



HAL
open science

Marché de la terre, structures agricoles et politiques environnementales : une approche multi-agents appliquée à la Bretagne

Elodie Letort, Pierre Dupraz, Laurent Piet, Aude Ridier

► To cite this version:

Elodie Letort, Pierre Dupraz, Laurent Piet, Aude Ridier. Marché de la terre, structures agricoles et politiques environnementales : une approche multi-agents appliquée à la Bretagne. FA 2014 Le Foncier Agricole: Usages, tensions et régulations, Société Française d'Economie Rurale (SFER). FRA., Jun 2014, Lyon, France. hal-01209037

HAL Id: hal-01209037

<https://hal.science/hal-01209037>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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

Résumé

Nous présentons un modèle multi-agents développé pour étudier l'impact sur la structure des exploitations et sur le marché foncier de la mise en place d'une régulation environnementale. Nous modélisons le marché d'une terre homogène entre agriculteurs hétérogènes, la terre permettant de produire des cultures de vente ou des fourrages. Pour déterminer le prix auquel il est prêt à acheter une parcelle, chaque agriculteur calcule la valeur qu'il lui attribue comme la somme actualisée des profits futurs anticipés. Nous calibrons les paramètres du modèle afin de représenter de façon réaliste la structure des exploitations laitières et le prix moyen de la terre observés en Bretagne. Nous simulons la mise en place d'un plafond sur les émissions azotées d'origine animale au-delà duquel les effluents excédentaires doivent être traités. Nous constatons notamment que, bien que les exploitations sélectionnées soient de plus en plus extensives, le nombre total de bovins peut ré-augmenter, après avoir fortement diminué, lorsque la contrainte environnementale devient forte. Nous obtenons également que si, individuellement, le prix des parcelles échangées augmente avec la mise en place de la régulation, le prix moyen du foncier peut baisser, l'échange portant sur des parcelles de moins en moins bien valorisées par les agriculteurs.

Mots-clés

Marché foncier agricole ; régulation environnementale ; effluents azotés organiques ; modèle multi-agents ; Bretagne

1. Introduction

Les structures agricoles bretonnes ont connu, entre le recensement de 2000 et celui de 2010 une diminution d'un tiers du nombre d'exploitations et une augmentation d'environ 20% de la surface agricole moyenne, passée de 46 ha en 2000 à 60 ha en 2010 (Agreste Bretagne, 2011). L'élevage laitier et les productions hors sol dominant toujours en 2010, avec un peu moins de 10 000 exploitations pour le premier et 8 000 exploitations pour les secondes. Parmi les enjeux environnementaux auxquels fait face l'agriculture bretonne, qui concentre une majorité d'élevages dont le chargement animal est élevé et le système de production intensif, celui de la gestion et de la maîtrise des effluents domine (Le Goffe, 2013). La Directive Nitrates du 12 décembre 1991 oblige les États membres de l'Union européenne (UE) à définir des zones vulnérables et à entreprendre sur ces zones des programmes d'action. Notamment, en matière d'épandage des effluents d'élevage, ceux-ci sont limités à 170 kg d'azote organique par hectare. Les quatre départements bretons ont été classés en zone vulnérable dès 1994. Quand l'azote organique excrété excède 170 kg, le canton est classé en zone d'excédent structurel et soumis à un programme de résorption des excédents. Dans ces zones, les extensions et créations d'élevages sont interdites mais les restructurations autorisées, sous réserve de ne pas augmenter le quota d'azote total. L'agriculteur en dépassement doit traiter ou transférer ses effluents excédentaires, voire parfois réduire son cheptel. Pour cela, il peut chercher des surfaces épandables chez des tiers, dans les cantons dont le seuil est inférieur à 140 kg/ha. Cette réglementation environnementale crée, dans une région comme la Bretagne, une tension sur le marché foncier, actuellement très majoritairement exploité en location (77% en 2010).

L'objectif de ce papier est de modéliser le marché foncier agricole afin d'analyser les effets de politiques environnementales sur les échanges de terres dans la région Bretagne. Pour cela, nous proposons une première version d'un modèle multi-agent du marché foncier afin d'en tester les propriétés et d'étudier les impacts de l'introduction d'une politique environnementale sur le fonctionnement du marché foncier et les structures agricoles.

Les systèmes multi-agents (SMA) sont en effet des modèles particulièrement bien adaptés pour modéliser les phénomènes qui résultent des décisions individuelles de nombreux agents hétérogènes en interaction. Le résultat agrégé de ces interactions n'est pas connu *a priori* et peut faire émerger des solutions qui échappent à l'analyse du seul comportement individuel. Ces modèles ont l'avantage de permettre l'étude des changements structurels d'un système sur le long terme. L'hétérogénéité des agents permet de représenter de nombreuses dimensions telles que les variations spatiales et régionales de l'agriculture et des ressources naturelles, l'hétérogénéité du capital humain, les asymétries d'information, les coûts de transaction (Bargigli et Tedeschi, 2013). Les méthodes analytiques et les modèles de simulation plus classiques, qui nécessitent un niveau d'agrégation plus élevé à travers des agents représentatifs, ne peuvent pas facilement intégrer la complexité des systèmes agricoles lorsqu'un grand nombre d'individus hétérogènes sont pris en compte.

Les modèles de marché de la terre spatialement distribués sont quasi-absents de la littérature économique standard, mais plusieurs modèles multi-agents arbitrants des échanges de foncier ont été développés depuis la fin des années 1990. Certains portent sur l'utilisation et la préservation des ressources naturelles, par exemple face à l'urbanisation comme le modèle ALMA (Filatova *et al.*, 2011), d'autres sur les changements d'usage des sols dans des zones agricoles en présence d'enjeux environnementaux et sociaux sensibles, comme le modèle PAMPA en Argentine de Bert *et al.* (2011) ou le modèle MASE au Brésil de Ralha *et al.* (2013). Certains ont pour particularité d'avoir particulièrement raffiné la représentation économique des usages agricoles, souvent dans l'optique d'évaluer l'impact des politiques agricoles (modèles MP-MAS, RegMAS, AgriPoliS). D'autres ont plutôt développé les aspects spatiaux grâce au couplage avec des bases de données géographiques (MASE, RegMas).

Le modèle AgriPoliS, initié par Balmann (1997), a été utilisé et en partie développé par Happe (2004) et Happe *et al.* (2006) pour simuler des politiques agricoles et analyser empiriquement les changements structurels régionaux en agriculture. AgriPoliS est l'un des premiers modèles à avoir développé une

représentation assez élaborée du modèle d'exploitation agricole, mise en jeu au sein d'un marché de la location de la terre agricole. Le modèle RegMas a été construit à partir du modèle AgriPoliS dans le but de simuler les effets de long terme des politiques sur les systèmes agricoles. Lobianco et Esposti (2010) l'ont utilisé pour analyser les effets du découplage des aides dans une région centrale d'Italie sur la période 2008-2015. La prise en compte de l'espace va plus loin que dans AgripoliS, RegMAS initialisant les parcelles à partir d'une carte des sols et la ressource étant distribuée individuellement et non agrégée à travers des types de sols. Les raffinements spatiaux de RegMAS permettent d'améliorer la pertinence des résultats de simulation de politiques agricoles dans des régions où les ressources naturelles sont particulièrement hétérogènes (zone à fort relief du centre de l'Italie). Le modèle MP-MAS met en compétition des agents agriculteurs sur le marché de la terre et de la ressource en eau. Les agents sont décrits non seulement par leurs caractéristiques individuelles (âge, main d'œuvre, localisation) mais aussi par le niveau d'innovation de leur technologie. L'objectif est d'analyser l'effet des politiques sur les ressources agro-écologiques et la diffusion de technologies. La spécificité est, d'une part, le couplage du modèle multi-agent avec des modèles biophysiques permettant d'estimer les fonctions de production et, d'autre part, l'introduction d'une caractéristique d'innovation estimée économétriquement (Berger, 2001 ; Schreinemachers *et al.*, 2009). L'innovation est accessible aux agents si elle atteint un certain seuil dans le réseau, ceci pour simuler les effets d'expérience et d'apprentissage par les pairs. Le modèle ALMA a quant à lui été développé pour simuler l'effet d'une politique environnementale de taxation sur le marché foncier en milieu urbain, dans le but de préserver un écosystème côtier. Il apporte des enseignements sur les propriétés émergentes des SMA (Filatova *et al.*, 2011). Les acheteurs produisent des enchères en fonction de leur contrainte budgétaire en arbitrant entre les aménités environnementales et la distance à la côte. Le modèle montre les effets classiques positifs de la taxe sur la protection des zones côtières et montre aussi des effets inattendus. La taxe est moins efficace pour préserver les ressources naturelles si les niveaux de revenus sont plus hétérogènes. La taille de la zone écologique-tampon qui se forme est plus faible et les pertes économiques moins élevées que si les simulations avaient porté sur des agents représentatifs et non des agents hétérogènes. Par ailleurs, la simulation multi-agent accentue l'effet de la taxe sur la ségrégation spatiale entre hauts revenus et bas revenus, les zones côtières étant réservées aux résidents les plus riches qui peuvent payer la taxe. Ainsi, l'approche permet d'appréhender spatialement et plus finement les bénéfices et les coûts de préservation de l'écosystème.

Le modèle que nous proposons ici se distingue de ces différentes approches du marché foncier agricole sur trois points principaux. Premièrement, nous considérons un marché de la vente où toutes les parcelles sont potentiellement échangeables à chaque instant : chaque agriculteur présent donne la valeur qu'il serait prêt à payer pour chaque parcelle et, dès lors que la valeur donnée par un agent pour une parcelle est supérieure à celle évaluée par le propriétaire, on considère que ce dernier a intérêt à la vendre au plus offrant. Deuxièmement, nous raisonnons à structures constantes : les agriculteurs considérés ne peuvent pas faire évoluer la structure de leur exploitation en optimisant leurs choix de production ; autrement dit, notre SMA n'est pas couplé avec un modèle d'exploitation externe. Troisièmement, l'hétérogénéité entre agriculteurs ne porte pas sur la technologie de production adoptée (tous les agriculteurs modélisés sont homogènes de ce point de vue) mais sur, d'une part, l'âge des agriculteurs qui détermine le niveau d'habileté avec lequel ils mettent en œuvre cette technologie homogène et, d'autre part, une caractéristique particulière de leur exploitation, à savoir la part de la surface fourragère principale dans la surface agricole utile. Nous utilisons ce modèle pour étudier l'impact d'une régulation environnementale portant sur les émissions azotées d'origine animale sur le fonctionnement du marché foncier et les structures des exploitations présentes, selon deux critères : le niveau de la contrainte imposée sur le niveau maximal d'effluent épandable ; le niveau du coût associé au traitement des émissions non épandables.

La suite de l'article est structurée de la façon suivante. Dans la section 2, nous détaillons le SMA mis au point en adoptant la méthode « *Overview, Design concepts, and Details* » (ODD) proposée par (Grimm *et al.*, 2006) et largement utilisée et développée depuis (Grimm *et al.*, 2010 ; Mueller *et al.*, 2013). Dans la section 3, nous présentons le calibrage du modèle sur les données de l'agriculture bretonne et rapportons

les résultats de nos simulations. Enfin, la section 4 discute les enseignements de ces résultats et propose des pistes d'approfondissement et de développement de notre modèle.

2. Le modèle multi-agents mis au point

Nous modélisons le fonctionnement d'un marché décentralisé d'achat d'une terre agricole homogène entre agriculteurs hétérogènes. Les interactions entre agents se déroulent uniquement sur le marché de la terre. La terre permet de produire, indifféremment, ou bien des cultures de ventes selon un certain rendement, ou bien des fourrages avec lesquels l'agriculteur nourrit des bovins pour produire du lait. La terre est homogène en ce sens que toutes les parcelles possèdent le même rendement pour les cultures. Les agriculteurs sont hétérogènes en ce sens qu'ils diffèrent selon leur âge et leur niveau d'habileté.

Pour déterminer le prix auquel il est prêt à acheter une parcelle de terre donnée, chaque agriculteur calcule la valeur qu'il lui attribue comme la somme actualisée des profits futurs qu'il anticipe pour celle-ci (cf. 2.3.3.1.). Schématiquement, le profit attendu correspond à la somme des marges brutes végétale et animale potentielles, pondérée par l'habileté de l'agriculteur et diminuée d'un coût de transport qui dépend de la distance de la parcelle au siège de l'exploitation. La marge brute végétale s'obtient comme la différence entre les ventes des cultures et le coût des intrants (dont les engrais) ; la marge brute animale s'obtient comme la différence entre les ventes de lait et de produits animaux et le coût des intrants (dont les aliments).

La programmation du modèle a été effectuée sous NetLogo 5.0.3 (Wilensky, 1999). La Figure 1 présente une capture d'écran de l'environnement de développement du modèle.

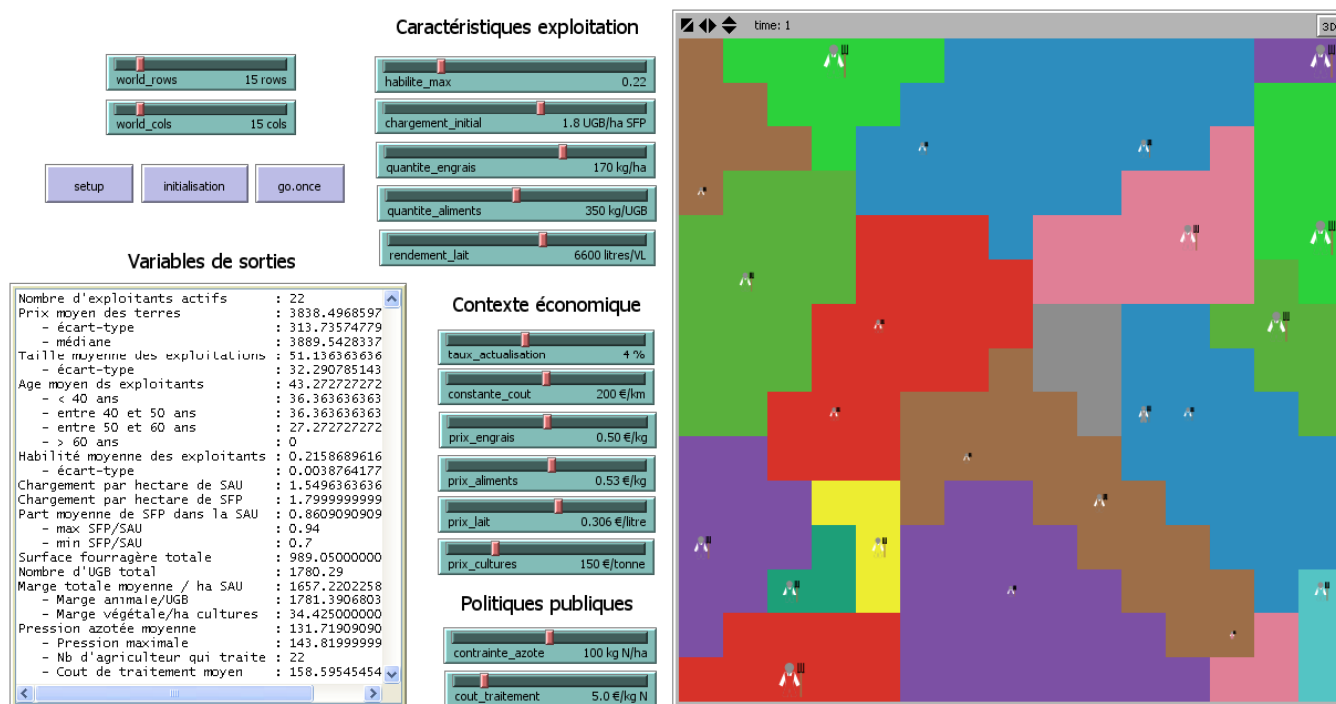


Figure 1. L'environnement de développement du modèle sous NetLogo 5.0.3

2.1. Panorama

2.1.1. Objectif

Le modèle mis au point vise à étudier l'impact sur la structure des exploitations et sur le marché foncier de la mise en place d'une régulation environnementale sur les émissions azotées générées par l'activité d'élevage bovin laitier. La régulation environnementale étudiée consiste en la définition d'un plafond par hectare au-delà duquel les quantités d'azote émises doivent être traitées.

2.1.2. Entités, variables d'état et échelles

Le modèle contient deux types d'entités, les parcelles de terre agricole et les agriculteurs. Les parcelles sont les pixels, carrés et de taille identique, qui composent l'espace de travail considéré. Chaque parcelle est caractérisée par :

- les coordonnées (abscisse et ordonnée) de son centre ;
- le rendement en cultures qu'elle permet d'obtenir ;
- l'identifiant de l'agriculteur propriétaire dans l'itération courante ;
- la valeur que lui attribue l'agriculteur qui en est le propriétaire courant.

Les agriculteurs sont les agents qui possèdent et utilisent les parcelles. Chaque agriculteur est caractérisé par :

- ses coordonnées (abscisse et ordonnée) dans l'espace de travail ;
- son âge ;
- son habileté ;
- les caractéristiques de son exploitation courante, à savoir :
 - la localisation de son siège, qui correspond aux coordonnées de son agriculteur ;
 - la liste des identifiants des parcelles qu'ils utilisent, ce qui permet de déterminer, d'une part, la surface agricole totale (SAU) de l'exploitation et, d'autre part, la valeur totale de celle-ci ;
 - ses deux caractéristiques techniques principales, à savoir la part de la surface fourragère principale (SFP) dans la SAU et le chargement en nombre d'unités gros bovins (UGB) par unité de SFP.

Bien qu'il s'agisse d'un modèle théorique, nous avons réalisé un calibrage des différents paramètres afin que les variables prennent des valeurs réalistes. Ainsi, nous avons considéré que les parcelles représentent une surface réelle de 5 hectares.

Une itération du modèle n'a pas de signification du point de vue temporel (i.e., il ne s'agit pas, par exemple, d'une année) : chaque itération correspond à la situation d'équilibre qui s'établit en fonction des agents en présence, des caractéristiques de l'environnement qui les amènent à prendre des décisions, et des interactions qui en résultent. Dit autrement, dans sa version actuelle, le modèle mis au point est essentiellement un outil de comparative statique et non un outil de modélisation dynamique. Nous ne considérons ainsi que deux itérations, dont le principe est détaillé plus loin (*cf.* 3.2).

2.1.3. Résumé des processus et de leur enchaînement

Le principal processus modélisé consiste en l'échange de parcelles entre agriculteurs lors de chaque itération. Toutes les parcelles peuvent changer de propriétaire à chaque itération. L'échange proprement dit se décompose en plusieurs phases.

D'abord, pour chaque parcelle, on calcule la liste des valeurs qui lui sont attribuées par l'ensemble des agriculteurs en présence. Dans le cas particulier de l'agriculteur qui en est le propriétaire au début de l'itération, cette valeur est calculée étant donné les caractéristiques techniques de l'exploitation actuelle dont la parcelle fait partie. Pour tous les autres agriculteurs, cette valeur est calculée étant donné les caractéristiques techniques de l'exploitation qui résulterait de l'acquisition de la parcelle étudiée. Le calcul de ces différentes valeurs tient compte de l'environnement économique qui prévaut pour l'itération courante, à la fois en terme de prix des produits et de coûts des intrants, et de l'existence ou non de la régulation environnementale.

Une fois connues les valeurs accordées par l'ensemble des agriculteurs à l'ensemble des parcelles, chacune de celles-ci est attribuée à l'agriculteur qui propose l'offre la plus élevée, au prix correspondant à cette offre. Il en devient donc le nouveau propriétaire.

Les échanges étant réalisés, chaque agriculteur peut alors définir sa nouvelle exploitation et en déterminer les nouvelles caractéristiques techniques. Il en déduit la SAU totale de l'exploitation, la valeur attribuée à chacune des parcelles la constituant et donc, finalement, la valeur totale de l'exploitation. A l'issue de chaque itération, les agriculteurs qui ne se sont pas vus attribuer de parcelle sont retirés du modèle et ne participent pas à l'itération suivante.

Lors d'une itération, le calcul des valeurs attribuées aux parcelles est réalisé en traitant les parcelles une par une dans un ordre aléatoire et, une parcelle étant donnée, en traitant également les agriculteurs un par un dans un ordre aléatoire. Les attributions aux nouveaux propriétaires n'ayant cependant lieu qu'une fois toutes les offres connues pour toutes les parcelles, ce traitement asynchrone des agents est sans conséquence sur les résultats du modèle (Caron-Lormier *et al.*, 2008).

2.2. Concepts

2.2.1. Principe de base

Le principe de base du modèle est l'attribution de chacune des parcelles de l'espace, lors une itération donnée, à l'agriculteur qui en propose l'offre la plus élevée. L'idée sous-jacente est celle de la maximisation du profit : aucun agriculteur n'est prêt à payer une parcelle plus que ce qu'il espère en retirer dans le futur ; c'est donc celui qui a le consentement à payer le plus élevé qui l'emporte.

2.2.2. Émergence

Les principales caractéristiques émergentes du modèle sont les suivantes :

- le prix moyen de la terre : il s'agit de la moyenne des valeurs auxquelles les parcelles qui changent de propriétaire lors d'une itération ont été échangées ;
- la distribution des agriculteurs présents à chaque itération, en nombre, en âge et en habileté ;
- la distribution des tailles des exploitations présentes, et de leurs caractéristiques techniques.

2.2.3. Anticipation

Les agriculteurs ont un comportement d'anticipation en ce sens qu'ils calculent la valeur d'une parcelle comme la somme actualisée nette des profits futurs associés sur un horizon infini (*cf.* 2.3.3.2). Cela étant, ils effectuent ce calcul en considérant que tous les éléments nécessaires restent inchangés pour toute la durée de cet horizon. En particulier, ils ne tiennent pas compte du fait que leur habileté évolue avec l'âge (*cf.* 2.3.3.2.), et effectuent donc ce calcul étant donné l'habileté initiale qui leur est attribuée. En ce sens, il n'y a pas de réel comportement d'anticipation.

2.2.4. Perception

Chaque agriculteur connaît parfaitement tous les éléments qui lui permettent de calculer la valeur de chacune des parcelles de l'espace. Autrement dit, il connaît parfaitement, d'une part, ses caractéristiques propres (âge, habileté) et, d'autre part, la qualité de n'importe quelle parcelle, c'est-à-dire son rendement et la distance à laquelle elle se situe.

Il convient de noter que le fait qu'un agriculteur connaisse ou non les valeurs offertes par les autres agriculteurs pour une parcelle donnée n'influence pas son propre comportement, c'est à dire n'intervient pas dans son propre calcul. Le fait que la parcelle soit attribuée au plus offrant revient cependant à une connaissance parfaite de toutes les offres par tous les agriculteurs en présence.

2.2.5. Interaction

La seule interaction entre agents est celle qui intervient entre les agriculteurs sur le marché de la terre, *via* la confrontation des différentes offres.

2.2.6. Stochasticité

La stochasticité intervient pour rendre les agriculteurs hétérogènes en termes d'âge, d'habileté et de part initiale de la SFP dans la SAU.

2.2.7. Observation

Les variables suivantes sont observées à l'issue de chaque itération :

- sur le marché foncier :
 - la moyenne, l'écart-type et la médiane du prix des parcelles échangées ;
- au niveau des agriculteurs présents :
 - leur nombre ;
 - leur répartition selon 4 classes d'âge (moins de 40, 40 à 49, 50 à 59 et 60 et plus)
 - la moyenne et l'écart-type de leur habileté ;
- au niveau des exploitations présentes :
 - la moyenne, l'écart-type et la moyenne du logarithme de leurs tailles ;
 - la moyenne des chargements par hectare de SAU et par hectare de SFP ainsi que le nombre d'UGB totaux ;
 - la moyenne, le minimum et le maximum de la part de la SFP dans la SAU ainsi que la SFP totale ;
 - la marge totale ainsi que le détail de la marge animale totale et de la marge végétale totale ;
 - la pression azotée moyenne et maximale ainsi que, lorsque la régulation environnementale est en place, le nombre d'agriculteurs qui traitent et le coût moyen de traitement.

2.2.8. Autres concepts

Le modèle mis au point ne fait pas appel aux autres concepts habituellement décrits dans la méthode ODD, comme l'adaptation ou l'existence de comportements collectifs.

2.3. Détails

2.3.1. Initialisation

L'utilisateur peut définir de façon interactive le nombre de lignes et de colonnes de l'espace de travail, qui peut donc être carré ou rectangulaire. Dans les simulations présentées ici, nous avons considéré un espace de 15 lignes et 15 colonnes, soit 225 parcelles.

Lors de l'initialisation du modèle, un agriculteur est créé sur chacune des 225 parcelles de l'espace et en devient le propriétaire initial. Chacun de ces 225 agriculteurs se voit caractérisé par :

- son âge, tiré aléatoirement de façon uniforme entre 25 et 60 ;
- l'âge auquel son habileté est maximale, tiré aléatoirement de façon uniforme entre 35 et 65 ;
- la part initiale de la SFP dans la SAU de son exploitation (uni-parcellaire), tirée aléatoirement de façon uniforme entre 0.45 et 0.95.

Les variables définissant la fonction de production agricole et l'environnement économique sont fixées à des valeurs identiques pour tous les agriculteurs ; elles sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs des paramètres du modèle

Variable	Valeur
<i>Production végétale</i>	
Rendement des cultures	2.95 tonne/ha
Prix de vente des cultures	150 €/tonne
Quantité d'engrais pour les cultures	170 kg/ha SAU
Prix des engrais	0.50 €/kg
Coût des autres inputs pour les cultures	110 €/ha SAU
<i>Production animale</i>	
Chargement initial	1.8 UGB/ha SFP
Part des vaches laitières (VL) dans les UGB	61.5%
Rendement laitier	6600 l/VL
Prix du lait	306 €/1000 l
Autres produits animaux	185 €/ha SAU
Quantité d'aliments pour les animaux	350 kg/UGB
Prix des aliments	0.53 €/kg
Coût des autres inputs pour les animaux	92 €/ha SAU
Émission azotée	85 kg/(UGB/ha SAU)
<i>Habilité</i>	
Habilité maximale	0.22
Âge auquel l'habileté est nulle	73
<i>Environnement économique</i>	
Coût de transport :	
coût fixe	200 €
terme linéaire	0.5 €/km
terme quadratique	2.5 €/km ²
Taux d'actualisation	4%

2.3.2. Données en entrée

Mise à part l'initialisation des paramètres (*cf.* sous-section précédente), le modèle ne mobilise pas de données en entrée au sens où l'entend la méthode ODD.

2.3.3. Sous-modèles

2.3.3.1. Détermination de la valeur des parcelles

La valeur $p_{ij}(T)$ de la parcelle i pour l'agriculteur j à l'itération T est calculée comme la somme actualisée des profits futurs anticipés par j pour i sur un horizon infini, selon le modèle de la valeur présente (Burt, 1986) :

$$p_{ij}(T) = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{\alpha_j(T)\pi_j(T+t) - \tau_{ij}}{(1+r)^t} \quad (1)$$

où $\alpha_j(T)$ est l'habileté de j à l'itération T (cf. 2.3.3.2.), $\pi_j(T+t)$ est le profit par hectare de SAU anticipé par j à la date $T+t$ (identique quelle que soit la parcelle i puisque la terre est homogène), τ_{ij} est le coût de transport entre i et j , et r est le taux d'actualisation.

Le profit anticipé par j pour la parcelle i par hectare de SAU à la date $T+t$ s'écrit :

$$\begin{aligned} \pi_j(T+t) = & (p_c y_c - w_N q_N - d_c) \times (1 - \%SFP_j(T)) \\ & + (p_l y_l \%VL + v_a - w_A q_A - d_a) \times \delta_j(T) \times \%SFP_j(T) \\ & - \rho_j(T) \end{aligned} \quad (2)$$

où p_c est le prix de vente des cultures, y_c est le rendement, w_N est le prix des engrais, q_N est la quantité d'engrais, d_c représentent les dépenses en autres inputs pour les cultures, $\%SFP_j(T)$ représente la part de la SFP dans la SAU de j à l'itération T , p_l est le prix du lait, y_l est le rendement laitier par vache laitière, $\%VL$ est la part des vaches laitières dans les UGB, v_a représente les ventes d'autres produits animaux, w_A est le prix des aliments, q_A est la quantité d'aliments, d_a représente les dépenses en autres inputs pour les animaux, $\delta_j(T)$ est le chargement en UGB par hectare de SAU de j à l'itération T , et $\rho_j(T)$ est l'éventuel coût de traitement supporté par j à l'itération T étant donné la régulation environnementale en place à l'itération T (cf. 2.3.3.3.). Aucun des éléments entrant dans le calcul de $\pi_j(T+t)$ ne dépendant de t , le profit espéré est constant quel que soit t , l'équation (1) se simplifiant donc en :

$$p_{ij}(T) = \frac{\alpha_j(T)\pi_j(T) - \tau_{ij}}{r} \quad (3)$$

Pour sa part, le coût de transport $\tau(d_{ij})$ s'écrit comme la somme d'un coût fixe, d'un terme linéaire et d'un terme quadratique selon la formule :

$$\tau_{ij} = \tau_0 + \tau_1 \times d_{ij} + \tau_2 \times d_{ij}^2 \quad (4)$$

où d_{ij} est la distance entre la parcelle i et l'agriculteur j et τ_0 , τ_1 et τ_2 des paramètres indépendants de la parcelle et de l'agriculteur.

2.3.3.3. Modélisation de l'habileté

L'habileté $\alpha_j(T)$ de l'agriculteur j à l'itération T est modélisée comme une fonction quadratique de son âge :

$$\alpha_j(T) = \bar{\alpha} \left(1 - \left(\frac{age_j(T) - \overline{age}_j}{age_0 - \overline{age}_j} \right)^2 \right) \quad (5)$$

où $\bar{\alpha}$ est l'habileté maximale identique pour tous les agriculteurs (*cf.* Tableau 1), $age_j(T)$ est l'âge de l'agriculteur j à l'itération T , \overline{age}_j est l'âge auquel l'habileté de j atteint la valeur maximale $\bar{\alpha}$, et age_0 est l'âge auquel l'habileté de j devient nulle (identique pour tous les agriculteurs, *cf.* Tableau 1).

D'après cette modélisation, tous les agriculteurs atteignent le même niveau maximal d'habileté mais ils le font à des âges différents, et l'habileté devient nulle à un âge identique pour tous les agriculteurs. La Figure 2 présente trois exemples de telles fonctions d'habileté. Dans la version comparative statique du modèle telle qu'elle est utilisée ici (*cf.* 2.1.2.), l'habileté d'un agriculteur dépend donc uniquement de l'âge qui lui est attribué aléatoirement lors de la phase d'initialisation (*cf.* 2.3.1.) et n'évolue pas au cours des itérations puisque l'âge est considéré comme fixe.

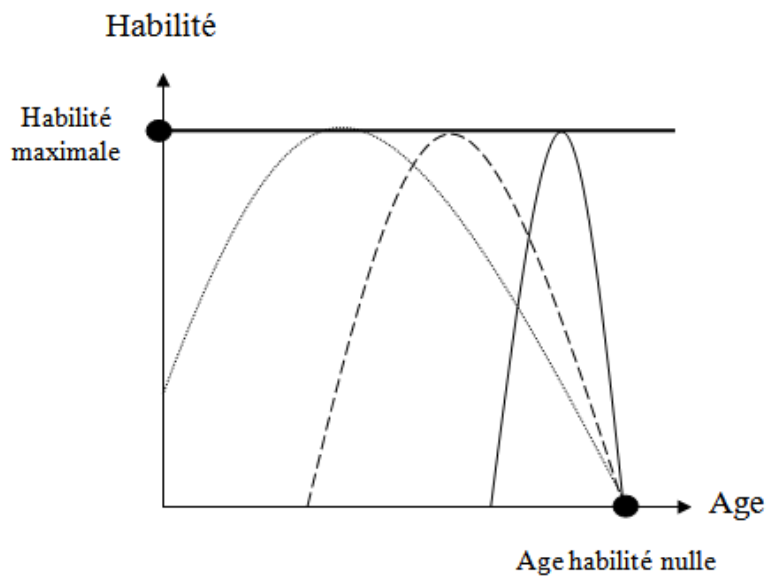


Figure 2. Trois exemples de fonction d'habileté selon l'âge auquel l'habileté est maximale

2.3.3.3. Modélisation de la régulation environnementale

La régulation environnementale imposée consiste à définir un plafond d'émission azotée d'origine animale au-delà duquel les agriculteurs sont contraints à traiter les effluents excédentaires, ce qui entraîne un coût venant diminuer leur profit espéré (*cf.* 2.3.3.1.).

Formellement, le coût de traitement $\rho_j(T)$ s'écrit :

$$\rho_j(T) = \bar{\rho} \times \max(0, \theta_0 \times \delta_j(T) \times \%SFP_j(T) - \bar{\theta}) \quad (6)$$

Où $\bar{\rho}$ est le coût de traitement par unité d'effluent excédentaire, θ_0 est l'émission azotée définie relativement au chargement par hectare de SAU (*cf.* Tableau 1), $\delta_j(T)$ est le chargement en UGB par hectare de SAU de j à l'itération T , $\%SFP_j(T)$ est la part de la SFP dans la SAU de j à l'itération T , et $\bar{\theta}$ est le plafond d'émission azotée défini par la régulation environnementale.

3. Mise en œuvre

3.1. Calibrage

La caractérisation des exploitations a été réalisée à partir des données du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) de 2004 à 2007 en Bretagne. On dispose de 311 exploitations laitières spécialisées sur un total de 617 observations. Leurs principales caractéristiques utilisées pour calibrer les variables du modèle sont présentées dans le Tableau 2. Dans notre modèle, les exploitations se différencient selon leur part de SFP dans la SAU.

Tableau 2. Caractéristiques des 311 exploitations laitières du RICA en Bretagne sur 2004-2007

	Unité	Moyenne	Ecart-type	Min.	Max.
<i>SAU</i>	ha	63.05	30.50	7.50	174.28
<i>Part de SFP/SAU</i>	ha SFP/ha SAU	0.79	0.13	0.43	1
<i>Chargement/SFP</i>	UGB/ha SFP	1.67	0.41	0.64	3.52
<i>UGB bovin</i>	UGB	79.41	40.53	13.70	273.93
<i>Vaches laitières</i>	UGB	45.48	18.89	11.00	118.00
<i>Charge en azote</i>	kg N/ha	86.76	24.90	43.53	213.39
<i>Produit lait</i>	€/UGB	1238.52	366.35	177.21	2572.54
<i>Rendement lait</i>	litres/UGB	6602.23	1230.65	1631.15	10633.71
<i>Prix lait</i>	€/ litre	0.306	0.019	0.186	0.391
<i>Part de VL</i>	VL/UGB bovin	0.615	0.140	0.250	0.987
<i>Produit animaux</i>	€/UGB	184.89	108.10	-256.18	675.54
<i>Produit cultures</i>	€/ha cultures	439.99	304.33	-191.25	1525.84
<i>Dépenses aliments</i>	€/UGB	184.86	108.50	13.78	1183.66
<i>Autres dépenses animales</i>	€/UGB	91.98	91.15	3.55	1398.57
<i>Dépenses engrais</i>	€/ha SAU	85.59	50.15	0	293.05
<i>Autres dépenses végétales</i>	€/ha SAU	110.16	54.54	10.11	289.76
<i>Marge animale</i>	€/UGB	1146.57	318.53	124.63	2217.04
<i>Marge végétale</i>	€/ha cultures	244.23	262.97	-361.32	1220.72
<i>Marge brute totale</i>	€/ha SAU	1530.71	488.97	209.27	3962.19

Les paramètres d'habileté et d'âge des exploitations du modèle ont été calibrés de telle sorte que les variables de prix des terres agricoles, de taille moyenne des exploitations et de distribution de l'âge des exploitants prennent des valeurs réalistes. Ainsi, le prix de vente moyen des terres agricoles en Bretagne est de 5 450 €/ha sur la période considéré, et le prix médian est 3 400 €/ha (données Perval recensant les transactions de terres agricoles notifiées par notaire). Les chefs d'exploitation ont en moyenne 45 ans (22% ont moins de 40 ans, 40% entre 40 et 50 ans, 34% entre 50 et 60 ans et 4% ont plus de 60 ans ; Agreste Bretagne, 2011). La taille moyenne des exploitations laitières bretonnes est de 63 ha.

3.2. Résultats

Nous n'avons considéré ici que deux itérations. La première itération permet d'obtenir, à partir de la situation résultant de la phase d'initialisation (*cf.* 2.3.1.), une configuration d'équilibre du marché foncier. Les exploitations adaptent leur quantité d'UGB en fonction des parcelles achetées, leur chargement par SFP et leur part de SFP dans la SAU restant fixes. Les exploitations ont des coûts de traitement pour les effluents en excédent, mais l'achat de terres agricoles ne leur permet pas de relâcher la contrainte azotée.

A la seconde itération, les exploitations agricoles ne peuvent plus augmenter leur cheptel. Toutes les parcelles achetées sont allouées aux cultures de vente. Leur chargement par SFP reste donc fixe, mais la part de SFP dans leur SAU diminue, ainsi que leur chargement par hectare de SAU, lorsqu'elles achètent

de la terre. L'achat de terres permet donc aux exploitations de diminuer leurs coûts des traitements, grâce aux surfaces d'épandage supplémentaires ainsi acquises.

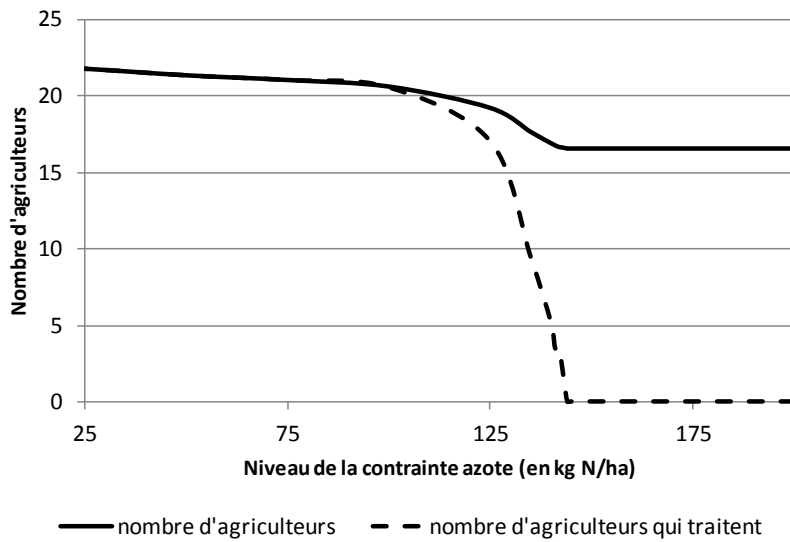
Afin d'éliminer l'effet aléatoire lié à la stochasticité du modèle, chaque simulation réalisée a été répliquée 100 fois, ce qui permet de présenter des résultats en moyenne et en écart-type.

3.2.1. Résultats de l'itération 1

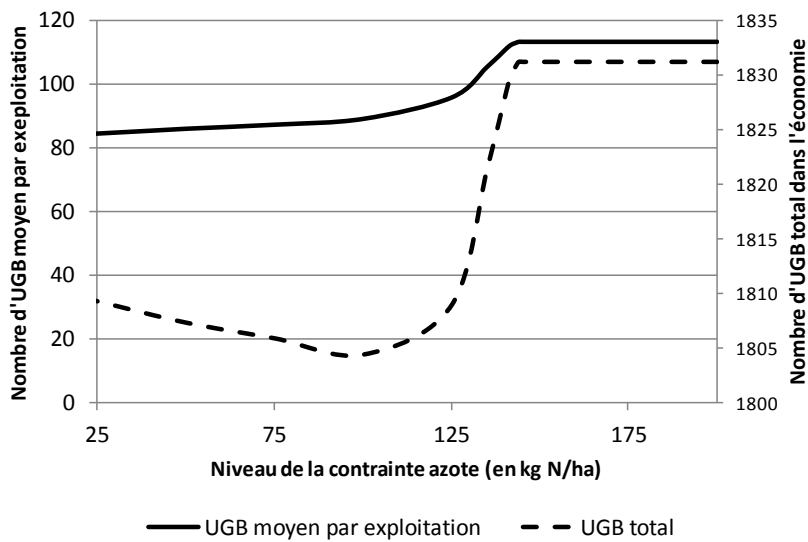
Cet ensemble de simulations, réalisé à la première itération, permet de comparer les équilibres du marché de la terre et de l'économie agricole de notre territoire pour différents niveaux de contrainte sur les épandages d'azote organique par hectare. L'ensemble d'exploitations sélectionnées pour chaque simulation est différent, *a fortiori* d'un niveau de contrainte à l'autre. Pour chaque niveau de contrainte, sont rapportés les moyennes et écarts-types des résultats caractérisant les équilibres associés. Ce sont ces résultats agrégés que nous commentons d'un niveau de contrainte à l'autre.

L'accroissement du niveau de contrainte sur l'azote se traduit naturellement par la sélection d'exploitations parmi lesquelles un nombre croissant est obligé de traiter (Figure 3a). Cette part des exploitations supportant des coûts de traitements s'accroît rapidement de 0% pour une contrainte un peu inférieure à 150 kg N/ha, à 100% pour une contrainte d'environ 100 kg N/ha. Entre ces deux niveaux de contraintes, sont sélectionnées des exploitations qui sont obligées de traiter et des exploitations dont la SAU est suffisante pour assurer l'épandage en respectant la contrainte. Entre 150 et 100 kg N/ha, les ensembles d'exploitations sélectionnées diffèrent fortement par la part de SFP dans la SAU, qui passe de 70% à 55%. C'est aussi entre ces bornes que la taille moyenne et, corollairement, le nombre des exploitations diffèrent le plus. Des niveaux de contraintes plus élevés sélectionnent des exploitations plus petites, plus nombreuses mais beaucoup plus extensives. Il en résulte une chute du nombre total d'UGB de notre territoire pour un niveau de contrainte compris entre 150 et 100 kg N/ha (Figure 3b).

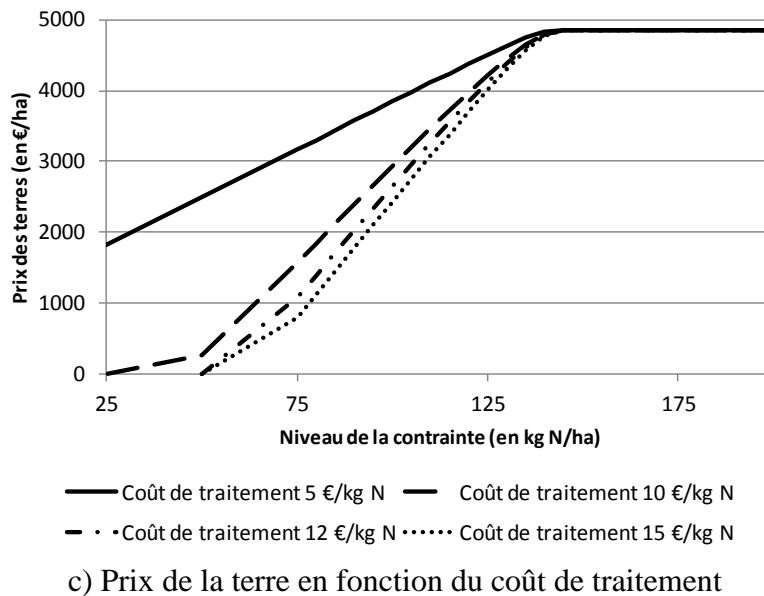
En deçà d'une contrainte de 100 kg N/ha, la sélection d'exploitations de plus en plus petites et de plus en plus extensives se poursuit. Mais toutes les exploitations sélectionnées sont désormais contraintes au traitement. Compte tenu de la rentabilité relative de l'élevage et des cultures, la baisse du ratio SFP/SAU est beaucoup plus modérée, de 55 à 52% pour une contrainte passant de 100 et de 0 kg N/ha, à comparer à la chute précédente de 70 à 55% pour une contrainte passant de 150 et de 100 kg N/ha. Cela s'explique par le fait qu'à ces niveaux de contrainte très forts, l'extensification qui permettait encore à certaines exploitations d'éviter totalement les coûts de traitement lorsque la contrainte était située entre 150 et 100 kg N/ha, ne le permet plus de manière aussi rentable en moyenne. En conséquence, malgré des exploitations sélectionnées de plus en plus extensives, mais surtout de plus en plus petites et nombreuses, le nombre d'UGB total ne décline plus en deçà de 100 kg N/ha. Il augmente même légèrement jusqu'à 0 kg N/ha où l'extensification n'est de fait plus du tout une alternative au coût de traitement (Figure 3b). Ainsi, le chargement moyen par ha de SAU qui baisse sur la plage de contrainte entre 145 et 100 kg N/ha, se redresse ensuite, sans toutefois retrouver le niveau qu'il atteint lorsque la contrainte n'est pas active, *i.e.* au-delà de 150 kg N/ha.



a) Nombre d'agriculteurs présents



b) Production animale des exploitations présentes



c) Prix de la terre en fonction du coût de traitement

Figure 3. Caractéristiques des exploitations et de l'économie à l'étape 1

Comme attendu, dès que la contrainte azotée est active, en deçà de 145 kg N/ha, les coûts de traitement appauvrissent l'ensemble de l'économie, mesurée par les marges brutes des exploitations. En conséquence le prix moyen de la terre décline également de manière quasi parallèle (Figure 3c). Différents coûts de traitement ont également été simulés. Plus ils sont élevés, plus le prix moyen des terres diminue fortement avec le niveau de contrainte. Lorsque le coût de traitement est supérieur à 12 €/kg N et lorsque la contrainte azotée est forte (inférieure à environ 50 kg N/ha), il n'y a plus de transactions de terres agricoles. Dans ces conditions, les marges des exploitations sont trop faibles, et le coût de transport est trop important pour qu'elles puissent investir dans du foncier.

3.2.2. Résultats de l'itération 2

Cet ensemble de simulations, réalisé à la seconde itération, permet d'étudier les impacts de l'introduction d'une politique environnementale sur les transactions de terres agricoles.

Comme le montrent les Tableaux 5 et 6, il n'y a pas de transactions de terres (alors qu'il y en avait à la première itération) lorsque la contrainte azotée est supérieure à environ 140 kg N/ha, et/ou lorsque le coût de traitement est inférieur à environ 12 €/kg N. Dans ce cas, cela signifie que la valeur d'une parcelle donnée par son propriétaire est toujours supérieure aux offres d'achat proposées par les autres agriculteurs. En effet, la valeur d'une parcelle donnée par son propriétaire est calculée à partir de sa marge réelle suite aux échanges réalisés lors de la première itération. En revanche, les offres des autres agriculteurs sont calculées à partir de leur marge anticipée s'il détenait une parcelle supplémentaire. Ils anticipent donc une diminution de leur marge animale par hectare de SAU, une augmentation de la marge végétale par hectare de SAU (puisque cette parcelle supplémentaire est allouée aux cultures), et une baisse du coût de traitement (si l'exploitation était contrainte, puisqu'une parcelle supplémentaire lui procure de nouvelles surfaces d'épandage). Dans ce contexte relativement peu contraint, le gain en coût de traitement et la hausse de marge végétale ne suffisent pas à compenser la perte de marge animale, qui a un poids relatif plus important dans le calcul de la marge totale par hectare de SAU.

Tableau 5. Effets du coût de traitement sur les échanges pour une contrainte de 110 kg N/ha

	Prix des terres			Nombre d'exploitations			Transactions
	Itération 1	Itération 2	Variation	Itération 1	Itération 2	Variation	Itération 2
5 €/kg N	4114.47	-	-	20.36	20.36	0 %	0
13 €/kg N	3179.59	3172.95	-0.21 %	30.46	28.73	-5.68 %	17.19
14 €/kg N	3114.83	3136.50	0.70 %	29.82	26.81	-10.09 %	28.85
15 €/kg N	3062.18	3103.31	1.34 %	28.93	25.30	-12.55 %	35.64

Tableau 6. Effets du niveau de contrainte sur les échanges pour un coût de traitement de 14 €/kg N

	Prix des terres			Nombre d'exploitations			Transactions
	Itération 1	Itération 2	Variation	Itération 1	Itération 2	Variation	Itération 2
145 kg N/ha	4856.85	-	-	16.54	16.54	0 %	0
140 kg N/ha	4777.94	4690.31	-1.83%	17.32	17.32	0 %	2.86
135 kg N/ha	4582.19	4452.04	-2.84%	19.05	18.89	-0.84 %	3.82
130 kg N/ha	4331.19	4267.31	-1.47%	21.26	20.78	-2.26 %	8.13
125 kg N/ha	4042.06	4007.14	-0.86%	23.65	22.57	-4.57 %	13.74
100 kg N/ha	2473.53	2520.98	1.92%	33.28	28.54	-14.24 %	38.25
75 kg N/ha	856.28	920.92	7.55%	36.03	30.52	-15.29 %	45.82
50 kg N/ha	-	-	-	225	225	0 %	0
25 kg N/ha	-	-	-	225	225	0 %	0

Les Tableaux 5 et 6 décrivent également l'effet du niveau de contraintes et du coût de traitement sur quelques caractéristiques des échanges et leurs différences d'une itération à l'autre. La diminution du nombre d'agriculteurs est plus forte entre les deux itérations lorsque le coût de traitement augmente et lorsque le niveau de contrainte azotée augmente. La différence de prix moyen des terres agricoles augmente également. D'un niveau de contrainte à une autre, et d'un coût de traitement à un autre, ce ne sont en effet pas les mêmes exploitations qui se maintiennent sur le marché dès la première itération. Les exploitations qui ont une forte pression azotée ont d'autant plus intérêt à acheter de la terre pour gagner en coût de traitement lorsque celui-ci est élevé et/ou lorsque la contrainte azotée est forte. Il y a donc une augmentation des échanges au profit des exploitations qui ont le plus d'UGB par hectare de SAU à mesure que la contrainte (physique ou financière) se resserre.

Les Tableaux 5 et 6 montrent enfin que le prix moyen des parcelles vendues à l'itération 2 peut être inférieur au prix moyen obtenu à l'itération 1, notamment pour des niveaux de contrainte azotée inférieurs à 135 kg N/ha et que le prix moyen obtenu à l'itération 2 diminue avec l'augmentation de la contrainte. En effet, ce ne sont pas les mêmes parcelles, ni les mêmes exploitations qui interviennent dans les échanges d'une itération à l'autre. Ainsi, l'itération 1 ayant déjà permis une certaine optimisation des parcellaires, les parcelles susceptibles d'être échangées à l'itération 2 sont plus éloignées des sièges des exploitations. Les parcelles échangées à l'itération 2 ayant ainsi moins de valeur (puisque plus distantes), le prix moyen de la terre (calculé sur les seules parcelles échangées) peut également baisser. Cependant, au-delà de cet effet en moyenne, la Figure 4 confirme bien que, pour qu'il y ait échange, la valeur d'une parcelle donnée doit augmenter entre les deux itérations. Celle-ci présente en effet, pour une réplification particulière, l'évolution du prix des parcelles échangées entre les deux itérations quel que soit le niveau de contrainte. Chaque point représente ainsi une parcelle qui a été échangée à la première et la deuxième itération. On remarque, d'une part, que toutes les parcelles échangées sont bien vendues à l'itération 2 à un prix supérieur au prix de vente de l'itération 1 et, d'autre part, que les mêmes parcelles sont vendues beaucoup plus chères lorsque la contrainte azotée est forte (jusqu'à 40% plus cher pour une contrainte de 70 kg N/ha).

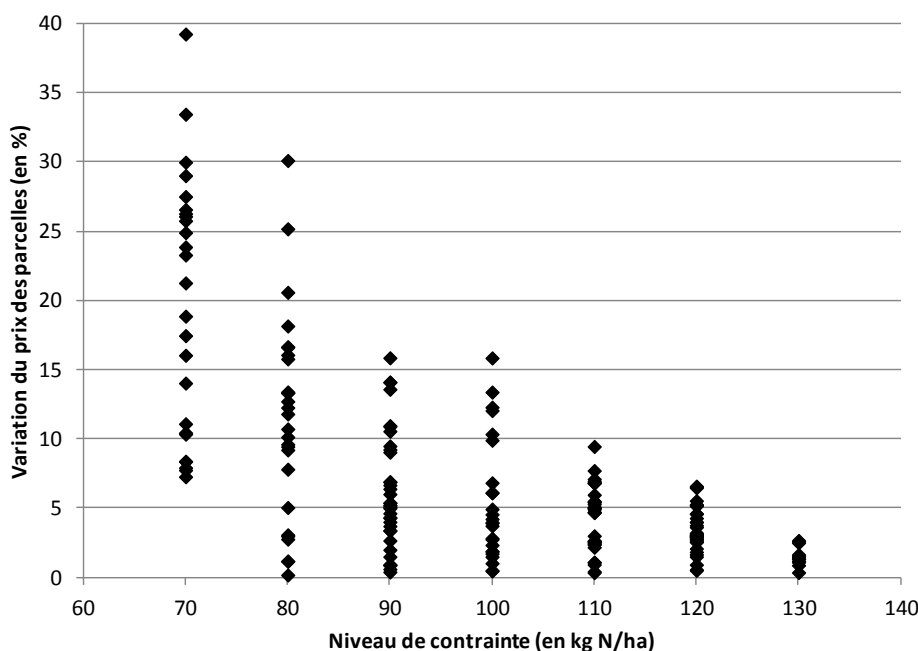


Figure 4. Exemple d'une réplification (avec un coût de traitement 14 €/kg N)

4. Discussion

Bien que relativement simple par rapport aux systèmes multi-agents « agricoles » bien établis dans la littérature (comme AgriPoliS, RegMAS, etc.), le modèle de marché foncier agricole présenté ici permet de mettre en évidence quelques propriétés émergentes intéressantes. Parmi les résultats saillants, on retiendra par exemple l'augmentation du nombre d'UGB total dans l'économie bien que les exploitations soient de plus en plus extensives lorsque la régulation environnementale devient fortement contraignante, ou encore l'augmentation du prix de chacune des parcelles échangées qui peut malgré tout se traduire par une baisse du prix moyen de la terre, l'échange portant sur des parcelles de moins en moins bien valorisées par les agriculteurs. Les premières simulations relatées ici confirment ainsi l'intérêt de l'approche multi-agents pour étudier de tels processus économiques complexes.

Toutefois, ce modèle repose sur quelques hypothèses strictes. Deux points sont à améliorer en priorité : l'homogénéité de la terre et la contrainte que l'on pose empêchant les exploitations d'augmenter la taille de leur cheptel lors de la deuxième itération. Une possibilité simple pour relâcher simultanément ces deux contraintes serait d'affecter aléatoirement, à chaque parcelle, un niveau particulier de mélange des deux types de production, cultures ou fourrages. Lors de l'échange d'une parcelle donnée, les UGB correspondant à la part de SFP présente dans celle-ci pourraient ainsi être transférés de l'ancien propriétaire au nouveau, à la manière des quotas laitiers.

Références

- Agreste Bretagne (2011). Recensement Agricole 2010. Premières tendances. *Agreste Bretagne*, Septembre 2011-3.
- Balman A. (1997). Farm-based modelling of regional structural change: A cellular automata approach. *European Review of Agricultural Economics*, 24(1): 85-108.
- Bargigli L., Tedeschi G. (2013). Major trends in agent-based economics. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 8(2): 211-217.
- Berger T. (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25(2-3): 245-260.
- Bert F. E., Podestá G. P., Rovere S. L., Menéndez Á. N., North M., Tatara E., Ruiz Toranzo F. (2011). An agent based model to simulate structural and land use changes in agricultural systems of the Argentine pampas. *Ecological Modelling*, 222(19): 3486-3499.
- Burt O. (1986). Econometric Modelling of the Capitalization Formula for Farmland Prices. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(1):10-26.
- Caron-Lormier G., Humphry R. W., Bohan D. A., Hawes C., Thorbek P. (2008). Asynchronous and synchronous updating in individual-based models. *Ecological Modelling*, 212(3-4): 522-527.
- Filatova T., Voinov A., van der Veen A. (2011). Land market mechanisms for preservation of space for coastal ecosystems: An agent-based analysis. *Environmental Modelling and Software*, 26(2): 179-190.
- Grimm V., Berger U., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske J., Goss-Custard J., Grand T., Heinz S. K., Huse G., Huth A., Jepsen J. U., Jorgensen C., Mooij W. M., Mueller B., Pe'er G., Piou C., Railsback S. F., Robbins A. M., Robbins M. M., Rossmann E., Rueger N., Strand E., Souissi S., Stillman R. A., Vabo R., Visser U., Deangelis D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1-2): 115-126.
- Grimm V., Berger U., Deangelis D. L., Polhill J. G., Giske J., Railsback S. F. (2010). The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23): 2760-2768.
- Happe K. (2004). *Agricultural policies and farm structures*. Institut für Agrarentwicklung in Mittel-und Osteuropa (IAMO).
- Happe K., Kellermann K., Balman A. (2006). Agent-based analysis of agricultural policies: An illustration of the agricultural policy simulator AgriPoliS, its adaptation and behavior. *Ecology and Society*, 11(1): 49.[online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art49/>.
- Le Goffe P. (2013). La Directive Nitrates, incompatible avec l'élevage ? Le cas de la France et des pays d'Europe du Nord. Notre Europe Policy Paper n°93.
- Lobianco A., Esposti R. (2010). The Regional Multi-Agent Simulator (RegMAS): An open-source spatially explicit model to assess the impact of agricultural policies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(1): 14-26.
- Mueller B., Bohn F., Dressler G., Groeneveld J., Klassert C., Martin R., Schlueter M., Schulze J., Weise H., Schwarz N. (2013). Describing human decisions in agent-based models. ODD+D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling and Software*, 48(0): 37-48.
- Ralha C. G., Abreu C. G., Coelho C. G. C., Zaghetto A., Macchiavello B., Machado R. B. (2013). A multi-agent model system for land-use change simulation. *Environmental Modelling and Software*, 42(0): 30-46.
- Schreinemachers P., Berger T., Sirijinda A., Praneetvatakul S. (2009). The diffusion of greenhouse agriculture in Northern Thailand: Combining econometrics and agent-based modeling. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne d'Agroeconomie*, 57(4): 513-536.
- Wilensky U. (1999). *NetLogo*.