que l'absence d'un marché du crédit formel conduit au recours à l'emprunt, sur le marché du crédit informel, à des taux usuriers. Ainsi, les agriculteurs, accablés par les dettes¹³⁴, se suicident par ingestion des pesticides. Les activistes suggèrent finalement que l'introduction du coton *Bt* sur le marché agricole indien a entraîné une vague de suicide alarmante (cf. Fig.2). Les victimes sont les petits cultivateurs du coton *Bt* surtout dans les régions d'Andhra Pradesh, de Karanataka, de Madhya Pradesh et de

¹³² Des études (Kranthi et al., 2006 ; Gujar et al., 2007) ont montré que le niveau d'expression de la toxine *Bt* n'est pas uniforme dans la plante de coton ainsi qu'au court de la saison culturale. Ce qui laisse la plante plus vulnérable aux attaques des ravageurs. Principalement, cela signifie aussi qu'il est plus probable que les chenilles de la capsule développent une résistance contre la toxine *Bt*. Les insectes, qui sont exposés à des doses sous létales de toxine, deviennent moins sensibles et finissent par devenir dominante. A ce stade, la population de ravageurs serait résistante et le coton *Bt* devient inefficace.

¹³³ Shiva (2009), "From Seeds of Suicide to Seeds of Hope: Why are Indian Farmers Committing Suicides and How can we Stop This Tragedy?", *Huffington Post*, April 28. http://www.huffingtonpost.com/vandana-shiva/from-seeds-of-suicide-to_b_192419.html

¹³⁴ Dodamani et al. (2010) ont affirmé que, dans l'Etat de Karnataka, environ 100% des cultivateurs du coton ont eu recours à un financement à crédit durant la saison agricole 2007-2008. Dans l'ensemble, seulement 10% des petits agriculteurs (qui cultivent moins de 2 hectares) ont remboursé totalement leurs dettes et 12% des grands agriculteurs (qui cultivent entre 2 et 4 hectares) ont remboursé partiellement leurs crédits. Les chiffres indiquent que les agriculteurs de l'Etat de Karnataka tombent dans le piège d'une dette absolument impossible à rembourser en raison des mauvaises récoltes. Sur le marché formel, le pourcentage de crédits remboursés représente à peine 10% du montant global. Pareillement, sur le marché informel, le montant du prêt remboursé par les agriculteurs ne dépasse pas 6% du montant total. Le remboursement presque négligeable pourrait être la cause fondamentale de suicide des agriculteurs dans les villages ruraux de Karnataka.

Maharashtra. Dans l'Etat d'Andhra Pradesh, le suicide des agriculteurs du coton *Bt* est devenu un événement quotidien¹³⁵.



Source : NCRB (2010)

Figure 5.1 : L'évolution du nombre de suicide des agriculteurs dans l'ensemble de quatre Etats de l'Inde (Andhra Pradesh, Karnataka, Maharashtra et Madhya Pradesh) : 1995-2009

Néanmoins, d'autres études suggèrent que l'augmentation des suicides des agriculteurs serait due à une combinaison de divers facteurs socio-économiques. Gruère et Sengupta (2011) ont précisé que l'adoption du coton *Bt* en Inde n'est ni une condition nécessaire ni une condition suffisante pour expliquer la question du suicide des agriculteurs. Pour ces auteurs, le coton *Bt* se serait montré très efficace en Inde mais le contexte au cours duquel ce coton fut introduit a généré des déceptions bien que la technologie en elle-même ne soit pas à blâmer. En effet, de nombreux autres facteurs de risque, qui ne sont pas tous liés à l'agriculture, ont probablement joué un rôle prépondérant dans le désespoir et par conséquent dans les suicides des agriculteurs : des conditions climatiques rugueuses, des situations économiques et sociales désastreuses et autres problèmes globaux (absence d'assurance, système d'irrigation non efficace, système bancaire douteux, pesticides hautement toxiques...). La cause principale enregistrée par cette étude est le lien indirect entre le coton *Bt* (par le biais de la perte de récoltes) et l'incapacité des agriculteurs à rembourser leurs dettes.

¹³⁵ Officiellement le nombre total de suicides, durant les deux mois de juillet et d'Aout 2009, s'élevait à 15 mais les partis opposant ainsi que les groupes des agriculteurs ont déclaré un total réel plus que 150 (Associated Press, 27 Août 2009).

	2005-06	2006-07	2007-08	2008-09	2009-10
Andhra Pradesh	1997	1394	1541	1381	1015
Gujarat	2700	2670	2660	2650	2750
Karnataka	1638	1362	1588	1675	1647
Maharashtra	3198	3193	3050	2400	4639
Punjab	5610	5975	6080	5760	5810
Madhya Pradesh	787	957	696	663	645
L'Inde	39773	41515	43630	43860	41822

Source: Directorate of Plant Protection (<http://ppqs.gov.in/IpmPesticides.htm>)

Tableau 5.2 : l'utilisation de pesticides (tonnes métriques).

L'objectif de ce chapitre est de tester la présence d'une relation de causalité entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde. Ladite relation ne peut avoir lieu que par le biais du surendettement. Même après la comptabilisation d'une réduction momentanée dans les coûts de production, dû à une baisse dans l'utilisation de pesticides, la diminution de l'efficacité des toxines *Bt* (l'acquisition de résistances chez les ravageurs aux toxines *Bt*) a induit de nouveau une augmentation significative du nombre des pulvérisations contre la chenille résistante à la protéine *Bt*. Ces paysans se sont souvent endettés pour acquérir le coton *Bt* et utiliser encore plus de pesticides. Cette situation a propulsé les agriculteurs dans un cycle d'endettement croissant qui, pour la plupart, est devenu insoutenable. L'agriculteur se trouve dans l'incapacité de rembourser sa dette, il va choisir ainsi de se suicider plutôt que de subir les coûts financiers et sociaux de la dette.

5.2 L'analyse empirique

Pour tester le lien de causalité entre l'introduction des semences *Bt* et l'augmentation permanente du nombre de suicides des agriculteurs de coton en Inde, nous considérons une approche d'estimation semiparamétrique bayésienne à variables instrumentales. Nous utilisons l'endettement comme instrument et nous émettons ainsi les deux hypothèses suivantes :

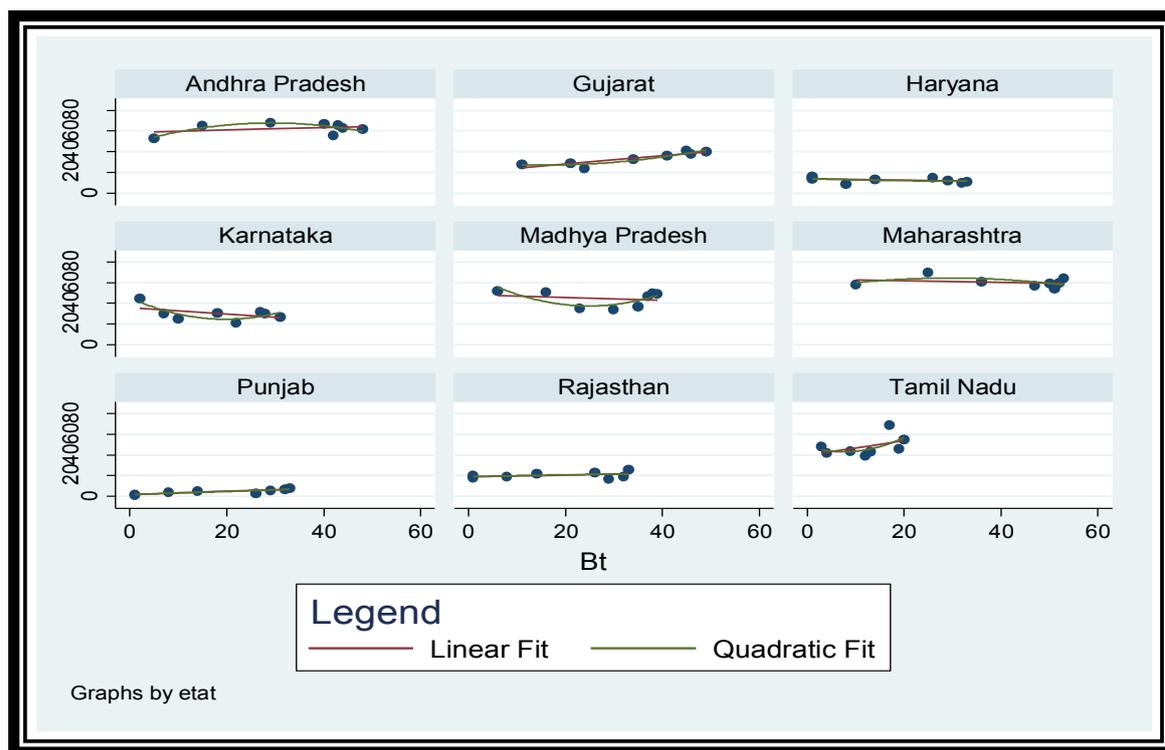
(i) L'endettement et le suicide sont positivement corrélés. Cette hypothèse, est assez intuitive. En effet, l'utilisation du coton génétiquement modifié nécessite davantage le recours à des crédits pour acquérir les semences et les pesticides. Etant donné que l'agriculteur se trouve dans l'incapacité de rembourser sa dette, il va choisir de se suicider plutôt que de subir les coûts financiers et sociaux de la dette (les agriculteurs seront menacés de l'expropriation de leur terre).

(ii) L'utilisation des semences *Bt* n'a pas d'effet sur le taux de suicide des paysans que par le biais de l'endettement. Cette relation s'explique par le fait que l'adoption de la technologie génétiquement modifiée ne change que le montant initial du crédit nécessaire à l'achat des semences transgéniques.

Le modèle de régression semiparamétrique bayésienne, exprimant le suicide comme une fonction non paramétrique du taux d'adoption des semences *Bt* (voir Fig. 5.3), se présente comme suit :

$$\ln S_{it} = X_{it}\theta + f(\ln P_{it}) + u_{it} \quad (5.1)$$

Où les indices i et t désignent respectivement l'Etat indien et l'année. La variable dépendante $\ln S_{it}$ s'apparente au logarithme naturel du taux de suicide, les variables indépendantes X_{it} sont définies par l'ensemble des variables logarithmiques : rendement du coton par hectare et la quantité utilisée des pesticides dans le processus de production du coton. La variable P_{it} se réfère au logarithme du taux d'adoption de variétés *Bt* par rapport à la superficie totale du coton. Enfin, u_{it} représente les termes d'erreur et $f(.)$ une fonction non paramétrique deux fois continûment différentiable sur un intervalle $[a, b]$.



Source : auteur

Linear Fit : Ajustement linéaire, *Quadratic Fit* : Ajustement Quadratique. (Les taux d'adoption du coton Bt sont en abscisses, par contre les taux de suicide sont en ordonnées).

Figure 5.2 : Les ajustements linéaire et quadratique de la relation entre l'adoption du coton Bt et le suicide des agriculteurs par Etat en Inde

La première préoccupation économétrique de l'équation (5.1) est l'endogénéité de la variable taux d'adoption de variétés Bt qui semble être corrélée avec les termes d'erreur u_{it} . En effet, il existe des facteurs inobservables qui affectent à la fois le taux de suicide des paysans et le taux d'adoption de coton Bt. Ces facteurs pourraient être le climat, l'aversion au risque ou d'autres facteurs spécifiques à chaque Etat. Par conséquent, il peut y avoir une corrélation entre les termes d'erreur et la variable taux d'adoption de la nouvelle technologie Bt telle que $E(u|lnP, X) \neq 0$. Une telle corrélation génère un biais dans l'estimation de la fonction non paramétrique $f(.)$ de l'équation (5.1). Afin de résoudre ce problème d'endogénéité, nous imposons deux perfectionnements à l'équation (5.1). *Primo*, on décompose les termes d'erreur de l'équation (5.1) comme suit : $u_{it} = \alpha_{1i} + \varepsilon_{it}$. Cette décomposition doit contrôler les effets individuels (spécifique à chaque Etat) à travers le coefficient α_{1i} pour faire face au biais d'endogénéité¹³⁶ résultant de variables omises (spécifiques à l'Etat). *Secundo*, nous introduisons une équation de régression IV

¹³⁶ En présence d'endogénéité, l'espérance du terme d'erreur conditionnelle à la variable explicative n'est plus nulle et les estimateurs habituels présentent des biais.

(instrumentale) pour la variable taux d'adoption en utilisant la variable endettement comme étant un instrument afin de résoudre le problème de biais d'endogénéité¹³⁷.

Généralement, il peut y avoir deux effets contraires associés à la corrélation entre le taux d'adoption de la technologie *Bt* et l'endettement du cultivateur de ce type du coton. D'une part, l'adoption des nouvelles semences transgéniques pourrait augmenter le rendement ce qui entraîne une augmentation dans le revenu de l'agriculteur et par conséquent le taux d'endettement diminue. D'autre part, la diffusion des semences transgéniques conduit à l'endettement. Donc, la déduction de l'effet net est une question empirique. En effet, la situation de monopole de la multinationale *Monsanto* a rendu le prix des semences *Bt* très élevé qui a conduit l'agriculteur à s'endetter pour acquérir cet *input*. Plus encore, une fois les semences transgéniques adoptées, il n'est plus possible de conserver les graines pour les replanter l'année suivante. Les cultivateurs du coton doivent donc acquérir les semences chaque saison ; ce qui maintient la demande à la fois pour les semences transgéniques et pour les crédits. L'accès au crédit se fait le plus souvent à des taux usuriers (*money lenders*). Ce taux est généralement plus élevé que le taux du marché, le service de la dette croît plus vite que la capacité de remboursement des ménages jusqu'à mettre les ménages en situation de surendettement¹³⁸.

L'équation de régression IV (instrumentale) de la variable taux d'adoption s'écrit comme suit :

$$\ln P_{it} = \alpha_{2i} + X_{it}\gamma_1 + \ln D_{it}\gamma_2 + v_{it} \quad (5.1)$$

Où $\ln D_{it}$ désigne le logarithme du nombre d'agriculteurs en situation de surendettement. Enfin, il est question d'estimer le système d'équations suivant :

$$\ln S_{it} = \alpha_{1i} + X_{it}\theta + f(\ln P_{it}) + \varepsilon_{it} \quad (5.1)$$

$$\ln P_{it} = \alpha_{2i} + X_{it}\gamma_1 + \ln D_{it}\gamma_2 + v_{it} \quad (5.2)$$

¹³⁷ Le choix entre la régression à variables instrumentales et le modèle classique simple se fera avec le critère d'information de déviance DIC (*Deviance Information Criteria*) donné par le logiciel WinBUGS (Spiegelhalter *et al.*, 2002). Le DIC est une généralisation de critère d'information AIC (*Akaike's Information Criterion*). Ce critère est composé de deux termes : un pour évaluer l'ajustement du modèle aux données et un pour mesurer la complexité du modèle c'est-à-dire le nombre effectif des paramètres constituant le modèle. Le modèle le plus performant est celui qui donne une valeur de DIC plus faible.

¹³⁸ Bazin, D., Berenger, V., Bhukuth, A. et Kheraief, N. (2013).

Pour l'équation (5.1), il s'agit d'un modèle semiparamétrique qui diffère d'un modèle standard par le fait que la forme de la réponse de certaines variables explicatives ne dépend pas directement des données mais par l'intermédiaire d'une fonction non paramétrique¹³⁹. Les variables instrumentales $\ln D_{it}$ sont supposées exogènes au système dans le sens que celles-ci sont indépendantes de u_{it} et de v_{it} .

La fonction non paramétrique pourrait être approximée par un polynôme quadratique¹⁴⁰ en taux d'adoption du coton Bt (voir Fig. 5.3). Le modèle semiparamétrique devient alors :

$$\begin{aligned}\ln S_{it} &= \alpha_{1i} + X_{it}\theta + b'_{it}\beta_p + u_{it} \\ \ln P_{it} &= \alpha_{2i} + \ln D_{it}\gamma + v_{it}\end{aligned}$$

On propose l'utilisation des techniques d'estimation *Bayésienne* qui présentent plusieurs avantages. *Primo*, d'un point de vue économétrique, les méthodes bayésiennes permettent d'obtenir des estimateurs efficaces résultant d'une procédure d'estimation simultanée de tous les paramètres (y compris les paramètres associés à la variable endogène ainsi que les écarts-types). Ceux-ci peuvent être estimés grâce à l'utilisation de méthodes de simulation *Monte Carlo par Chaînes de Markov* (MCMC). Les méthodes MCMC regroupent un ensemble d'algorithmes permettant d'appréhender par simulation des systèmes qui ne peuvent être résolus de façon analytique. *Secundo*, en comparaison avec l'approche dite standard, les méthodes bayésiennes permettent une nette amélioration en termes de biais et de la variance des estimateurs en particulier pour les échantillons de taille réduite. L'idée de base est de générer un grand nombre d'échantillons distribués selon une certaine loi de probabilité d'intérêt afin d'obtenir des estimateurs convergents. *Tertio*, ces méthodes sont également intéressantes dans la mesure où celles-ci sont de plus en plus utilisées pour estimer les

¹³⁹ L'estimation semiparamétrique d'une régression linéaire partielle pourrait être obtenue en utilisant la commande PLREG développé par Lokshin (2006) sous Stata. Grace à cette estimation, on peut également déduire le résultat du test de spécification paramétrique de la fonction f . Le test peut être mené pour comparer le modèle paramétrique (l'hypothèse nulle) avec celui linéaire partiel (l'hypothèse alternative). Ce test pourrait être mis en œuvre en utilisant la moyenne des résidus au carré associée au modèle paramétrique s_{res}^2 et celle associée à la régression linéaire partielle s_{diff}^2 . La statistique du test s'écrit : $V = \sqrt{m \cdot n} \frac{(s_{res}^2 - s_{diff}^2)}{s_{diff}^2}$, où m et n désignent respectivement l'ordre de la différentiation du modèle linéaire partiel et la taille de l'échantillon. La statistique V , qui converge vers une loi normale centrée réduite sous l'hypothèse nulle, est égale à 3.881 et correspond à une « p-value » égale à 0.000. Alors on refuse l'hypothèse nulle et par conséquent f est une fonction non paramétrique.

¹⁴⁰ Pour de longues séries des données, le lissage de la fonction non paramétrique pourrait être fait par la spline naturelle cubique (Chib et Greenberg, 2010).

paramètres de modèles complexes. La puissance de ces méthodes réside dans le fait qu'elles sont capables de traiter numériquement des problèmes d'intégration complexes.

Les outils de modélisation bayésienne choisis dans le cadre de ce chapitre peuvent donc vraisemblablement faciliter l'extraction de l'information contenue dans notre base de données (disponible en dimension réduite) et permettre ainsi l'assemblage des connaissances.

5.2.1 L'analyse bayésienne¹⁴¹ :

Le modèle est constitué de deux équations sur des données de panel à effets individuels fixes :

$$s_{it} = \alpha_{1i} + x_{it}\theta + b'_{it}\beta_p + \varepsilon_{it} \quad (5.1)$$

$$p_{it} = \alpha_{2i} + x_{it}\gamma_1 + d_{it}\gamma_2 + v_{it} \quad (5.2)$$

Où :

s_{it} représente le logarithme du nombre de suicides des agriculteurs du coton Bt dans l'Etat i ($i=1, \dots, n$) durant l'année t ($t=1, \dots, T$)¹⁴².

p_{it} renvoi au logarithme du taux d'adoption du coton Bt (en millier d'hectares) dans l'Etat i ($i=1, \dots, n$) pendant l'année t ($t=1, \dots, T$).

d_{it} désigne le logarithme du nombre d'agriculteurs du coton Bt surendettés dans l'Etat i ($i=1, \dots, n$) durant l'année t ($t=1, \dots, T$).

x_{it} est composée de deux variables exogènes :

a) le logarithme du rendement de coton Bt dans l'Etat i ($i=1, \dots, n$) durant l'année t ($t=1, \dots, T$) ;

b) le logarithme de la quantité de pesticides utilisée par l'Etat i ($i=1, \dots, n$) durant l'année t ($t=1, \dots, T$).

¹⁴¹ Voir l'annexe A.5.1 pour un rappel sur l'inférence bayésienne.

¹⁴² $n=9$ et $T=8$, alors le nombre total d'observations $N = n \times T = 9 \times 8 = 72$.

b'_{it} est l'approximation quadratique du terme non paramétrique. Ainsi, $\beta_p = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$ et $b_{it} = \begin{pmatrix} p_{it} \\ (p_{it})^2 \end{pmatrix}$.

α_{1i} et α_{2i} sont les effets fixes individuels pour l'Etat i ($i=1, \dots, n$).

ε_{it} et v_{it} sont les termes d'erreurs de l'Etat i ($i=1, \dots, n$) durant l'année t ($t=1, \dots, T$).

Les effets fixes individuels $\alpha_i = (\alpha_{1i}, \alpha_{2i})'$ sont supposés indépendants et distribués suivant une loi normale : $\alpha_i \sim N(\mathbf{0}, \Sigma_\alpha)$. Les termes d'erreurs $\varepsilon_{it} = (\varepsilon_{it}, v_{it})'$ sont également supposés indépendants et distribués suivant une loi normale : $\varepsilon_{it} \sim N(\mathbf{0}, \Sigma_\varepsilon)$. Enfin, les effets fixes individuels et les termes d'erreurs sont indépendants de variables exogènes et instrumentales. On définit $\Psi_\alpha = \Sigma_\alpha^{-1}$ et $\Psi_\varepsilon = \Sigma_\varepsilon^{-1}$.

a. Les lois a priori

La mise en œuvre de l'inférence bayésienne nécessite la spécification d'une loi *a priori* jointe pour l'ensemble des paramètres. Pour ce faire, une distribution a priori sera définie pour chacun des paramètres du modèle. Dans notre cas, on a choisi d'utiliser des lois *a priori* faiblement informatives¹⁴³ (voir annexe A.5.1) sur les paramètres θ , γ , et β . On a ainsi :

- $\theta_i \sim N(\mu_{\theta_i, \text{prior}}, \sigma_{\theta_i, \text{prior}}^2)$ pour $i=1, 2$;
- $\beta_j \sim N(\mu_{\beta_j, \text{prior}}, \sigma_{\beta_j, \text{prior}}^2)$ pour $j=1, 2$;
- $\gamma_k \sim N(\mu_{\gamma_k, \text{prior}}, \sigma_{\gamma_k, \text{prior}}^2)$ pour $k=1, 2, 3$ et
- pour les matrices de précision¹⁴⁴ Ψ_α et Ψ_ε une distribution *a priori* Wishart (voir annexe A.5.3). Cette loi est stable dans le sens où la loi *a posteriori* reste une loi de Wishart. On a ainsi :

$$p(\Psi_\alpha) \propto |\Psi_\alpha|^{-3/2} \text{ et } p(\Psi_\varepsilon) \propto |\Psi_\varepsilon|^{-3/2}.$$

¹⁴³ Il s'agit de densités de probabilité définies avec une grande variance. Le choix d'une distribution *a priori* faiblement informative reflète l'absence d'information sur la loi *a priori* du paramètre.

¹⁴⁴ La matrice de précision désigne l'inverse de la matrice de variance-covariance.

Les paramètres	Priors faiblement informatifs (vague Prior)
θ_1	$\theta_1 \sim N(\mu_1, \tau_1)$ avec $\tau_1 = 1/\sigma_1^2$ (le programme WinBUGS prend la loi normale en paramètres moyenne et précision où la précision est définie comme l'inverse de la variance) $\mu_1 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_1 \sim U(0, 2)$
θ_2	$\theta_2 \sim N(\mu_2, \tau_2)$ avec $\tau_2 = 1/\sigma_2^2$ $\mu_2 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_2 \sim U(0, 2)$
β_1	$\beta_1 \sim N(\mu_3, \tau_3)$ avec $\tau_3 = 1/\sigma_3^2$ $\mu_3 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_3 \sim U(0, 2)$
β_2	$\beta_2 \sim N(\mu_4, \tau_4)$ avec $\tau_4 = 1/\sigma_4^2$ $\mu_4 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_4 \sim U(0, 2)$
γ_1	$\gamma_1 \sim N(\mu_5, \tau_5)$ avec $\tau_5 = 1/\sigma_5^2$ $\mu_5 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_5 \sim U(0, 2)$
γ_2	$\gamma_2 \sim N(\mu_5, \tau_5)$ avec $\tau_5 = 1/\sigma_5^2$ $\mu_5 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_5 \sim U(0, 2)$
γ_3	$\gamma_3 \sim N(\mu_6, \tau_6)$ avec $\tau_6 = 1/\sigma_6^2$ $\mu_6 \sim N(0, 0.001)$ et $\sigma_6 \sim U(0, 2)$
Σ_ϵ	$\Sigma_\epsilon^{-1} \sim W\left(\begin{pmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{pmatrix}, 2\right)$
Σ_α	$\Sigma_\alpha^{-1} \sim W\left(\begin{pmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{pmatrix}, 2\right)$

Tableau 5.3 : Lois *a priori* marginales pour le modèle

La distribution *a priori* jointe du paramètre $\varphi = \{\theta, \gamma_1, \gamma_2, \beta, \Psi_\alpha, \Psi_\epsilon\}$ sera ainsi donnée par l'expression suivante :

$$\begin{aligned}
 p(\varphi) &= p(\theta, \gamma, \beta, \Psi_\alpha, \Psi_\epsilon) \\
 &\propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left\{\sum_{i=1}^2 \frac{(\theta_i - \mu_{\theta_i, \text{prior}})^2}{\sigma_{\theta_i, \text{prior}}^2} + \sum_{j=1}^2 \frac{(\beta_j - \mu_{\beta_j, \text{prior}})^2}{\sigma_{\beta_j, \text{prior}}^2} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \sum_{k=1}^3 \frac{(\gamma_k - \mu_{\gamma_k, \text{prior}})^2}{\sigma_{\gamma_k, \text{prior}}^2} + \right\}\right) |\Psi_\alpha|^{-3/2} |\Psi_\epsilon|^{-3/2}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

On a supposé l'indépendance *a priori*, de façon que la distribution *a priori* jointe est simplement le produit des lois *a priori* marginales (équation 5.4). Le choix d'une telle hypothèse, fréquemment utilisée en inférence bayésienne, n'est que très peu contraignant car la corrélation qui peut exister entre les paramètres est prise en compte *a posteriori*. Dans le cas de *priors* faiblement informatifs, l'hypothèse de l'indépendance *a priori* est absolument sans conséquence (l'effet de la distribution *a priori faiblement informative* sur celle *a posteriori* est minimal).

b. La distribution a posteriori jointe

Notre modèle suppose l'existence des effets individuels latents non observables α_i , l'estimation des paramètres inconnus n'est alors pas directe. Une méthode indirecte est possible fondée sur le calcul de *la vraisemblance des données complètes* au lieu du calcul direct de la vraisemblance des données observées (Gelman *et al.*, 1995, p. 201-202). La vraisemblance des données complètes est définie par le produit entre la vraisemblance des données observées et celle des effets individuels latents non observables (Robert et Casella, 2011, p. 125).

Formellement, le vecteur α désigne le vecteur des effets individuels latents non observables appartenant à \mathbb{R}^n et le vecteur (s, x, α) est appelé vecteur des données complètes. On appellera vraisemblance complète, la vraisemblance calculée à partir des données complètes (s, x, α) qui s'écrit :

$$\underbrace{p(s, x, \alpha | b, d, \varphi)}_{\text{La vraisemblance des données complètes}} = \underbrace{p(s, x | \alpha, b, d, \varphi)}_{\text{La vraisemblance des données observées}} \cdot \underbrace{p(\alpha | b, d, \varphi)}_{\text{La vraisemblance des effets individuels}} \tag{5.4}$$

où

$$\begin{aligned}
 & p(s, x | \alpha, b, d, \varphi) = \\
 & (2\pi)^{-N} |\Psi_\epsilon|^{N/2} \times \\
 & \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it}\theta - b'_{it}\beta_p - \alpha_{1i} \\ p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i} \end{pmatrix}' \Psi_\epsilon \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it}\theta - b'_{it}\beta_p - \alpha_{1i} \\ p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i} \end{pmatrix} \right] \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

et

$$p(\alpha | b, d, \varphi) = (2\pi)^{-n} |\Psi_\alpha|^{n/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \mu_\alpha)' \Psi_\alpha (\alpha_i - \mu_\alpha) \right]$$

Le calcul de vraisemblance est souvent inaccessible dans le cas non gaussien. Pour cela, la distribution gaussienne multivariée est généralement utilisée (l'équation 5.5). Ainsi, la distribution *a posteriori* jointe s'écrit :

$$\underbrace{p(\varphi, \alpha | s, x, b, d)}_{\text{La distribution a posteriori jointe}} \propto \underbrace{p(\varphi)}_{\text{La loi a priori jointe du paramètre } \varphi} \cdot \underbrace{p(s, x, \alpha | b, d, \varphi)}_{\text{La vraisemblance des données complètes}} \quad (5.6)$$

d'où :

$$\begin{aligned}
 & p(\varphi, \alpha | s, x, b, d) \\
 & \propto |\Psi_\epsilon|^{N-3} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it}\theta - b'_{it}\beta_p - \alpha_{1i} \\ p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i} \end{pmatrix}' \Psi_\epsilon \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it}\theta - b'_{it}\beta_p - \alpha_{1i} \\ p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i} \end{pmatrix} \right] \\
 & \times |\Psi_\alpha|^{n-3} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \mu_\alpha)' \Psi_\alpha (\alpha_i - \mu_\alpha) \right] \exp \left(-\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{(\theta_i - \mu_{\theta_i, \text{prior}})^2}{\sigma_{\theta_i, \text{prior}}^2} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{j=1}^2 \frac{(\beta_j - \mu_{\beta_j, \text{prior}})^2}{\sigma_{\beta_j, \text{prior}}^2} + \sum_{k=1}^3 \frac{(\gamma_k - \mu_{\gamma_k, \text{prior}})^2}{\sigma_{\gamma_k, \text{prior}}^2} \right\} \right) \quad (5.7)
 \end{aligned}$$

c. Les distributions conditionnelles a posteriori et l'échantillonneur de Gibbs :

La distribution *a posteriori* jointe (5.7) ne prend pas la forme d'une densité connue et par conséquent ne peut pas être utilisée directement pour déduire l'inférence bayésienne. On peut être intéressé par les caractéristiques (la moyenne et la variance) de chacun des paramètres du modèle. Toutefois, il n'existe pas de formules analytiques simples pour ces caractéristiques a posteriori et par conséquent la simulation sera nécessaire. De ce fait, on utilise l'échantillonneur de Gibbs (Geman et Geman, 1981), décrit dans l'annexe A.5.1, afin de simuler la distribution a posteriori de paramètres inconnus du modèle. Notre approche d'échantillonneur de Gibbs est fondée sur les résultats de Rossi *et al.* (2005) et Koop (2003). L'idée de la méthode de simulation de Gibbs consiste à générer les paramètres inconnus alternativement selon leurs distributions conditionnelles *a posteriori* décrites dans l'annexe A.5.4.

5.2.2 Données et logiciel utilisés :

a. Les données :

Nos estimations sont fondées sur des données de panel. L'échantillon est composé de neuf Etats indiens¹⁴⁵ durant la période 2003-2010 (données agrégées par Etat). On a utilisé, pour chaque Etat, les variables suivantes :

1. Le nombre de suicides des agriculteurs du coton (National Crime Records Bureau of the Ministry of Home Affairs, 2011).

2. Le rendement moyen du coton *Bt* (kg par hectare). Les sources des données relatives à cette variable sont : *The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA, 2010) et IndiaStat (*Agricultural Statistics*).

3. La quantité de pesticide utilisée dans la culture de variétés *Bt* (litres par hectare). Les sources des données relatives à cette variable sont : les données officielles en IndiaStat (*Agricultural Statistics*) et *The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA, 2010).

4. La surface consacrée au coton *Bt* par rapport à la superficie totale (le taux d'adoption en pourcentage). Les sources de données relatives à cette variable sont : IndiaStat (*Agricultural Statistics*) et *The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA, 2010).

5. Le nombre des agriculteurs endettés. Cette série a été générée à partir de deux rapports de « *National Sample Survey Organisation (NSSO) in the Ministry of Statistics & Programme Implementation* » (Mai, 2005)¹⁴⁶.

b. Le logiciel WINBUGS :

La méthode de modélisation bayésienne la plus utilisée par les statisticiens est la méthode d'échantillonnage de Gibbs. En utilisant cette méthode, WINBUGS¹⁴⁷ (Spiegelhalter, Thomas, Best et Gilks, 1996) représente un excellent logiciel pour la modélisation bayésienne. Il offre un échantillonneur de Gibbs doté de nombreuses caractéristiques (CODA, trace, history, graphiques..) très utiles pour le diagnostic de la convergence. WinBUGS (disponible

¹⁴⁵ Maharashtra, Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh, Gujarat, Karnataka, Tamil Nadu, Punjab, Haryana et Rajasthan.

¹⁴⁶ Les rapports de NSSO N° : 501(59/18.2/2) et 498 (59/33/1).

¹⁴⁷ WinBUGS (*Bayesian inference Using Gibbs Sampling for Windows*) a été développé par l'unité « MRC Biostatistics » de l'université de Cambridge. C'est un logiciel gratuit (la version actuelle est WinBUGS 1.4.3).

gratuitement sur <http://www.mrcbsu.cam.ac.uk/bugs/winbugs/contents.shtml>) est un logiciel pour le système d'exploitation Windows qui vise à faciliter l'utilisation de l'approche bayésienne. Ce logiciel fait partie du projet BUGS (**B**ayesian inference **U**sing **G**ibbs **S**ampling) qui utilise la méthode de l'échantillonneur de Gibbs (Gibbs sampling) avec des algorithmes Monte Carlo par Chaîne de Markov (MCMC). BUGS commence avec un modèle composé des lois *a priori* et une chaîne (ou plusieurs chaînes) de valeurs initiales pour révéler les *outputs*¹⁴⁸ de la loi *a posteriori*. Le logiciel WinBUGS permet de calculer, pour chaque modèle, la valeur moyenne, la médiane, et l'intervalle de crédibilité¹⁴⁹ à 95% (2,5 et 97,5 percentiles).

Dans la pratique, une des difficultés des algorithmes MCMC est la vérification de la convergence. Avant de procéder aux inférences, il est crucial de s'assurer que l'échantillon MCMC peut être considéré comme représentatif de la loi *a posteriori*. Au cours de ce travail, la convergence des algorithmes MCMC serait vérifiée par un examen visuel des chaînes MCMC et complété par un calcul de la statistique de convergence de Raftery-Lewis (1992) pour pouvoir reporter des paramètres suffisamment précis (voir annexe A.5.2.b). Le calcul de cette statistique est proposé en routine par le logiciel WinBUGS et le package « R-CODA » (*Convergence Diagnostics and Output Analysis* sous le logiciel R) développé parallèlement à la famille de logiciels BUGS. Ce diagnostic de convergence permet de déterminer la longueur de la chaîne de Markov (le nombre d'itérations nécessaire pour pouvoir estimer un quantile de la loi *a posteriori* à partir de la chaîne de Markov simulée) ainsi que le nombre d'itérations correspondant à *la période de chauffe*. Le diagnostic de convergence de Raftery-Lewis (1992) permet également de déterminer l'intervalle d'amincissement ("thinning interval") pour réduire l'autocorrélation.

Suivant les résultats de diagnostic de Raftery-Lewis (1992), 450 000 itérations ont été effectuées afin d'obtenir des chaînes de Markov suffisamment longues pour pouvoir reporter des paramètres assez précis. Le nombre d'itérations correspondant à la période de chauffe est égal à 1000 (voir annexe A.5.2.b). Pour que l'échantillon final, généré par la méthode

¹⁴⁸ Les outputs sont donnés par le biais de l'algorithme de Gibbs qui est implémenté déjà dans le logiciel WinBUGS.

¹⁴⁹ L'intervalle de crédibilité est l'équivalent bayésien de l'intervalle de confiance pour la statistique classique. Par définition, un intervalle de crédibilité au niveau α est un intervalle tel que la probabilité que le paramètre lui appartient, selon la distribution *a posteriori*, est égale à $(1-\alpha)$.

MCMC, soit indépendant l'intervalle d'amincissement doit être égal à 121 (voir annexe A.5.2.b).

5.2.3 Les résultats d'estimation

Comme nous l'avons déjà mentionné, on a utilisé des simulations de type MCMC pour échantillonner les paramètres d'un modèle semiparamétrique en présence d'endogénéité. Sous le paradigme bayésien, ces paramètres sont considérés comme des variables aléatoires. Pour l'équation principale, on a inclus une variable endogène, le nombre de suicide des agriculteurs et quatre variables explicatives, à savoir le rendement du coton *Bt* par hectare, le taux d'adoption du coton *Bt* (le terme linéaire), le taux d'adoption du coton *Bt* au carré (le terme quadratique) et la quantité de pesticides utilisée par hectare ainsi qu'une variable latente qui décrit l'effet individuel. Dans l'équation instrumentale on a considéré l'adoption du coton *Bt* comme une variable endogène, le nombre des agriculteurs endettés comme instrument et deux variables exogènes, à savoir le rendement du coton *Bt* par hectare et la quantité des pesticides utilisée par hectare ainsi qu'une variable latente qui décrit l'effet individuel. Enfin, dans cette application, nous avons écarté les 1000 premières itérations de la chaîne MCMC¹⁵⁰ et l'estimation a été calculée à partir de valeur de la distribution *a posteriori* obtenue sur les 450000 dernières itérations. Enfin, une règle empirique bayésienne a été vérifiée pour tous les paramètres : le rapport entre les erreurs de Monte Carlo (*MC error*) et les écarts-types (*SD*) doit être inférieur à 0.05.

a. L'effet de l'adoption du coton *Bt* sur le suicide des agriculteurs

Pour les neuf Etats indiens, ces coefficients sont désignés par *bêta* (termes linéaire et quadratique). Les estimations bayésiennes de ces coefficients permettent de mesurer la variation en pourcentage de suicides par rapport à un accroissement dans le taux d'adoption du coton transgénique. Le diagnostic de Raftery-Lewis a indiqué le nombre d'itérations nécessaire pour que la chaîne converge vers la loi cible stationnaire. Après avoir effectué les 450000 itérations, constituant notre chaîne de Markov, les principales caractéristiques de lois *a posteriori* marginales obtenues, sont résumées dans les tableaux 5.3 et 5.4. La qualité des graphes des densités *a posteriori* est satisfaisante, la loi normale étant conjuguée avec elle-même et la loi *a posteriori* est ainsi une densité gaussienne (Fig. 5.4).

¹⁵⁰ Par conséquent, l'influence de la loi *a priori* finit par disparaître.

WinBUGS a ainsi estimé les paramètres « bêta » (associés aux termes linéaire et quadratique) 450000 fois. Les résultats obtenus représentent les moyennes de 450000 itérations ainsi que leurs écarts-types. Avec ces estimations, on trouve également des intervalles de crédibilité de niveau 95% qui sont définis par les quantiles de niveau 2.5% et 97.5% de la loi *a posteriori* empirique. Formellement, si on désigne par I l'intervalle de crédibilité, β le paramètre estimé, x les observations et le niveau de risque $\alpha \in]0, 1[$, on a :

$$P(\beta \in I|x) = \int_I \pi(\beta|x)d\beta = 1 - \alpha \quad (5.8)$$

Ces intervalles permettent de juger la significativité d'un paramètre. En fait, si les bornes supérieures et inférieures de l'intervalle de crédibilité sont du même signe, le paramètre a ainsi un effet significatif. Cet effet sera positif ou négatif selon le signe de l'estimation de la moyenne de ce paramètre (c'est-à-dire, dans le cas de notre cas, la variable « suicide des agriculteurs » du coton augmente –signe positif– ou diminue –signe négatif– par rapport à l'adoption du coton *Bt*). Par contre, si la valeur « zéro » est comprise dans cet intervalle, le paramètre n'aura pas d'effet significatif.

	mean	SD	MC error	2.5%	median	97.5%	start	sample
beta [1,1]	-0.043	2.783	0.100	-	0.033	6.695	1001	450000
				6.498				
beta [1,2]	0.950	4.181	0.157	-	0.397	15.58	1001	450000
				4.203				
beta [1,3]	-3.471	4.222	0.155	-	-2.419	1.606	1001	450000
				14.64				
beta [1,4]	-6.710	8.356	0.318	-	-3.082	-0.243	1001	450000
				30.33				
beta [1,5]	1.018	3.070	0.109	-	1.05	6.839	1001	450000
				6.255				
beta [1,6]	15.23	11.26	0.422	-	14.34	39.78	1001	450000
				4.806				
beta [1,7]	-1.842	5.780	0.218	-22.6	0.031	0.575	1001	450000

beta [1,8]	-0.819	5.330	0.202	-	-0.069	7.019	1001	450000
				19.08				
beta [1,9]*	-0.0792	0.545	0.019	-	-0.0674	-0.0200	1001	450000
				2.468				

Maharashtra = 1; Andhra Pradesh = 2; Karnataka = 3; Madhya Pradesh = 4; Gujarat = 5; Tamil Nadu = 6; Punjab = 7; Rajasthan = 8; Haryana = 9.

Le terme linéaire = 1. * : signifie que le résultat est significatif

Tableau 5.4 : Statistiques descriptives des lois marginales *a posteriori* (les variations en pourcentage dans le suicide par Etat entraîné par un changement dans le taux d'adoption du coton *Bt* – terme linéaire)

	mean	SD	MC error	2.5%	median	97.5%	start	sample
beta [2,1]*	0.0730	0.486	0.0264	0.0434	0.0698	0.1749	1001	450000
beta [2,2]*	0.0734	0.636	0.0346	0.0278	0.0602	0.2653	1001	450000
beta [2,3]*	0.0375	0.453	0.0166	0.0230	0.0228	0.1613	1001	450000
beta [2,4]*	0.0698	0.934	0.0356	0.0356	0.0305	0.3484	1001	450000
beta [2,5]	-0.055	0.258	0.0091	-0.533	-0.060	0.579	1001	450000
beta [2,6]	-0.718	1.668	0.0616	-4.206	-0.591	2.304	1001	450000
beta [2,7]	0.220	0.664	0.0284	-0.096	0.023	2.706	1001	450000
beta [2,8]	0.128	0.683	0.0257	-0.621	0.016	2.584	1001	450000
beta [2,9]	0.055	0.033	0.0010	0.0152	0.047	0.1432	1001	450000

Maharashtra = 1; Andhra Pradesh = 2; Karnataka = 3; Madhya Pradesh = 4; Gujarat = 5; Tamil Nadu = 6; Punjab = 7; Rajasthan = 8; Haryana = 9.

Le terme quadratique = 2.

* : signifie que le résultat est significatif

Tableau 5.5 : Statistiques descriptives des lois marginales *a posteriori* (les variations en pourcentage dans le suicide par Etat entraîné par un changement dans le taux d'adoption du coton *Bt* – terme quadratique)

Contrairement au terme linéaire (Tab. 5.4), les écarts type du terme quadratique sont très faibles ce qui confirme le choix d'une estimation non linéaire. En effet, le fait d'avoir un écart-type faible pour chaque estimation entraîne un intervalle de confiance plus rétréci pour chacun des paramètres, ce qui explique que l'estimation est plus précise¹⁵¹. On constate, d'après les intervalles de confiance, un impact positif et significatif de l'adoption du coton *Bt*

¹⁵¹ Une façon de réduire l'amplitude de l'intervalle de confiance est d'accroître le nombre d'itérations.

sur le suicide des agriculteurs seulement pour quatre Etats indiens à savoir Maharashtra, Andhra Pradesh, Karnataka et Madhya Pradesh (respectivement bêta[2,1], bêta[2,2], bêta[2,3] et bêta[2,4]). Pour l'Etat de Maharashtra, une augmentation du taux d'adoption des semences transgéniques de 1% implique un accroissement dans le taux de suicide des agriculteurs de l'ordre de 0,073%. En 2006, Maharashtra a consacré en moyenne 3 millions d'hectares au coton. C'est plus que la superficie totale du coton des cinq Etats réunis (le Punjab, l'Haryana, le Rajasthan, le Madhya Pradesh et l'Andhra Pradesh). Mais les rendements, dans l'Etat Maharashtra, sont les plus faibles de tout le pays.

Selon le gouvernement du Maharashtra, 1920 paysans se sont suicidés entre le 1^{er} janvier 2001 et le 19 août 2006 dans tout l'État, ce qui confirme l'accélération du phénomène après l'arrivée des semences *Bt* sur le marché en juin 2005¹⁵². La région de Vidarbha (l'Etat de Maharashtra), où se trouvent les plus grandes plantations de coton transgénique en Inde, a enregistré plus de 8.200 suicides d'agriculteurs durant la dernière décennie. Dans la même région, 209 suicides de fermiers ont été recensés en 2011, en lien avec les rendements décroissants du coton *Bt*¹⁵³. Par conséquent, l'Etat de Maharashtra vient de supprimer les licences de culture de coton *Bt*. La région revient donc, après une décennie de commercialisation, sur sa décision d'autoriser ce type de cultures. Pour l'Etat d'Andhra Pradesh, une augmentation du taux d'adoption des semences transgéniques de 1% synonyme un accroissement dans le taux de suicide des agriculteurs de l'ordre de 0,0734%. Durant la saison *Kharif* 2011 (c'est-à-dire de Juin-Juillet 2011 jusqu'à Octobre-Novembre 2011), la récolte a échoué dans 33,37.10⁵ acres sur un total de 47.10⁵ acres plantées en coton *Bt*. Cela signifie que les deux tiers de la superficie a subi une perte de rendement¹⁵⁴. En 2011, le gouvernement de l'Andhra Pradesh a annoncé que la récolte, sur deux tiers de ses surfaces cultivées, était inférieure à la moitié en comparaison avec ce qui a été enregistrée l'année précédente¹⁵⁵. Concernant l'Etat de Karnataka, une augmentation du taux d'adoption des semences transgéniques de 1% implique un accroissement dans le taux de suicide des agriculteurs de l'ordre de 0,0375%. Selon le professeur Nanjundaswamy, fondateur du

¹⁵² Jaideep Hardikar, « One suicide every 8 hours », *DNA India*, 26 août 2006.

http://www.dnaindia.com/india/report_one-suicide-every-8-hours_1049554

¹⁵³ Transmission "Indian State of Maharashtra Revokes Monsanto's Cotton Seed License" August 23, 2012. <http://alternatenewsmedia2012.wordpress.com/2012/08/23/indian-state-of-maharashtra-state-revokes-monsantos-cotton-seed-license/>

¹⁵⁴ "Crop-wise extent damage" Andhra Pradesh department of Agriculture.

¹⁵⁵ Meena Menon (2012), « *Bt* cotton no marvel », *The Hindu*, March 25.

mouvement pour la Défense des Fermiers du Karnataka (Karnataka Rajya Ryota Sangha - KRRS), "certains des fermiers qui se sont suicidés avaient réalisé jusqu'à cinquante pulvérisations d'herbicide et de pesticide sur leurs champs de coton, mais cela n'a pas empêché leur récolte de déperir"¹⁵⁶. Enfin, pour l'Etat de Madhya Pradesh, une augmentation du taux d'adoption des semences transgéniques de 1% engendre un accroissement dans le taux de suicide des agriculteurs de l'ordre de 0,0698%. En effet, les niveaux du rendement cotonnier pour cet Etat ont connu un recul marqué passant de 740 Kg/ha en 1997-1998 à 445 Kg/ha en 2010-2011 (Rapport USDA du 31/08/2012).

À l'échelle de tout le pays, Sadashivappa et Qaim (2009) ont montré que l'adoption du coton transgénique a engendré en moyenne une augmentation du rendement entre 30% et 40%, une réduction dans l'utilisation des pesticides de l'ordre de 40% et par conséquent, une augmentation du gain autour de 40\$ par acre (Tab. 1.6). Cependant, en 2006, le ministère indien de l'agriculture déclarait que la moitié des foyers paysans étaient endettés. Plus encore, en Mars 2010, *Monsanto* a admis clairement que les insectes ravageurs du coton ont développé une résistance à la toxine *Bt*. La multinationale a, de ce fait, avisé les agriculteurs qu'il leur fallait passer à sa deuxième génération de coton *Bt* (*Bollguard-II*). Enfin, en janvier 2012, le Ministère de l'Agriculture Indien a reconnu, pour la première fois, le lien entre le suicide des agriculteurs et la baisse du rendement du coton *Bt*¹⁵⁷. Le rapport du ministère de l'agriculture daté du 09 janvier 2012 (SJ/FA-2/1a/i) a affirmé que¹⁵⁸: "*Cotton farmers are in a deep crisis since shifting to Bt cotton. The spate of farmer suicides in 2011-12 has been particularly severe among Bt cotton farmers. In fact cost of cotton cultivation has jumped from Rs 7 million per hectare to Rs 12 million due to rising costs of pesticides. Total Bt cotton production in the last five years has reduced.*"

On peut constater également que bêta[1,9] (tableau 5.4) possède un intervalle de crédibilité entièrement négatif, ce qui signifie que le taux de suicide des agriculteurs a diminué pour l'Etat d'Haryana suite à l'adoption du coton *Bt*. Ainsi, une augmentation du

¹⁵⁶ Les mots ont un sens (2009), « Inde : Suicides massifs de milliers de paysans – Les OGM en questions » 17 avril. <http://www.lesmotsontunsens.com/inde-suicide-collectif-1-500-paysans-ogm-coton-bt-monsanto-4131>.

¹⁵⁷ Environment news Service: «Maharashtra State Revokes Monsanto's Cotton Seed License » August 9, 2012. <http://ens-newswire.com/2012/08/09/maharashtra-state-revokes-monsantos-cotton-seed-license/>

¹⁵⁸Zia Haq, "Ministry blames Bt Cotton for Farmer Suicides" Hindustan Times, March 26, 2012. <http://www.hindustantimes.com/News-Feed/Business/Ministry-blames-Bt-cotton-for-farmer-suicides/Article1-830798.aspx>

taux d'adoption des semences transgéniques de 1% implique une baisse dans le taux de suicide des agriculteurs de l'ordre de 0,0792%. Le reste des Etats indiens (Gujarat, Tamil Nadu, Punjab et Rajasthan) ont majoritairement un intervalle de crédibilité qui contient la valeur 0, ainsi le facteur adoption du coton *Bt* n'a pas d'effet significatif sur le suicide des cultivateurs du coton. De ce fait, on ne peut pas déduire un lien direct entre l'utilisation du coton transgénique et le suicide des agriculteurs dans ces Etats.

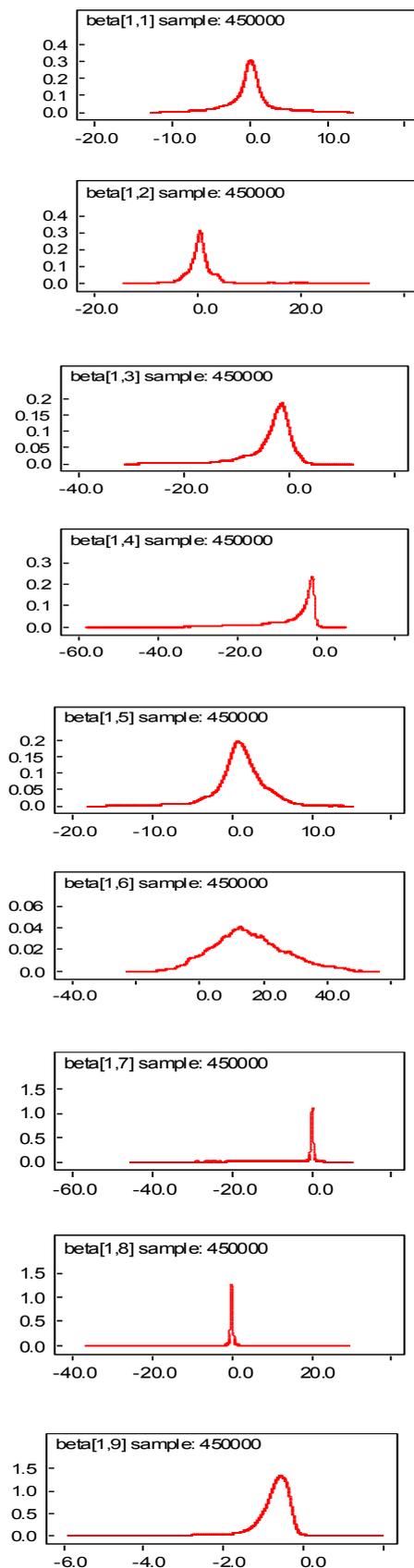


Figure 5.3 : densité des lois *a posteriori* pour le paramètre beta (terme linéaire) tirée à partir d'un échantillon de 450000 itérations

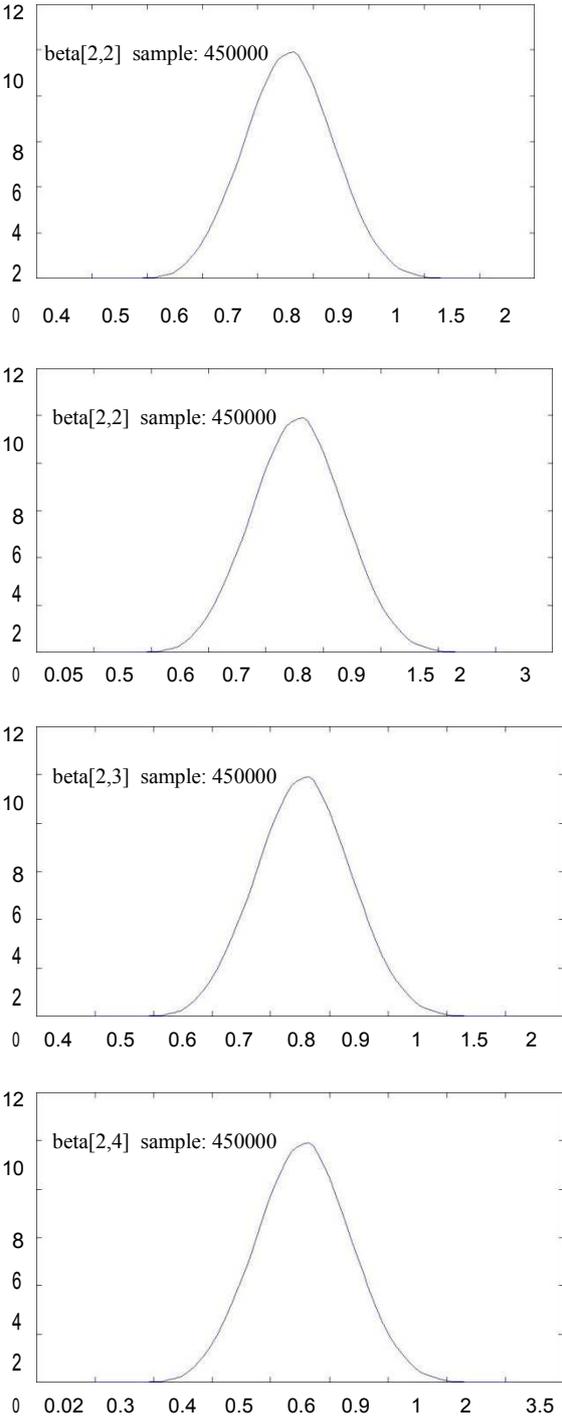


Figure 5.4 : densité des lois *a posteriori* pour le paramètre beta (terme quadratique) tirée à partir d'un échantillon de 450000 itérations

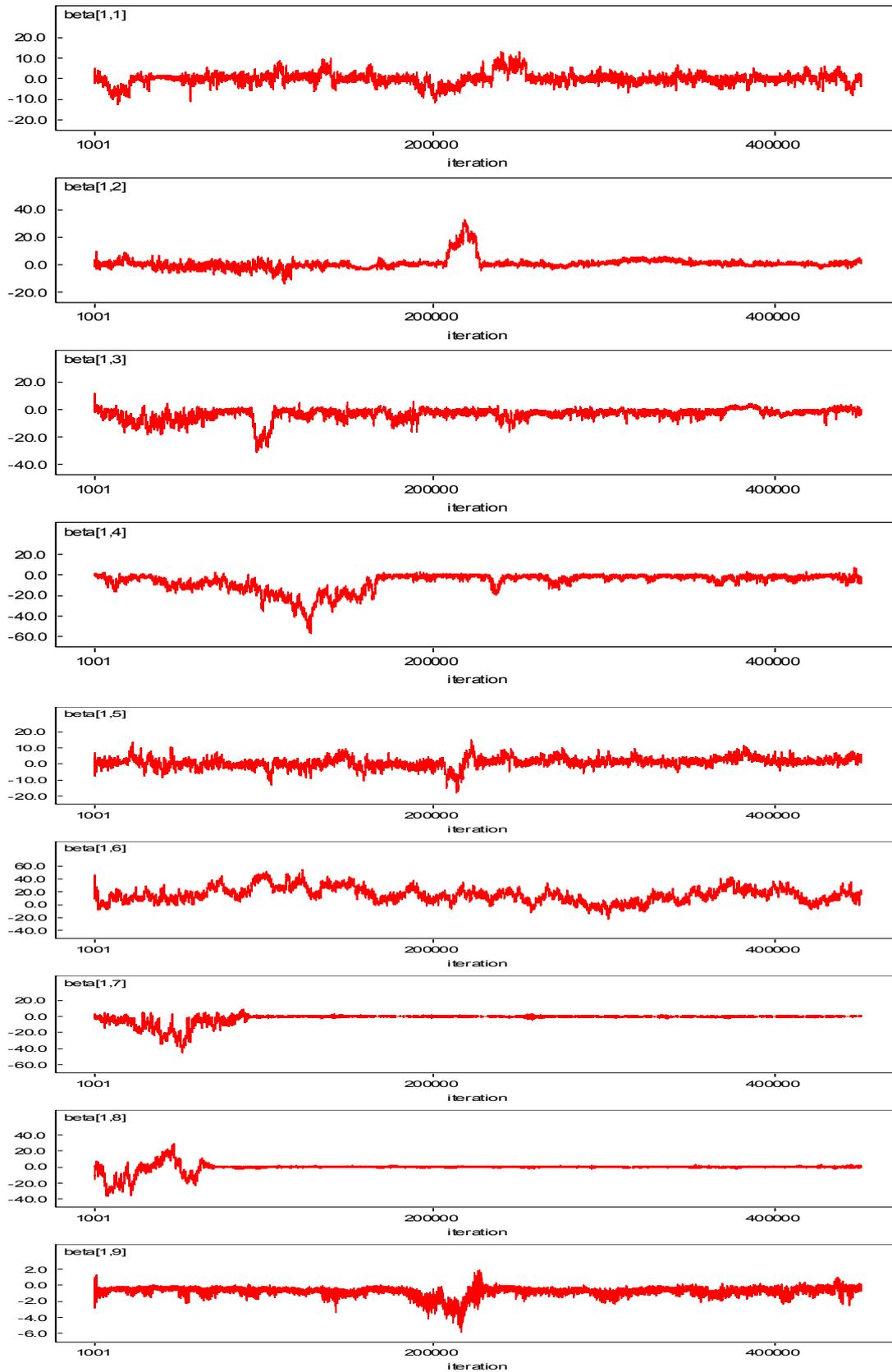


Figure 5.5: Vérification de la convergence de chaînes de Markov pour le paramètre beta (terme linéaire) : les chaînes convergent vers un état stationnaire correspondant à la vraie valeur.

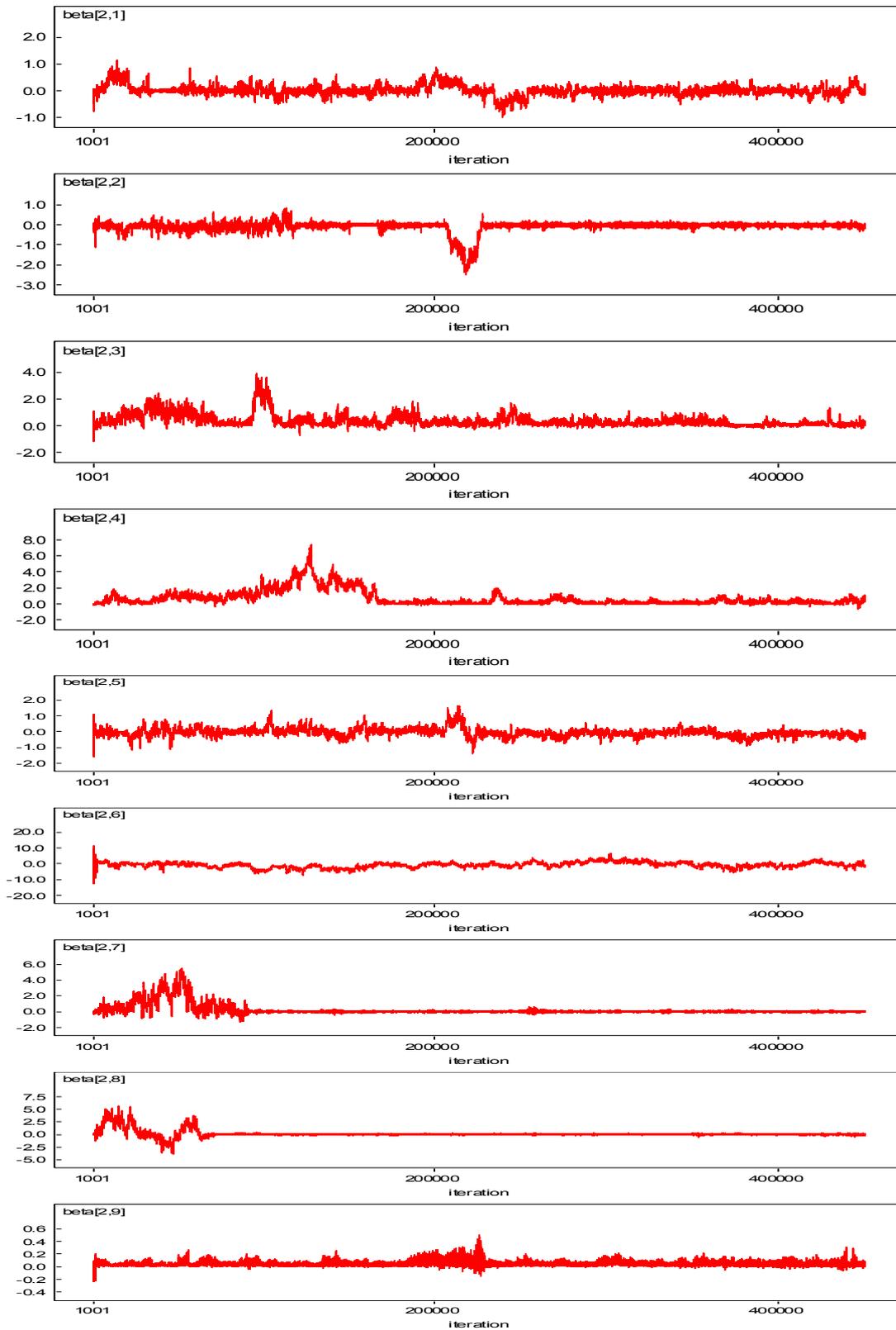


Figure 5.6 : Vérification de la convergence de chaînes de Markov pour le paramètre beta (terme quadratique) : les chaînes convergent vers un état stationnaire correspondant à la vraie valeur

b. L'effet de l'augmentation de l'usage de pesticides sur le suicide des agriculteurs :

On remarque, d'après les intervalles de confiance, un impact positif et significatif de l'augmentation de l'usage de pesticides sur le suicide des agriculteurs du coton transgénique seulement pour quatre Etats indiens à savoir Maharashtra, Andhra Pradesh, Karnataka et Madhya Pradesh (respectivement $\theta_{[2,1]}$, $\theta_{[2,2]}$, $\theta_{[2,3]}$ et $\theta_{[2,4]}$ dans le tableau 5.5). Le reste des Etats indiens (Gujarat, Tamil Nadu, Panjab, Rajasthan et Haryana) ont majoritairement un intervalle de crédibilité qui contient la valeur 0, ainsi l'accroissement du niveau d'utilisation de pesticides n'a pas d'effet significatif sur le suicide des cultivateurs du coton. Il n'y a donc pas de lien direct entre l'utilisation excessive de pesticides et le suicide des agriculteurs dans ces Etats.

Plus de 55% de la quantité totale de pesticides appliquée en Inde est consacré pour la production du coton, bien que cette culture représente 5% de la superficie agricole du pays (Kalyan R., 2006). D'où la création du coton *Bt* qui a pour but de réduire en partie le recours aux pesticides chimiques. Selon Dev et Rao (2007), la culture des variétés *Bt* peut diminuer les coûts des insecticides de l'ordre de 18% en comparaison avec les semences conventionnelles. D'après Qaim *et al.* (2006), les mêmes coûts ont baissé entre 50% et 78% dans les parcelles *Bt*. Plus encore, Krishna et Qaim (2012) ont montré que l'adoption du coton *Bt* en Inde a entraîné une réduction considérable et durable dans la quantité de pesticides utilisée. Même si le problème de ravageurs secondaires a pris de l'ampleur, celui-ci n'a pas contrarié le bénéfice total. Au contraire, l'ampleur de réduction de pesticides a augmenté, au cours du temps (à la fois en termes absolus et relatifs). Selon les auteurs, l'utilisation du coton *Bt*, durant la période 2006-2008, a entraîné une réduction nette de l'ordre de 52% en termes de quantité de pesticides épandus.

Cependant, en Mars 2010, *Monsanto* a admis clairement que les insectes ravageurs du coton ont développé une résistance à la toxine *Bt*. Ainsi, les agriculteurs qui ont adopté les variétés de cotons transgéniques sont désormais obligés d'utiliser une quantité croissante de pesticides. Les petits paysans, qui sont forcés de s'endetter pour utiliser encore plus de pesticides, se retrouvent dans une situation de surendettement. Une telle condition pousse inévitablement les paysans ruinés au suicide.

D'après une étude réalisée récemment dans la région de Vidarbha (l'Etat de Maharashtra), Swaminathan et Rawal (2011) ont conclu que les coûts de pesticides étaient beaucoup plus

élevés pour le coton transgénique (Rs. 1041 par acre ce qui représente 13% du cout total des intrants) que pour les semences conventionnelles (Rs. 622 par acre ce qui représente 11% du coût total des intrants). L'argument selon lequel les cultures de plantes *Bt* accroissent l'utilisation des pesticides est expliqué par l'émergence de ravageurs secondaires (comme la punaise terne). L'apparition de ce type de ravageurs, insensible à la toxine *Bt*, signifie que d'autres quantités additionnelles de pesticides sont devenues nécessaires ce qui entraîne des coûts supplémentaires pour l'agriculteur, limitant ainsi la rentabilité du coton *Bt*.

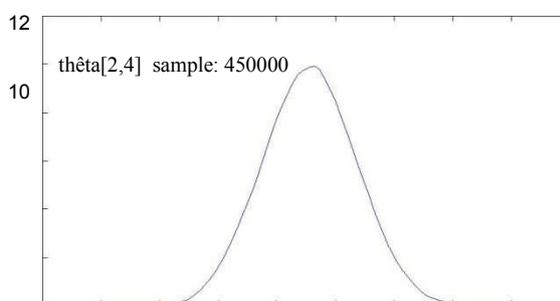
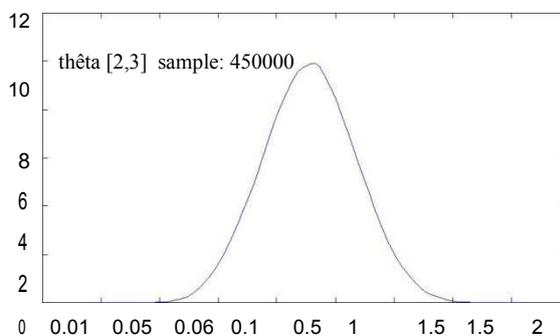
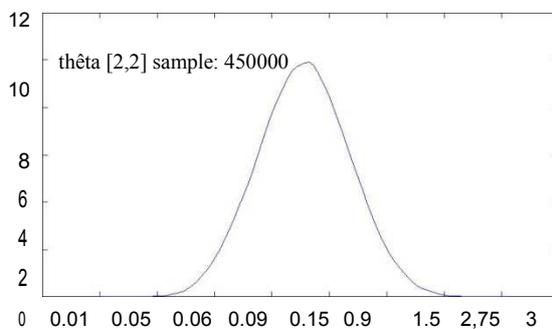
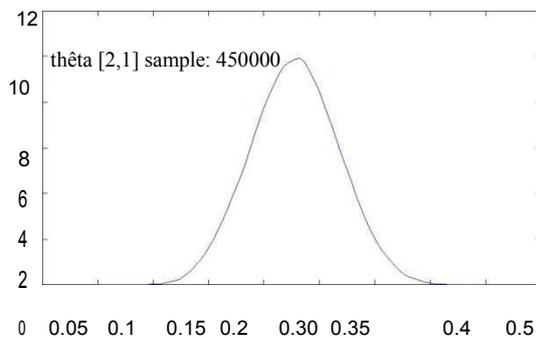
	mean	SD	MC error	2.5%	median	97.5%	start	sample
theta	0.321	1.435	0.0518	0.110	1.896	3.941	1001	450000
[2,1]*								
theta	0.143	3.816	0.1448	0.038	1.580	2.762	1001	450000
[2,2]*								
theta	0.133	2.318	0.0855	0.056	1.015	1.453	1001	450000
[2,3]*								
theta	0.537	0.666	0.0235	0.118	0.454	1.949	1001	450000
[2,4]*								
theta [2,5]	1.237	2.473	0.0936	- 2.488	0.984	7.519	1001	450000
theta [2,6]	-5.594	1.527	0.0521	- 8.475	-5.652	-2.184	1001	450000
theta [2,7]	2.657	2.417	0.0911	- 1,960	2.401	7.661	1001	450000
theta [2,8]	-0.178	0.736	0.0236	- 1.957	-0.124	0.381	1001	450000
theta [2,9]	-0.327	3.994	0.1515	- 7.863	-0.388	7.541	1001	450000

Maharashtra = 1; Andhra Pradesh = 2; Karnataka = 3; Madhya Pradesh = 4; Gujarat = 5; Tamil Nadu = 6; Punjab = 7; Rajasthan = 8; Haryana = 9.

* : indique que le résultat est significatif

Tableau 5.6 : Statistiques descriptives des lois a posteriori marginales (les variations en pourcentage dans le taux de suicide des fermiers provoqué par un changement dans la quantité utilisée de pesticides)

Les cultivateurs du coton *Bt* en Andhra Pradesh « continuent d'utiliser une quantité importante de pesticides chimiques variés, et plus particulièrement d'insecticides. Les cultivateurs de coton *Bt* subissent davantage de dommages dus aux organismes nuisibles en raison des attaques soutenues des ravageurs secondaires et de la résistance au coton *Bt* développée par les vers de la capsule du cotonnier. Les dégâts économiques provenant de l'apparition de ravageurs secondaires peuvent être assez importants pour inciter les producteurs à procéder à leur contrôle par des pulvérisations de pesticides supplémentaires » (Tirado, R., 2010, p. 3).



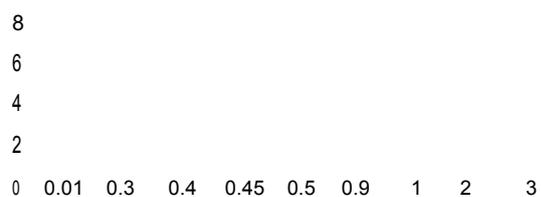


Figure 5.7 : densité des lois *a posteriori* pour le paramètre θ tirée à partir d'un échantillon de 450000 itérations

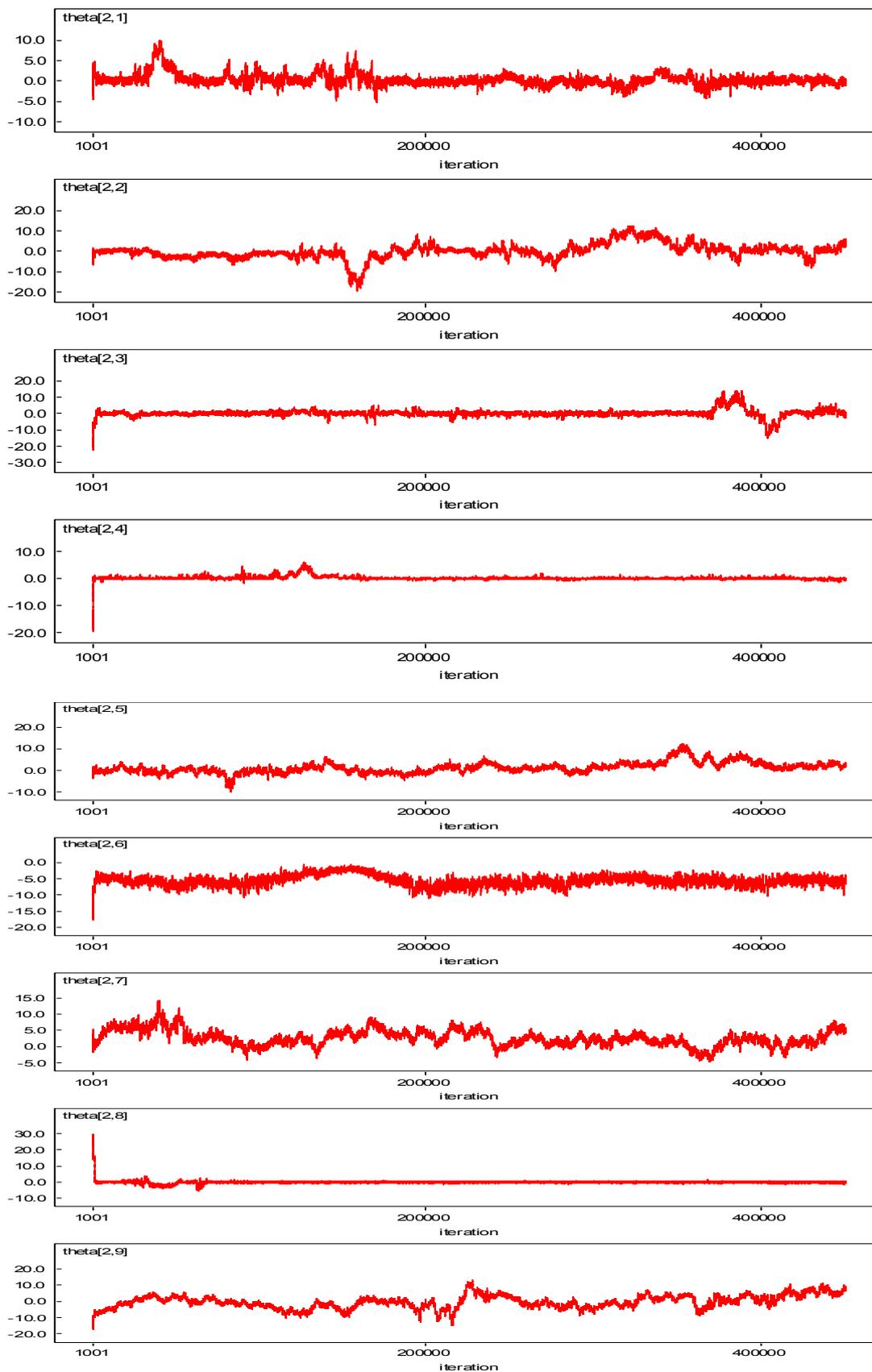


Figure 5.8 : Vérification de la convergence de chaînes de Markov pour le paramètre θ : les chaînes convergent vers un état stationnaire correspondant à la vraie

5.3 Test et Robustesse des résultats

L'objectif de cette section est d'apporter des réponses aux 3 questions suivantes : 1) le problème d'endogénéité existe-il vraiment ? (*whether endogeneity is really present*) 2) dans le cadre de notre analyse, le problème d'endogénéité est-il important ? (*whether it matters*) 3) la variable instrumentale est-elle la bonne? (*whether the selected instruments make sense*). Enfin, notre objectif est de tester la relation entre l'adoption du coton Bt et le suicide des fermiers et non la dépendance entre le taux de diffusion de la nouvelle technologie et l'endettement des agriculteurs.

On a estimé la régression instrumentale, décrite par nos hypothèses, par la méthode bayésienne. Les résultats sont utilisés pour apporter des réponses aux trois questions ci-dessus.

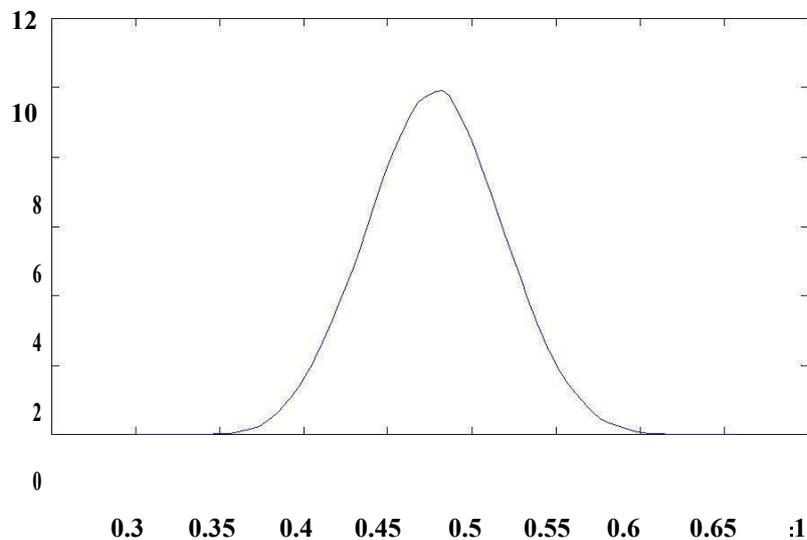
Question 1 : le problème d'endogénéité existe-il vraiment ?

Pour répondre à cette question, on a calculé la distribution *a posteriori* de la corrélation entre le taux d'adoption de la technologie *Bt* et le terme d'erreurs u dans l'équation (5.1) du suicide. Une corrélation différente de 0 indique qu'il existe un degré d'endogénéité. Plus encore, une corrélation positive suggère que l'endogénéité découle des facteurs qui ont les mêmes effets à la fois sur le suicide et l'adoption du coton Bt (par exemple l'influence de la variable omise est positive pour les deux variables). Par contre, une corrélation négative montre que les sources d'endogénéité sont des facteurs qui ont des effets différents sur le suicide et l'adoption du coton Bt¹⁵⁹.

Le résultat est clair : la distribution *a posteriori* de la corrélation entre l'adoption du coton *Bt* et le terme d'erreur dans l'équation de suicide a une moyenne égale à 0,473 et un intervalle *a posteriori* à 95% de bornes 0,396 et 0,552 (voir la figure ci-dessus). Ainsi, une corrélation égale à 0 sera rejetée. Sur la base de ce résultat on peut conclure que le taux d'adoption de la technologie Bt est une variable endogène dans l'équation du suicide.

¹⁵⁹ Lancaster (2005, p. 332-335) a décrit l'approche de la mesure du niveau d'endogénéité d'une manière plus détaillée.

Corrélation de terme d'erreurs (la distribution a posteriori de ρ)



Note: la figure montre la distribution *a posteriori* de ρ = corrélation (Bt-Coton, terme d'erreurs) dans une régression instrumentale. L'intervalle de crédibilité *a posteriori* à 95% de ρ est entre 0.396 and 0.552, alors la valeur $\rho = 0$ sera rejetée. On peut conclure que le taux d'adoption du coton Bt est une variable endogène.

L'endogénéité de la variable taux d'adoption du coton Bt b_{it} est présenté par la corrélation entre b_{it} et le terme d'erreurs ε_{it} dans l'équation principale.

Question 2 : le problème d'endogénéité est-il significatif ?

Même si le problème d'endogénéité est présent, il peut avoir un faible effet sur les coefficients estimés. Pour savoir si c'est le cas, on estime deux modèles (l'un avec variable instrumentale et l'autre sans variable instrumentale) et on compare leurs résultats. On peut conclure que le problème d'endogénéité est significatif si les résultats des deux modèles s'écartent (par exemple lorsque les distributions *a posteriori* ont des différentes propriétés).

Le choix entre la régression à variables instrumentales et le modèle classique simple peut se faire également avec le critère d'information de déviance DIC (*Deviance Information Criteria*) donné par le logiciel WinBUGS (Spiegelhalter *et al.*, 2002). Le DIC est une généralisation de critère d'information AIC (*Akaike's Information Criterion*). Ce critère est composé de deux termes : un pour évaluer l'ajustement du modèle aux données et l'autre terme pour mesurer la complexité du modèle c'est-à-dire le nombre effectif des paramètres

constituant le modèle. Le modèle le plus performant est celui qui donne une valeur de DIC plus faible.

Pour la régression instrumentale, la distribution *a posteriori* de la variable taux d'adoption du coton Bt dans le cas de l'Etat de *Maharashtra* (voir le tableau ci-dessous) a une valeur moyenne de l'ordre de 0,073, l'intervalle de crédibilité *a posteriori* à 95% est compris entre 0,043 et 0,1749. En d'autres termes, un accroissement du taux d'adoption de 10% entraîne une augmentation du taux de suicide entre 4% et 17,49 %. Par contre, pour la régression bayésienne non-instrumentale à effets fixes (que nous utilisons comme étant un modèle de référence), la valeur moyenne est de l'ordre de 0,042 et l'intervalle *a posteriori* à 95% est compris entre -0,183 et 0,268. Par rapport à la régression linéaire, l'estimation instrumentale du coefficient associée à la variable taux d'adoption du coton Bt a augmenté de l'ordre de 73,8%. Pareillement pour les autres États. On peut conclure que l'utilisation de la méthode instrumentale permet un grand changement dans le résultat.

L'Etat Indien	Le taux d'adoption (régression instrumentale)		Le taux d'adoption (régression non-instrumentale)	
	La moyenne	L'intervalle <i>a posteriori</i>	La moyenne	L'intervalle <i>a posteriori</i>
<i>Maharashtra</i>	0,0730	[0,043 ; 0,174]	0,0428	[-0,183 ; 0,268]
<i>Andhra Pradesh</i>	0,0734	[0,027 ; 0,265]	0,0311	[-0,150 ; 0,212]
<i>Karnataka</i>	0,0375	[0,023 ; 0,161]	0,0294	[-0,217 ; 0,276]
<i>Madhya Pradesh</i>	0,0698	[0,035 ; 0,348]	0,0643	[0,037 ; 0,091]

Question 3 : la variable instrumentale est-elle bonne?

L'analyse bayésienne pourrait être utilisée pour savoir si l'instrument choisi est la bonne. Un bon instrument doit satisfaire trois conditions : 1) la validité, 2) fortement corrélé avec la variable dépendante et 3) influence la variable *exogène-endogène* d'une manière importante.

La validité : en principe, un instrument ne doit pas être corrélé avec le terme d'erreurs. En d'autres termes, la variable instrumentale ne devrait pas avoir un effet direct sur la variable endogène (son seul effet doit se faire par le biais de la variable exogène à instrumenter).

L'analyse bayésienne pourrait être utilisée pour voir ce qui se passe si cette hypothèse n'est pas vérifiée. Grâce à une analyse bayésienne, il est possible d'incorporer *une distribution a priori faiblement informative* de l'effet direct de l'instrument sur la variable dépendante (c'est-à-dire tester l'hypothèse de la validité).

La plupart des économètres supposent que l'effet direct est exprimé par une distribution à priori serrée en zéro. Ce qui explique d'ailleurs notre choix d'un *a priori faiblement informatif*. Plus encore, en changeant *les distributions a priori* la différence entre les coefficients estimés par la régression instrumentale bayésienne et ceux estimés par une régression simple bayésienne reste « énorme ».

Statistiquement significatif : un instrument devrait être fortement corrélé avec la variable exogène à instrumenter. De préférence, la variable instrumentale devrait avoir un effet important sur la variable *exogène-endogène*, sinon, on aura des instruments faibles, ce qui peut rendre difficile de tirer des conclusions significatives (Bound *et al.*, 1995). L'analyse bayésienne permet d'identifier s'il existe un problème d'instrument faible mais elle ne peut pas changer la puissance d'un instrument. L'utilisation des instruments faibles, dans le cadre de l'analyse bayésienne, pourrait aboutir à des distributions vagues et non-normales et par conséquent *il n'existe pas un risque d'avoir des estimations non précises et incorrectes*.

Notre instrument « l'endettement » a un effet significatif sur le taux d'adoption de la technologie Bt. Ainsi, le problème d'un instrument faible n'est pas présent dans notre analyse (voir le tableau ci-dessous).

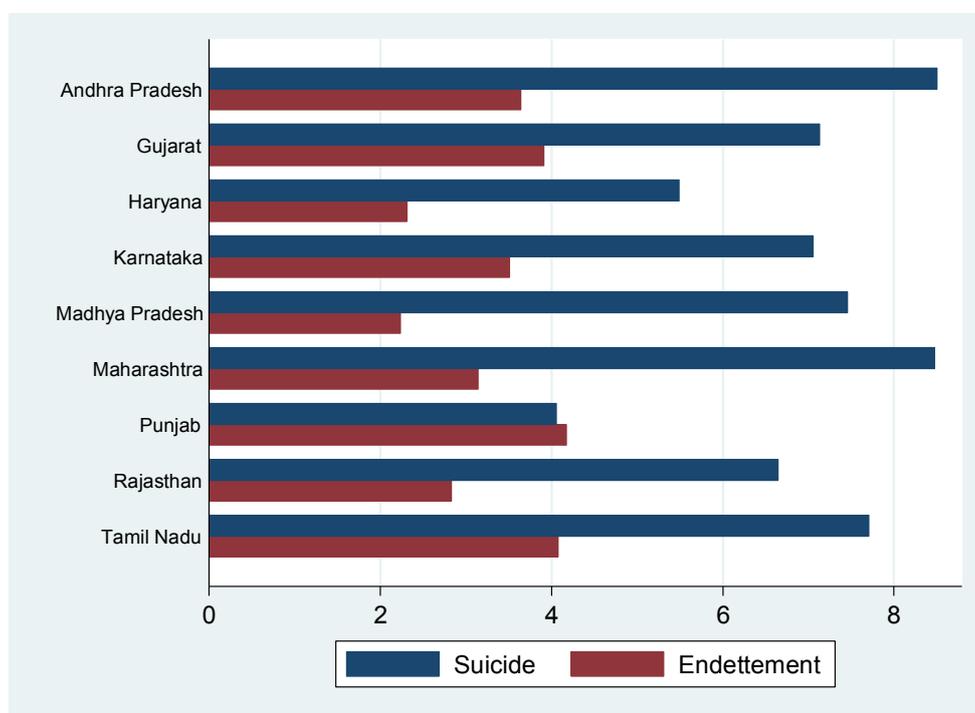
La distribution a posteriori entre l'endettement et le taux d'adoption du coton Bt

L'État Indien		
	<i>La moyenne</i>	<i>L'intervalle a posteriori</i>
<i>Maharashtra</i>	0,1192	[0,069 ; 0,255]
<i>Andhra Pradesh</i>	0,2412	[0,081 ; 0,353]
<i>Karnataka</i>	0,3016	[0,092 ; 0,407]
<i>Madhya Pradesh</i>	0,1084	[0,053 ; 0,248]

Note : les intervalles a posteriori ne contiennent pas la valeur 0, donc il n'existe pas un problème d'instrument faible.

L'influence la variable endogène d'une manière significative :

Un instrument ne doit pas seulement être corrélé avec la variable *exogène-endogène* mais il doit également l'influencer d'une manière significative. L'instrument pourrait influencer la variable à instrumenter, d'une manière significative, pour un sous-échantillon particulier de la population (exemple : des régions géographiques, des groupes sociaux,...). Par conséquent, les estimations seront d'une utilité limitée et dans ce cas *le caractère local* des estimations doit être souligné. Dans notre estimation empirique l'effet important de l'instrument sur la variable exogène à instrumenter est présent dans la majorité des États Indiens (voir figure ci-dessous). Alors, l'effet de l'instrument n'est pas limité à une région bien déterminée.



Vérification de la robustesse des résultats

- 1) Pour vérifier si nos résultats sont robustes aux spécifications *a priori*, on a estimé notre modèle VI bayésien en utilisant des différentes distributions *a priori*. Les résultats n'ont pas changé. On n'a pas également enregistré une différence visible entre les représentations graphiques de densités *a posteriori* associées aux différentes distributions *a priori*.

2) On a comparé également les résultats obtenus avec l'estimation bayésienne du modèle VI (*Variable Instrumentale*) et ceux obtenus par la méthode instrumentale classique. Les coefficients associés aux taux d'adoption de la technologie Bt obtenus par la méthode de régression instrumentale bayésienne sont différents de ceux obtenus par la méthode VI classique. On a testé aussi la présence d'endogénéité dans la régression classique. Le test de Durbin-Wu-Hausman est significatif de l'ordre de 0,1% (c.-à-d. présence d'endogénéité).

L'Etat Indien	<i>Le taux d'adoption (régression instrumentale bayésienne)</i>		<i>Le taux d'adoption (régression instrumentale classique)</i>	
	<i>La moyenne</i>	<i>L'intervalle a posteriori</i>	<i>La moyenne</i>	<i>L'intervalle a posteriori</i>
<i>Maharashtra</i>	0,0730	[0,043 ; 0,174]	0,0132^{***}	[-0,016 ; 0,018]
<i>Andhra Pradesh</i>	0,0734	[0,027 ; 0,265]	0,0182[*]	[-0,098 ; 0,061]
<i>Karnataka</i>	0,0375	[0,023 ; 0,161]	0,0427	[-0,024 ; 0,159]
<i>Madhya Pradesh</i>	0,0698	[0,035 ; 0,348]	0,0179^{**}	[-0,011 ; 0,076]

Note : * (p< 0,05) ** (p< 0,01) *** (p< 0,001)

5.4 Conclusion

Ce chapitre présente une méthode semiparamétrique bayésienne qui a été programmée sous le logiciel WinBUGS. Nous utilisons une des méthodes de simulation MCMC (Monte-Carlo par chaîne de Markov) à savoir l'échantillonnage de Gibbs qui permet de traiter de nombreux problèmes d'estimation même pour des modèles non linéaires. En effet, un des avantages à utiliser les méthodes bayésiennes, pour modéliser la relation semiparamétrique entre le suicide des cultivateurs du coton et le taux d'adoption des semences transgéniques, est que l'on peut calculer de manière précise les distributions *a posteriori* du modèle ainsi que leurs écarts-type en utilisant les techniques MCMC. Ces méthodes utilisent des connaissances antécédentes (des lois *a priori*), exprimées sous forme de distribution de probabilité, afin de modifier une nouvelle information. Notre choix des lois *a priori* peu informatives est motivé par le fait qu'on ne se dispose pas d'information pertinente sur la distribution *a priori* de paramètres.

Le formalisme bayésien a permis d'estimer la relation entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde. En utilisant des données secondaires agrégées à l'échelle Etat¹⁶⁰, nos conclusions démontrent clairement l'impact positif de l'utilisation du coton transgénique sur le suicide des fermiers indiens. Les cultivateurs de coton *Bt*, avec leurs coûts agricoles élevés, leur agriculture forte utilisatrice des pesticides chimiques et leur dette importante, sont vulnérables et par conséquent sont exposés à un risque élevé de faillite.

Plus généralement, nous avons proposé une méthodologie permettant de valoriser les données, individuelles ou de panels, issues d'enquêtes afin de tester le lien de causalité entre suicides d'agriculteurs et coton *Bt* en inde. La puissance de l'approche bayésienne permet de proposer une modélisation riche et flexible pour corriger le biais potentiel qui pourrait être relevé dans le processus de sélection des agriculteurs du coton *Bt*. L'estimation des données de panel à effets fixes, sous l'hypothèse des lois *a priori* vagues (peu informatives), pourra contrôler les effets de biais de sélection dans l'analyse des enquêtes qui ont été effectuées jusqu'à maintenant. Plus encore, notre approche a pris en considération l'endogénéité qui peut caractériser le choix de se suicider et l'adoption des semences transgéniques. En effet, le

¹⁶⁰ En utilisant des données au niveau « État », on a tendance à commettre un « *ecological fallacy* » en tirant l'inférence du comportement individuel à partir des données agrégées. Toutefois, en absence des données individuelles, Robert *et al.* (1990) ont montré la supériorité de l'estimation bayésienne en comparaison avec les méthodes classiques. L'inférence du comportement individuel à partir de corrélations collectives est le seul recours dont on dispose. Enfin, l'utilisation des données agrégées permet d'éviter le coût élevé entraîné par les techniques de sondages pour obtenir des informations au niveau individuel.

choix de cultiver les variétés *Bt* risque d'être affecté par la même variable qui influence le suicide d'agriculteurs à savoir le degré de pression des insectes ravageurs. Selon Smale *et al.* (2010, p. 68), « si les sources de l'endogénéité ne sont pas testées et traitées dans la démarche économétrique, les coefficients de régression seront biaisés. Ce problème a été souvent reconnu, mais très rarement traité dans les modèles examinés ».

Bien que les données utilisées soient des données secondaires (qui ont été collectées par d'autres études de recherche), notre intention dans ce chapitre était de développer une approche empirique qui pourrait être mise en application avec des enquêtes de terrain (transversales ou panel) dans le contexte d'un projet réalisable sur une période future.

On a pu ainsi déduire, à partir des intervalles de confiance, un impact positif et significatif de l'adoption du coton *Bt* sur le suicide des agriculteurs seulement en quatre Etats indiens à savoir Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh et Maharashtra. Ainsi, le coton *Bt* fait peser un risque financier important sur les petits exploitants pauvres pratiquant cette culture dans ces quatre Etats. Une durée d'adoption rapide de la nouvelle technologie, accompagnée d'un phénomène de suicide, se traduirait sûrement par des parts de bénéfices plus importantes en faveur du monopole « Monsanto ». Le reste des Etats (Gujarat, Punjab, Rajasthan et Tamil Nadu,) ont montré de coefficients non significatifs, ainsi le facteur adoption du coton *Bt* n'a pas d'effet significatif sur le suicide des cultivateurs du coton dans ces Etats. Il n'y a donc pas de lien entre l'utilisation du coton transgénique et le suicide des agriculteurs dans ces Etats.

On a examiné également la relation entre l'utilisation de pesticides et le suicide des cultivateurs du coton *Bt* en Inde. On a constaté un impact positif et significatif de l'augmentation de l'usage de pesticides sur le suicide des agriculteurs du coton transgénique seulement en quatre Etats indiens à savoir Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh et Maharashtra. En effet, l'hypothèse selon laquelle les semences *Bt* peuvent augmenter les rendements en réduisant le nombre des insectes nuisibles pourrait être mise en cause par deux problèmes. *Primo*, les insectes ravageurs cibles peuvent développer une résistance aux toxines *Bt*, ce qui rend ces dernières inefficaces. *Secundo*, des ravageurs secondaires, qui ne sont pas sensibles aux toxines *Bt*, peuvent émerger à la suite d'une réduction de l'utilisation des pesticides.

Pour le reste des Etats indiens (Gujarat, Haryana, Panjab, Rajasthan et Tamil Nadu), les estimations montrent de coefficients non significatifs, ainsi l'accroissement du niveau

d'utilisation de pesticides n'a pas d'effet significatif sur le suicide des cultivateurs du coton. Il n'existe donc pas une corrélation entre l'utilisation excessive de pesticides et le suicide des agriculteurs dans ces Etats.

ANNEXES DU CHAPITRE 5

A.5.1 L'inférence bayésienne :

Contrairement à l'approche classique, les paramètres inconnus en statistiques bayésiennes sont considérés comme étant aléatoires et admettent ainsi une densité de probabilité. Un modèle statistique bayésien se compose d'un modèle statistique paramétrique et d'une *distribution a priori* sur le paramètre inconnu (Robert, 2001). La *distribution a priori* doit décrire à la fois l'état de croyance *a priori* du modélisateur sur les paramètres à estimer ainsi que son degré d'incertitude sur le phénomène observé. La *distribution a priori* suppose ainsi que le statisticien détienne une connaissance initiale sur le paramètre inconnu avant l'observation des données.

Un modèle statistique paramétrique est défini par l'observation d'une variable aléatoire X , distribuée selon la densité de probabilité $p(x/\theta)$ où seul le paramètre θ est inconnu et appartient à un espace vectoriel de dimension finie. Ainsi, en utilisant la formule de Bayes, il est possible d'énoncer l'expression de la distribution de probabilité conditionnelle de θ par rapport à l'observation des données x :

$$p(\theta/x) = \frac{p(\theta) \cdot p(x/\theta)}{p(x)}$$

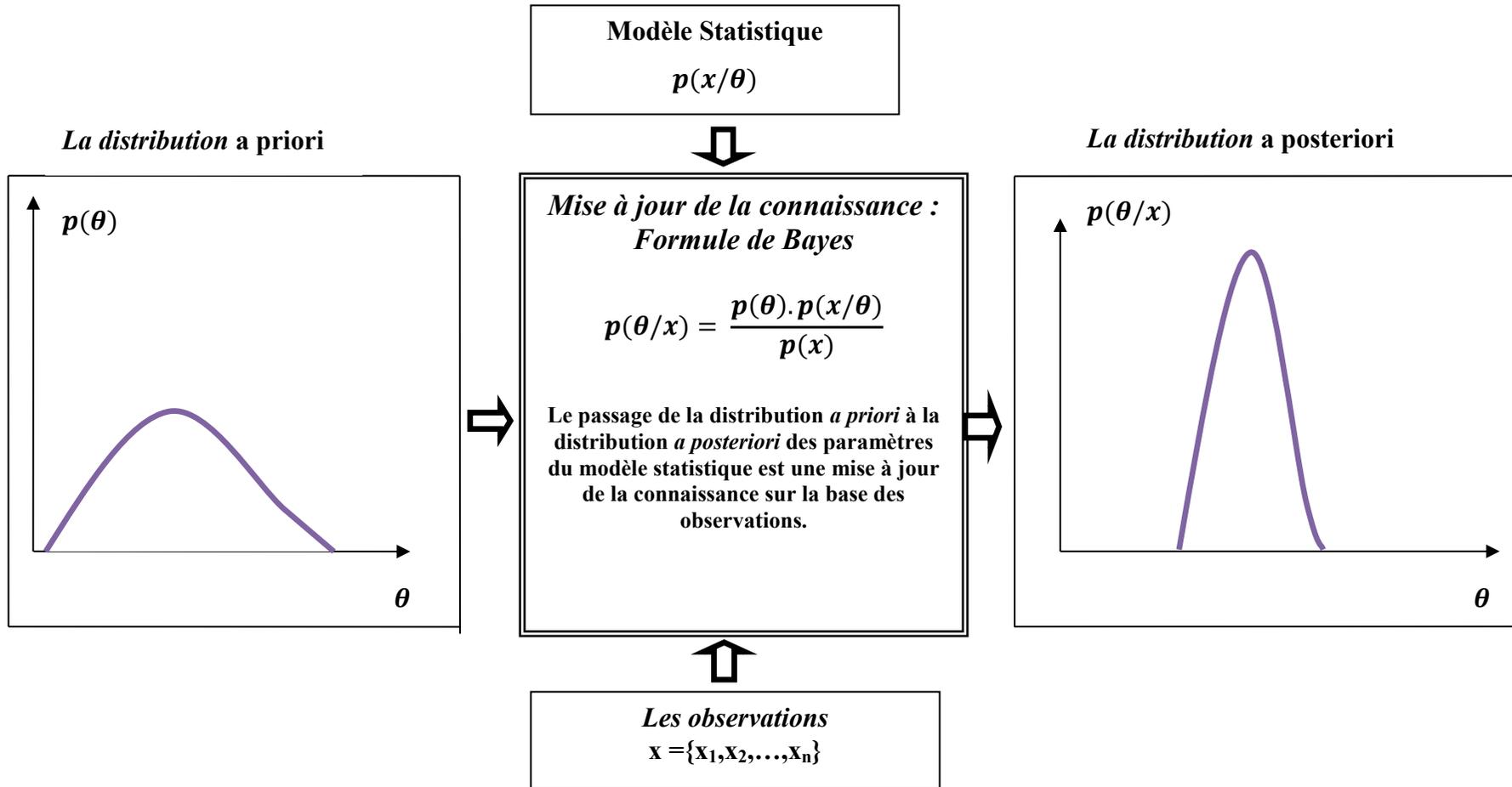
où la distribution marginale $p(x)$ pourrait être déduite de la loi jointe $p(x, \theta)$:

$$p(x) = \int_{\Theta} p(x, \theta) d\theta = \int_{\Theta} p(x/\theta) p(\theta) d\theta$$

où Θ désigne l'ensemble des valeurs possibles de la variable aléatoire θ . Les différents termes de l'équation précédente peuvent être interprétés comme suit :

1. $p(\theta)$ est la *distribution a priori* du paramètre inconnu θ . Cette distribution exprime la connaissance préalable qu'un expert possède sur ce paramètre ou bien elle se fonde sur l'analyse d'autres études similaires.
2. $p(x/\theta)$ est la vraisemblance des données sous le modèle paramétré par θ . C'est l'information apportée par une observation x sur le paramètre θ .
3. $p(\theta/x)$ est la distribution de probabilité *a posteriori* du paramètre θ , sur la base de la connaissance *a priori* et de l'information apportée par les données $p(x/\theta)$.
4. $p(x)$ (ne dépend pas de θ) est un terme qui assure une propriété fondamentale de la densité de probabilité à savoir : $\int_{\Theta} p(\theta/x) d\theta = 1$.

Enfin, la formule de Bayes exprime le passage de la distribution *a priori* à la distribution *a posteriori* comme le montre la figure ci-dessous.



Source : Gelman *et al.* (1995)

Mise à jour de la connaissance avec la formule de Bayes.

Puisque x et $p(x)$ sont connus *a posteriori*, alors la distribution *a posteriori* de θ par rapport à x est proportionnelle à $p(\theta).p(x/\theta)$. La formule de Bayes peut donc être réécrite sous la forme suivante, où \propto est un symbole de proportionnalité

$$p(\theta/x) \propto p(\theta).p(x/\theta)$$

Cette expression montre que l'inférence Bayésienne dépend de l'information provenant de la vraisemblance $p(x/\theta)$ et la distribution *a priori* $p(\theta)$.

La distribution a priori faiblement informative

La distribution *a priori* pourrait être également *non informative*, appelée aussi une distribution *a priori vague* ou *faiblement informative*. Une loi faiblement informative reflète l'absence d'information sur la distribution statistique du paramètre. Dans ce cas, on peut choisir des variances assez grandes afin de ne pas contraindre le paramètre ou même une loi « impropre »¹⁶¹. Par conséquent, l'effet de la distribution *a priori* « faiblement informative » sur celle *a posteriori* sera minimal.

Pour modéliser la distribution *a priori* « faiblement informative », les statisticiens utilisent souvent la loi *a priori* de Jeffreys (1939). Cette loi « impropre » est définie pour un paramètre θ de la manière suivante :

$$p(\theta) \propto [J(\theta)]^{1/2}$$

où $J(\theta)$ désigne la quantité d'information de Fisher associée à θ qui s'écrit comme suit :

$$J(\theta) = E \left[\left(\frac{d \log p(x/\theta)}{d\theta} \right)^2 \middle| \theta \right] = -E \left(\frac{d^2 \log p(x/\theta)}{d\theta^2} \middle| \theta \right)$$

Les méthodes MCMC :

La formule de Bayes et le calcul des différentes lois marginales qui en résultent font appel à de nombreux calculs d'intégrales multidimensionnelles, ce qui rend la solution analytique peut-être très complexe. Les techniques de simulations dites MCMC (*Monte Carlo Markov Chain*) sont alors requises pour évaluer ces intégrales. Les méthodes MCMC¹⁶² construisent à partir d'une loi de probabilité connue une chaîne de Markov ergodique admettant pour loi

¹⁶¹ La loi impropre est une loi qui a une densité de probabilité qui ne s'intègre pas à 1. On peut citer l'exemple de la loi uniforme lorsque le paramètre prend ses valeurs dans un domaine non borné.

¹⁶² Une description exhaustive des méthodes MCMC peut être trouvée dans le livre « Méthodes de Monte Carlo par Chaîne de Markov » (Christian Robert, 1996).

stationnaire la loi *a posteriori*. Le principe consiste alors à faire tourner un nombre de fois l'algorithme, jusqu'à la convergence de chaîne a une distribution asymptotique stationnaire, et utiliser les dernières valeurs obtenues comme échantillon. Les deux principales méthodes MCMC sont celles de *Metropolis-Hastings* (Metropolis *et al.*, 1953 et Hastings, 1970) et l'*échantillonneur de Gibbs* (Geman et Geman, 1984). Ces deux méthodes sont fondées sur le même principe : ils assurent l'existence de noyaux de transition permettant de générer une chaîne de Markov de loi stationnaire. En d'autres termes, l'utilisation de l'échantillonneur de Gibbs ou la méthode de Metropolis-Hastings nous aide à chercher une chaîne de Markov qui : 1) admet une unique distribution stationnaire ; 2) converge vers cette distribution stationnaire et 3) vérifie le théorème d'ergodicité.

Quelques définitions (Robert, 1996) :

Soit (X_t) une suite de variables aléatoires à valeur dans Ω et A une partie de Ω .

Définition 1 (Chaîne de Markov) : la suite (X_t) forme une chaîne de Markov si pour tout $t \geq 1$, et pour tout $x_0, x_1, \dots, x_{t-1}, x_t, x_{t+1}$ telle que $P(X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_{t-1} = x_{t-1}, X_t = x_t) > 0$, on ait :

$$P(X_{t+1} = x_{t+1} | X_t = x_t, X_{t-1} = x_{t-1}, \dots, X_0 = x_0) = P(X_{t+1} = x_{t+1} | X_t = x_t)$$

On dit que la chaîne de Markov est sans mémoire.

Définition 2 (Chaîne de Markov Homogène): une chaîne de Markov (X_t) est dite homogène dans le temps si $P(X_{t+1} = x_{t+1} | X_t = x_t)$ ne dépend pas de t .

Définition 3 (Noyau de transition) : soit l'ensemble Ω (l'espace d'états) muni d'une tribu \mathcal{B} . On appelle *noyau de transition* toute famille $\mathcal{P} = \{P(x, B), x \in \Omega \text{ et } B \in \mathcal{B}\}$ telle que :

1. Pour tout $B \in \mathcal{B}$, $x \rightarrow P(x, B)$ est une fonction mesurable de (Ω, \mathcal{B}) dans $([0, 1], \mathcal{B}([0,1]))$;
2. Pour tout $x \in \Omega$, $P(x, \cdot)$ est une mesure de probabilité sur (Ω, \mathcal{B}) .

Les $P(x, B)$ sont appelées aussi *probabilités de transition* de x vers B .

Définition 4 (Distribution d'état): la distribution X_{t+1} peut s'écrire :

$$P(X_{t+1} = j) = \sum_{i=1}^M P(X_t = i)P(X_{t+1} = j | X_t = i)$$

où M est le nombre d'états et $j = 1, 2, \dots, M$. Si, on note p_{t+1} la distribution de X_{t+1} , on aura :

$$p_{t+1}(j) = \sum_{i=1}^M p_t(i)\pi(i, j)$$

La forme matricielle sera donnée comme suit :

$$p'_{t+1} = p'_t \Pi$$

Définition 5 (Distribution stationnaire) : la distribution p est dite stationnaire pour Π si on a :

$$p = p\Pi$$

Définition 6 (Irréductibilité) : on note $p_{ij}(m) = P(X_{t+m} = j | X_t = i)$

Les états i et j communiquent s'il existe un $m > 0$ tel que $p_{ij}(m) > 0$ et $p_{ji}(m) > 0$. On dit alors que les deux états i et j forment *une classe communicante*.

Une chaîne de Markov est irréductible, si et seulement si, elle admet une unique classe communicante.

En d'autres termes, si la chaîne de Markov ne possède qu'une unique classe, c'est à dire que tous ses éléments communiquent, la chaîne sera dite irréductible.

Proposition : une chaîne de Markov irréductible et finie admet une unique distribution stationnaire (pour preuve voir Robert, 1996).

Définition 7 (Ergodicité) : une chaîne de Markov est dite ergodique si la distribution de X_t converge indépendamment de la distribution initiale.

L'échantillonneur de Gibbs :

L'algorithme de Gibbs tire son nom d'un physicien et mathématicien américain du 19^{ième} siècle Josiah Willard Gibbs. Le nom « échantillonneur de Gibbs » a été popularisé par l'article de Geman et Geman (1984) qui ont généré des observations à partir d'une distribution de Gibbs (distribution de Boltzmann).

L'échantillonneur de Gibbs permet de simuler les distributions marginales *a posteriori*, de tous les paramètres inconnus du modèle, à partir des distributions conditionnelles *a posteriori* de tous ces paramètres. En d'autres termes, après avoir choisi la valeur initiale, les p composantes du vecteur de paramètres inconnus θ sont générés les uns après les autres d'une manière conditionnelle. A chaque étape, la distribution conditionnelle utilise les valeurs générées les plus récentes parmi toutes les autres composantes. Ainsi, seules les lois conditionnelles sont utilisées pour la simulation.

Formellement, soit $f(\theta|x)$ la fonction de densité conditionnelle du vecteur $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$ par rapport aux données observées x . L'algorithme de Gibbs, sous sa formulation générale, s'énonce :

Initialisation : $\theta^{(0)} = (\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \dots, \theta_p^{(0)})$

A l'itération t ($t=1, \dots, T$)

- Etape 1 : générer $\theta_1^{(t+1)}$ à partir $f(\theta_1 | \theta_2^{(t)}, \dots, \theta_p^{(t)}, x)$
- Etape 2 : générer $\theta_2^{(t+1)}$ à partir $f(\theta_2 | \theta_1^{(t+1)}, \dots, \theta_p^{(t)}, x)$
- ...
- Etape $(p-1)$: générer $\theta_{p-1}^{(t+1)}$ à partir $f(\theta_{p-1} | \theta_1^{(t+1)}, \theta_2^{(t+1)}, \dots, \theta_p^{(t)}, x)$
- Etape p : générer $\theta_p^{(t+1)}$ à partir $f(\theta_p | \theta_1^{(t+1)}, \theta_2^{(t+1)}, \dots, \theta_{p-1}^{(t+1)}, x)$

Si la convergence est obtenue, alors :

- 1) Retenir le vecteur $\theta = (\theta_1^{(t+1)}, \theta_2^{(t+1)}, \dots, \theta_{p-1}^{(t+1)}, \theta_p^{(t+1)})$

Si non

- 2) Remplacer t par $(t+1)$ et retourner à l'Etape 1.
-

Il est à noter que l'échantillonneur de Gibbs est un cas particulier de l'algorithme de *Metropolis-Hastings* (introduit dans sa forme la plus simple par Metropolis en 1953 et généralisé par Hastings en 1970)¹⁶³.

L'algorithme de Metropolis-Hastings :

L'algorithme de Metropolis-Hastings est un algorithme d'acceptation/rejet. Pour une certaine densité cible $f(\theta|x)$ connue à une constante près, l'idée de l'algorithme consiste à faire la simulation à partir d'une *distribution instrumentale* (appelée aussi la *loi de proposition*) qui est assez simple à simuler. L'algorithme se déroule ainsi :

¹⁶³ Gelman *et al.*, (1995).

1. On commence avec un valeur initiale vectorielle $\theta^{(0)}$, pour lequel $f(\theta^{(0)}|x) > 0$.
2. Pour $t=1, \dots, T$:
 - a) Générer θ^* à partir de la densité instrumentale (ou la loi de proposition) $J(\theta^*|\theta^{t-1})$.
 - b) Calculer le ratio de densités suivant :

$$r = \frac{f(\theta^*|x)}{f(\theta^{t-1}|x)}$$

- c) On pose :

$$\theta^t = \begin{cases} \theta^* & \text{avec probabilité } \min(r, 1) \\ \theta^{t-1} & \text{si non} \end{cases}$$

L'algorithme exige la possibilité de calculer le rapport r pour tout (θ^*, θ) , et d'en tirer θ à partir de la distribution instrumentale $J(\theta^*|\theta^{t-1})$ quels que soient θ et t . Plus encore, l'étape (c) ci-dessus nécessite la génération d'un nombre aléatoire de loi uniforme $U(0,1)$. Si $\theta^t = \theta^{t-1}$ c'est-à-dire la valeur θ^* a été refusée. En d'autres termes, la chaîne θ^* générée par l'algorithme ne possède pas les propriétés qui nous assurent de l'existence de sa distribution stationnaire et de la convergence de celle-ci vers la densité cible.

Il existe plusieurs sous-catégories d'algorithmes Metropolis-Hastings, suivant le type de distribution instrumentale choisie. Une description exhaustive de ces méthodes et de leur mise en œuvre peut être trouvée dans Gelman *et al.* (1995).

A.5.2 Les diagnostics de convergence :

A ce niveau, on doit répondre à deux questions : *i)* quel est le nombre d'itérations nécessaire à la *période de chauffe* ("burn-in period")¹⁶⁴ pour que $\theta^{(t)}$ soit distribuée suivant la loi cible ? et *ii)* comment doit-on régler le nombre d'itérations pour que l'échantillon généré permet d'avoir une bonne estimation des paramètres inconnus ?

Le choix de la condition initiale peut influencer la qualité de convergence. Il est alors nécessaire de ne pas tenir compte des premières itérations de l'algorithme, mais il n'existe pas une règle générale pour déterminer la durée de cette *période de chauffe*. En pratique, les

¹⁶⁴ Le terme *burn-in* désigne les premières itérations, élaborées avec la méthode MCMC, qui ne seront pas utilisées pour l'inférence. Ces itérations seront systématiquement éliminées de l'échantillon généré afin d'éviter l'influence des valeurs initiales.

premières itérations pourraient être évaluées à l'aide de la visualisation graphique¹⁶⁵ de la simulation qui sera la méthode la plus utilisée (Laurent, 2007). Si la taille de l'échantillon généré est assez large alors l'effet de la période de chauffe, sur le calcul de statistiques a posteriori, est minimal (Ntzoufras, 2005).

En pratique, le nombre d'itérations total pour lequel la chaîne est perçue comme « ayant convergé » ou « ayant atteint la stationnarité » pourrait être évalué à l'aide de graphiques de paramètres à estimer ainsi que les fonctions d'autocorrélation entre les séries d'estimations successives (Nakache et Gueguen, 2005).

a. Le diagnostic de convergence (Gelman et Rubin ,1992)

Pour vérifier la convergence d'une chaîne de Markov on peut aussi simuler avec au moins deux chaînes de valeurs initiales et comparer les variances intra-chaîne (entre valeurs d'une même chaîne) et inter-chaînes (entre les valeurs de chaînes différentes). Quand le rapport entre ces deux variances s'approche de la valeur asymptotique de 1, alors on peut considérer que toutes les chaînes convergent. En effet, cette méthode est fondée sur la statistique de Gelman et Rubin (1992).

Formellement, soit m un entier strictement supérieur à 1 (au moins deux chaînes de valeurs initiales différentes) et soit θ_{ij} le $i^{\text{ème}}$ ($i=1, \dots, n$) élément de la chaîne j ($j=1, \dots, m$). La variance inter-chaînes est définie comme :

$$B = \frac{n}{m-1} \sum_{j=1}^m (\bar{\theta}_j - \bar{\theta})^2$$

et la variance intra-chaîne se formule :

$$W = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\theta_{ij} - \bar{\theta}_j)^2$$

où $\bar{\theta}_j$ est la moyenne des n réalisations de la chaîne j et $\bar{\theta}$ est la moyenne des $m \times n$ réalisations de toutes les chaînes.

B et W sont des estimateurs convergents de la variance de θ . La quantité :

$$\hat{\sigma}_{\theta}^2 = \left(1 - \frac{1}{n}\right)W + \frac{1}{n}B$$

¹⁶⁵ On peut également utiliser la méthode de Raftery et Lewis (1992) pour déterminer le nombre des itérations de chauffage (on peut appliquer cette méthode avec le logiciel R).

pourrait être ainsi interprétée comme l'estimateur de la loi cible $p(\theta)$. Gelman et Rubin (1992) ont montré que $\hat{\sigma}_\theta^2$ surestime automatiquement la variance de la loi $p(\theta)$ tant que les chaînes n'ont pas convergé.

D'où la statistique de Gelman et Rubin (1992), qui est une statistique de diagnostic de convergence, définit par :

$$R = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_\theta^2}{W}}$$

Cette statistique tend vers 1 quand $n \rightarrow \infty$. En pratique, on considère que les chaînes ont atteint la convergence si $R < 1.2$ ¹⁶⁶ (une condition de convergence préconisée par Gelman et Rubin).

b. Le diagnostic de Raftery-Lewis (1992)

Le diagnostic qui a été soumis par Raftery-Lewis (1992) exprime le nombre d'itérations nécessaire pour pouvoir estimer un quantile particulier (2,5% par défaut, approximé avec une précision de l'ordre de 0,05 et une probabilité égale à 0,95) de la distribution cible avec une certaine précision. Ainsi, ce diagnostic s'intéresse à la réalisation d'un certain degré de précision pour les quantiles plutôt qu'à la convergence de la moyenne. Le diagnostic de Raftery-Lewis peut être appliqué à l'*output* provenant d'une seule chaîne de valeurs initiales.

Ce diagnostic peut-être effectué par le logiciel **R**. Le test rapporte les paramètres :

- N_{min} : le nombre minimum d'itérations nécessaires pour estimer, avec une précision donnée, le quantile d'intérêt sous l'hypothèse de l'indépendance (autocorrélation nulle).
- N : le nombre total d'itérations que la chaîne doit effectuer.
- M : le nombre d'itérations nécessaire à la *période de chauffe* ("burn-in period").
- I : le facteur de dépendance donné par $I = N/N_{min}$ qui indique l'accroissement relatif dans l'échantillon dû à l'autocorrélation. Si I est égal à 1, alors les valeurs générées par les itérations sont indépendantes. Une valeur de I supérieur à 5 indique qu'il existe un problème de convergence (Best *et al.*, 1996). En général, I peut être considéré comme une estimation approximative de l'intervalle d'amincissement ("thinning interval") nécessaire pour que les observations soient indépendantes (cette technique sert à corriger le problème d'autocorrélation d'ordre élevé).

¹⁶⁶ La loi de R est connue lorsqu'on utilise des approximations normales pour W et B .

A titre d'Exemple :

RAFTERY AND LEWIS CONVERGENCE DIAGNOSTIC				
=====				
Iterations used = 1001:6000				
Thinning interval = 1				
Sample size per chain = 5000				
Quantile (q) = 0.025				
Accuracy (r) = +/- 0.005				
Probability (s) = 0.95				
	Burn-in (M)	Total (N)	Lower bound (Nmin)	Dependence factor (I)
beta[1,1]	33	31161	3746	8.32
beta[1,2]	78	85286	3746	22.80
beta[1,3]	102	110496	3746	29.50
beta[1,4]	42	45806	3746	12.20
beta[1,5]	102	110496	3746	29.50
beta[1,6]	165	179043	3746	47.80
beta[1,7]	165	179043	3746	47.80
beta[1,8]	208	231660	3746	61.80
beta[1,9]	245	241845	3746	64.60
beta[2,1]	55	58760	3746	15.70
beta[2,2]	405	438570	3746	117.00
beta[2,3]	110	102235	3746	27.30
beta[2,4]	102	111994	3746	29.90
beta[2,5]	206	224550	3746	59.90
beta[2,6]	105	99400	3746	26.50
beta[2,7]	72	80416	3746	21.50
beta[2,8]	156	197480	3746	52.70
beta[2,9]	111	121296	3746	32.40

Pour juger de la convergence de paramètres qui décrivent la relation entre le suicide des agriculteurs et l'adoption du coton *Bt* nous exploitons le diagnostic de Raftery-Lewis (1992). On peut conclure que :

- le nombre maximal d'itérations, nécessaire pour obtenir une certaine précision de quantile d'ordre 2,5%, doit être égal à 438282.
- le nombre d'itérations nécessaire à la *période de chauffe* ("burn-in period") est égal 405.
- Pour certains paramètres, le facteur de dépendance *I* est élevé, ce qui révèle une autocorrélation élevée et par conséquent un intervalle d'amincissement ("*thinning interval*") sera nécessaire pour que les observations soient indépendantes. On peut ainsi

considérer un nombre maximal d'itérations égal à $3746 \times 117 = 471996$ avec un intervalle d'amincissement égal à 117.

Les résultats de diagnostic de Raftery-Lewis (1992) sont donc donnés par les tableaux suivants :

Les résultats de diagnostic de Raftery-Lewis pour le paramètre beta				
RAFTERY AND LEWIS CONVERGENCE DIAGNOSTIC				
=====				
Iterations used = 1001:6000				
Thinning interval = 1				
Sample size per chain = 5000				
Quantile (q) = 0.025				
Accuracy (r) = +/- 0.005				
Probability (s) = 0.95				
	Burn-in (M)	Total (N)	Lower bound (Nmin)	Dependence factor (I)
beta[1,1]	33	31161	3746	8.32
beta[1,2]	78	85286	3746	22.80
beta[1,3]	102	110496	3746	29.50
beta[1,4]	42	45806	3746	12.20
beta[1,5]	102	110496	3746	29.50
beta[1,6]	165	179043	3746	47.80
beta[1,7]	165	179043	3746	47.80
beta[1,8]	208	231660	3746	61.80
beta[1,9]	245	241845	3746	64.60
beta[2,1]	55	58760	3746	15.70
beta[2,2]	405	438570	3746	117.00
beta[2,3]	110	102235	3746	27.30
beta[2,4]	102	111994	3746	29.90
beta[2,5]	206	224550	3746	59.90
beta[2,6]	105	99400	3746	26.50
beta[2,7]	72	80416	3746	21.50
beta[2,8]	156	197480	3746	52.70
beta[2,9]	111	121296	3746	32.40

Les résultats de diagnostic de Raftery-Lewis pour le paramètre theta

RAFTERY AND LEWIS CONVERGENCE DIAGNOSTIC

=====

Iterations used = 1001:6000

Thinning interval = 1

Sample size per chain = 5000

Quantile (q) = 0.025

Accuracy (r) = +/- 0.005

Probability (s) = 0.95

	Burn-in (M)	Total (N)	Lower bound (Nmin)	Dependence factor (I)
theta[1,1]	39	38850	3746	10.4
theta[1,2]	73	79338	3746	21.2
theta[1,3]	129	136569	3746	36.5
theta[1,4]	96	104718	3746	28.0
theta[1,5]	64	67556	3746	18.0
theta[1,6]	66	74430	3746	19.9
theta[1,7]	145	150915	3746	40.3
theta[1,8]	105	109794	3746	29.3
theta[1,9]	84	93378	3746	24.9
theta[2,1]	64	67556	3746	18.0
theta[2,2]	112	117230	3746	31.3
theta[2,3]	54	58758	3746	15.7
theta[2,4]	276	301920	3746	80.6
theta[2,5]	140	156654	3746	41.8
theta[2,6]	147	150162	3746	40.1
theta[2,7]	80	85144	3746	22.7
theta[2,8]	102	104244	3746	27.8
theta[2,9]	207	231387	3746	61.8

Les résultats de diagnostic de Raftery-Lewis pour le paramètre gamma

RAFTERY AND LEWIS CONVERGENCE DIAGNOSTIC

=====

Iterations used = 1001:6000

Thinning interval = 1

Sample size per chain = 5000

Quantile (q) = 0.025

Accuracy (r) = +/- 0.005

Probability (s) = 0.95

	Burn-in (M)	Total (N)	Lower bound (Nmin)	Dependence factor (I)
gamma[1,1]	102	97619	3746	26.1
gamma[1,2]	204	271371	3746	72.4
gamma[1,3]	208	228285	3746	60.9
gamma[1,4]	93	104108	3746	27.8
gamma[1,5]	170	190487	3746	50.9
gamma[1,6]	91	99361	3746	26.5
gamma[1,7]	103	112254	3746	30.0
gamma[1,8]	287	324931	3746	86.7
gamma[1,9]	300	354910	3746	94.7
gamma[2,1]	137	148578	3746	39.7
gamma[2,2]	92	100932	3746	26.9
gamma[2,3]	119	130858	3746	34.9
gamma[2,4]	90	97802	3746	26.1
gamma[2,5]	83	93311	3746	24.9
gamma[2,6]	137	148578	3746	39.7
gamma[2,7]	416	453230	3746	121.0
gamma[2,8]	140	155690	3746	41.6
gamma[2,9]	78	89767	3746	24.0
gamma[3,1]	137	148578	3746	39.7
gamma[3,2]	171	193401	3746	51.6
gamma[3,3]	160	172548	3746	46.1
gamma[3,4]	208	228285	3746	60.9
gamma[3,5]	117	126817	3746	33.9
gamma[3,6]	91	109458	3746	29.2
gamma[3,7]	218	188552	3746	50.3
gamma[3,8]	281	310410	3746	82.9
gamma[3,9]	90	97802	3746	26.1

A.5.3 La distribution de Wishart :

La loi de *Wishart*¹⁶⁷ est une version multivariée de la loi du χ^2 . Soit $\{X_i\}_{i=1}^v$ une suite de variables aléatoires gaussiennes indépendantes et identiquement distribuées $N(0, Q)$ avec Q une matrice symétrique définie positive de dimension $p \times p$. Par définition la matrice aléatoire $Y = \sum_{i=1}^v X_i X_i'$ est distribuée selon une loi *Wishart*. Les acceptations suivantes caractérisent cette loi et la densité de l'inverse d'une variable aléatoire de *Wishart*.

Définition 1 : la matrice aléatoire Y , de dimension $p \times p$, symétrique et semi définie positive est distribuée selon une loi de Wishart $Y \sim W_p(Q, v)$, si et seulement si, sa densité est donnée par la fonction suivante :

$$f(Y; Q, v) = \frac{|Q|^{\frac{v}{2}} |Y|^{\frac{v-p-1}{2}}}{2^{\frac{vp}{2}} \pi^{\frac{p(p-1)}{4}} \prod_{i=1}^p \Gamma\left(\frac{v+1-i}{2}\right)} e^{-\frac{1}{2} \text{tr}\{YQ^{-1}\}}$$

pour Q une matrice semi définie positive et $v \geq p$ degré de liberté.

Définition 2 : une matrice aléatoire X , de dimension $p \times p$, est distribuée selon une *loi inverse Wishart* $X \sim iW_p(Q, v)$, si et seulement si, $X^{-1} \sim W_p(Q^{-1}, v)$.

Ainsi la fonction de densité associée à X est définie par :

$$f_{iW_p(Q,v)}(X; Q, v) = \frac{|Q|^{\frac{v}{2}} |X|^{-\frac{v+p+1}{2}}}{2^{\frac{vp}{2}} \pi^{\frac{p(p-1)}{4}} \prod_{i=1}^p \Gamma\left(\frac{v+1-i}{2}\right)} e^{-\frac{1}{2} \text{tr}\{X^{-1}Q\}}$$

¹⁶⁷ John Wishart (1898-1956) est un statisticien écossais.

A.5.4. Les distributions conditionnelles *a posteriori*

Pour spécifier les distributions conditionnelles de paramètres inconnus du modèle, on doit tout d'abord déterminer la distribution *a posteriori* jointe gaussienne¹⁶⁸ (l'équation 5.6). Celle-ci est définie par le produit entre les lois *a priori* et la vraisemblance des données complètes. Ensuite, l'expression de la loi conditionnelle complète de chaque paramètre inconnu sera définie par le produit des lois unidimensionnelles des seules variables et les données qui lui sont directement reliées (Koop, 2003 et Rossi *et al.* 2005.). Ainsi, l'estimation des paramètres du processus gaussien (5.6) est réalisée sous les distributions *a priori* et par l'implémentation d'un algorithme de Gibbs alternant les tirages dans les distributions conditionnelles *a posteriori* suivantes :

On note $\varphi_{-\eta}$ l'ensemble de tous les paramètres dans φ à l'exception η .

1. $(\Psi_\epsilon | s, x, b, d, \alpha, \varphi_{-\Psi_\epsilon}) \sim$

$$Wishart \left(N, \left[\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it}\theta - b'_{it}\beta_p - \alpha_{1i} \\ p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it}\theta - b'_{it}\beta_p - \alpha_{1i} \\ p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i} \end{pmatrix}' \right]^{-1} \right)$$

2. $(\Psi_\alpha | s, x, b, d, \alpha, \varphi_{-\Psi_\alpha}) \sim Wishart(n, [\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \mu_\alpha)(\alpha_i - \mu_\alpha)']^{-1})$

3. $(\mu_\alpha | s, x, b, d, \alpha, \varphi_{-\mu_\alpha}) \sim N \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \frac{1}{n} \Sigma_\alpha \right)$

4. $((\theta, \beta)' | s, x, b, d, \alpha, \varphi_{-\mu_\alpha}) \sim N(\mu_{\theta, \beta}, V_{\theta, \beta})$

avec

$$V_{\theta, \beta} = \left[\begin{pmatrix} (\sigma_{\theta, prior}^2)^{-1} & 0 \\ 0 & (\sigma_{\beta, prior}^2)^{-1} \end{pmatrix} + (\sigma_{\epsilon, \nu}^2)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n \begin{pmatrix} x_{it}x'_{it} & x_{it}b'_{it} \\ b_{it}x_{it} & b_{it}b'_{it} \end{pmatrix} \right]^{-1}$$

$$\mu_{\theta, \beta} = V_{\theta, \beta} \left[\begin{pmatrix} (\sigma_{\theta, prior}^2)^{-1} \mu_{\theta, prior} \\ (\sigma_{\beta, prior}^2)^{-1} \mu_{\beta, prior} \end{pmatrix} + (\sigma_{\epsilon, \nu}^2)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n \begin{pmatrix} x_{it} \\ b_{it} \end{pmatrix} (s_{it} - \alpha_{1i} - \mu_{\epsilon_{it}|v_{it}}) \right]$$

où

$$\mu_{\epsilon_{it}|v_{it}} = (p_{it} - x_{it}\gamma_1 - d_{it}\gamma_2 - \alpha_{2i}) \sigma_{\epsilon, \nu} / \sigma_v^2 \text{ et } \sigma_{\epsilon|v}^2 = \sigma_\epsilon^2 - \sigma_{\epsilon, \nu}^2 / \sigma_v^2 \text{ avec } \Sigma_\epsilon = \begin{pmatrix} \sigma_\epsilon^2 & \sigma_{\epsilon, \nu} \\ \sigma_{\epsilon, \nu} & \sigma_v^2 \end{pmatrix}$$

5. $((\gamma_1, \gamma_2)' | s, x, b, d, \alpha, \varphi_{-\mu_\alpha}) \sim N(\mu_{\gamma_1, \gamma_2}, V_{\gamma_1, \gamma_2})$

¹⁶⁸ The kernel joint posteriori density.

avec :

$$V_{\gamma_1, \gamma_2} = \left[\begin{pmatrix} (\sigma_{\gamma_1, prior}^2)^{-1} & 0 \\ 0 & (\sigma_{\gamma_2, prior}^2)^{-1} \end{pmatrix} + (\sigma_{\varepsilon, v}^2)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n \begin{pmatrix} x_{it} x'_{it} & x_{it} d'_{it} \\ d_{it} x_{it} & d_{it} d'_{it} \end{pmatrix} \right]^{-1}$$

$$\mu_{\gamma_1, \gamma_2} = V_{\gamma_1, \gamma_2} \left[\begin{pmatrix} (\sigma_{\theta, prior}^2)^{-1} \mu_{\theta, prior} \\ (\sigma_{\beta, prior}^2)^{-1} \mu_{\beta, prior} \end{pmatrix} + (\sigma_{\varepsilon, v}^2)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n \begin{pmatrix} x_{it} \\ d_{it} \end{pmatrix} (p_{it} - \alpha_{2i} - \mu_{\varepsilon_{it}|v_{it}}) \right]$$

où

$$\mu_{\varepsilon_{it}|v_{it}} = (s_{it} - \theta x_{it} - b'_{it} \beta_p - \alpha_{1i}) \sigma_{\varepsilon, v} / \sigma_{\varepsilon}^2 \text{ et } \sigma_{\varepsilon|v}^2 = \sigma_{\varepsilon}^2 - \sigma_{\varepsilon, v}^2 / \sigma_v^2 \text{ avec } \Sigma_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \sigma_{\varepsilon}^2 & \sigma_{\varepsilon, v} \\ \sigma_{\varepsilon, v} & \sigma_v^2 \end{pmatrix}$$

$$6. (\alpha_i | s, x, b, d, \alpha, \varphi_{-\alpha_i}) \sim$$

$$N \left([\Psi_{\alpha} + n\Psi_{\varepsilon, v}]^{-1} \left[\Psi_{\alpha} \mu_{\alpha} + \Psi_{\varepsilon, v} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} s_{it} - x_{it} \theta - b'_{it} \beta_p \\ p_{it} - x_{it} \gamma_1 - d_{it} \gamma_2 \end{pmatrix}, [\Psi_{\alpha} + n\Psi_{\varepsilon, v}]^{-1} \right] \right)$$

A.5.5 Le programme WinBUGS

```
#####  
#####  
#  
#           A WinBUGS program for estimating "Indian Farmer Suicides"  
#  
#####  
#####  
  
#       Author: Naceur Kheraief © (February 2013)  
#  
#  
#           *Department of Human Science  
#           University of Nice Sophia Antipolis, Nice, France  
#  
#  
#           ** GREDEG (Research Group on Law Economics and  
#           Management), UMR CNRS 6227  
#           250, rue Albert Einstein, 06560 Valbonne  
  
#  
#           email: nkhraief@gmail.com  
#  
#####  
#####  
  
#       This program is meant to be used for non-commercial purposes only.  
#       Please report any problems/ suggestions to Naceur Kheraief at:  
  
#           nkhraief@gmail.com  
#  
#       Please reference the manuscript below if the results of this program are used in  
#       any published material.  
#  
#       See the WinBUGS manual for detailed instructions on model specification and  
#       updating. WinBUGS software and manuals can be obtained at:  
  
#           http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/  
  
#####  
#####
```

Indian States:

```

Maharashtra <- 1
Andhra Pradesh <- 2
Karnataka <- 3
Madhya Pradesh <- 4
Gujarat <- 5
Tamil Nadu <- 6
Punjab <- 7
Rajasthan <- 8
Haryana <- 9
    
```

```

model {
for (i in 1:9){
for (t in 1:8){
Y[i,t,1] <-suicides[i,t]
X[i,t,1] <-yields[i,t]
Y[i,t,2] <-Bt-Cotton[i,t]
X[i,t,2] <-pesticides[i,t]
X[i,t,3] <-debt[i,t]
Y[i,t,1:2] ~ dnorm(mu[i,t,1:2], tau[1:2,1:2])
mu[i, t,1] <-theta[1,i]*X[i,t,1] + beta[1,i]*mu[i,t,2] + beta[2,i]*pow(mu[i,t,2],2) +
theta[2,i]* X[i,t,2] + alpha[i,1]
mu[i, t, 2] <- gamma[1,i]* X[i,t,1] + gamma[2,i]* X[i,t,2] + gamma[3,i]*X[i,t,3] +
alpha[i,2]
}
}
for (i in 1:9){
alpha[i,1:2] ~ dnorm(mu.alpha[i,1:2], tau.alpha[1:2,1:2])
mu.alpha[i,1:2]~ dnorm(mu0[i,1:2], S[,])
mu0[i,1]<- 0.0
mu0[i,2]<- 0.0
}
for (i in 1:9){
theta[1,i]~ dnorm(mu.theta1[i], tau.theta1[i])
theta[2,i]~ dnorm(mu.theta2[i], tau.theta2[i])
beta[1,i]~dnorm(mu.beta1[i],tau.beta1[i])
beta[2,i]~dnorm(mu.beta2[i],tau.beta2[i])
gamma[1,i]~ dnorm(mu.gamma1[i],tau.gamma1[i])
gamma[2,i]~ dnorm(mu.gamma2[i],tau.gamma2[i])
gamma[3,i]~ dnorm(mu.gamma3[i],tau.gamma3[i])
tau.theta1[i]<- pow(sigma.theta1[i], -2)
tau.theta2[i]<- pow(sigma.theta2[i], -2)
tau.beta1[i]<- pow(sigma.beta1[i], -2)
tau.beta2[i]<- pow(sigma.beta2[i], -2)
    
```

```
tau.gamma1[i]<- pow(sigma.gamma1[i], -2)
tau.gamma2[i]<- pow(sigma.gamma2[i], -2)
tau.gamma3[i]<- pow(sigma.gamma3[i], -2)
mu.theta1[i]~ dnorm(0, 0.001)
mu.theta2[i]~ dnorm(0, 0.001)
mu.beta1[i]~ dnorm(0, 0.001)
mu.beta2[i]~ dnorm(0, 0.001)
mu.gamma1[i]~ dnorm(0, 0.001)
mu.gamma2[i]~ dnorm(0, 0.001)
mu.gamma3[i]~ dnorm(0, 0.001)
sigma.theta1[i] ~ dunif (0, 2)
sigma.theta2[i] ~ dunif (0, 2)
sigma.beta1[i] ~ dunif (0, 2)
sigma.beta2[i] ~ dunif (0, 2)
sigma.gamma1[i] ~ dunif (0, 2)
sigma.gamma2[i] ~ dunif (0, 2)
sigma.gamma3[i] ~ dunif (0, 2)
}
tau[1:2,1:2] ~dwish(R[,],2)
R[1,1]<- 0.001
R[1,2]<- 0.0
R[2,1]<-0.0
R[2,2]<-0.001
sigma[1:2,1:2]<-inverse(tau[1:2,1:2 ])
tau.alpha[1:2,1:2] ~dwish(Q[,],2)
Q[1,1]<- 0.001
Q[1,2]<- 0.0
Q[2,1]<-0.0
Q[2,2]<-0.001
sigma.alpha[1:2,1:2]<-inverse(tau.alpha[1:2,1:2 ])
S[1,1]<- 0.001
S[1,2]<- 0.0
S[2,1]<-0.0
S[2,2]<-0.001
}
}
#end model
```

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La biotechnologie agricole est largement utilisée dans de nombreux pays développés (du Nord). Toutefois, son avantage pour les économies en développement (du Sud) est sujet à débat. Dans cette thèse, nous avons focalisé nos travaux principalement sur la question de l'adoption du coton génétiquement modifié (coton *Bt*) en Inde. Les résultats concernant les performances du coton transgénique sont mitigés. D'un côté, plusieurs études (par exemple Rao & Dev, 2009 ; Subramanian & Qaim, 2009, 2010 ; Gruere & Sengupta, 2011 ; Basu & Qaim, 2007 ; Ramasundaram *et al.*, 2012 ; Qaim & Zilberman, 2003 ; Clive, 2008, 2011 et Naik *et al.*, 2005) ont conclu que l'adoption du coton *Bt* constitue une opportunité pour réduire l'usage de pesticides, diminuer l'utilisation de la main d'œuvre et accroître le rendement car elle permet de lutter contre les insectes nuisibles tels que les vers de la capsule du cotonnier (les parasites les plus destructeurs). Les partisans de la nouvelle technologie ont indiqué que l'utilisation de coton *Bt* permet de réduire les pertes des rendements à travers le contrôle de certains insectes lépidoptères. D'un autre côté, ces variétés de coton transgénique ont propulsé les fermiers indiens dans un cercle vicieux créé par un niveau élevé d'endettement qui, pour la plupart, est devenu insupportable. De ce fait, le suicide s'apparente à une alternative rationnelle lorsque le coût de la vie devient insoutenable. Par conséquent, l'ambition de ce travail est d'apporter une contribution au débat sur la relation entre l'utilisation du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde. *vie*

Le principal apport de cette thèse est de montrer que l'utilisation de coton génétiquement modifié affecte «positivement» le suicide des agriculteurs indiens. En effet, plusieurs arguments nous incitent à énoncer ce résultat. Ainsi, dans cette conclusion générale, nous proposons en premier temps de faire le point sur les résultats obtenus, puis nous évoquons certains aspects de notre analyse qui nécessitent d'être approfondis pour conforter notre conclusion. Enfin, nous proposons les nouvelles pistes de recherche.

1. Résultats de notre recherche

La thèse comporte cinq chapitres chacun se terminant systématiquement par une conclusion résumant nos contributions.

Par le biais **du chapitre 1**, l'objectif principal était d'abord d'effectuer une revue critique de différentes études empiriques relatives à l'impact économique de la culture du coton *Bt* envers le fermier indien. L'examen détaillé de ces études permet de répondre à la question suivante : quel est l'impact économique de l'adoption du coton *Bt* sur le fermier indien? En effet, le coton *Bt*, ayant comme caractéristique la résistance génétique aux vers de la capsule du cotonnier, autorise de supprimer en partie le recours aux produits phytosanitaires et de limiter les dégâts causés par les insectes ravageurs. Par conséquent, pour la grande majorité des études réalisées sur l'Inde, le coton *Bt* a engendré une réelle augmentation du rendement et une diminution des quantités de pesticides (et donc une réduction de la quantité de main d'œuvre nécessaire pour l'application des produits chimiques), ce qui a permis indéniablement une diminution du coût total du coton et une augmentation du profit du fermier. Toutefois, bien qu'une grande partie de la littérature confirme les avantages économiques des variétés transgéniques à court terme, il est encore précoce pour confirmer d'une manière concluante et définitive les avantages économiques des semences transgéniques par rapport à celles conventionnelles à moyen et long termes. Plus encore, les bienfaits associés à la nouvelle technologie *Bt* peuvent varier selon les pressions exercées par les insectes ravageurs, les facteurs socio-économiques et politiques.

La revue de la littérature nous a permis également d'évaluer les données et les méthodes utilisées par ces travaux ainsi que leurs effets sur les résultats et les conclusions obtenus. Deux problèmes, liés à la cohérence des données, pourraient être identifiés : la petitesse des tailles d'échantillons et le biais potentiel de sélection. Plus encore, la possible endogénéité à la fois de la décision de cultiver le coton *Bt* et d'utilisation des pesticides, pose un autre problème qui devrait être corrigé afin d'éviter les estimations biaisés. Outre ces limites, d'autres contraintes méthodologiques pourraient être identifiées. *Primo*, la définition du coût n'est pas homogène entre les différentes études. Certains travaux ne considèrent que les coûts de pesticides et de semences transgéniques par contre d'autres études incluent le coût de production totale (Morse *et al.* 2007a). Par conséquent, les résultats entre ces études ne sont pas toujours comparables. *Secundo*, l'impact de la nouvelle technologie ne peut être évalué correctement que si une analyse contrefactuelle est effectuée. Une approche de type contrefactuel le consiste à mesurer l'impact de l'adoption du coton *Bt* sur la variation du bien-

Conclusion générale

être de l'agriculteur indien par la différence entre cette variation effectivement observée et celle à laquelle on aurait assistée si la technologie *Bt* n'aurait pas été adoptée. *Tertio*, les chercheurs ont supposé que l'agriculteur a tendance à maximiser le profit moyen plutôt que minimiser les risques, et par conséquent la productivité devient prioritaire sur la sécurité alimentaire ; ces préférences ainsi que les priorités supposées peuvent ne pas refléter le comportement réel d'un agriculteur (Soleri *et al.* 2008). L'hypothèse de la maximisation du profit, qui a été retenue par la majorité des études, est à la base de la croyance erronée qui dit que le coton transgénique et les pesticides doivent être traités comme des *inputs substituables* pour lutter contre les insectes ravageurs.

Dans un second temps, ce chapitre a discuté de la relation entre l'adoption du coton *Bt* et la succession de suicides d'agriculteurs en Inde. En effet, le coton transgénique, à lui seul, n'élimine pas complètement l'utilisation de pesticides. Il peut néanmoins le réduire, car la technologie *Bt* n'est opérante que contre certains insectes de l'ordre des lépidoptères. Selon Qayum et Sakhari (2005), le coton *Bt* n'a pas réalisé les résultats escomptés (faire disparaître les problèmes d'insectes et réduire d'autant l'utilisation de pesticides) et les fermiers qui ont utilisé ce type de semences ont eu un autre problème à savoir le développement d'insectes secondaires qui nécessite des doses supplémentaires de pesticides pour les éradiquer. L'augmentation du coût de production a aggravé l'état d'endettement des fermiers envers les succursales de *Mahyco-Monsanto*, qui leur vendaient à crédit les semences transgéniques et les produits phytosanitaires. Les cultivateurs du coton se trouvent dans un état de surendettement et le suicide (surtout dans les grands Etats producteurs du coton) devient l'unique échappatoire face à une situation économique insupportable. Bien que le phénomène du suicide d'agriculteurs en Inde ait commencé bien avant l'adoption du coton *Bt*, la nouvelle technologie n'a pas toutefois contribué à résoudre ce sérieux problème.

Dans le chapitre 2, après avoir retracé les différents types de suicide selon le sociologue français Durkheim, on a tenté de passer en revue les principales théories économiques ainsi que certaines études empiriques majeures au regard de l'économie du suicide. La théorie économique est fondée sur l'hypothèse du *choix rationnel* qui pourrait trouver dans le phénomène du suicide un intéressant défi de recherche. L'objectif primordial de cette revue de la littérature consiste à mettre l'accent sur l'importance d'étudier le suicide à travers l'hypothèse *rationaliste*. Cette approche vient indirectement pour compléter le point de vue médical qui suppose que le phénomène du suicide est le résultat d'un comportement souvent irrationnel. Sur le plan théorique, une variété de modèles peut être appliqué au comportement

Conclusion générale

suicidogène, dont principalement l'analogie de la participation au marché du travail mais aussi l'analyse coût-bénéfice. Par contre, la tentative de suicide a été examinée dans le cadre de la théorie des jeux. En particulier, depuis le papier fondateur de Hamermesh et Soss (1974), les économistes ont formalisé la notion qui stipule que la maximisation de l'utilité joue un rôle prépondérant dans la formation du comportement suicidaire. Selon ces auteurs, un agent économique choisit de commettre un acte suicidaire si son utilité anticipée sur l'ensemble de son cycle de vie baisse en dessous d'un certain seuil. Sur le plan empirique, les économistes ont démontré que le suicide n'est pas un acte qui résulte seulement de l'isolement social ou d'une maladie mentale. *La première approche*, qui est la principale approche reconnue et utilisée par les économistes, consiste à traiter des données agrégées (l'approche macroéconométrique). Pour la plupart de ces travaux, il existe une relation de cause à effet entre le chômage et le suicide. Toutefois, le suicide risquerait d'être affecté par les mêmes variables qui influencent le chômage. Par exemple, l'employé peut perdre son emploi à cause l'alcoolisme ou d'une maladie mentale. Ainsi, si les sources d'endogénéité ne sont pas testées et corrigées, les coefficients de régression seront biaisés. *La deuxième approche* principale consiste à utiliser des données désagrégées au niveau des individus afin d'étudier les préférences individuelles envers le suicide. Cette approche microéconométrique offre un cadre d'analyse plus riche pour étudier le comportement suicidaire. Toutefois, cette analyse requiert des bases de données individuelles importantes qui ne sont pas toujours disponibles dans la majorité des pays. Ainsi, l'absence d'une telle base des données a conduit certains chercheurs à entreprendre des études soit macro-économétriques soit expérimentales.

Dans le premier chapitre de cette thèse nous avons synthétisé les effets positifs immédiats de l'adoption du coton *Bt* en Inde rapportés par les travaux précédents. Ces avantages pour les petits fermiers restent à vérifier dans le contexte actuel de l'Inde. En effet, le Ministère de l'Agriculture Indien a reconnu, pour la première fois, le lien entre le suicide des agriculteurs et la baisse du rendement du coton *Bt*. Le rapport du ministère de l'agriculture daté du 09 janvier 2012 (SJ/FA-2/1a/i) a constaté que : *“Cotton farmers are in a deep crisis since shifting to Bt cotton. The spate of farmer suicides in 2011-12 has been particularly severe among Bt cotton farmers. In fact cost of cotton cultivation has jumped from Rs 7 million per hectare to Rs 12 million due to rising costs of pesticides. Total Bt cotton production in the last five years has reduced.”*

Ainsi, pour analyser théoriquement la relation entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs en Inde, nous avons passé en revue (dans le deuxième chapitre de cette thèse)

Conclusion générale

le point de vue économique sur le phénomène du suicide. Il n'existe pas à notre connaissance de modèle théorique qui s'intéresse à cette question. Prenant acte de cette lacune, nous proposons dans les chapitres 3 et 4 deux modèles qui abordent le risque et de l'incertitude liés à la nouvelle technologie *Bt*.

Dans le chapitre 3, nous avons éclairci la rationalité qui incite les fermiers indiens à choisir le suicide. En effet, la technologie transgénique est associée à un facteur de risque qui dépend du degré de résistance de l'insecte ravageur du coton à la toxine *Bt*. Ainsi, à mesure que la population d'insectes développe une résistance contre la protéine *Bt*, la pression exercée par ces ravageurs sur la récolte provoque des pertes considérables de rendements. Afin de répondre à cette problématique, nous avons tenté de formuler un modèle théorique décrivant le comportement du cultivateur de coton qui est à la fois producteur et consommateur. Notre modèle (d'optimisation intertemporelle en temps est discret) semble fournir une explication décrivant le comportement du cultivateur du coton *Bt* vis-à-vis d'un facteur de risque qui spécifie la prédisposition de l'agriculteur au suicide. Ce facteur de risque varie en fonction du degré de résistance des insectes ravageurs aux protéines *Bt*. En effet, si le gène *Bt* est dépossédé de ses capacités de résistance alors l'agriculteur sera dans l'obligation de pulvériser davantage de pesticides pour compenser la diminution de l'efficacité des toxines *Bt* ; ce qui représente ainsi un coût additionnel. Outre le prix démesuré de semences, les coûts des pesticides, nécessaires pour lutter contre les ravageurs résistants, deviennent plus élevés que ceux payés par le cultivateur de coton conventionnel. Les petits agriculteurs se retrouvent ainsi pris dans le cercle vicieux de l'endettement ; ce qui entraîne mécaniquement et inexorablement un accroissement régulier du nombre de suicides.

Enfin, on a révélé que la rationalité qui incite l'agriculteur à opter entre le suicide ou continuer de vivre dépend essentiellement d'un seuil critique de risque qui résulte à son tour du *seuil économique de nuisibilité*. Ce seuil de tolérance est représenté par la taille de la population de ravageurs qu'un agriculteur peut admettre sans un grand risque pour sa récolte. Si le niveau de la population d'insectes évolue au-delà du seuil économique de nuisibilité, l'utilité devient négative et par conséquent l'agriculteur choisira le suicide qui lui rapporte une valeur d'utilité nulle, *ad vitam aeternam*.

De même, les résultats **du chapitre 4** expliquent le comportement suicidaire du cultivateur du coton *Bt* en Inde. Notre second modèle théorique a pris en considération deux hypothèses : *Primo*, la résistance observée chez les insectes ravageurs aux toxines *Bt*. *Secundo*, l'émergence de nouveaux ravageurs (des parasites secondaires) insensibles au *Bt*.

Conclusion générale

Par conséquent, des applications supplémentaires de pesticides pourraient s'avérer obligatoires pour éviter davantage de pertes de rendement. Ces coûts additionnels doivent cependant limiter la rentabilité économique du coton *Bt*. Dans la mesure où les agriculteurs ne tiennent pas compte de ces effets intertemporels (la résistance aux toxines *Bt* et l'émergence des insectes secondaires), on peut les qualifier comme étant une externalité négative intertemporelle. Ainsi, le coût réel, associé à l'utilisation des semences transgéniques, est la somme entre le coût direct (le coût marginal d'utilisation du coton *Bt*) et le coût indirect (le coût relatif à la résistance des insectes ravageurs aux toxines *Bt*).

Enfin, on a démontré la relation entre le suicide des fermiers et l'introduction du coton *Bt* en Inde. La décision de suicide a été formalisée dans le cadre d'un modèle de maximisation d'utilité. Conformément à la littérature sur l'économie du suicide, un individu est censé se supprimer si la valeur présente de son utilité intertemporelle, durant sa vie active, baisse en dessous d'un certain seuil (Hamermesh et Soss, 1974). L'apport de notre modèle consiste à introduire l'incertitude sur le gain net associé à la culture du coton *Bt* en supposant que ce gain évolue selon un processus stochastique (un mouvement Brownien géométrique avec un processus de sauts qui obéit à une loi de Poisson). Le modèle a été résolu analytiquement pour déterminer le gain net du seuil au-dessous duquel un cultivateur du coton *Bt* se donne la mort. Ce gain net minimum est exprimé en fonction des paramètres du processus stochastique (la valeur espérée du taux de croissance du gain net, sa variance et la probabilité de saut du gain net vers le bas à la suite de l'apparition d'une résistance chez les insectes ravageurs aux toxines *Bt*). Les impacts de changements de ces paramètres sur la valeur du seuil sont aussi calculés pour montrer comment l'incertitude au niveau du gain net peut influencer la décision de suicide chez les cultivateurs du coton *Bt*. Somme toute, l'agriculteur a tendance à se suicider quand l'incertitude autour du gain net du coton *Bt* augmente.

Sur le plan empirique, le **chapitre 5** s'intéresse à l'estimation de la relation entre l'adoption du coton *Bt* et le suicide des agriculteurs. Pour ce faire, nous développons une méthode d'estimation bayésienne semi-paramétrique. L'avantage de la méthode d'estimation bayésienne est qu'elle ne requiert pas d'échantillons de grande taille. Cette méthode d'estimation nous permet de calculer d'une manière précise les distributions *a posteriori* du modèle ainsi que leurs écarts-type en utilisant les techniques MCMC. Enfin, en raison de l'endogénéité du processus de prise de décision du cultivateur du coton, nous avons dû utiliser des variables instrumentales.

Conclusion générale

En recourant à des données secondaires agrégées à l'échelle Etat, nos conclusions démontrent clairement l'impact positif de l'utilisation du coton transgénique sur le suicide des fermiers indiens. Les cultivateurs de coton *Bt*, avec leurs coûts agricoles élevés, leur agriculture forte utilisatrice des pesticides chimiques et leurs dettes trop élevées, sont vulnérables et par conséquent sont exposés à un risque élevé de faillite.

La méthodologie qui a été développée dans ce chapitre empirique offre une perspective prometteuse pour analyser des informations provenant d'enquêtes à l'échelle du producteur et tester l'hypothèse de la substituabilité entre le coton *Bt* et les pesticides. En effet, l'hypothèse de substituabilité entre ces inputs est limitée par l'horizon temporel. Les insectes ravageurs peuvent développer au cours du temps une certaine résistance contre la toxine *Bt*. Ainsi, la capacité des toxines *Bt* à éliminer les vers de la capsule du cotonnier diminue graduellement, ce qui oblige l'agriculteur à augmenter les doses de pesticides appliquées. De plus, même lorsque le contrôle de la population d'insectes cibles est efficace, l'émergence de ravageurs secondaires (qui ont été contrôlés par les prédateurs naturels au cours des toutes premières années de culture du coton *Bt*) peuvent causer des pertes économiques considérables. Pareillement, l'émergence de ces ravageurs secondaires peut inciter les cultivateurs du coton à procéder à leur contrôle par la pulvérisation des quantités supplémentaires de pesticides.

D'après les résultats obtenus aussi bien sur le plan théorique qu'empirique, nous sommes enclins à penser que l'expérience du coton *Bt* en Inde a été un échec particulièrement pour les petits fermiers. De fait, les modèles théoriques abordent une question centrale à savoir l'évolution dynamique des populations de ravageurs. Or, cette hypothèse n'a pas été retenue par les études théoriques précédentes. L'utilisation de ces variétés génétiquement modifiées n'a pas entraîné une réduction durable de produits phytosanitaires, devenus de nouveau indispensables. Les petits agriculteurs se retrouvent ainsi pris dans une véritable spirale infernale d'endettement, ce qui entraîne un accroissement régulier du nombre de suicides parmi eux. Bien que le phénomène des suicides d'agriculteurs en Inde ait commencé bien avant l'adoption du coton *Bt*, la nouvelle technologie *Bt* n'a pas toutefois contribué à résoudre ce sérieux problème.

2. Limites de la thèse

Le problème du coton génétiquement modifié en Inde est complexe et multidimensionnel. Ainsi, notre analyse ne s'est pas voulue exhaustive quand à l'adoption du coton *Bt* par les fermiers indiens. Plus encore, bien que notre approche économétrique semble originale, il est impossible de traiter correctement l'essentiel de la question avec uniquement des données secondaires. Toutefois, la méthode d'analyse développée peut être profitable pour l'étude d'autres enquêtes du terrain approfondies, qui s'étendent sur plusieurs années et avec une large représentation géographique. Dans ce qui suit, nous présentons certaines interrogations qui n'ont pas été abordées par notre analyse du fait de la problématique initiale.

- Notre thèse n'a pas abordé la question relative aux structures juridiques et institutionnelles dans lesquelles le coton *Bt* a été adopté en Inde. En effet, l'évaluation de ces structures s'avère nécessaire pour examiner la relation entre l'introduction du coton génétiquement modifié et la recrudescence de suicides d'agriculteurs en Inde. Il existe des contraintes institutionnelles qui rendent le coût de transaction élevé. Selon Smale *et al.* (2007, p. 33) : *« Les conditions institutionnelles et les arrangements mise en place dans la filière de production semblent être les facteurs déterminant les plus importants de l'impact du coton Bt à l'échelle du producteur, même lorsque le trait a fait preuve d'efficacité dans les essais en champ ou en ferme. Plus particulièrement, la redevance liée au transfert de technologie qui est directement répercutée sur le prix de la semence, la certitude de recevoir les intrants à temps et de pouvoir vendre son produit, et la nature et le contenu du contrat négocié par les producteurs, sont des facteurs cruciaux. Ces facteurs seront directement influencés par les politiques agricoles et les négociations déjà en cours dans la région ».*
- Notre analyse exclut également les impacts directs et indirects de l'introduction du coton génétiquement modifié sur le bien-être, la pauvreté et la distribution du revenu. Du point de vue méthodologique, on peut simuler ces effets à l'aide d'un modèle d'équilibre général calculable.
- Cette thèse n'a pas traité la question du consentement à payer des agriculteurs (*farmers willingness to pay*) ainsi que la courbe de demande, de la nouvelle technologie, estimée sous des différents régimes de tarification. En utilisant la méthode d'évaluation contingente, l'analyse du consentement à payer aide à prendre en compte des réformes

dans la filière cotonnières et/ou du changement dans les politiques de l'adoption du coton *Bt* en Inde.

- Enfin, notre thèse ne pose pas non plus la question de la répartition des bénéfices relatifs au coton génétiquement modifié entre *Monsanto*, les fermiers indiens et les consommateurs. Le marché des semences génétiquement modifiées se caractérise par une structure oligopolistique.

3. Perspectives de recherches

Certains aspects méritent toutefois d'être approfondis et développés afin de pouvoir conforter notre conclusion. Une extension possible de ce travail serait d'évaluer le taux de répartition des bénéfices, associés à l'utilisation du coton *Bt* en Inde, entre les innovateurs, les fournisseurs de semences, les cultivateurs et les consommateurs. Nos recherches peuvent naturellement être orientées pour analyser les différentes stratégies suivies par la joint-venture *Mahyco Monsanto Biotech* afin de diffuser ses variétés *Bt* entre les fermiers et d'expliquer les conséquences économiques de ces stratégies sur les principaux acteurs du secteur cotonnier en Inde. Ainsi, notre méthodologie à venir pourrait se résumer comme suit : après avoir examiné la littérature existante sur le semencier indien Mahyco (qui appartient au géant agro-alimentaire américain *Monsanto*), la question de répartition sera traitée avec un modèle de simulation. Pour ce faire, on peut utiliser un modèle de surplus économique avec une analyse de sensibilité des paramètres du modèle (Smale *et al.*, 2007). À l'aide du logiciel @RiskTM¹⁶⁹ il est possible d'estimer différents scénarios (comparaisons de multiples tarifications). Cette analyse va nous permettre d'identifier les éléments qui entraînent le surendettement de l'agriculteur indien. Cela pourra également nous aider à approfondir notre compréhension du phénomène du suicide des agriculteurs du coton. Selon Smale *et al.* (2007, p. 100)¹⁷⁰ : « *L'utilisation de cette approche offre la possibilité d'une analyse avancée du risque lié à la variation des élasticités de l'offre, des taux d'adoption, des redevances liées au transfert de technologie, des rendements de coton par hectare et des coûts de production* ».

En général, la réussite de la biotechnologie agricole dépend nécessairement de la répartition équitable de la valeur des biotechnologies agricoles entre les différents agents

¹⁶⁹ Voir Smale *et al.* (2007, pp. 100-101) pour plus de détails sur ce logiciel.

¹⁷⁰ Les auteurs ont utilisé cette approche pour évaluer l'ampleur potentielle des bénéfices économiques du coton *Bt* en Afrique de l'Ouest. D'autres travaux ont concerné essentiellement les Etats-Unis, le Mexique, la Chine et l'Afrique du Sud mais cette étude n'a jamais été menée pour l'Inde.

Conclusion générale

économiques. Donc, la question est de savoir à qui profitent les biotechnologies agricoles : aux petits fermiers ou bien aux entreprises semencières?

La répartition des bénéfices dépend également de la variable *droit de propriété intellectuelle* (DPI) de l'innovation biotechnologique. En effet, le DPI accorde un pouvoir de monopole à l'innovateur sur son invention. Ainsi, il est possible d'étudier l'impact de DPI sur le profit du producteur du coton, le surplus du consommateur et le bien-être social.

La seconde extension envisagée pour ce travail se donne pour ambition d'examiner l'impact économique de l'adoption du coton *Bt* en Inde à partir d'un modèle d'équilibre général calculable multirégional (EGCM). Pour cela, il faudrait construire une matrice de comptabilité sociale avec 2002 (l'année de l'autorisation commerciale du coton *Bt* en Inde) comme année de référence. Ce modèle aura pour objectif de quantifier les effets de l'utilisation des semences transgéniques sur la production, les prix, les rendements des facteurs et le bien-être. Cette analyse permettra également de capter les caractéristiques institutionnelles du secteur du coton en Inde. Dans cette étude, nous porterons une attention particulière à l'estimation du gain de productivité lié à l'introduction du coton génétiquement modifié pour toutes les régions du monde cultivant le coton *Bt*. La productivité totale des facteurs sera également estimée sur la base d'études disponibles réalisées au niveau de l'exploitation agricole du coton *Bt*. L'utilisation d'un tel cadre de modélisation se justifie principalement pour deux raisons majeures. *Primo*, étant donné l'importance économique du coton pour un pays comme l'Inde, les impacts du coton *Bt* sur l'emploi dans les zones rurales, le PIB et les exportations seront également être pris en compte et examinés dans l'ensemble de l'économie. *Secundo*, étant donné que l'utilisation du coton *Bt* a été généralisée dans plusieurs régions, l'impact de la nouvelle technologie ne dépend pas seulement du taux d'adoption dans le pays, mais également du niveau d'utilisation du coton *Bt* dans les autres régions du monde. L'interdépendance du secteur cotonnier en Inde au marché mondial du coton rend le cadre multirégional le plus approprié pour explorer les conséquences du changement technologique sur le commerce. Il va sans dire que la baisse continue des prix de coton sur le marché mondial ne peut que préoccuper les agriculteurs indiens. La baisse des prix sur le marché international est due à la politique de subvention américaine aux producteurs de coton. Ainsi, la vulnérabilité du paysannat cotonnier en Inde dépend fortement des fluctuations des cours mondiaux de l'or blanc.

Au niveau de la valorisation de nos résultats, nous pensons créer notre propre base de données à partir d'une méthode basée sur des questionnaires. Dans ce sens, notre proposition

Conclusion générale

consiste à accorder toute l'importance aux données individuelles récoltées *via* une enquête de terrain qui devrait normalement porter sur un nombre suffisamment large et représentatif du tissu de la population cible (proportion des fermiers suicidés et des fermiers encore en activité, taille des exploitations, chiffre d'affaires, âge des fermiers,...). Notre objectif sera donc de considérer une demande de financement auprès de l'ANR comme une étape *sine qua none* pour déposer une demande complémentaire auprès de l'*European Research Council* (ERC) au travers des « *ERC Starting grants* ».

La dernière extension que nous proposons consiste à établir une étude comparative entre l'échec de l'Inde et le succès de la Chine en matière du coton génétiquement modifié. Selon Smale *et al.* (2007, p. 33) : « *À ce jour, les études empiriques publiées suggèrent que la Chine représente le cas de réussite la plus importante en termes d'effets durables et positives de la culture du coton Bt sur la réduction de l'utilisation de pesticides, les revenus des producteurs, les avantages liés à la santé et à l'environnement, la couverture régionale et le développement durable depuis 1999* ». En Chine, les semences transgéniques se vendent à un prix inférieur à celui pratiqué en Inde. En effet, le secteur public chinois a offert un grand nombre des variétés *Bt* qui concurrencent le coton génétiquement modifié du secteur privé. La Chine profite de l'existence d'un secteur public qui se charge de la recherche et développement en biotechnologie agricole (*The Chinese Academy of Agriculture Science*) capable de concurrencer *Monsanto*. En 1999, la Chine avait investi 112 millions de dollars dans le secteur de la biotechnologie agricole par contre l'Etat indien a dépensé 60 millions de dollars pour la recherche en biotechnologie durant la même année (Pray, 2001). Selon Fok *et al.* (2005, p. 15) : « *Non seulement il n'y a pas de marché monopolistique des semences de Coton Génétiquement Modifié en faveur des firmes internationales qui ont introduit les premières variétés, il ressort aussi que la capacité de mise en marché de variétés de Coton Génétiquement Modifié par les institutions locales de recherche a été accrue, aux différents niveaux administratifs contestant ainsi la suprématie initiale des variétés américaines* ». Par conséquent, le cas de la Chine montre tout simplement que l'engagement du secteur public dans les activités de R&D en biotechnologie peut encourager les petits fermiers (à faibles revenus) à adopter la nouvelle technologie *Bt*.

Enfin, dans le contexte de l'adoption d'une innovation biotech, l'agriculteur peut ne pas avoir une information complète sur la nouvelle technologie et par conséquent la rationalité de celui-ci est « limitée », surtout dans les pays en développement. Cette analyse pourrait nous permettre d'élargir et d'enrichir notre modèle théorique (chapitre 3) tout en comprenant mieux le comportement suicidaire des agriculteurs indiens. En effet, la diffusion de la

Conclusion générale

technologie *Bt* est liée à sa capacité de contrôler les vers de la capsule du cotonnier. Dans ce cas, l'agriculteur est en mesure de comprendre le rôle principal de coton *Bt* mais il ne possède pas une information suffisante pour juger la performance de la technologie *Bt* (rationalité limitée). Ainsi, le critère de regret minimax, proposée par Savage en 1951, est une règle générale de prise de décision dans une situation d'information incomplète. Supposons qu'un agriculteur doit choisir entre les deux types de semences : OGM ou non OGM (bio ou conventionnelles) et qu'il veut faire un choix qui maximise son bien-être. Toutefois, il ne possède pas d'information complète sur le résultat qui serait produit par chaque alternative. Comment doit-il se comporter? La théorie bayésienne suppose que l'agriculteur peut en premier temps attribuer une distribution de probabilité subjective aux résultats inconnus et maximiser en second temps le bien-être espéré. Cependant, la distribution de probabilité subjective est en soi un état de connaissance, et le fermier peut pressentir incapable de juger un événement aléatoire. Comment devrait-il donc se comporter? Le paysan peut appliquer *le critère de regret minimax* (Savage, 1951) qui consiste à évaluer le regret maximal (ou le manque à gagner maximal) éventuel associé à chaque décision possible, puis à choisir celle à laquelle est lié le plus petit regret maximum. Autrement dit, la règle de Savage consiste à choisir une alternative minimisant la perte maximale de bien-être résultant de l'absence d'une information complète. Plus précisément, le regret (ou le manque à gagner) associé à une alternative est défini par la différence entre le bien-être maximal (réalisable en situation d'information complète) et celui réalisé par cette alternative. En situation d'information complète, la meilleure stratégie est de choisir évidemment une alternative minimisant le regret à zéro.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Abbring J. H., Heckman J., Chiappori P. A. & Pinquet J., (2003), “Adverse Selection and Moral Hazard in Insurance: Can Dynamic Data Help to Distinguish?”, *Journal of the European Economic Association* Volume 1, Issues 2–3, pp. 512–521, April / May.

Arora A. & Bansal S., (2012), “Diffusion of *Bt*-Cotton in India: Impact of Seed Prices and Varietal Approval”, *Applied Economic Perspectives and Policy* Volume 34, Issue 1, pp. 102-118, Spring.

Barraclough B. & Huges J., (1987), “*Suicide: Clinical and Epidemiological Studies*” New York : Croom Helm. 188 p.

Barwale R. B., Gadwal V. R., Zehr U. & Zehr B., (2004), “Prospects for *Bt*-Cotton Technology in India”, *AgBioForum*, Volume 7, Issues 1-2, pp. 23–26.

Basu, A.K. & Qaim, M., (2007), “On the Adoption of Genetically Modified Seeds in Developing Countries and the Optimal Types of Government Intervention”, *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 89, Issue 3, pp. 784-804, August.

Bazin D., Berenger, V., Bhukuth A. & Kheraief N., (2013), “Why Does the *Bt*-Cotton Kill Farmers in India? Presentation of a Synthetic Model”, Document de travail, Université de Nice Sophia Antipolis, March.

Becker, G.S., (1976), “The Economic Approach to Human Behavior” in Becker G.: *The Economic Approach to Human Behavior*. Chicago: University of Chicago Press, 314 p.

Becker G.S. & Posner R.A., (2006), “Suicide: An Economic Approach”, Unpublished Manuscript, University of Chicago, March.

Bendel, R.B. and Carlin, B.P., (1990) “Bayes Methods in the Ecological Fallacy Context: Estimation of Individual Correlation from Aggregate Data,” *Communications in Statistics, Part A – Theory and Methods*, Volume 19, Issue 7, p. 2595–2623.

Bennett R.M., Ismael Y., Kambhampati U. & Morse, S., (2004a), “Economic Impact of Genetically Modified Cotton in India”. *AgBioForum*, Volume 7, Issue 3, pp. 96-100.

Bennett R., Ismael Y., Morse S. & Shankar B., (2004b), “Reductions in Insecticide Use from Adoption of *Bt*-Cotton in South Africa: Impacts on Economic Performance and Toxic Load to the Environment”, *Journal of Agricultural Science*, Volume 142, Issue 6, pp. 665–674, December.

Bennett R., Ismael Y. & Morse S., (2005), “Explaining Contradictory Evidence Regarding Impacts of Genetically Modified Crops in Developing Countries. Varietal Performance of Transgenic Cotton in India”, *Journal of Agricultural Science*, Volume 143, Issue 1, pp.35-41, February.

Bennett R., Kambhampati U., Morse S. & Ismael Y., (2006), “Farm-Level Economic Performance of Genetically Modified Cotton in Maharashtra, India”, *Review of Agricultural Economics*, Volume 28, Issue 1, pp. 59-71.

Berman E. & Laitin D. D., (2008), “Religion, Terrorism and Public Goods: Testing the Club Model”, *Journal of Public Economics*, Volume 92, Issues 10-11, pp. 1942-1967, October.

Bibliographie

Best N., Cowles M. & Vines K., (1996), “*CODA: Convergence Diagnostics and Output Analysis Software for Gibbs Sampling Output*”, Version 0.30, MRC Biostatistics Unit, Institute of Public Health, Cambridge, UK.

Block J. H., Hoogerheide L. & Thurik R., (2012), “Are Education and Entrepreneurial Income Endogenous? A Bayesian Analysis”, *Entrepreneurship Research Journal*, Volume 2, Issue 3, pp. 2157-5665, July.

Bound, J., Jaeger, D.A., Baker, R.M., 1995, “Problems with Instrumental Variables Estimation When the Correlation between the Instruments and the Endogenous Explanatory Variable is Weak”. *Journal of the American Statistical Association*, 90(430): 443-450.

Brainerd E., (2001), “Economic Reform and Mortality in the Former Soviet Union: A Study of the Suicide Epidemic in the 1990s”, *European Economic Review*, Volume 45, Issues 4-6, pp. 1007-1019, May.

Bureau O., (2006), “*Bt-Cotton Royalty Issue: AP Seeks PM’s Support*”, (January 24, 2006) *The Hindu Business Line*.

Center for Human Rights and Global Justice, (2011), “*Every Thirty Minutes: Farmer Suicides, Human Rights, and the Agrarian Crisis in India*” (New York: NYU School of Law).

Chen, J., Choi, Y., and Sawada, Y., (2008), “Suicide and Life Insurance”, Center for International Research on the Japanese Economy, Discussion Papers, CIRJE-F-558, University of Tokyo.

Chiappori P. A., Jullien B., Salanié B. & Salanié F., (2001), “Asymmetric Information in Insurance: General Testable Implications”, *Rand Journal of Economics*, Volume 37, Issue 4, pp. 783–798, December.

Chib S. & Greenberg E., (2010), “Additive Cubic Spline Regression with Dirichlet Process Mixture Errors”, *Journal of Econometrics*, Volume 156, Issue 2, pp. 322-336, June.

Choudhary, B. & Gaur, K., (2010), “*Bt-Cotton in India: A Country Profile. ISAAA Series of Biotech Crop Profiles*”, ISAAA: Ithaca, NY.

Clive J., (2008), “Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008”, ISAAA brief 39, ISAAA.

Clive J., (2011), “Situation Mondiale des Plantes GM Commercialisées : 2011”. ISAAA Brief No. 43: Ithaca, NY: International Service for the Acquisition of AgriBiotech Applications (ISAAA).

Coalition for a GM-Free India, (2012), “10 Years of *Bt-Cotton*: False Hype and Failed Promises Cotton farmers’ Crisis Continues with Crop Failure and Suicides”, March. <http://indiagminfo.org/?p=393>.

Crost B., Shankar B., Bennett R. & Morse S., (2007), “Bias from Farmer Self Selection in Genetically Modified Crop Productivity Estimates: Evidence from India Data”, *Journal of Agricultural Economics*, Volume 58, Issue 1, pp. 24–36, February.

Bibliographie

Crost B. & Shankar B., (2008), “*Bt-cotton and Production Risk: Panel Data Estimates*”, *International Journal of Biotechnology*, Volume 10, Issues: 2-3, pp. 122-131, May.

Cutler D., Glaeser E.L. & Norberg K.E., (2001), “Explaining the Rise in Youth Suicide”, pp. 219-269 in Jonathan Gruber (eds.), *Risky Behavior Among Youths: An Economic Analysis*, Chicago: University of Chicago Press, X +538 p.

Daly M. C. & D. J. Wilson, (2009), "Happiness, Unhappiness, and Suicide: An Empirical Assessment," *Journal of the European Economic Association*, MIT Press, Volume 7, Issues (2-3), pp. 539-549, April-May.

Daly M. C. & D. J. Wilson & N. J. Johnson, (2012), "Relative Status and Well-Being: Evidence from U.S. Suicide Deaths," Working Paper Series 2012-16, Federal Reserve Bank of San Francisco.

Dev S. M. & Rao N. C., (2007), “Socio-Economic Impact of *Bt-Cotton*”, Centre for Economic and Social Studies (CESS) Monograph No. 3. Hyderabad, India: CESS.

Dinesh C. S., (2010), “*Bt-Cotton has Failed Admits Monsanto*”, (March 6, 2010), *India Today*.

Dixit A. & Pindyck R.S., (1994), “*Investment Under Uncertainty*”, Princeton, N.J.: Princeton University Press, XIV+ 468 p.

Dodamani M. T., Kerutagi M. G. & Jayashree H., (2010), “Financial Viability of Cotton Growers in Northern Karnataka”, *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, Volume 23, Issue 2, pp. 262- 264. January-March.

Dublin L.I. & Bunzel B., (1933), *To Be or Not to Be: A Study of Suicide*, New York, Harrison Smith and Robert Haas, X+ 443 p.

Durkheim E., (1897), “*Le Suicide : Étude de Sociologie*”, 9^{ème} tirage, Paris, Puf., coll. Quadrige, 463 p., 1985.

Elster J., (1998), “Emotions and Economic Theory”, *Journal of Economic Literature*, Volume 36, Issue 1, pp. 47-74, March.

Environment News Service, (2012), “Maharashtra State Revokes *Monsanto*’s Cotton Seed License” August 9.

Fok, M., W. Liang, G. Wang et Y. Wu, (2005), “Diffusion du Coton Génétiquement Modifié en Chine : Leçons sur les Facteurs et les Limites d'un Succès”, *Économie Rurale*, Volume 285, Issue January-February, pp. 5-32.

Fok M., (2006), “Conditions, Résultats et Perspectives d'Utilisation du Coton Génétiquement Modifié (coton *Bt*) dans les PED”, *Revue Tiers Monde*, Volume 188, Issue 1, pp. 773-798, Octobre-Décembre.

Fok M., (2010), « Autant en emporte la culture du coton transgénique aux Etats-Unis... », *Cahiers Agricultures*, Volume 19, Issue 4, pp. 292-308. DOI: 10.1684/agr.2010.0406. August.

Bibliographie

Frederick S., Loewenstein G. & O'Donoghue T., (2002), "Time Discounting and Time Preference: A Critical Review", *Journal of Economic Literature*, Volume 40, Issue 2, pp. 351-401, June.

Gandhi V.P. & Namboodiri N.V., (2006), "The Adoption and Economics of *Bt*-Cotton in India: Preliminary Results from a Study", Ahmadabad: Indian Institute of Managing (IIMA) Working Paper 2006-09-04.

Gelman A. & Rubin D.B., (1992), "Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences", *Statistical Science*, Volume 7, Issue 4, pp. 457-511, November.

Gelman A., John B. C., Hal S. S. & Rubin D. B., (1995), "Bayesian Data Analysis", 2^{ème} édition, London : Chapman and Hall, XXV + 668 p.

Geman S. & Geman D., (1984), "Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume PAMI-6, Issue 6, pp. 721-741, November.

Gibson P., (1989), "Gay Male and Lesbian Youth Suicide". In U.S. Department of Health and Human Services (Ed.), Report of the Secretary's Task Force on Youth Suicide (pp. 3- 110 to 3- 142). (DHHS Publication No. ADM 89- 1623). Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services.

Government of India, (2011), "Agricultural Statistics at Glance", Agricultural Statistics Division, Ministry of Agriculture, New Delhi.

Greenberg E., (2008), "*Introduction to Bayesian Econometrics*", Cambridge; New York: Cambridge University Press, XV+ 205 p.

Gruère G. & Sengupta D., (2011), "*Bt*-Cotton and Farmer Suicides in India: An Evidence-Based Assessment", *Journal of Development Studies*, Volume 47, Issue 2, pp. 316 -337, February.

Gujar, G.T., Kalia, V., Kumar, A., Singh, B.P., Mittal, A., Nair, R. & Mohan, M., (2007) "Helicoverpa Armigera Baseline Susceptibility to Bacillus thuringiensis (Bt) Cry Toxins and Resistance Management for Bt Cotton in India". *Journal of Invertebrate Pathology*, Volume 95, Issue 3, 214–219, July.

Gupta A.K. & Chandak V., (2005), "Agricultural Biotechnology in India: Ethics, Business and Politics", *International Journal of Biotechnology*, Volume 7, Issues 1-2, pp. 212–227, March.

Halbwachs M., (1930), "*Les Causes du Suicide*" Paris, Alcan, 520 p.

Hamermesh D.S. & Soss N.M., (1974), "An Economic Theory of Suicide", *Journal of Political Economy*, Volume 82, Issue 1, pp. 83-98, January-February.

Haq Z., (2012), "Ministry Blames *Bt*-Cotton for Farmer Suicides", (March 26, 2012), *Hindustan Times*.

Hardikar J., (2006), "One Suicide every 8 Hours", (August 26, 2006), *Daily News and Analysis*, India.

Bibliographie

Hassan R., (1995), “*Suicide Explained: The Australian Experience*”, Carlton South, VIC: Melbourne University Press, XV+225 p.

Hastings W., (1970), “Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and their Applications”, *Biometrika*, Volume 57, Issue 1, pp. 97-109, April.

Hoogeveen H. & Oostendorp R., (2003), “On the Use of Cost-Benefit Analysis for the Evaluation of Farm Household Investments in Natural Resource Conservation”, *Environment and Development Economics*, Volume 8, Issue 2, pp. 331-349, May.

Huang W., (1996), “Religion, Culture, Economic and Sociological Correlates of Suicide Rates: A Cross-National Analysis”, *Applied Economics Letters*, Volume 3, Issue 12, pp. 779-782, December.

Huang W., (1997), “A Life Force Participation Perspective of Suicide”, pp. 81-89, in: Lester, D. and Yang, B. (eds.), *The Economy of Suicide: Economic Perspective on Suicide*. Commack, NY: Nova Science Publishers, 186 p.

Huang J., Hu R., Fan C., Pray C. E. & Rozelle S., (2002), “*Bt*-Cotton Benefits, Costs, and Impacts in China”, *AgBioForum*, Volume 5, Issue 4, pp. 153-166.

Hume D., (1759), “*Of Suicide*”, in *Essays: Moral, Political and Literary*, published posthumously in 1784 and reprinted in Singer, P. (ed.) *Applied Ethics*, Oxford: Oxford University Press, 1986, 128 p.

ICAC (International Cotton Advisory Committee), (2011), *Economics and Statistics 2011*, ICAC, Washington, D.C.

Janvry A. de, Fafchamps M. & Sadoulet E., (1991), “Peasant Household Behavior with Missing Markets: Some Paradoxes Explained”, *The Economic Journal*, Volume 101, Issue 409 pp. 1400–1417, November.

Kalyan R., (2006), “*Bt*-Cotton Bubble Set to Burst”, (November 14, 2006) Deccan Herald.

Kamien M. I. & Schwartz N. L., (1991), “*Dynamic Optimization: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management*”, 2^{ème} Édition, North-Holland, Amsterdam, XVII + 377 p.

Kathage J. & Qaim M., (2012), “Economic Impacts and Impact Dynamics of *Bt* (*Bacillus thuringiensis*) Cotton in India”, *PNAS* (www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1203647109).

Khadi B.M., Rao M.R.K., & Singh M., (2007), “The Hindu Survey of Indian agriculture 2007: Potential to Improve Lives of Ryots”. *The Hindu*.

Kiemo K., (2004), “Towards a Socio-Economic and Demographic Theory of Elderly Suicide: A Comparison of 49 Countries at Various Stages of Development”. PhD presented in Uppsala University, Sweden. ISBN 91-506-1747-8.

Koo J., & Cox W.M., (2008), “An Economic Interpretation of Suicide Cycles in Japan”, *Contemporary Economic Policy*, Volume 26, Issue 1, pp. 162-174, January.

Bibliographie

- Koop G., (2003), “*Bayesian Econometrics*”, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, XIV+ 359 p.
- Kranthi K.R., Jadhav D.R., Wanjari R.R., Shakir A. & Russell D., (2001), “Carbonate and Organophosphate Resistance in cotton pests in India, 1995 to 1999”, *Bulletin of Entomological Research*, Volume 91, Issue 1, pp. 37-46, February.
- Kranthi S., K.R. Kranthi, P.M Siddhabhatti & Dhepe V.R., (2004), “Baseline Toxicity of Cry1Ac Toxin Against Spotted Bollworm, *Earias vittella* (Fab.) Using a Diet-based Bioassay”, *Current Science*, Volume 87, Issue 11, pp. 1593-1597, December.
- Kranthi K.R., C.S. Dhawad, S.R. Naidu, K. Mate, G.T. Behere, R.M. Wadaskar & S. Kranthi, (2006), “Inheritance of Resistance in Indian *Helicoverpa armigera* (Hübner) to Cry1Ac Toxin of *Bacillus Thuringiensis*”, *Crop Protection*, Volume 25, Issue 2, pp. 119- 124, February.
- Kranthi, S., Dhawad, C. S., Naidu, S., Bharose, A., Chaudhary, A., Sangode, V., Nehare, S.K., Bajaj, S. R. & Kranthi K. R. (2009), “Susceptibility of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera : Noctuidae) to the *Bacillus thuringiensis* toxin Cry2Ab before and after the introduction of *Bollgard-II*”, *Crop Protection*, Volume 28, Issue 5, pp. 371-375, May.
- Laffont J.J., (1987), “Externalities”, dans *The New Palgrave: A Dictionary of Economics* (first edition), Palgrave Macmillan.
- Lalitha N., Pray C. E., & Ramaswami B., (2008), “The Limits of Intellectual Property Rights: Lessons from the Spread of Illegal Transgenic Seeds in India”, Discussion Paper 08-06, Indian Statistical Institute.
- Lalitha N., Ramaswami B. & Viswanathan P. K., (2009), “*India’s Experience with Bt Cotton: Case Studies from Gujarat and Maharashtra*”. In R. Tripp (Ed.), *Biotechnology and Agricultural Development: Transgenic Cotton, Rural Institutions and Resource-Poor Farmers* (pp. 135–167), London and New York: Routledge, 280 p.
- Lancaster, T., (2004), “*An Introduction to Modern Bayesian Econometrics*”, Blackwell Publishing: Oxford, XIV + 401 p.
- Laurent S., (2007), “*Analyse Bayésienne avec WinBUGS et R*”, CIRAD.
- Leonard D. & Long N. V., (1992), “*Optimal Control Theory and Static Optimization in Economics*”, Cambridge; New York: Cambridge University Press, X+ 353 p.
- Liao C., Heckel D.G., Akhurst R. (2002), “Toxicity of *Bacillus thuringiensis* Insecticidal Proteins for *Helicoverpa armigera* and *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera:Noctuidae), Major Pests of Cotton”, *Journal of Invertebrate Pathology*, Volume 80, Issue 1 pp. 55-63, May.
- Lichtenberg E., & Zilberman D., (1986), “The Econometrics of Damage Control: Why Specification Matters”, *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 68, Issue 2, pp. 261–273, May.

Bibliographie

- Long N.V. & Vousden N., (1977), “*Optimal Control Theorems*”, in: J.D. Pitchford and S.J. Tumovsky, eds., *Applications of Control Theory to Economic Analysis* (North-Holland. Amsterdam), XII + 363 p.
- Malliaris A. G. et Brock W. A., (1982), “*Stochastic Methods in Economics and Finance*” Amsterdam; New York: North-Holland Publishing Company, XVIII + 303 p.
- Manjunath T.M., (2004), “*Bt-Cotton in India: The Technology Wins as the Controversy Wanes*”, (December 29, 2004) *AgBioWorld*. <http://www.agbioworld.org/newsletter>.
- Manski C., (1977), “The Structure of Random Utility Models”, *Theory and Decision*, Volume 8, Issue 3, pp. 229-254, July.
- Mariyono J., (2007), “The Impact of IPM Training on Farmers’ Subjective Estimates of Economic Thresholds for Soybean Pests in Central Java, Indonesia.” *International Journal of Pest Management*, Volume 53, Issue 2, April -June, pp. 83-87.
- Mathur S.C., (1999), “Future of Indian Pesticides Industry in Next Millennium”, *Pesticide Information*, Volume 24, Issue 4, pp. 9-23.
- McGrath R.G., (1999), “Falling Forward: Real Options Reasoning and Entrepreneurial Failure”, *Academy of Management Review*, Volume 24, Issue 1, pp. 13-30, January.
- McIntosh J., (2009), “USA 2006 Official Data”, Prepared for American Association of Suicidology.
- McFadden D., (1974), “Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior,” in P. Zarembka (editor), *Frontiers in Econometrics*, New York: Academic Press, IX + 252 p.
- Medoff M.H., (1986), “An Evaluation of the Effectiveness of Suicide Prevention Centers”, *Journal of Behavioral Economics*, Volume 15, Issue 3, pp. 43-55, July-August-September.
- Menon M., (2012), “*Bt-Cotton no Marvel*”, (March 25, 2012), *The Hindu*.
- Metropolis N., Rosenbluth A., Rosenbluth M. & Teller A., (1953), “Equation of State Calculations by Fast Computing Machines”, *The Journal of Chemical Physics*, Volume 21, Issue 6, pp. 1087-1092, June.
- Minoiu C. & Rodriguez A., (2008), “The Effect of Public Spending on Suicide: Evidence from U.S. State Data”, *The Journal of Socio-Economics*, Volume 37, Issue 1, pp. 237-261, February.
- Mirer T., (1998), “Rational Suicide and Optimal Length of Life” State University of New York, Albany, working paper, June.
- Monsanto*, (2009), “Le Coton en Inde”
<http://www.Monsanto.com/global/fr/actualites/Pages/le-coton-en-inde.aspx>.
- Morse S., Bennett R. M., & Ismael Y., (2005), “Comparing the Performance of Official and Unofficial Genetically Modified Cotton in India”, *AgBioForum*, Volume 8, Issue 1, pp. 1-6.

Bibliographie

Morse S., Bennett R., & Ismael Y., (2007a), "Isolating the 'Farmer' Effect as a Component of the Advantage of Growing Genetically Modified Varieties in Developing Countries: a Bt Cotton Case Study from Jalgaon, India", *Journal of Agricultural Science*, Volume 145, Issue 5, pp. 491-500, October.

Morse S., Bennett R., & Ismael Y., (2007b), "Inequality and GM Crops: A Case Study of Bt Cotton in India", *AgBioForum*, Volume 10, Issue 1, pp. 44-50.

Murugkar M., Ramaswami B., & Shelar M., (2007), "Competition and Monopoly in the Indian Cotton Seed Market", *Economic and Political Weekly*, Volume 62 Issue 37: pp. 3781–3789, September.

Naik, G., Qaim M., Subramanian A., & Zilberman D., (2005), "Bt Cotton Controversy: Some Paradoxes Explained", *Economic and Political Weekly*, Volume 40, Issue 15, pp. 1514–1517, April.

Nakache J.-P. & Guéguen A., (2005), "Analyse Multidimensionnelle de Données Incomplètes", *Revue de Statistique Appliquée*, Volume 53, Issue 3, pp. 35-62.

Narayanamoorthy A., & Kalamkar S. S., (2006), "Is Bt Cotton Cultivation Economically Viable for Indian Farmers? An Empirical Analysis", *Economic and Political Weekly*, Volume 41, Issue 26, pp. 2716–2724, June.

NCRB (National Crime Records Bureau), (2011), "Accidental Deaths and Suicides in India: 2010 full report", New Delhi, India: Ministry of Home Affairs.

Ntzoufras I., (2009), "*Bayesian Modeling Using WinBUGS*" John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, XXIII+ 492 p.

Ogburn W.F. & Thomas D., (1922), "The Influence of the Business Cycle on Certain Social Conditions", *Journal of the American Statistical Association*, Volume 18, Issue 139, pp.324-340, September.

Orphal J., (2005), "Comparative Analysis of the Economics of Bt and Non-Bt Cotton Production", Institute of Economics in Horticulture, University of Hannover, Hannover, Germany, Pesticide Policy Project Publication Series, Special Issue 8, p. 71, January.

Parsai G., (2011), "Area under Bt Cotton Expands; NGOs Decry Government Propaganda», (July 27, 2011), *The Hindu*.

Pemsl D., Waibel H. & Orphal J., (2004), "A Methodology to Assess the Profitability of Bt-Cotton: Case Study Results from the State of Karnataka, India", *Crop Protection*, Volume 23, Issue 12, pp. 1249–1257, December.

Pray C. (2001) "Public-private sector linkages in research and development: biotechnology and the seed industry in Brazil, China and India", *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 83, Issue 3, pp. 742-47.

Pray C.E. & Rao S., (2008), "*Economic Impact of Price Controls and Regulations: Case of GM Cotton in India*", Master of Science thesis, Rutgers: The State University of New Jersey.

Bibliographie

Pray C. E. & Nagarajan L., (2010), “Price Controls and Biotechnology Innovation: Are State Government Policies Reducing Research and Innovation by the AgBioTech Industry in India?” *AgBioForum*, Volume 13, Issue 4, pp. 297–307.

Qaim M., (2003), “*Bt*-Cotton in India: Field Trial Results and Economic Projections”, *World Development*, Volume 31, Issue 12, pp. 2115–2127, December.

Qaim M. & Janvry A. De, (2003), “Genetically Modified Crops, Corporate Pricing Strategies, and Farmers’ Adoption: The Case of *Bt*-Cotton in Argentina”, *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 85, Issue 4, pp. 814-828, November.

Qaim M. & Zilberman D., (2003), “Yield Effects of Genetically Modified Crops in Developing Countries”, *Science*, Volume 299, Issue 5608, pp. 900-902, February.

Qaim M., Subramanian A., Naik G. & Zilberman D., (2006), “Adoption of *Bt*-Cotton and Impact Variability: Insights from India”, *Review of Agricultural Economics*, Volume 28, Issue 1, pp. 48–58.

Qaim, M., Pray, C.E. & Zilberman, D., (2008), “Economic and Social Considerations in the Adoption of *Bt* Crops”: 329-356, in J. Romeis, A.M Shelton, G.G Kennedy (eds), *Integration of Insect-Resistant Genetically Modified Crops with IPM Programs*, Springer, Series: Progress in Biological Control, XVIII + 441 p.

Qayum A., & Sakkhari K., (2004), “Did *Bt* Cotton Fail AP Again in 2003–2004? A Season Long Study of *Bt* Cotton in Andhra Pradesh”, Hyderabad: Deccan Development Society and Permaculture Association of India.

Qayum A., & Sakkhari K., (2005), “*Bt* Cotton in Andhra Pradesh – 3 Year Assessment. The First Sustained Independent Scientific Study of *Bt* Cotton in India”, Hyderabad: Deccan Development Society, VI + 46 p.

Raftery A.E. & Lewis S.M., (1992), “One Long Run with Diagnostics: Implementation Strategies for Markov Chain Monte Carlo”, *Statistical Science*, Volume 7, Issue 4, pp. 493-497, November.

Ramasubramanyam T., (2004), “Magnitude, Mechanism and Management of Pyrethroids Resistance in *Helicoverpa Armigera* in India”, *Journal of Entomology*, Volume 1, Issue 1, pp. 6-11.

Ramaswami B, Pray C. E. & Lalitha N., (2012), “The Spread of Illegal Transgenic Cotton Varieties in India: Biosafety Regulation, Monopoly, and Enforcement” *World Development*, Volume 40, Issue 1, pp. 177–188, January.

Rao, N.C. & Dev, S.M., (2009), “Socio-Economic Impact of Transgenic Cotton”, *Agricultural Economics Research Review*, Volume 22, Issues 1-2: pp. 461-470, June.

Rao, N.C. & Dev, S.M., (2010), “Biotechnology and Pro-Poor Agricultural Development”, *Economic and Political Weekly*, Volume 45, Issue 23: pp. 56-64, June.

Robert C. P., (1996), “Méthodes de Monte Carlo par Chaînes de Markov”, *Economica*, 350 p.

Bibliographie

Robert C. P., (2001), “The Bayesian Choice: From Decision-Theoretic Foundations to Computational Implementation” (2^{ème} Édition), New York: Springer, XXII + 604 p.

Robert C. P. & Casella G., (2011), “Méthodes de Monte-Carlo avec R”, Springer, Paris; 1^{ère} Edition, XVI + 256 p.

Rodriguez A., (2005), “Income Inequality, Unemployment, and Suicide: A panel Data Analysis of 15 European Countries”, *Applied Economics*, Volume 37, Issue 4, pp.439-451, Mars.

Rosenthal R.W., (1993), “Suicide Attempts and Signaling Games”, *Mathematical Social Sciences*, Volume 26, Issue 1, pp. 25-33, July.

Rossi P.E., Allenby G.M. & McCulloch R., (2005), “Bayesian Statistics and Marketing”, Wiley: Chichester, UK, x + 348 p.

Roy D., Herring R.J. & Geisler C., (2007), “Naturalizing Transgenic: Loose Seeds, Official Seeds, and Risk in the Decision Matrix of Gujarati Cotton Farmers”, *Journal of Development Studies*, Volume 43, Issue 1, pp. 158-176, January.

Sadashivappa P., & Qaim M., (2009), “Bt-Cotton in India: Development of Benefits and the Role of Government Seed Price Intervention”, *AgBioForum*, Volume 12, Issue 2, pp. 172–183.

Sahai S., & Rehman S., (2003), “Performance of Bt-Cotton: Data from First Commercial Crop” *Economic and Political Weekly*, Volume 38, Issue 30, pp. 3139-3141, July-August.

Sahai S. & Rehman S., (2004), “Bt-Cotton, 2003–2004: Fields Swamped with Illegal Variants”, *Economic and Political Weekly*, Volume 39, Issue 26, pp. 2673–2674, June.

Salanié B., (1998), “*Microéconomie : les Défaillances de Marché*”, Economica, Paris, 231 p.

Savage, L. (1951), “The Theory of Statistical Decision,” *Journal of the American Statistical Association*, Volume 46, Issue 253, pp. 55-67, March.

Scoones I., (2005), “*Science, Agriculture and the Politics of Policy: The Case of Biotechnology in India*”, New Delhi: Orient Longman, XII+ 417 p.

Seierstad A. & Sydsaeter K., (1987), “*Optimal Control Theory with Economic Applications*”, North Holland, XVI+ 445 p.

Sexton S.E., Z. Lei & Zilberman D., (2007) "The Economics of Pesticides and Pest Control", *International Review of Environmental and Resource Economics*, Volume 1, Issue 3, pp. 271-326.

Shah E., (2005), “Local and Global Elites Join Hands: Development and Diffusion of Genetically Modified Bt-Cotton Technology in Gujarat, India”, *Economic and Political Weekly*, Volume 60, Issue 43, pp. 4629-4639, October.

Shahzad K. & Qaim M., (2011), “Impact of Bt-Cotton on Pesticide Poisoning in Smallholder Agriculture: A Panel Data Analysis”, *Ecological Economics*, Volume 70, Issue 11, pp. 2105–2113, September.

Bibliographie

- Sharma, D., (2010), “*Bt Cotton Has Failed Admits Monsanto*”, *India Today*, 6 Mars.
<http://indiatoday.intoday.in/site/Story/86939/India/Bt+cotton+has+failed+admits+Monsanto.html>.
- Shetty P. K., (2004), “Socio-Ecological Implications of Pesticide Use in India”, *Economic and Political Weekly*, Volume 39, Issue 49, pp. 261-267, December.
- Shiva V., (2008), “Toxic Genes and Toxic Papers: IFPRI Covering Up the Link Between *Bt* Cotton and Farmers Suicides” www.whale.to/b/shiva1.pdf.
- Shiva V., (2009), “From Seeds of Suicide to Seeds of Hope: Why Are Indian Farmers Committing Suicide and How Can We Stop This Tragedy?”, *the Huffington Post*.
http://www.huffingtonpost.com/vandana-shiva/from-seeds-of-suicide-to_b_192419.html.
- Shiva V., Barker D. & Lockhart C., (2011), “The GMO Emperor Has No Clothes A Global Citizens Report on the State of GMOs - False Promises, Failed Technologies”
www.navdanyainternational.it.
- Smale M., Zambrano P., Falck-Zepeda J. & Gruère G. P., (2006a), “Parables: Applied Economics Literature about the Impact of Genetically Engineered Crop Varieties in Developing Economies”, Environment and Production Technology Division Discussion Paper 158. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute.
- Smale, M., Zambrano, P. & Cartel, M., (2006b), “Bales and Balance: A Review of the Methods Used to Assess the Economic Impact of *Bt*-Cotton on Farmers in Developing Economies”, *AgBioForum*, Volume 9, Issue 3, pp. 195–212.
- Smale M., Gruere G., Falck-Zepeda J., Bouet A., Horna D., Cartel M., Zambrano P., Niane A., Quemada H., (2007), “Évaluation de l’Impact Économique Potentiel du Coton *Bt* en Afrique de l’Ouest : Résultats préliminaires et méthodes proposées”, rapport final de IFPRI (International Food Policy Research Institute), 188 p.
- Smale, M., Zambrano, P., Gruere, G., Falck-Zepeda, J., Matuschke, I., Daniela H., *et al.*, (2009), “Measuring the Economic Impacts of Transgenic Crops in Developing Agriculture During the First Decade: Approaches, Findings, and Future Directions”, IFPRI Food Policy Review, 10.
- Smith A., (1759), “*The Theory of Moral Sentiments*”, Edited by D.D Raphael and A.L Macfie. Oxford: Oxford University Press, Facsimile Reprint Edition, Indianapolis: Liberty Classics, 1982, c1976, x+ 412 p.
- Soleri D., Cleveland D. A., Glasgow G., Sweeney S. H., Cuevas F. A., Fuentes M. R. & Humberto Rios L., (2008), “Testing Assumptions Underlying Economic Research on Transgenic Food Crops for Third World Farmers: Evidence from Cuba, Guatemala and Mexico”, *Ecological Economics*, Volume 67, Issue 4, pp. 667-682, November.
- Spiegelhalter D., Thomas A., Best N., & Gilks W., (1996a), “*BUGS 0.5: Bayesian inference Using Gibbs Sampling-Manual*”, Medical Research Council Biostatistics Unit, Institute of Public Health, Cambridge, UK. www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/documentation.

Bibliographie

Spiegelhalter D., Thomas A., Best N., & Gilks W., (1996b), “BUGS 0.5: Examples Volume 1”, Medical Research Council Biostatistics Unit, Institute of Public Health, Cambridge, UK. www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/documentation.

Spiegelhalter D., Thomas A., Best N. & Gilks W., (1996c), *BUGS 0.5: Examples Volume 2*. Medical Research Council Biostatistics Unit, Institute of Public Health, Cambridge, UK. www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/documentation

Stack S., (2000), “Work and the Economy”, Chapter 8, pp. 193-221 in Ronald W. Maris, Alan L. Berman and Morton M. Silverman (eds), *Comprehensive Textbook of Suicidology*, New York: Guilford Press, XXII + 650 p.

Stone G. D., (2011), “Field versus Farm in Warangal: *Bt*-Cotton, Higher Yields, and Larger Questions”, *World Development*, Volume 39, Issue 3, pp. 387-398, March.

Subramanian A. & Qaim M., (2009), “Village-Wide Effects of Agricultural Biotechnology: The Case of *Bt*-Cotton in India”, *World Development*, Volume 37, Issue 1, pp. 256–267, January.

Subramanian, A. & Qaim, M., (2010), “The Impact of *Bt*-Cotton on Poor Households in Rural India”, *Journal of Development Studies*, Volume 46, Issue 2, pp. 295–311, February.

Swaminathan, M. & Rawal, V., (2011), “Are there Benefits from the Cultivation of *Bt*-Cotton? A Comment Based on Data from a Vidarbha Village”, *Review of Agrarian Studies*, Volume 1, Issue 1, pp. 101-124.

Tabashnik B. E., Gassmann A. J., Crowder D. W. & Carrière Y., (2008), “Insect Resistance to *Bt* Crops: Evidence versus Theory”, *Nature Biotechnology*, Volume 26, Issue 2, pp. 199-202, February.

The Wall Street Journal, (2010), “The Pros and Cons of Genetically Modified Seeds”, (March 15, 2010), *The Wall Street Journal*.

Thurstone L., (1927), “A Law of Comparative Judgment”, *Psychological Review*, Volume 34, Issue 4, pp. 273-286, July.

Tirado R., (2010), “Picking Cotton — The Choice Between Organic and Genetically-Engineered Cotton for Farmers in South India”, Greenpeace, Note technique 03/2010 des laboratoires de recherche Greenpeace, Juin 2010.

http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/agriculture/2010/Picking_Cotton.pdf

Toyokawa Y. & Shirouzu T., (1998), “On the Recent Trend in Suicide Rate”. *Journal of the Association of Life Insurance Medicine of Japan*, Volume 96, pp. 143–148.

Tseng S. H., (2006), “The Effect of Life Insurance Policy Provisions on Suicide Rates”, in Chapter 2, Ph.D. dissertation, Three Essays on Empirical Applications of Contract Theory, Department of Economics, University of Chicago.

Wang S., Just D. R. & Pinstrup-Andersen P., (2006), “Damage from Secondary Pests and the Need for Refuge in China”, in J. Alston, R.E. Just, & D. Zilberman, D. (Eds.), *Regulating Agricultural Biotechnology: Economics and Policy*, New York: Springer, VIII + 732 p.

Bibliographie

Wang S., Just D. R. & Pistrup-Andersen P., (2008), “*Bt*-Cotton and Secondary Pests”, *International Journal of Biotechnology*, Volume 10, Issues 2-3, pp. 113-121, May.

Wolfenbarger L.L., Phifer P.R., (2000), “The Ecological Risks and Benefits of Genetically Engineered Plants”, *Science*, Volume 290, Issue 5499, pp. 2088-2093.

World Health Organization, (2002), “World Report on Violence and Health”, XXII + 360 p.

Yang B., (1990), “Is Suicide a Rational Choice?: An Economic Approach”, pp. 15-20., in Lester, D. (ed.), *Understanding and Preventing Suicide*. Springfield, IL: Thomas, XII + 121 p.

Yanhui L., Kongming W., Yuying J., Yuyuan G. et N. Desneux., (2012), “Widespread Adoption of *Bt* Cotton and Insecticide Decrease Promotes Bio-Control Services”, *Nature*, Volume 487, Issue 7407, pp. 362-365, June. Doi: 10.1038/nature11153.

Zhao, J. Z., Cao, J., Collins, H. L., Bates, S. L., Roush, R. T., Earle, E. D. & Shelton, A. M. (2005). “Concurrent Use of Transgenic Plants Expressing a Single and Two *Bacillus thuringiensis* Genes Speeds Insect Adaptation to Pyramided Plants” *PNAS*, volume 102, Issue 24, pp. 8426-8430.

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1	15
LES IMPACTS SOCIOÉCONOMIQUES DU COTON <i>Bt</i> EN INDE : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE	15
1.1 Introduction	16
1.2 Des faits et des chiffres	19
1.3 Les semences <i>Bt</i> illégales	23
1.4 Les prix des semences <i>Bt</i> :	24
1.5 L'impact économique du coton <i>Bt</i> en Inde :	29
1.6 Une évaluation critique de la littérature	39
1.7 Le coton <i>Bt</i> et le suicide des agriculteurs en Inde	41
1.8 Statistiques	44
1.9 Une étude du terrain	47
1.10 L'endettement des agriculteurs	54
1.11 Conclusion.....	61
CHAPITRE 2	63
ECONOMIE DU SUICIDE :	63
UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	63
2.1 Introduction	64
2.2 Informations Statistiques sur le suicide.....	66
2.3 L'approche de Durkheim	72
2.3.1 Le suicide anémique : l'absence de normes	72
2.3.2 Le suicide fataliste : un excès de régulation sociale	73
2.3.3 Le suicide égoïste : un défaut d'intégration sociale	73
2.3.4 Le suicide altruiste : un excès d'intégration sociale	74
2.4 L'approche microéconomique.....	76
2.4.1 Le modèle offre-demande du suicide : le marché du suicide	76
2.4.2 Le modèle de Hamermesh et Soss : maximisation de l'utilité	78
2.4.3 Les préférences et le suicide : le changement de l'ordre de préférences	79
2.5 L'approche de la théorie des jeux : tentative de suicide	82
2.5.1 Les modèles de Rosenthal (1993) et Cutler, Glasser et Norberg (2001) : l'approche par les signaux	82

2.5.2	Le modèle de Becker-Posner (2006) : la tentative du suicide	84
2.5.3	La comparaison entre le modèle de Becker-Posner (2006) et l'approche par les Signaux : le rôle central du sympathisant	87
2.5.4	Le modèle de Mirer (1998) : une validation empirique	88
2.5.5	Le suicide : « effet de contagion »	89
2.6	Les travaux empiriques	89
2.6.1	L'approche macroéconométrique : l'inférence aux comportements agrégés	90
2.6.2	L'approche microéconométrique : l'inférence au comportement individuel	92
2.7	Les mesures de prévention du suicide et les politiques économiques	94
2.8	Les développements récents dans l'étude économique du suicide	97
2.9	Conclusion	99
CHAPITRE 3		102
L'ADOPTION DU COTON <i>Bt</i> ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE :		102
PREMIER ESSAI THÉORIQUE		102
3.1	Introduction	103
3.2	Présentation du modèle	107
3.2.1	Le problème du producteur	107
3.2.2	La fonction d'utilité aléatoire (problème du consommateur)	119
3.3	Conclusion	125
ANNEXES DU CHAPITRE 3		127
A.3.1	La démonstration de la proposition 3.3	128
A.3.2	La démonstration de la proposition 3.4	128
A.3.3	Statique comparative	129
CHAPITRE 4		131
L'ADOPTION DU COTON <i>Bt</i> ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE :		131
SECOND ESSAI THÉORIQUE		131
4.1	Introduction :	134
4.2	Présentation du modèle :	137
4.2.1	Le problème du producteur de coton	137
4.2.2	Le suicide des cultivateurs du coton <i>Bt</i>	151
4.3	Conclusion	157
ANNEXES DU CHAPITRE 4		159
A.4.1	La théorie du contrôle optimal	160
A.4.2	Les conditions nécessaires	166

A.4.3: Les conditions suffisantes.....	167
A.4.4 : La démonstration du lemme 4.1	167
A.4.5 : Les solutions des équations différentielles	168
A.4.6 : les solutions du système différentiel.....	170
A.4.7 : La démonstration de la proposition 4.1	171
A.4.8 : Le mouvement brownien : rappel et définitions.....	172
A.4.9 : La démonstration de la proposition 4.2	176
A.4.10 : Statique comparative	181
CHAPITRE 5	183
L'ADOPTION DU COTON BT ET LE SUICIDE DES AGRICULTEURS EN INDE :	
UN ESSAI EMPIRIQUE	183
<i>(UNE APPROCHE SEMIPARAMÉTRIQUE BAYÉSIENNE)</i>	183
5.1 INTRODUCTION.....	184
5.2 L'ANALYSE EMPIRIQUE	188
5.2.1 L'analyse bayésienne :	192
a. Les lois a priori	193
b. La distribution a posteriori jointe	195
c. Les distributions conditionnelles a posteriori et l'échantillonneur de Gibbs :	197
5.2.2 Données et logiciel utilisés :	198
a. Les données :	198
b. Le logiciel WINBUGS :	198
5.2.3 Les résultats d'estimation.....	200
a. L'effet de l'adoption du coton <i>Bt</i> sur le suicide des agriculteurs	200
b. L'effet de l'augmentation de l'usage de pesticides sur le suicide des agriculteurs :	210
5.3 Test et Robustesse des résultats	215
5.4 Conclusion.....	221
ANNEXES DU CHAPITRE 5	223
A.5.1 L'inférence bayésienne :.....	224
A.5.2 Les diagnostics de convergence :	231
a. Le diagnostic de convergence (Gelman et Rubin ,1992)	232
b. Le diagnostic de Raftery-Lewis (1992)	233
A.5.3 La distribution de Wishart :	238

A.5.4. Les distributions conditionnelles <i>a posteriori</i>	239
A.5.5 Le programme WinBUGS	241
CONCLUSION GÉNÉRALE	244
BIBLIOGRAPHIE	257

Résumé

L'Inde est le deuxième producteur mondial de coton ; après la Chine, avec environ 12,1 millions d'hectares en 2011, soit un tiers de la superficie mondiale. Après l'avènement des biotechnologies agricoles, le gouvernement indien, sous l'égide du premier ministre Atal Bihari Vajpayee, a encouragé l'utilisation de coton génétiquement modifié, dénommé coton *Bacillus thuringiensis* (Bt). Les variétés de coton Bt permettent de lutter contre les pertes de rendement causées par les parasites lépidoptères. Toutefois, leur implantation n'a pas été sans difficulté (la résistance des insectes, la pollution des sols, l'utilisation massive d'eau et d'engrais, le déséquilibre de l'écosystème et l'appauvrissement des fermiers). Aujourd'hui, l'Inde connaît un débat majeur autour de son expérience en matière d'adoption de coton transgénique, débat où plusieurs arguments d'impacts sur le bien-être des petits agriculteurs sont avancés. Depuis sa commercialisation en 2002, le coton Bt a provoqué les mécontentements et les suicides des fermiers appauvris. En moyenne un paysan se donne la mort toutes les 30 minutes. Les victimes sont principalement les petits fermiers qui cultivaient les semences génétiquement modifiées dans les Etats indiens : Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh et Maharashtra. Ces agriculteurs étaient pour la plupart endettés auprès de la compagnie semencière Mahyco-Monsanto Biotech, qui leur fournissait à crédit les semences Bt ainsi que les pesticides. Faut-il y déceler une corrélation entre le coton génétiquement modifié et ces suicides atypiques ? Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'explorer, tant sur le plan théorique qu'empirique, la relation entre l'utilisation du coton Bt et le suicide des agriculteurs en Inde.

Essentiellement factuelle, le premier chapitre de cette thèse tente à livrer une revue exhaustive et critique de la littérature sur les impacts socioéconomiques de l'introduction du coton génétiquement modifié en Inde. Le deuxième chapitre présente les différentes approches économiques relatives au suicide. En effet, la théorie économique est fondée sur l'hypothèse du choix rationnel qui pourrait trouver dans le phénomène du suicide un intéressant défi de recherche. Dans le troisième chapitre nous proposons une première contribution théorique où nous avons pris en compte l'évolution de la résistance des ravageurs aux toxines Bt. Les agriculteurs reviennent à une utilisation intensive des insecticides ce qui représente tel un coût additionnel. Ces fermiers, qui se retrouvent pris dans une véritable spirale infernale d'endettement, choisissent donc le suicide plutôt que de subir les coûts financiers et sociaux de la dette. La deuxième contribution théorique du quatrième chapitre a pris en considération à la fois la détérioration de la résistance des toxines Bt dans le temps et l'augmentation potentielle des populations de ravageurs secondaires. Les agriculteurs, en utilisant une quantité grandissante de pesticides, doivent s'endetter davantage pour pulvériser plus de pesticides. Le dernier chapitre veut tester empiriquement les arguments développés par les modèles théoriques. Enfin, les résultats obtenus nous amènent à penser que l'échec de la culture du coton Bt pourrait être à l'origine de surendettement des paysans et de cette vague de suicidaire.

Socio-Economic Impacts of Genetically Modified Organisms: the Case of *Bacillus thuringiensis* Cotton Farmer Suicides in India

Abstract

India is the world's second largest producer of cotton, after China. The total cotton area in India was 12.1 million hectares in 2011, accounting for approximately one third of the world's total cotton area. After the advent of agricultural biotechnology, the Indian government, under the former prime minister Atal Bihari Vajpayee, has encouraged the use of genetically modified cotton, called *Bacillus thuringiensis* (Bt) cotton. The Bt cotton varieties can provide control against crop loss caused by lepidopteran pests. However, the process of introduction of Bt cotton has not been without difficulty (insect resistance to Bt crop, soil pollution, the excessive use of water and fertilizer, an imbalance of the ecosystem and impoverishment of farmers). Since its first commercialization in India, Bt cotton has caused a considerable discontent and suicides of impoverished cotton farmers. On average, one farmer commits suicide every 30 minutes in India. The victims are mainly small farmer who grow genetically modified cotton seeds in certain states in India (Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh and Maharashtra). Most of these farmers are deeply indebted to the Mahyco Monsanto Biotech (MMB) Company, which provided them access to credits for buying Bt cotton seeds and pesticides. Is there a correlation between the genetically modified cotton and these suicides? Thus, the purpose of this thesis is to theoretically and empirically explore the causal relationship between Bt cotton and farmer suicides in India.

Essentially factual, the first chapter of this dissertation attempts to provide a comprehensive and critical literature review on the socio-economic impacts of the introduction of Bt cotton in India. In the second chapter we review economic theories and empirical studies on the socioeconomic aspects of suicide. Indeed, the economic theory, founded on the rational choice assumption, might find in the suicide phenomenon an interesting research challenge. In the third chapter we propose the first theoretical contribution by taking into account the evolution of insect resistance to Bt toxin. Farmers revert to the use of chemical pesticides after just few years which represent additional costs. These farmers, who find themselves caught in a vicious circle of debts, choose to commit suicide rather than suffer the financial and social impacts of debts. The fourth chapter, our second theoretical contribution, takes into account both aspects of Bt technology: the development of insect resistance to Bt cotton over time and the potential of secondary pests emerging. The farmers, by using an increasing amount of pesticides, have to go further into debt to increase the number of chemical sprays to control their cotton pests. In the last chapter we want to empirically assess the arguments advanced in the theoretical models. Finally, our theoretical and empirical results lead us to think that the Bt cotton failure in India could be the principal cause of farmer indebtedness and this wave of suicides.

Mots-clés : Coton Biotechnologique/Inde/Suicide des agriculteurs

Key words: Bt cotton/India/farmers' suicides

Laboratoire : GREDEG Université de Nice Sophia Antipolis, 250 rue Albert Einstein - Bâtiment 2- 06560 Valbonne