



**HAL**  
open science

# Modéliser les changements mineurs et majeurs d'individus en interactions : application à la conversion à l'agriculture biologique

Q. Xu

► **To cite this version:**

Q. Xu. Modéliser les changements mineurs et majeurs d'individus en interactions : application à la conversion à l'agriculture biologique. Sciences de l'environnement. Doctorat d'Université spécialité : informatique, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, 2018. Français. NNT : 2018CLFAC027 . tel-02608116

**HAL Id: tel-02608116**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02608116>**

Submitted on 16 May 2020

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

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



# UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE

Ecole Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand

## **T h è s e**

Présentée par :

Qing XU

Pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : informatique

## **Modéliser les changements mineurs et majeurs d'individus en interactions**

Application à la conversion à l'agriculture biologique

Soutenue publiquement le 26/11/2018 devant le jury :

Mme Juliette Rouchier

M. Roger Martin-Clouaire

Mme Muriel Tichit

Mme Sophie Thoyer

M. Michel Streith

Mme Sylvie Huet

M. Christophe Poix

M. Guillaume Deffuant

*Rapporteure*

*Rapporteur*

*Examinatrice*

*Examinatrice*

*Examineur*

*Encadrante*

*Encadrant*

*Directeur*



## **Avant-propos**

Cette thèse a été effectuée en partenariat entre IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) et VetAgro Sup.

Je remercie grandement IRSTEA, VetAgro Sup ainsi que la région Auvergne, qui par son soutien financier, a permis la réalisation de cette thèse.



## Résumé

Nous connaissons depuis plus d'un siècle des bouleversements climatiques, socio-économiques et sociétaux de plus en plus fréquents et intenses. L'adaptation à ce contexte incertain, pour envisager l'avenir de façon durable, est un défi particulièrement important. L'agriculture est au cœur de ce défi et de la réflexion sur les modes d'adaptation. Les anthropologues ont récemment identifié deux types de changements de l'agriculteur: le changement mineur (en accord avec le comportement normatif de référence), et le changement majeur (changement profond, remise en cause des normes majoritaires permettant l'adoption de comportements innovants). Ces deux types de changement sont très proches de l'adaptation incrémentale et de l'adaptation transformationnelle qui sont définis tant pour des individus que pour des institutions locales, nationales ou internationales ...

Nous proposons un modèle individu-centré de l'adaptation des agriculteurs qui intègre dynamiquement changements mineurs et majeurs, en nous focalisant sur la dimension psycho-sociale de ces changements. Nous appliquons notre modèle à la question, de la conversion à l'agriculture biologique des éleveurs laitiers français. Cette transition a en effet été généralement caractérisée comme un changement majeur, ou une adaptation transformationnelle, et s'avère donc pertinente pour tester notre modèle.

Le modèle d'agriculteur est en général dans un régime stable durant lequel seuls des changements mineurs sont opérés. Ces changements sont menés en imitant des comportements adoptés par les agriculteurs les plus crédibles. La crédibilité d'un agriculteur pour un autre est d'autant plus forte que son volume produit est supérieur à celui de cet agriculteur. Ces changements se traduisent concrètement par des modifications des volumes produits qui correspondent à des choix de pratiques plus ou moins intensifs.

Le modèle peut passer d'un régime stable à un autre en transitant par un changement majeur impliquant de changer la hiérarchie des importances, accordées aux dimensions « productiviste » et « environnementale », qui pondèrent son évaluation des résultats de son mode de production (par exemple : conventionnel ou biologique). Le calcul de son évaluation utilise la théorie de l'action raisonnée. Il permet à l'agriculteur de déterminer sa satisfaction, à partir de ses résultats précédents, et de ses résultats comparés à ceux de ses pairs crédibles, en tenant compte de l'importance accordées à chaque dimension d'évaluation. Lorsqu'un agriculteur est insatisfait de son mode de production courant, il évalue sa satisfaction potentielle pour un autre mode de production, et adopte ce dernier si son gain de satisfaction est supérieur à un seuil. Il change alors la hiérarchie des importances accordées à ses dimensions d'évaluation pour être en accord avec le mode adopté. Un agriculteur biologique accordera ainsi

par exemple une importance plus forte à la dimension environnementale qu'à la dimension productiviste. Ce changement implique alors une réévaluation tant de la crédibilité de ses pairs que de leurs pratiques.

L'étude de la diffusion de l'agriculture biologique, simulée par notre modèle de changements mineurs/majeurs a été réalisée pour :

- des populations stéréotypées et théoriques. Cette étude a permis d'identifier les trajectoires typiques d'évolution des agriculteurs et les raisons de ne pas se convertir qui y sont associées ;
- des populations initialisées à partir des données du Recensement Général Agricole 2000, et d'heuristiques extraites de la littérature permettant notamment de déterminer les résultats environnementaux à partir des volumes produits et des caractéristiques de l'exploitation, et de faire évoluer le nombre d'exploitations et les caractéristiques de ces exploitations. Ces études ont souligné l'importance des caractéristiques de l'exploitation comme facteur explicatif de l'adoption et clarifié l'impact des dynamiques sociales associées aux changements majeurs et mineurs. En général, les changements mineurs, de même que l'évolution démographique vers un nombre plus faible d'exploitations produisant davantage en moyenne, ont tendance à freiner la diffusion durant les premiers temps des simulations. Dans un second temps, le changement majeur peut favoriser la diffusion de la conversion au sein de certaines populations. Il est toutefois souligné qu'une population qui croît tout d'abord sa production moyenne du fait de l'évolution démographique, puis adopte partiellement l'agriculture biologique, affiche un taux de conversion global bien inférieur à une population qui adopte partiellement, puis croît sa production.

Ces analyses du comportement du modèle ont permis de mieux comprendre l'impact des changements majeurs entre régimes stables de changements mineurs, sur les trajectoires individuelles d'adoption, ainsi que sur les taux d'adoption de populations d'exploitations aux caractéristiques agronomiques variées et évolutives.

**Mots clés :** modèle individu-centré, conversion à l'agriculture biologique, décision, changement mineur, changement majeur, adaptation incrémentale, adaptation transformationnelle, évolution démographique

## Abstract

### **Minor and major changes model of interacting individuals: application to the conversion to organic farming**

For more than a century, climatic, socio-economic and societal changes are more and more frequent and intense. Adapting to this uncertain context to envisage a sustainable future is a particularly important challenge. Agriculture is at the heart of this challenge and the reflection on the modes of adaptation. Anthropologists have recently identified two types of farmer changes: minor change (consistent with normative behavior), and major change (deep change, challenge the majority norms allowing adoption of innovative behaviors). These two types of change are very close to the incremental adaptation and the transformational adaptation that are defined for individuals as well as for local, national or international institutions.

We propose an individual-based model to study farmers' adaptations that dynamically integrates minor and major changes. We focus on the social-psychological dimension of these changes. Our model is applied to the question of French dairy farmers' conversions to organic farming. This transition has been characterized as a major change, or a transformational adaptation, and is therefore relevant to test our model.

A farmer stays generally in a stable regime doing only minor changes. These changes are carried out by imitating the practices of the most credible farmers. The credibility of one farmer given to another is larger if his (her) produced volume is greater than that of this farmer. These changes are shown by concrete changes of produced volumes, which correspond to more or less intensive choices of practice.

In the model, a farmer passes from one stable regime to another through a major change involving a change of his (her) hierarchy of importance over the "productivist" and "environmental" evaluative dimensions. The importance weights his (her) evaluation of the results according to the mode of production (for example: conventional or organic). The computation of the evaluation is based on the theory of reasoned action. This evaluation shows a farmer's satisfaction that is based on his (her) previous results and his (her) results compared to those of his (her) credible peers, taking into account the importance given to each dimension of evaluation. When a farmer is dissatisfied with his (her) current mode of production, he (she) evaluates his (her) potential satisfaction with another mode of production, and adopts the latter if his (her) satisfaction gain is above a threshold. He (she) then changes the importance hierarchy given to the evaluation dimensions to be in agreement with the adopted mode. For example, an organic farmer will give more importance to the environmental dimension than to the productivist dimension. This change implies a reassessment of



both the credibility given to his (her) peers and their practices.

The study of the diffusion of organic farming, simulated by our model of minor and major changes, was carried out on:

- some stereotypical and theoretical populations. This study identified the typical trajectories of farmers' evolutions and the reasons of farmers' non-adoption of organic farming;
- some populations based on the data from the General Agricultural Census 2000, and the heuristics extracted from the literature. These heuristics allow the model to determine the environmental results based on the produced volume and the farm characteristics, and to simulate the dynamics of farm numbers as well as farm characteristics. These studies emphasized the importance of farm characteristics as an explanatory factor for the adoption and clarified the impact of social dynamics associated with major and minor changes on the adoption. In general, minor changes, as well as the demographic shift towards a smaller number of farmers and a larger average production, tend to slow down the diffusion at the beginning of the simulations. Major changes can then favor the diffusion of the adoption in some populations. It is shown that a population that first increases its average production due to the demographic dynamics, and then partially adopts organic farming has a much lower overall adoption rate than a population that partially adopts and then expands its production.

These analysis of model behavior provide a better understanding of the impact of major changes between stable regimes of minor changes on the individual trajectories of adoption, as well as on the adoption rates of farm populations with different farm characteristics and dynamics.

**Key words:** individual based model, conversion to organic farming, decision, minor change, major change, incremental adaptation, transformational adaptation, demographic dynamics

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Conseil Régional d'Auvergne et VetAgro Sup pour le co-financement de cette thèse.

Je tiens également à remercier Madame Juliette Rouchier et Monsieur Roger Martin-Clouaire d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse.

Je remercie cordialement les membres du jury Monsieur Michel Streith, Madame Sophie Thoyer et Madame Muriel Tichit pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail.

Merci à Madame Fatiha Bendali qui m'a délicatement accompagnée depuis mon master et m'a encouragé tout au long. Elle a pris le temps de m'écouter et de discuter avec moi.

Un grand merci à Isabelle Boisdon pour toute son aide. Ses remarques m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. Elle a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier également mon directeur de thèse, Monsieur Guillaume Deffuant, pour la confiance qu'il m'a accordée lors de ce travail doctoral. Il s'est montré dès le premier jour, accueillant, chaleureux et disponible. Je le félicite pour ses qualités humaines tout à fait hors du commun qui ont été des ingrédients nécessaires au bon déroulement de ma thèse.

Je remercie très vivement Monsieur Christophe Poix pour ses encadrements, ses soutiens et ses conseils tout le long de notre collaboration. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie avec son appui scientifique.

J'adresse tous mes remerciements à Madame Sylvie Huet, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire. Qu'elle soit aussi remerciée pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigués. Elle a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Merci beaucoup pour son soutien inconditionnel, son enthousiasme et ses conseils.

Je souhaite aussi adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont participées de près ou de loin par leur soutien et leur conseil. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail sans cette aide si précieuse, qu'ils en soient remerciés.

Il m'est impossible d'oublier Eric Perret pour son aide précieuse pour les données du modèle. Il a toujours fait tout son possible pour m'aider. Je tiens aussi à remercier particulièrement Yannick De Cacqueray-Valmenier, Ghenima Amer, Alain Gueringer... pour toutes nos discussions et leurs conseils qui m'ont accompagné tout au long.

Irstea et VetAgro Sup ont été mon foyer d'accueil durant ces trois ans ; mes collègues ont pris part à la réussite de cette expérience, grâce à l'ambiance intellectuelle et chaleureuse. Une mention spéciale à mes compagnons de thèse, les autres doctorants, qui vivent leur aventure parallèlement.

Merci à vous tous d'avoir constitué le cadre de travail idéal à l'élaboration de cette thèse.

感谢我的父母，兄长，和祖母们，我像风筝一样一心想要飞上蓝天，而给我力量的正是亲人们手中握着的那条线，家人的支持和鼓励一直是我前进的强大动力！

感谢我的朋友们：喻苏婷、曾睿、谢晋、朱志鹏、龚哲、韩燕梅等一直以来对我的关心和帮助，你们给予我的真诚友情温暖了我的生命！

感谢我的男朋友邱流进，多年来，无论我们的地理距离有多远，你都一直用心守护。承君默默奉献、相濡以沫，与我共同承担学业上的几许艰辛和人生旅途上的风风雨雨！

## Table des matières

Chapitre 1. Vue d'ensemble.....	13
Chapitre 2. Clarifier les concepts de changement et formaliser le processus dans le cadre de la décision des agriculteurs.....	63
Chapitre 3. Raisons de ne pas adopter l'agriculture biologique.....	75
Chapitre 4. L'impact de différents composants du modèle sur le taux d'adoption: implémentation RGA.....	125
Chapitre 5. L'impact de la démographie dynamique du modèle sur le taux d'adoption: implémentation RGA.....	157
Chapitre 6. Discussion générale.....	199
Références.....	215
Annexe A. Quelques éléments de la littérature classique sur les processus de décision.....	225
Annexe B. Article acceptée pour publication dans Lecture Notes in Computer Science par la Social Simulation Conference 2018 (actes).....	233
Annexe C. Calcul des productions, des performances et du nombre de vaches.....	255



## Chapitre 1. Vue d'ensemble

Ce dernier siècle, et plus encore ces dernières décennies, les changements de l'environnement ont été plus intenses et plus fréquents. Les changements climatiques, socio-économiques et sociétaux poussent les acteurs à s'adapter, non seulement de façon linéaire, mais également en envisageant des transformations globales. Tel est le cas des agriculteurs qui doivent à la fois répondre aux besoins alimentaires d'une population mondiale croissante, et aux problèmes environnementaux tels que le manque d'eau, l'appauvrissement des sols, l'impact des intrants chimiques sur la santé humaine et la biodiversité, ... Le devenir de nos sociétés dépend de la capacité de notre agriculture et de nos agriculteurs à s'adapter pour participer à une réponse durable à ces problématiques. Cette capacité d'adaptation et son impact à grande échelle sur les modes de production agricole est au centre de notre travail.

Notre thèse propose une modélisation individu-centrée fondée sur les différentes formes d'adaptation des agriculteurs identifiées récemment par la littérature (incrémentales et transformationnelles). Au travers d'applications, nous évaluons son impact sur la distribution des modes de production des agriculteurs, conventionnels ou biologiques. L'approche individu-centrée, se basant sur des règles d'évolution de chacun des individus en interaction avec les autres est en effet un outil pertinent pour l'étude des changements globaux émergents des dynamiques de changement d'individus interagissant (Hedström et Ylikoski 2010). Les individus virtuels employés dans notre travail sont, dans la suite, pour les distinguer des individus réels, souvent appelés agents<sup>1</sup>. Notre application, la conversion à l'agriculture biologique, a par ailleurs été récemment citée comme illustrant une nouvelle forme d'adaptation des agriculteurs, leur permettant notamment de faire face à des situations inconnues. Ce dernier point explique peut-être pourquoi la diffusion de cette pratique reste encore mal comprise. Elle a en effet fait l'objet d'études précédentes, davantage fondées sur les formes classiques d'adaptation, et une prise en compte des connaissances récentes

---

<sup>1</sup> Ils diffèrent toutefois des agents des modèles à base d'agents. Ils sont plus simples quant à leur capacité cognitive, de façon notamment à permettre d'étudier leurs interactions dans des populations de grandes tailles (minimisation du coût computationnel).

en la matière peut permettre un nouvel éclairage sur son processus de diffusion.

Dans la suite de ce chapitre visant à présenter une vue d'ensemble de la thèse et à introduire les résultats de modélisation, nous revenons tout d'abord sur les formes d'adaptation et de changement de l'agriculteur récemment mises en avant par la littérature pour en dégager les éléments saillants. Nous interrogerons ensuite les modèles individus-centrés proches de notre problématique de façon à déterminer leur pertinence au regard de nos éléments saillants. Nous dégagerons de ce travail les questions de modélisation. Nous présenterons ensuite les principes de la modélisation que nous proposons pour y répondre, ainsi que des dynamiques associées. De façon à mieux en appréhender les tenants et aboutissants, nous décrirons ensuite notre cas d'application : la conversion à l'agriculture biologique des éleveurs laitiers français. Nous poursuivrons par une synthèse de chacune de nos études d'impact au niveau de la population de nos choix de modélisation. L'ensemble de ce chapitre nous permettra donc incidemment de présenter les publications réalisées durant cette thèse objets des chapitres qui suivent. Le dernier chapitre synthétise nos résultats et les discute, de façon à en identifier les points forts et les limites. Nous pourrons alors, de ces limites, déterminer des perspectives de poursuite de notre travail.

## **Une vision récente de l'adaptation et du processus de changement**

La littérature récente identifie deux types d'adaptation à toutes échelles, mieux décrites comme des processus de changement au niveau des agriculteurs. Ces changements ont des caractéristiques différentes et correspondent à différentes situations. Deux paradigmes sont en effet parvenus aux mêmes conclusions pour ce qui est de l'évolution des individus : le paradigme d'adaptation ; et le paradigme d'étude des processus de changement des agriculteurs. Ces deux paradigmes mettent en avant deux formes différentes d'évolution, avec des définitions qui sont très proches pour ce qui est de l'évolution de l'individu. Nous avons participé à la rédaction d'une courte synthèse de cette littérature qui a fait l'objet d'une publication dans *Agricultural Sciences* (Huet, Rigolot et al. 2018). Cette publication constitue notre chapitre 2. Nous présentons plus en avant dans ce qui suit les éléments utiles à la compréhension de nos choix de modélisation. Ces éléments s'appuient sur la littérature citée dans notre chapitre 2 et sur quelques éléments classiques de la littérature sur les processus de décision présentés en Annexe A.

## **L'adaptation incrémentale et l'adaptation transformationnelle**

Le paradigme d'adaptation comprenait au départ uniquement une vision incrémentale. Cette vision d'adaptation est pertinente pour appréhender le changement dans un contexte dont les principaux éléments sont connus, et dans lequel l'impact d'un choix apparaît comme déterminable et contrôlable. Les récents bouleversements globaux ont toutefois rendu saillants un processus d'adaptation adopté pour faire face à un contexte changeant, et globalement perçu comme négatif lorsqu'il est pensé en termes d'adaptation incrémentale. Ce « nouveau » processus d'adaptation, appelé adaptation transformationnelle, est une démarche positive visant à trouver de nouvelles solutions, radicalement différentes et permettant une meilleure durabilité. Il a tout particulièrement été souligné en agriculture comme réponse au changement globaux, sociaux, économiques et environnementaux, par (Rickards et Howden 2012; Pelling, O'Brien, et Matyas 2015).

L'adaptation incrémentale est une extension de « ce qui est déjà fait » (Kates, Travis, et Wilbanks 2012). Elle renvoie à des actions dont l'objectif est de maintenir l'essence, l'intégrité et les valeurs des systèmes en place tout en améliorant leurs performances (Noble et al. 2014).

L'adaptation transformationnelle se distingue d'une adaptation incrémentale en changeant les attributs fondamentaux du système en place (Noble et al. 2014). (Kates, Travis, et Wilbanks 2012) ont identifié au moins trois classes d'adaptations transformationnelles: 1) celles qui sont adoptées à une échelle ou une intensité beaucoup plus grande ; 2) celles qui sont vraiment nouvelles dans une région donnée ou un système de ressources particulier ; et 3) celles qui transforment les lieux et la relation au travail. Ces dernières, auxquelles nous nous intéressons tout particulièrement, sont celles qui se situent au niveau de l'individu.

D'après ces définitions, l'adaptation transformationnelle implique non seulement des changements techniques radicaux, mais aussi des changements dans l'identité, et des changements d'organisation et de relations sociales (O'Brien et Hochachka 2010). (Dowd et al. 2014) ont montré que les adaptateurs transformationnels ont davantage de sources d'informations que les adaptateurs incrémentaux. Ils sont par ailleurs plus actifs pour la recherche d'information que les adaptateurs incrémentaux.



Le paradigme d'adaptation peut être appliqué à tous les niveaux de problème, comme la société, la nation, la région, l'institution, l'individu, etc. Pour mieux comprendre le changement de comportement des agriculteurs, nous nous focalisons sur l'adaptation transformationnelle au niveau de l'individu, mieux décrite dans ce qui suit par le concept de changement majeur. La définition de l'adaptation transformationnelle de l'individu proposée par (O'Brien et Hochachka 2010) est en effet très proche du concept de changement majeur proposé par (Sutherland, Burton, et al. 2012). Elles sont par ailleurs toutes deux pertinentes pour notre cas d'application, la conversion à l'agriculture biologique, puisque (Rickards et Howden 2012) la cite comme un cas classique d'adaptation transformationnelle, et (Sutherland, Burton, et al. 2012) l'utilise pour illustrer le changement majeur.

### **Le changement mineur et le changement majeur**

Comme le paradigme d'adaptation, le paradigme de changement propose deux types de changement : le changement mineur et le changement majeur (Sutherland, Burton, et al. 2012). (Sutherland, Burton, et al. 2012) distingue un changement majeur qui est caractérisé par un changement de trajectoire agricole, appelé transition par (Wilson 2006; R. J. F. Burton et Wilson 2006). Un changement mineur n'implique pas de transition. La dichotomie majeur/mineur est liée à la notion de trajectoire et de régimes. Deux phases, ou régimes, différent(e)s sont identifié(e)s pour étudier les deux types de changement : la phase de dépendance à la trajectoire et la phase transitoire.

(Sutherland, Burton, et al. 2012) différencient en effet les changements majeurs et mineurs au niveau de l'exploitation en mobilisant ces phases. Les changements mineurs se produisent de manière incrémentale dans une trajectoire de dépendance aux décisions passées de l'agriculteur. Dans cet état incrémental, les agriculteurs tentent d'améliorer leur satisfaction dans le même système. Parfois, en raison d'événements déclencheurs, l'agriculteur considère que le système actuel n'est plus en mesure de produire des résultats satisfaisants. Il perçoit alors le besoin d'un changement majeur (Sutherland, Burton, et al. 2012) que nous pouvons définir comme une phase transitoire entre deux phases de dépendance à une trajectoire. Le changement majeur est ainsi un changement de trajectoire.

Ces deux types de changements et la transition de l'un à l'autre sont intégrés dans les deux types de régime proposés par (Sutherland, Burton, et al. 2012) : le régime de

dépendance à la trajectoire pendant lequel seuls des changements mineurs se produisent; le régime transitoire qui est spécifique d'un changement majeur permettant de passer d'une phase stable de dépendance à une autre. Les processus associés à ces phases sont sensiblement différents :

- Le premier régime de dépendance aux trajectoires (« path dependency ») ne modifie pas les références, les valeurs ou les normes de l'agriculteur. Il correspond aux changements mineurs dans un contexte stable. L'agriculteur prend ses décisions notamment en se basant sur ses expériences. Plus il a d'expériences, moins il compte sur ses pairs ou sur des sources externes pour ses décisions. Les décisions de ce régime peuvent être de type stratégique, à long terme, mais elle n'implique pas une remise en cause de l'agriculteur sur son identité professionnelle et sa vision du monde.
- Le second régime, transitoire comme illustré par la figure 1, représente le changement majeur. Il implique une divergence par rapport à la norme en place et mène in fine à un changement de norme de référence. En effet, un changement majeur implique la réorientation d'une quantité considérable d'activités ou de ressources agricoles, par exemple en passant de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique ou autre activité de diversification. C'est très différent d'un changement mineur (Sutherland, Burton, et al. 2012). (Sutherland, Burton, et al. 2012) soutient que les changements majeurs ont tendance à se produire en réponse à des événements déclencheurs.

La plupart du temps, les individus, et plus particulièrement les agriculteurs, n'évaluent pas, ou en tout cas pas en tant que possibilité pour eux-mêmes, les possibilités qui se présentent à eux, qu'elles s'inscrivent ou non dans une autre norme que la leur (Schwenk 1988). Ceci est encore plus vrai si ces opportunités font référence à d'autres normes que la leur. Seuls des événements déclencheurs particuliers, qui peuvent être un ou plusieurs événements, amènent l'agriculteur à un état d'esprit impliquant un besoin d'un changement majeur (Sutherland, Burton, et al. 2012; Barbier, Cerf, et Lussion 2015; Alavoine-Mornas et Madelrieux 2014; Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976). Tel est par exemple le cas des crises répétées des prix du lait conventionnel qui a entraîné un « ras-le-bol » profond des agriculteurs et un fort désir de changement (Rogers 1995; Bély et Despeghel 2017).

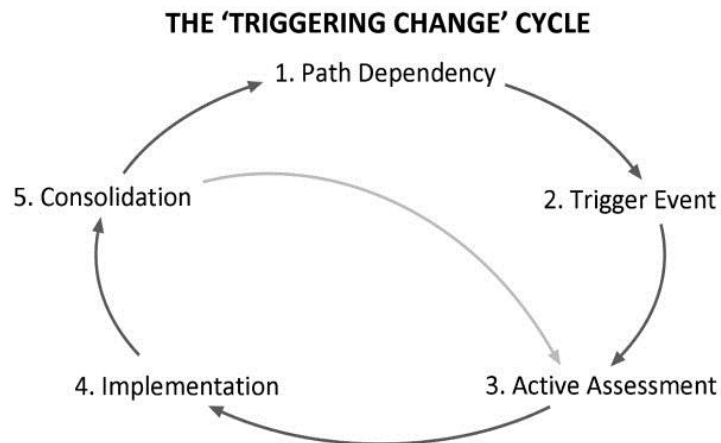


Figure 1. Régime de changement majeur (Sutherland, Burton, et al. 2012) allant d'un régime « Path Dependency » à un autre régime « Path Dependency »

Lorsque le besoin de changement profond est ressenti, l'agriculteur envisage alors un changement majeur, différent des changements s'inscrivant en cohérence avec sa norme d'appartenance. Cet état est si inconfortable que l'agriculteur doute de ses valeurs et de la norme de son groupe. Il s'ouvre alors aux différentes opportunités, options et façons alternatives de pratiquer l'agriculture. Il opte pour de nouveaux réseaux d'information et de nouvelles sources d'influence. Il considère que des changements mineurs, en cohérence avec son système courant, ne sont plus pertinents pour le maintien de son activité. Seul un véritable changement majeur, inconnu, peut apparaître comme une solution durable. Dès qu'il perçoit une opportunité fiable par rapport à sa situation courante, il change alors en se détournant de sa norme de référence et en s'attachant à développer des relations qui stabilise ses choix (Rogers 1995).

Allant plus loin, (Sutherland, Burton, et al. 2012) proposent que ce besoin de changement puisse être utilement formulé en termes de motivation pour rechercher activement des informations sur les changements possibles et les traiter. Pour ces auteurs, une telle motivation est conforme au « Likelihood Elaboration model » (Petty et Cacioppo 1986), arguant qu'un agent plus motivé fait plus d'efforts cognitifs pour traiter l'information de manière plus rationnelle. Le processus de décision pour ce genre de changement (i.e. changement majeur) est ainsi tellement coûteux en terme de temps, d'efforts cognitifs et affectifs (Petty et Cacioppo 1986; Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976) que les individus ne cherchent et ne comparent généralement pas plusieurs options simultanément. L'agriculteur ne considère donc

qu'une seule option de changement majeur à la fois. Il commence à évaluer et à tester la nouvelle option.

L'agriculteur peut aussi revenir au premier régime sans avoir effectué de changement majeur, si de nouvelles informations le rassurent sur sa situation courante (Deffuant, Huet, et Amblard 2005; Feola et Binder 2010; Öhlmér, Olson, et Brehmer 1998; Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976; Ajzen 1991; Rogers Everett 1995).

Le changement majeur effectué, son intérêt confirmé, l'agriculteur sort du régime de transition et revient au premier régime (régime de « path dependency »). Il a toutefois entre temps effectué un changement de vision du monde, changement qui implique une redéfinition de la hiérarchie de ses valeurs, de son identité professionnelle.

De même que (Sutherland, Burton, et al. 2012), (Gasson 1973; Schultz 2001; Mzoughi 2011; Dam, Nizet, et Streith 2012) soulignent l'importance des valeurs pour le comportement d'un individu. D'après ces chercheurs, les valeurs personnelles définissent la façon de voir le monde et d'évaluer les autres. Elles sont stables, en tant que l'environnement est stable car pertinente pour celui-ci. Elles représentent l'identité personnelle. (Öhlmér, Olson, et Brehmer 1998) soulignent ainsi que « les valeurs permettent de qualifier des résultats, des situations, des choses tandis que les buts expriment le moyen de suivre les valeurs ». Les valeurs expriment le besoin et les motivations des agriculteurs. La motivation et les raisons du comportement individuel concernent le processus qui modère la satisfaction et l'actualisation des besoins ou motivations (van Veldhoven 1988). La reconnaissance des besoins insatisfaits est un facteur qui active et stimule la motivation. Quand un individu, en contexte changeant et incertain, parvient à un état de fort besoin de changement, il va commencer à douter de ce qui est important pour lui, et éventuellement changer son identité/ses valeurs.

Ces visions du changement, que nous pouvons voir comme une vision unique de deux types de changements différents qu'il faut situer l'un par rapport à l'autre dynamiquement, soulignent l'importance de la prise en compte du temps, de la trajectoire des individus et des systèmes. Ce temps est en effet encore souvent négligé dans les problématiques de prise de décision, la dynamique temporelle n'étant pas le centre d'attention principal (Garcia et al. 2005; Gladwin 1989). Soutenant ce point de vue, (Lamine et Bellon 2009; Darnhofer et al. 2010) évoquent le manque d'études sur la conversion à l'agriculture biologique en tant que trajectoire des agriculteurs et

soulignent le peu d'exemples de telles études, comme (Boisdon et al. 2013; Dockès et al. 2013b; Brédart et Stassart 2017).

## **Modèles dynamiques pertinents pour l'étude du processus de changement des agriculteurs**

Notre objectif est, au vu de la littérature sur l'adaptation, de modéliser les deux types de changements identifiés et leur articulation, de façon à déterminer si une pratique réputée plus durable, telle que l'agriculture biologique, peut se diffuser au sein d'une population d'agriculteur.

(Feola et Binder 2010) soulignent la nécessité d'un cadre dynamique de modélisation pour mieux comprendre le changement en agriculture. (Darré, Le Guen, et Lemery 1989; Barbier, Cerf, et Lusson 2015) argumentent aussi qu'il faut regarder les agriculteurs ensemble dans leur réseau social ou leur groupe, et prendre en compte la dimension collective de la dynamique des changements techniques. L'importance du temps, de l'individu, des interactions entre individus, et notre objectif d'étude de la distribution globale des modes de production, ont guidés notre choix de modèle. Une modélisation basée sur des agents (Goldstone et Janssen 2005), ou modélisation individu-centrée<sup>2</sup> (Grimm 1999) semblent pertinentes et bien adaptées à l'étude de cette dynamique des agriculteurs. De tels modèles, s'intéressant aux changements des agriculteurs, et plus particulièrement à notre cas d'application, la conversion à l'agriculture biologique, existent déjà. Nous les présentons ici rapidement en soulignant leur lien avec les deux types de changements identifiés.

### **Projet IMAGES inspiré de la Théorie de la Diffusion d'Innovation (Deffuant, Huet, et al. 2002; Deffuant, Huet, et Amblard 2005)**

Un des premiers modèles « agents » en la matière est le modèle IMAGES (Deffuant, Huet, et al. 2002; Deffuant, Huet, et Amblard 2005) qui visait à étudier la diffusion de mesures agro-environnementales (MAE) dans différents pays européens. Il s'inscrit

---

<sup>2</sup> Les « individus » diffèrent toutefois des agents des modèles à base d'agents. Ils sont plus simples quant à leur capacité cognitive, de façon notamment à permettre d'étudier leurs interactions dans des populations de grandes tailles (minimisation du coût computationnel).

dans le courant des modèles de diffusion d'innovation. Dans ce modèle, un agriculteur décide d'investir dans une évaluation rationnelle du bénéfice économique de l'adoption d'une MAE seulement lorsque son intérêt social général pour ce changement a atteint un certain seuil. Cette hypothèse a été inspirée par des situations réelles recueillies lors d'entretiens avec les agriculteurs à l'époque du projet (entre 1997 et 2001), ou encore en 2007 lors des enquêtes « agriculteurs » réalisées auprès des agriculteurs des pays de l'Est dans le cadre du projet européen IDARI<sup>3</sup>. A cette époque, l'agriculture biologique n'avait que peu d'intérêt économique, et les agriculteurs biologiques étaient une très petite minorité, négativement perçue par les autres agriculteurs. Dans le modèle, l'intérêt général d'un agriculteur pour l'agriculture biologique est une opinion influencée par les individus qui ont une opinion suffisamment similaire.

(Deffuant, Huet, et Amblard 2005) s'inspirent de la théorie de la diffusion d'innovation (Rogers 1983). Ils considèrent l'influence sociale sur l'opinion d'intérêt général comme la clé pour entrer dans le processus de décision. Les agriculteurs ne considèrent pas vraiment l'innovation tant que leur opinion sociale n'est pas suffisamment élevée. Si l'opinion initiale sur le changement est négative ou faible, l'agriculteur n'envisage pas d'évaluer l'adoption de l'innovation pour sa propre exploitation. Il peut donc ne jamais évaluer pour lui l'intérêt économique de la conversion pour sa propre exploitation. L'adoption dans ce modèle dépend donc tout d'abord de la distribution de l'opinion d'intérêt général dans la population, puis si elle est suffisamment bonne, du résultat de l'évaluation économique de la conversion. Cette évaluation est le résultat d'une comparaison entre le gain économique courant et le gain économique en cas de conversion.

Le processus de changement dans ce modèle peut être bloqué ou stoppé par une mauvaise évaluation sociale de l'innovation. L'enjeu premier d'entrée ou de sortie dans le processus de changement n'est donc pas celui du changement majeur : le modèle ne s'intéresse pas au fait que le décideur perçoit, ou ne perçoit pas ou plus, la situation

---

<sup>3</sup> IDARI (QLK5-CT-2002-02718): Integrated Development of Agricultural and Rural Institutions (IDARI) in Central and Eastern European Countries

actuelle comme un problème.

Dans IMAGES, l'intérêt social général d'un agriculteur est influencé par ses discussions avec ses pairs. Dans la dynamique choisie, cette influence est conditionnée par un niveau de proximité dans les opinions (Deffuant, Huet, et al. 2002). Un agriculteur peut donc garder une opinion différente de la majorité de ses pairs. Ceci signifie qu'il peut adopter une stratégie d'agriculture alternative s'il a une forte opinion positive sur l'alternative, même s'il est isolé dans son réseau social et intégré dans un contexte local qui a une opinion négative sur sa nouvelle stratégie. Ce résultat va à contrario des données et de la littérature. Les données des projets européens IMAGES et IDARI, et la théorie de la diffusion de l'innovation (Rogers 1983) affirment en effet qu'un agent converti change ses relations afin de renforcer son choix et de rester bien informé sur sa nouvelle pratique. Ainsi, au lieu de maintenir la même relation étroite avec ses pairs qu'auparavant, il se connecte à d'autres agriculteurs ayant déjà adopté sa nouvelle pratique. De plus, dans le modèle IMAGES, ni la situation économique actuelle d'une exploitation, ni la satisfaction d'un agriculteur vis-à-vis de sa pratique actuelle, n'ont d'impact sur la motivation à évaluer sérieusement la stratégie alternative. Contrairement au processus de changement majeur, le processus de décision de l'agriculteur d'IMAGES n'est pas initié par la prise de conscience d'un besoin de changement profond.

### **Couplage de la Théorie de l'Action Raisonnée et d'IMAGES (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009)**

Les principes du modèle IMAGES sont similaires à ceux d'un certain nombre de théories en psychologie sociale, et notamment ceux de la Théorie de l'Action Raisonnée (TRA) (Ajzen et Fishbein 1975) et de la Théorie du Comportement Planifié (TCP, (Ajzen 1991)) (voir présentation en annexe A, et plus loin dans ce chapitre). (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009) ont couplé les principes de l'influence sociale du projet IMAGES à ceux de la TCP. Ils proposent ainsi une version dynamique de la norme subjective de la TCP. Celle-ci est rendue dynamique en utilisant le modèle d'influence sociale sur les opinions d'intérêt général d'IMAGES (Deffuant, Huet, et al. 2002). Leur modèle est initialisé par des données recueillies lors d'enquêtes pour initialement calibrer le modèle de la TCP. La situation courante n'est pas prise en compte. En plus, l'attitude personnelle et le contrôle comportemental perçu sont statiques.

## **Modèle pour le changement mineur (Martin-Clouaire 2017)**

(Martin-Clouaire 2017) explique que la plupart des études ne considèrent pas la dynamique du processus par lequel les actions sont décidées dans des situations spécifiques. Pour dépasser cette limite, il propose un cadre pour la modélisation d'une prise de décision opérationnelle en agriculture. Ce cadre réconcilie trois approches décisionnelles cognitives séminales en proposant une architecture révisée de « croyance (belief), désir et intention » (appelé communément BDI pour Beliefs, Desire, Intention). Les croyances d'un agent sont les informations que l'agent possède sur l'environnement et sur d'autres agents qui existent dans le même environnement. Les désirs d'un agent représentent les états de l'environnement, et parfois de lui-même, que l'agent aimerait voir réalisés. Les intentions d'un agent sont les désirs que l'agent a décidé d'accomplir ou les actions qu'il a décidé de faire pour accomplir ses désirs.

Le rôle clé des heuristiques est incorporé en donnant la possibilité de mettre en œuvre le contrôleur de processus « decision ladder » proposé par (Rasmussen 1976), ou les protocoles de décision « recognition-primed » (Klein 1997), de façon à représenter les différentes manières dont les gens décident (c'est-à-dire selon un processus exigeant plus ou moins de raisonnement, d'efforts cognitifs, et/ou selon leur expérience en tant que norme tacite leur permettant d'accéder rapidement à des solutions satisfaisantes, démontrées comme empiriquement valides pour soi par le passé).

Ce cadre structure le comportement décisionnel dans un ensemble de processus cognitifs tels que la perception, l'interprétation, le raisonnement des objectifs, la planification et le jugement pour modéliser une dynamique d'adaptation d'un agriculteur (Martin-Clouaire 2017).

La vision de (Martin-Clouaire 2017) sur la prise de décision est particulièrement pertinente pour les questions d'adaptation. Bien qu'envisageant deux modes de décision, son modèle reste cependant essentiellement axé sur les changements mineurs (adaptations incrémentales), comme la plupart des modèles de prise de décision des agriculteurs. En effet, (Martin-Clouaire 2017) identifie lui-même deux limites principales à son cadre : 1) une faible représentation de l'apprentissage ; et 2) une vision restrictive de l'agriculteur en tant qu'agent unique, accordant peu d'attention aux relations sociales. Ces deux éléments faibles (apprentissage et relations sociales) sont précisément des éléments cruciaux pour modéliser ces adaptations.



Outre ces faiblesses, les changements induits par une adaptation transformationnelle, et plus particulièrement ceux ayant trait à l'identité et aux valeurs des individus ne sont pas pris en compte.

### **Autres modèles « agents » du changement de l'agriculteur et modèles d'influence sociale**

(Olabisi, Wang, et Ligmann-Zielinska 2015) proposent un modèle exploratoire à base d'agents avec un réseau social abstrait pour expliquer l'adoption d'une pratique par des agriculteurs. Dans leur modèle, à l'initialisation, les agents paysans sont distribués au hasard dans un espace social. Deux agents ayant une petite différence sociale peuvent transmettre des informations. Cependant, le réseau social est statique.

(Deffuant, Carletti, et Huet 2012; S. Huet et Deffuant 2015) proposent un modèle complémentaire d'influence sociale dans lequel l'influence d'un agent sur un autre ne dépend pas de la différence entre leurs opinions ou croyances, mais de la crédibilité qu'un agent accorde à un autre agent. Cette crédibilité dépend du niveau d'estime que l'agent accorde à l'autre agent. L'estime se fonde dans ce modèle sur la différence entre l'opinion que l'agent a de l'autre agent, et l'opinion qu'il a de lui-même. Nous verrons que notre modélisation reprend, pour déterminer l'influence des pairs, à la fois ce concept de crédibilité et le concept d'homophilie (i.e. similarité) classiquement utilisé.

De notre revue des modèles existants, nous remarquons que globalement les modèles ne considèrent qu'un seul type de changement. Ils varient toutefois en focalisant plus ou moins sur la dimension cognitive du processus de décision (niveau d'effort cognitif), ou la dimension sociale du processus (interactions avec leur pair). Sauf (Martin-Clouaire 2017), aucun d'entre eux ne postule réellement de deux types de changement qui s'imbriqueraient et feraient appel à différentes heuristiques cognitives et sociales. Aucun d'entre eux n'apparaît réellement pertinent pour le changement majeur : ils ne prennent pas en compte un niveau de satisfaction pour la pratique courante pour s'engager dans une réflexion sur un changement profond, identitaire, en désaccord avec sa norme et impliquant un changement de vision du monde. Ils ne considèrent, pour la plupart, l'adoption d'une pratique, que comme une opportunité qui peut être facilement saisie une fois qu'elle est valorisée socialement et viable économiquement. Un tel type de changement s'apparente plutôt à un changement mineur. Il s'agit en effet de changements qui s'inscrivent de façon cohérente dans le parcours de pratiques

de l'individu, et apparaissent comme une amélioration dans la continuité de la norme dominante.

Nous proposons donc une nouvelle modélisation visant à dépasser ces limites et à intégrer les connaissances récentes issues de la littérature en matière d'adaptation ou de changement.

## **Les principes de notre modélisation individu-centrée**

Notre recherche porte sur l'intégration au sein d'un modèle individu-centré des deux types de changements : mineur et majeur. Il requiert la prise en compte, au sein de ce modèle intégré, des caractéristiques identifiées des changements de pratiques en agriculture, et l'utilisation au mieux des principes des modèles dynamiques existants et des théories de référence.

Nous proposons un cadre intégrateur des deux types de changements identifiés : mineur et majeur. Le cadre, fortement résumé dans le chapitre 2 présentant l'article (Huet, Rigolot et al. 2018), est présenté ici plus en détail. Plus précisément, cette section présente tout d'abord un modèle conceptuel intégrateur des changements mineurs et majeurs. Elle s'attache ensuite à formaliser plus avant, tant les dynamiques de changements mineurs et majeurs, que les conditions de passage d'un type de changement à l'autre.

## **Modèle conceptuel intégrateur des deux types de changement**

Notre modèle conceptuel intégrateur pour la modélisation du changement est illustré en figure 2. Le cadre conceptuel se compose de deux boucles imbriquées considérant nos deux types de changement possibles, changement majeur et changement mineur. Le changement majeur est un changement profond d'orientation, un changement de stratégie d'agriculture impactant l'identité de l'agriculteur. Le changement mineur correspond à de petits changements réguliers qui portent sur les pratiques.

La plupart du temps, l'individu reste dans la boucle de changement mineur (la boucle bleue de la figure 2) et fait évoluer ses pratiques sans se remettre en cause du point de vue normatif. Il évalue régulièrement sa situation courante. S'il est satisfait, il reste dans sa stratégie courante sans remettre en cause son identité (relations sociales, valeurs

morales, ...). Lorsqu'il est insatisfait de la situation actuelle du fait d'une accumulation d'insatisfaction (son insatisfaction dépasse un seuil), l'individu est en rupture et prend conscience d'un besoin de changement profond.

Il remet alors en cause l'orientation majeure qu'il a adoptée et commence à s'intéresser à d'autres façons de se définir professionnellement et de satisfaire à ses besoins. Il s'attache à évaluer des stratégies jusqu'ici non perçues du fait de leur inconsistance avec les normes en place et avec ses valeurs morales (ie ce qui est plus ou moins important pour l'agriculteur) desquelles elles découlent. Après la phase de réflexion, si la stratégie alternative n'est pas suffisamment intéressante par rapport à la situation courante, l'individu reste dans la stratégie courante. Ce retour montre aussi que le processus de décision n'est pas linéaire, il peut y avoir des retours (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976). Si la stratégie alternative est suffisamment meilleure, l'individu change de stratégie. Le choix de la stratégie implique des valeurs personnelles et des pratiques particulières. Un changement de stratégie peut donc impliquer des changements de pratiques si celles-ci ne sont pas cohérentes avec la nouvelle stratégie. Ce changement de stratégie est un changement majeur.

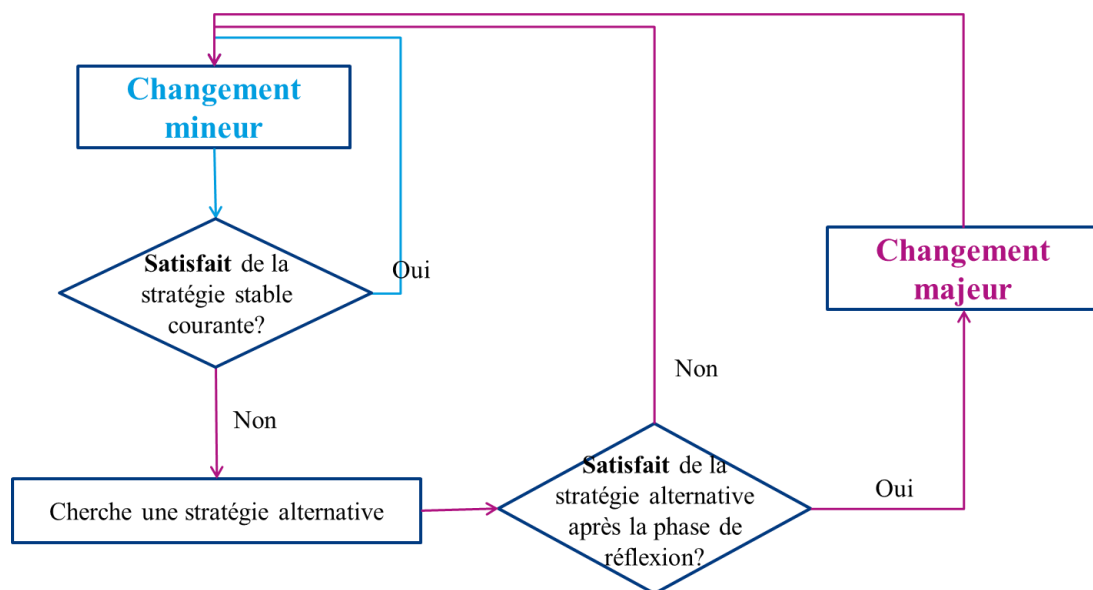


Figure 2. Modèle conceptuel de changement de pratiques agricoles

L'état stable de l'individu correspond à la boucle bleue « changement mineur » de la figure 2. Une fois que l'individu sort de la boucle interne de satisfaction courante, il est dans une phase transitoire qui correspond au processus de changement majeur (boucle violette). Pendant la phase stable, l'individu n'évalue que sa satisfaction de la

situation courante (ie stratégie courante) et ne considère pas d'autres stratégies. Par contre, quand l'individu est dans la phase transitoire, il évalue également sa satisfaction potentielle pour une stratégie alternative trouvée dans un media, ou observée par lui dans la population.

Une caractéristique importante de notre modèle est liée au processus de décision intégrant le concept de changement majeur. Les changements majeurs ne sont pris en compte que dans certaines situations critiques, car les différents coûts impliqués (économiques, cognitifs, émotionnels, etc.) sont très élevés. En dehors de ces situations critiques, les acteurs ne songent pas à changer leurs orientations majeures, ni la façon dont ils les hiérarchisent. Dans une période stable, si un agriculteur est assez satisfait de sa stratégie agricole actuelle, il n'en envisage pas d'autres. Seul un certain niveau de frustration impliquant une insatisfaction forte de sa stratégie courante incite un agriculteur à envisager un changement majeur en évaluant une alternative à sa stratégie courante.

Un changement mineur correspond à de petites modifications de pratiques. Il se fait sur une base décisionnelle heuristique simple, peu coûteuse cognitivement (copie des pratiques des pairs selon une intensité dépendant de leur similarité et de leur crédibilité). Il est détaillé dans la sous-section suivante. Ce processus mimétique entraîne une convergence locale des pratiques. Un changement majeur correspond à un changement de stratégie. Il implique un processus de décision coûteux cognitivement, réflexif, nécessitant la détermination de la satisfaction vis-à-vis d'une situation effective ou possible. La décision est prise en rationalité limitée. Un changement majeur modifie la hiérarchie d'importances accordées aux dimensions d'évaluation du mode de production. En conséquence, l'éleveur change sa façon d'évaluer les autres et leurs pratiques. Un changement majeur amène ainsi à une nouvelle vision du monde de l'éleveur.

Notre cadre posé, nous en avons proposé une instanciation pratique en termes de dynamiques. Elle fait l'objet de la sous-section suivante.

### **Modèle dynamique associé au modèle conceptuel pour l'étude de la dynamique de changement des agriculteurs**

Cette sous-section présente les réponses aux questions de recherche proposées dans

la version la plus aboutie du modèle dynamique. Le modèle a en effet évolué du fait de ses implémentations plus ou moins fondées sur les données.

Nous commençons par une définition des concepts principaux du modèle avant de décrire plus avant le modèle de changement mineur, puis le processus de changement majeur. La formalisation mathématique de ces dynamiques est présentée plus en détail dans les articles des chapitres 3, 4 et 5.

## **Terminologie**

Commençons tout d'abord par définir les termes utilisés pour représenter les concepts mobilisés par le modèle.

- **Dimension** : une dimension est un axe de définition identitaire servant de base pour l'évaluation d'une pratique. Nous postulons, en accord avec notre état de l'art, qu'un agriculteur se définit majoritairement selon deux dimensions : une dimension productive, appelée plus loin « production », correspondant à une fonction nourricière (du monde, de la famille, ...), et une dimension environnementale, appelée plus loin « environnement », correspondant à une fonction de jardinier de la Terre (Stock 2007). Le modèle autorise toutefois à considérer davantage de dimensions d'évaluation.
- **Importance** : chaque dimension a une importance plus ou moins forte pour l'agriculteur. Cette importance traduit ses valeurs morales. La façon dont les dimensions sont hiérarchisées en termes d'importance traduit le compromis de l'individu entre ses valeurs morales et une vision du monde lui permettant de s'évaluer de façon satisfaisante. Nous faisons l'hypothèse que la somme des importances données aux dimensions est une constante. Les importances qu'un agriculteur donne à ses dimensions d'évaluation ne changent que quand il change sa stratégie.
- **Stratégie** : la stratégie dans notre approche représente la façon dont l'agriculteur hiérarchise, en termes d'importance, les dimensions sur lesquelles il s'évalue et évalue les autres.
- **Pratique** : la pratique est représentée dans le modèle par les résultats qui lui sont associés pour chacune des dimensions de son évaluation. Elle est donc, dans notre vision simplifiée, représentée directement par sa performance et sa production sur chacune des dimensions sur lesquelles l'agriculteur s'évalue et est évalué. Dans la

suite, nous appelons performance totale, et résultat total, les performances sur l'ensemble des dimensions d'évaluation d'une part, les productions sur l'ensemble des dimensions d'évaluation d'autre part.

- **Crédibilité:** la crédibilité caractérise les relations entre les agriculteurs. Tous les agriculteurs d'une région simulée sont des pairs visibles. Un agriculteur accorde une crédibilité à chacun de ses pairs. La crédibilité attribuée à un pair particulier est liée à l'évaluation de la qualité de sa pratique. Plus la production d'un agriculteur est forte par rapport à un autre agriculteur, plus la crédibilité accordée à cet agriculteur par cet autre agriculteur est forte.
- **Exploitations similaires :** deux exploitations sont similaires si elles sont jugées comparables par les deux agriculteurs qui les exploitent. Une fonction de distance permet de quantifier le degré de similarité. La similarité d'exploitation est requise pour permettre l'influence des pratiques entre agriculteurs d'une part, et le recueil d'information sur la satisfaction liée à l'adoption de la stratégie alternative d'autre part. L'influence des pratiques qui mène à reproduire les performances de la source d'influence n'a de sens que si les exploitations sont suffisamment proches en termes de descriptions et de contraintes (par exemple : taille, localisation, ...). De même, une information sur la satisfaction liée à l'application d'une stratégie alternative, n'est intéressante pour l'agriculteur qui s'informe, que s'il est susceptible d'obtenir une satisfaction similaire avec son exploitation.

### **Spécificités des changements mineurs et majeurs**

En cohérence avec leurs définitions issues de la littérature, les changements mineurs et majeurs de notre modèle ont leurs spécificités que nous décrivons ici plus en détail.

#### *Spécificité du changement mineur*

C'est un processus de décision basé sur une heuristique relativement simple et avec un coût cognitif relativement faible. Les individus influents sont les seuls individus similaires jugés plus crédibles car plus compétents. Il s'agit d'un mimétisme prenant en compte une crédibilité.

#### *Spécificité du changement majeur*

C'est un processus plus compliqué. Il a trois caractéristiques principales :

- Il implique un changement de hiérarchie des valeurs, i.e. de ce qui est important pour l'individu.
- Il est déclenché par une insatisfaction forte, entraînant un besoin de changer profondément. Cette insatisfaction s'inscrit dans le temps et se fonde sur la mémoire des résultats passés.
- Il engendre un processus de décision qui est beaucoup plus coûteux et engageant cognitivement, surtout pour ce qui concerne l'évaluation de la stratégie alternative supposée inconnue. Il implique le calcul de deux satisfactions différentes basées sur une réflexion sur ce qui est important, l'évaluation des résultats et des normes en place. Il entraîne un changement des individus considérés comme des sources d'information fiables et compétentes.

Nous décrivons à présent plus en détail la dynamique des changements mineurs et majeurs.

### **Le changement mineur**

Pour (Darré 1985), les agriculteurs co-construisent leurs pratiques au sein de leur réseaux sociaux et participent ainsi fortement du changement technique. Nous avons donc fondé le changement mineur sur un processus d'imitation des pratiques des pairs, à condition que ces pairs soient jugés crédibles et qu'ils aient des exploitations agricoles jugées similaires. Nous proposons un modèle dans lequel la crédibilité accordée aux pairs dépend de leur résultat associé à leur pratique de production, sachant que ce résultat n'est pas indépendant de la crédibilité (qui participe de la mise à jour de la performance des pratiques). Cette boucle rétroactive mène donc nos agriculteurs à avoir des résultats totaux similaires lorsqu'ils possèdent des exploitations ayant des caractéristiques proches (par exemple la Surface Agricole Utiles, le nombre de vaches, le quota comme c'est le cas dans les applications présentées plus loin, mais aussi l'altitude, la nature de sols, ...).

*Crédibilité des pairs (cf section « Dynamics » dans « Material and Methods » des chapitres 3, 4 ou 5)*

La crédibilité qu'un agriculteur donne à un autre agriculteur dépend de la distance entre ses résultats totaux et ceux de l'autre agriculteur en considérant l'importance donnée à chacune des dimensions définissant la pratique. Elle est donc fondée sur une

appréciation de la compétence relative d'autrui.

En effet, comme argumenté par la théorie de la diffusion d'innovation (Rogers 1983), l'agent essaye perpétuellement de diminuer son incertitude sur sa pratique et ses choix. Il établit donc des relations plus fortes et proches avec les pairs qui lui semblent les plus compétents.

En pratique, pour un agriculteur  $a$ , si le résultat de la pratique d'un tiers  $t$  est inférieur au sien,  $a$  lui accorde peu de crédibilité. Si au contraire les résultats de  $a$  sont inférieurs à ceux de  $t$ ,  $a$  accorde une forte crédibilité à  $t$ . La crédibilité que  $a$  accorde à  $t$  suit une fonction sigmoïdale qui prend la valeur 0,5 lorsque les résultats de  $a$  et  $t$  sont identiques. Elle tend vers 0 lorsque les résultats de  $a$  sont bien meilleurs que ceux de  $t$ , et vers 1 lorsque les résultats de  $a$  sont bien pires que ceux de  $t$ .

*Evolution des pratiques par un mimétisme moyen des pratiques crédibles des exploitations similaires (cf section « Dynamics » dans « Material and Methods » des chapitres 3, 4 ou 5)*

Dans le modèle, les pratiques d'un agriculteur, ou plutôt ses résultats totaux, sont mis à jour en les comparant aux pratiques des autres agriculteurs du même type. Une fonction de similarité est introduite pour déterminer si deux exploitations peuvent être jugées du même type. Le contenu de cette fonction dépend de l'application. L'agriculteur change sa pratique sur la base de la somme pondérée par la crédibilité des pairs, des distances entre sa pratique et celles de ses pairs du même type, sur les dimensions décrivant sa pratique. Ce processus entraîne une uniformisation locale des pratiques pour un même type d'exploitation, du fait de la « copie », ou imitation des pratiques des pairs similaires et crédibles. Il traduit la co-construction des pratiques locales mise en avant par (Darré, Le Guen, et Lemery 1989).

En conclusion, l'évolution de pratique change la différence de pratique perçue entre les pairs, et donc la crédibilité qu'ils s'accordent. Le réseau d'individus influents un agriculteur est, de ce fait, dynamique. Cette différence perçue de la distance renvoie aux importances que l'individu accorde à chaque dimension d'évaluation de pratique. La distance de pratique considérée n'est en effet pas la distance brute sur les dimensions d'évaluation, mais la distance perçue car la distance brute est pondérée par l'importance de chacune des dimensions d'évaluation. Nous voyons dans la suite que le processus de changement majeur peut changer ces importances, et donc



modifier davantage le réseau d'individus perçus comme compétents. Ce caractère dynamique des individus jugés crédibles participe du changement de norme d'un agriculteur qui, changeant de source d'influence, change sa vision du comportement normatif.

### **Le changement majeur**

Comme nous l'avons vu précédemment, la décision de changement majeur est prise différemment de celle du changement mineur. Elle se fonde sur le calcul d'une satisfaction pour la situation courante, et d'une satisfaction potentielle pour la situation alternative (ce dernier calcul n'étant effectué que lorsque la satisfaction pour la situation courante est insuffisante). Rappelons pour des raisons de clareté que le changement majeur est appelé changement de stratégie dans le modèle.

#### *Période de réflexion*

Lors d'un changement majeur, l'importance donnée à chaque dimension du résultat de pratique représente l'identité d'un agriculteur, c'est sa valeur personnelle ; la crédibilité représente son réseau social. A part l'identité et le réseau social d'un agriculteur, il y a aussi deux durées importantes pour caractériser le changement majeur concernant la stratégie à appliquer sur l'exploitation : la durée de la phase de réflexion et la durée de la phase de confirmation, comme indiqué sur la figure 2.

(Sutherland, Burton, et al. 2012; Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976; Moser et Ekstrom 2010) nous confirment qu'un changement majeur est très coûteux et demande un fort engagement affectif et cognitif. Il implique donc une phase de réflexion plus ou moins longue avant l'éventuelle réalisation du changement. Dans notre modèle, le changement est conditionné par une durée minimale de l'état d'insatisfaction qui correspond à la phase de réflexion.

(Rogers 1983), de son côté, met en évidence une phase de confirmation après avoir adopté un comportement. Pendant cette période, l'agent biaise le traitement des informations et/ou le choix de ses interlocuteurs en faveur du comportement qu'il vient d'adopter, de façon à lui permettre de se renforcer dans ses choix, de mieux connaître ce nouveau comportement et de diminuer son incertitude. Dans notre modèle, l'agriculteur qui vient de changer de stratégie ne considère pas un nouveau

changement de stratégie pendant une durée à paramétrer.

Le changement de stratégie (équivalent à un changement majeur pour nous) modifie l'importance donnée à chaque dimension de pratique. Le réseau social est ainsi changé car la crédibilité est basée sur la distance perçue de pratique (ie la distance pondérée par l'importance sur chaque dimension d'évaluation). En conséquence, l'agriculteur a tendance à développer des relations plus fortes et proches avec les pairs ayant la même stratégie que la sienne.

*Calculer la satisfaction pour entrer ou non dans le processus et évaluer le changement*

Nous avons vu précédemment que c'est la fonction de satisfaction qui fait évoluer le processus de changement vers un changement mineur ou majeur. Cette fonction est construite en s'appuyant sur la Théorie de l'Action Raisonnée (TRA) (Ajzen et Fishbein 1975).

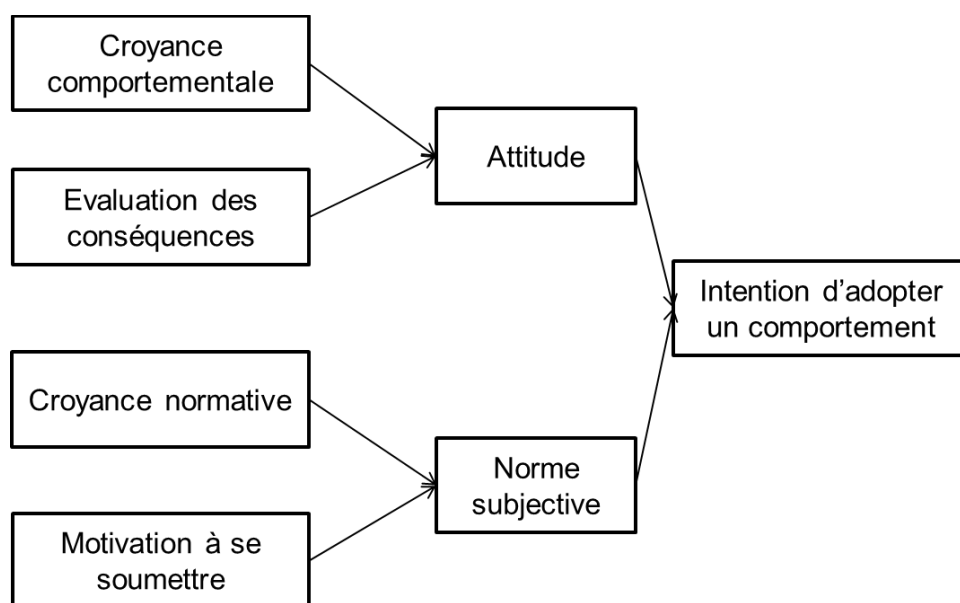


Figure 3. TRA original (Ajzen et Fishbein 1975)

La TRA propose un modèle statique pour prédire l'intention d'adopter un comportement. Comme montré sur la figure 3, dans le cadre de ce modèle, l'intention est la somme pondérée de deux déterminants conceptuels: l'attitude de l'individu envers le comportement à effectuer, et la norme subjective relative à ce comportement. La pondération est déterminée en pratique par une régression basée sur des résultats

d'enquête. Cette théorie est également présentée en annexe A.

Le changement de stratégie est fortement déterminé par la satisfaction des stratégies. Les deux dimensions du résultat de pratique sont des déterminants de la fonction de satisfaction d'un individu. La satisfaction de l'agriculteur dépend de ses valeurs, c'est à dire de l'importance accordée aux dimensions descriptives de la pratique. Ces valeurs lient pratiques et identité de l'agriculteur en termes de consonance ou de dissonance.

Dans notre modèle (figure 4), la satisfaction d'une stratégie est assimilée à l'intention de la TRA originale. La stratégie peut être celle courante, ou la stratégie alternative. En cohérence avec la TRA, la satisfaction dépend de l'attitude (évaluation personnelle) et de la norme subjective (évaluation par les pairs). Dans le modèle, la satisfaction est la moyenne de ces deux éléments. Nous faisons ici l'hypothèse que chaque élément de la TRA a le même poids dans la détermination de la satisfaction. Nous avons décomposé ces deux éléments du calcul de la satisfaction d'une manière similaire à celle dont ils sont décomposés dans la TRA. Cette décomposition nous permet par ailleurs de rendre « notre » TRA « dynamique », puisque les éléments à la base du calcul de l'attitude et de la norme subjective sont eux-mêmes dynamiques dans notre modèle.

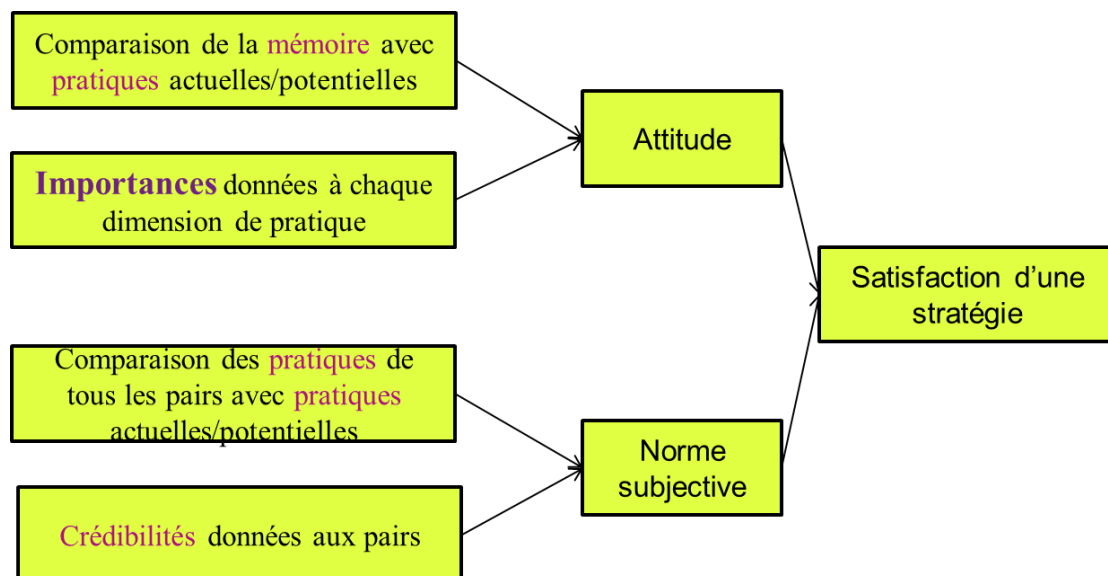


Figure 4. Utilisation des principes de la TRA dans notre modèle pour calculer la satisfaction

- **Attitude de notre modèle ou évaluation personnelle**

Chaque agent a une mémoire pour stocker ses expériences des pratiques. Le modèle a une fenêtre de mémoire pour calculer la moyenne des pratiques. (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976; Öhlmér, Olson, et Brehmer 1998) soutiennent que les pratiques antérieures d'un agriculteur sont un facteur extrêmement influent de sa décision d'adopter une pratique future.

L'évaluation personnelle, appelée « attitude » dans la théorie, a deux composantes pour chacune des dimensions de son évaluation : la croyance basée sur l'expérience et l'importance accordée à la dimension d'évaluation. Pour chaque dimension, les croyances sont pondérées par l'importance. L'attitude d'un agriculteur concernant une pratique à évaluer est la différence entre les résultats totaux<sup>4</sup> de la pratique courante et les résultats totaux passés mémorisés alors qu'il avait la même stratégie. La pratique à évaluer dépend de la stratégie qui est évaluée. Si la stratégie évaluée est la stratégie courante, la pratique courante est la pratique de l'année en cours. Si la stratégie à évaluée est la stratégie alternative, son mode d'évaluation dépend de l'origine des informations qui la concerne.

- Si l'information est recueillie auprès des agriculteurs similaires qui ont déjà optés pour cette stratégie alternative, la pratique courante prend pour valeur la pratique moyenne des pairs similaires appliquant la stratégie alternative. L'hypothèse est ici faite que l'éleveur n'a aucune information en mémoire sur la stratégie alternative, ou que s'il en a, il ne l'utilise pas, la considérant comme obsolète.
- Si l'agriculteur ne trouve aucun pair similaire doté de la stratégie à évaluer, il s'informe auprès des médias et la pratique courante à évaluer est alors la pratique de la stratégie alternative telle que quantifiée dans les médias.

Une évaluation positive traduit une amélioration des résultats de l'éleveur. Une évaluation négative correspond à une détérioration des résultats.

Les différences entre les résultats totaux de la pratique sont perçues de façon variable

---

<sup>4</sup> Pour mémoire, résultats totaux correspond à de productions de matières agricoles, et productions environnementales

par les agriculteurs en fonction de l'importance qu'ils accordent aux dimensions d'évaluation. Ainsi, un agriculteur appliquant une stratégie environnementale, et donc estimant la dimension « environnement » plus importante que la dimension « production », donnera peu d'importance à une différence moyenne sur la dimension « production ». Un agriculteur ayant une stratégie productiviste donnera au contraire beaucoup d'importance dans le calcul de ses évaluations à cette différence moyenne. Une même perte de production pourra ainsi soit être négligée par un agriculteur, soit diminuer significativement sa satisfaction.

- **Norme subjective ou évaluation par les pairs**

Dans le modèle, chaque agent est supposé connaître ce que font les autres (leurs stratégies et leurs résultats totaux de pratique). L'évaluation par les pairs, appelée également norme subjective dans la théorie, est la comparaison de sa pratique à évaluer avec celles des agriculteurs jugés importants. De la même façon que pour l'attitude, la pratique à évaluer dépend de la stratégie et de la source d'information sur la stratégie. L'importance des agriculteurs correspond à la crédibilité qui leur est donnée.

Conformément à (Gasson 1973; Simon 1955; Rogers 1983), les valeurs d'un individu détermine sa vision du monde et ainsi sa façon d'évaluer autrui. La crédibilité entre soi et l'autre dépend de la distance perçue entre pratiques de soi et pratiques de l'autre. Un agriculteur appliquant une stratégie environnementale, estime donc que ses pairs ayant de meilleurs résultats en environnement sont crédibles et importants. Un agriculteur ayant une stratégie productive donnera au contraire davantage de crédibilité à ses pairs ayant de meilleurs résultats en production. Un même agriculteur pourra ainsi être soit très crédible pour un pair, soit peu crédible pour un autre pair ayant même résultat du premier pair en fonction de ce qui est important pour du pair.

- **Satisfaction de notre modèle et intention de la TRA**

La TRA est conçu comme un outil statistique visant à prédire l'intention d'adoption moyenne d'une population vis-à-vis d'un comportement alternatif. Nous l'utilisons ici comme une heuristique de décision individuelle.

La TRA originale n'évalue que l'alternative à adopter. Elle n'implique pas pour adopter le comportement de déterminer effectivement son évaluation du comportement

courant. A ce titre, elle est plus pertinente pour un changement mineur que pour un changement majeur. Elle ne prend en effet pas en compte une éventuelle très forte insatisfaction de l'individu, et plus particulièrement vis-à-vis de de la norme courante qui peut lui apparaître comme inappropriée.

Dans la TRA originale, l'intention n'est pas liée directement au comportement. L'auteur de la théorie indique qu'un ensemble de contraintes, d'impondérables mais aussi des éléments relatifs au sentiment de contrôle du changement, facilitent ou limitent l'adoption effective du comportement même si l'intention est forte. Dans le modèle, nous supposons le lien direct entre satisfaction pour l'alternative et adoption du comportement. L'adoption se fait en effet à partir du moment où la satisfaction pour l'alternative est supérieure à la satisfaction pour la situation courante, cette dernière devant être inférieure à un seuil indiquant une forte insatisfaction.

Dans la phase de changement mineur, l'agriculteur fait évoluer sa mémoire, sa pratique et la crédibilité donnée aux autres. Attitude, norme subjective et satisfaction sont ainsi modifiées. Pour un changement majeur, l'importance, qui entre dans le calcul de crédibilité, attitude et norme subjective, est aussi dynamique.

#### *Rechercher une stratégie alternative*

Un agriculteur insatisfait de sa situation courante recherche une stratégie alternative en commençant par une recherche dans le groupe d'exploitations du même type, ou similaire, que la sienne. « Même type » et « similaire » ont la même signification, et renvoient sur les mêmes individus à un temps donné, pour les changements majeurs et mineurs. Nous supposons que lorsque qu'un individu cherche une alternative, il peut toujours en trouver une disponible, soit dans la population, soit dans les médias.

Un agriculteur qui cherche et évalue une alternative supposée non connue va considérer l'information comme pertinente pour évaluer le devenir potentiel de son exploitation, si elle est fournie par une exploitation suffisamment semblable. Une exploitation différente ne peut être une base d'information permettant à l'agriculteur de projeter les résultats de celle-ci sur sa propre exploitation.

S'il n'y a pas d'exploitation similaire ayant adopté l'alternative au sein de la population, l'éleveur va s'informer dans les médias. Nous supposons que les médias proposent une

pratique « idéalisée » de l'alternative en indiquant un résultat maximum pour chaque dimension de l'alternative en fonction du type d'exploitation et de la stratégie appliquée de l'éleveur.

Si l'alternative est trouvée dans la population, le résultat de chaque dimension de la pratique d'alternative est le résultat moyen de chaque dimension de la pratique des pairs qui ont le même type d'exploitation que lui (similaire) et appliquent la stratégie alternative. Si l'alternative est trouvée dans les médias, la pratique alternative est directement celle trouvée dans les médias.

### *Décider et effectuer un changement majeur*

Le changement majeur est appelé changement de stratégie dans le modèle. De façon cohérente avec la définition du changement majeur et de l'adaptation transformationnelle individuelle, changer de stratégie signifie, dans notre modèle, changer de façon de hiérarchiser les dimensions d'évaluation des pratiques.

Dans le modèle, un agent change les importances données à chaque dimension d'évaluation du résultat de pratique si et seulement s'il change de stratégie. Un agriculteur appliquant une stratégie plutôt productiviste donne plus d'importance à la dimension de production et moins à la dimension d'environnement. S'il change pour une stratégie plus environnementale, il va changer la hiérarchie d'importance entre ces deux dimensions. Il va alors donner plus d'importance à l'environnement et moins à la production.

De plus, un changement de stratégie implique des changements de pratiques. Par exemple, un agriculteur « productiviste » change son orientation pour être « pro-environnement ». Ce processus est probablement accompagné de changements de pratiques qui peuvent conduire à une diminution de production.

### **Synthèse des nouveautés de notre travail de modélisation**

Les propriétés des changements majeur et mineur sont intégrées dans notre modèle conceptuel et son instanciation. Par rapport aux modèles existants, notre modèle incorpore des éléments nouveaux tels que :

- Deux types de changement : majeur et mineur, et les conditions de passage de l'un à l'autre en considérant que les changements mineurs seuls constituent l'état « dynamique stable » de l'individu alors que le processus de changement majeur renvoie sur des états transitoires.
- Une motivation de l'individu à considérer le changement associé à sa satisfaction pour sa situation courante – cette motivation lui permet de diverger du comportement valorisé par la norme et des principes d'évaluation de sa situation associée à ce comportement – les modèles existants ne considèrent qu'une motivation pour l'alternative liée aux caractéristiques intrinsèques de celle-ci et à sa valeur sociale.
- Une prise de conscience d'un besoin de changement majeur, et non plus seulement un intérêt pour une nouveauté facilitant la stratégie et les pratiques prescrites par la norme et/ou permettant de se valoriser au travers des indicateurs portés par la norme.
- Un changement basé sur le changement des crédibilités pour autrui, des changements des priorités accordées aux objectifs (importance), des distances de pratiques (similarité), et non plus seulement sur un processus de conformisme basé sur les distances relatives d'opinions et d'incertitude.
- Un support solide dans le domaine de la psychologie sociale et une modélisation dynamique pour chaque composante de la théorie, cela nous permet d'avoir des éléments intéressants à analyser avec le modèle informatique et d'expliquer ce que nous apprenons du modèle.
- En cohérence avec la Théorie de l'Action Raisonnée (Ajzen et Fishbein 1975), notre modèle intègre des variables décomposées - en l'occurrence l'attitude et la norme subjective - au lieu de variables globales comme dans (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009). L'évaluation d'un agriculteur est donc basée sur sa stratégie et sa pratique concrète. Elle porte sur ses propres expériences et les stratégies et pratiques de ses pairs, au lieu d'une opinion générale abstraite.
- Une TRA dynamique du fait des changements de pratiques, de crédibilités liées aux changements mineurs, et des changements de l'importance accordée aux dimensions d'évaluation liés au changement majeur.
- L'évolution des pratiques change la différence de pratique perçue entre pairs, et donc la crédibilité qu'ils s'accordent. Le réseau d'individus qui influencent un agriculteur est donc dynamique. La distance de pratique évaluée renvoie aux importances que l'individu accorde à chaque dimension d'évaluation de pratique.



Le processus de changement majeur peut changer ses importances, et donc changer encore davantage le réseau d'individus perçus comme compétents. Ce caractère dynamique des individus jugés crédibles participe du changement de norme d'un agriculteur qui, changeant de source d'influence, change sa vision du comportement normatif.

Nous avons à présent une vision globale de nos principes de modélisation. Les fonctions d'évolution sont présentées plus en détail dans les chapitres 3 à 5 qui représentent une sélection de nos articles publiés ou soumis. Avant de présenter les résultats de ces articles plus en détail, introduisons notre problématique applicative : la conversion à l'agriculture biologique des éleveurs laitiers français.

### **L'agriculture biologique : un cas d'application pertinent pour l'étude des changements mineurs et majeurs**

De nombreuses études soulignent que la dynamique de la décision dépend fortement de la manière dont les agents perçoivent cette décision. (Michelsen 2001) et (Tovey 1997) soulignent que les facteurs éthiques et de mode de vie façonnent les décisions des agriculteurs quant à leur passage à l'agriculture biologique. Pour certains chercheurs, l'agriculture biologique n'est pas seulement un ensemble de techniques et de pratiques, mais aussi un mouvement social (Fairweather et al. 2009; Darnhofer, Schneeberger, et Freyer 2005; Rigby, Young, et Burton 2001; Pavie, Dockès, et Echevarria 2002; Sutherland, Gabriel, et al. 2012). La conversion à l'agriculture biologique implique donc de forts changements dans l'identité, le réseau social et la vision du monde d'un agriculteur, et commence par un fort besoin de changement (Barbier, Cerf, et Lusson 2015; Sutherland, Burton, et al. 2012). Rappelant l'étude de (Stock 2007; Sutherland 2013), considère la conversion à l'agriculture biologique comme un changement majeur en tant que processus réflexif. La conversion à l'agriculture biologique est également un des exemples cités d'adaptation transformationnelle des agriculteurs (Rickards et Howden 2012; Dowd et al. 2014).

Les récentes crises laitières combinées à la demande croissante des consommateurs en produits alimentaires biologiques a fait de la conversion à l'agriculture biologique une initiative socialement et économiquement intéressante pour les producteurs laitiers (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara, et Latruffe 2011). Cependant, beaucoup d'entre eux ne se sont toujours pas convertis. Pourquoi ? (Sutherland et Darnhofer 2012)

montre qu'en dépit de la crise économique, de nombreux agriculteurs n'adoptent pas l'agriculture biologique car cela contredit leur définition de la « bonne agriculture ».

Ces éléments font de la conversion à l'agriculture biologique un changement à la fois pertinent pour le test de la modélisation du processus de changement individuel, et intéressant pour l'étude de la diffusion au sein de la population de cette pratique agricole réputée plus durable.

En fait, l'agriculture biologique (AB) est un signe officiel de qualité, qui labellise une production agricole sur des principes éthiques. Il garantit, pour la France, le respect d'un cahier des charges européen qui est un prototype de systèmes agricoles durables du point de vue de l'environnement. Il interdit l'usage des intrants chimiques de synthèse qui peuvent avoir un impact fort sur l'environnement. Par rapport au mode conventionnel, l'AB a un plus faible impact environnemental et des rendements souvent plus faibles (surtout pour des exploitations très intensives au départ).

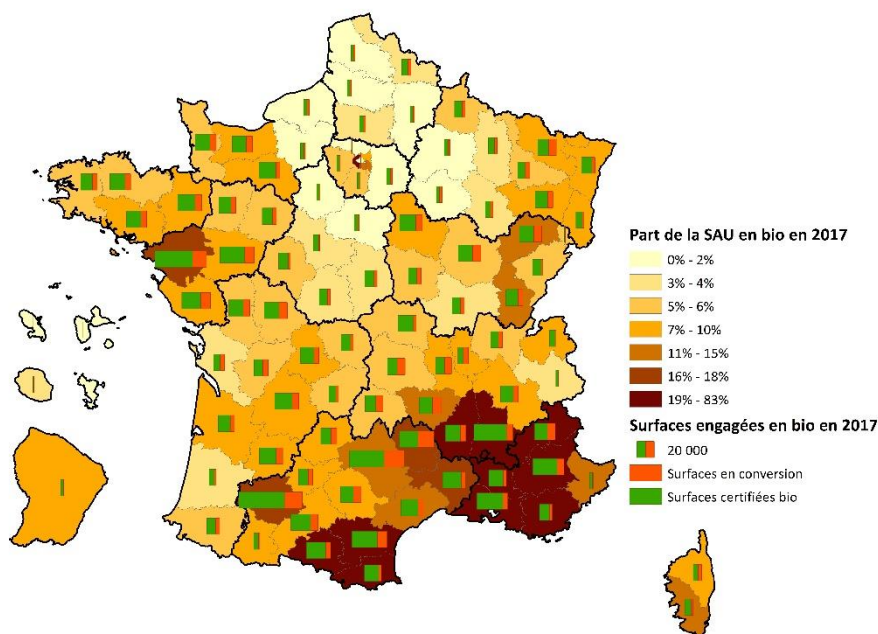


Figure 5. Surfaces bio et en conversion et part dans la SAU de chaque département Français en 2016, source : Agence BIO/OC, Agreste 2017

La Figure 5 montre les surfaces en AB et en conversion et la part dans la SAU (Surface Agricole Utile) de chaque département Français en 2017. Il y a encore très peu de « bios » en France (même en ajoutant les exploitations en conversion). La plupart de

départements ont un pourcentage moyen de leur *SAU* engagée en AB inférieur à 10%. La distribution de la « bio » est aussi très contrastée. Les départements ayant de relativement forts taux de « bios » sont plutôt au Sud-Est de la France. Les autres régions ont peu de surface en « bio », particulièrement au Nord.

Le processus de conversion fait souvent suite à une longue réflexion. Lorsque l'agriculteur décide de se convertir, il entre dans une période de conversion d'une durée de deux ou trois ans. Durant cette période, il adopte sa pratique au cahier des charges AB, mais ne peut pas vendre ses produits sous le label AB et profiter des plus-values des produits AB. Pour compenser les pertes liées à l'adaptation de sa pratique, notamment ses pertes de rendement, il bénéficie de l'aide durant la période de conversion. A la fin de la période de conversion, l'éleveur est certifié AB et peut compenser ses éventuelles pertes de rendement par la plus-value des produits vendus sous le label AB. Il peut alors, si ce n'est pas déjà fait, s'engager avec une coopérative laitière pour la collecte de son lait bio. D'après la Loi de Modernisation de l'Agriculture et de la Pêche, dans le secteur du lait de vache, avant 2017, l'engagement avec une coopérative durait au moins 5 ans. A l'échéance du contrat il est possible de repasser en conventionnel.

La référence actuelle est l'agriculture conventionnelle, ou agriculture intensive prenant son sens et ses valeurs dans le fait de produire les plus grandes quantités possibles. Les agriculteurs ont été formés, évalués et s'évaluent en utilisant ce cadre de référence. Par exemple, pour un producteur laitier, une production de lait élevée par vache est un indicateur de succès, et est considérée comme un bon indicateur pour évaluer si l'éleveur est un bon agriculteur ou pas. La norme en place est une norme de production intensive. L'intensivité se mesure en pratique par le volume de lait moyen annuel produit par vache laitière. Une pratique intensive maximise ce volume et correspond à des modes d'alimentation des animaux basés sur des céréales plutôt que de l'herbe. Les surfaces en herbes pour les exploitations intensives sont donc généralement faibles. Cette norme d'intensivité fixe, comme objectif premier pour l'agriculteur, de produire des volumes de lait toujours plus importants.

Ce type d'objectif n'est pas majoritaire en AB où les indicateurs de succès reposent beaucoup plus sur les équilibres financiers recettes et charges, et privilégient une diminution des coûts plutôt qu'une augmentation des recettes. Ces choix débouchent

généralement sur des exploitations tendant vers l'autonomie alimentaire, de façon à réduire les coûts de nourriture des vaches, plutôt que de « pousser » ces dernières à produire davantage de lait. L'AB est une pratique dite extensive, c'est-à-dire dotée d'une production par vache laitière relativement faible par rapport à une pratique intensive.

La conversion à l'AB est un changement majeur. Il ne nécessite pas seulement de changer sa référence (de la norme d'intensivité vers un principe d'extensivité). Il requiert d'apprendre à s'approprier les nouveaux critères d'évaluation associés à la nouvelle référence, mais aussi au préalable d'accepter de ne pas bien savoir comment évaluer sa nouvelle situation, critères et références n'étant pas toujours disponibles ou accessibles.

D'après (Sutherland 2013) qui s'appuie sur la théorie du capital social de Bourdieu (Bourdieu 1986), les agriculteurs biologiques et conventionnels diffèrent parce qu'un agriculteur qui se convertit doit compenser la perte culturelle associée à la diminution de l'évaluation de soi-même. Ensuite, pour résoudre la dissonance induite par la façon inappropriée dont il gagne sa vie, il réévalue et redéfinit ses valeurs et les objectifs liés à son identité d'agriculteur. En effet, pour compenser la perte de statut habituel sur la dimension « producteur » associée à la pratique bio, il redéfinit et pondère davantage la dimension de « jardinier de la nature » (appelé « steward » ou « preneur de soins » par (Stock 2007)).

C'est pourquoi d'après (Sutherland 2013), les agriculteurs biologiques se voient et sont perçus comme ayant des motivations plus favorables à l'environnement que les agriculteurs conventionnels. Ceci n'est pas dû à une différence initiale dans les valeurs des agriculteurs mais à un apprentissage, une rationalisation à posteriori du comportement (Joule et Beauvois 1989; Klein 1997).

Selon (Sutherland et Darnhofer 2012), les changements identitaires dans la perception et les pratiques des agriculteurs qui se sont convertis à l'AB pour des raisons pragmatiques sont importants. Ils sont explicables par le besoin d'une bonne estime de soi. Ce besoin est d'ordinaire satisfait en se rapprochant de son groupe de référence et/ou en rejetant d'autres groupes très différents (Pool, Wood, et Leck 1998). Diminuer la distance à son groupe de référence ne peut plus apparaître comme une solution à l'agriculteur souffrant d'une mauvaise estime de soi du fait de la norme portée par ce groupe. Il ressent alors un besoin de changement profond qui l'amène à changer ses

références.

Ce n'est ainsi pas seulement une question de valeurs, c'est aussi une question de normes déterminant les opinions et les comportements acceptables, propres d'un groupe donné. Le travail de (Ambrosius et al. 2015), plus basé sur des approches socio psychologiques, souligne l'importance de l'identité en termes d'engagement envers le groupe de référence et la similarité entre les personnes. Ils discutent aussi de la pertinence du dernier développement de la théorie du comportement planifié (Ajzen 1991) en se référant à la norme subjective, puis aux approches de la dynamique de groupe (Matz et Wood 2005). En effet, l'explication de la façon dont un tel apprentissage se produit peut aussi être fondée dans la littérature sur les groupes et l'émergence en psychologie sociale. Ceci est basé sur le processus de comparaison sociale classique renouvelé (Buunk et Gibbons 2007; Festinger 1954; Guimond 2006), qui explique l'émergence et le maintien des normes. Ce processus est implémenté dans notre modèle au travers de notre Théorie de l'Action Raisonnée dynamique.

Cependant, la conversion à l'AB peut parfois être un changement mineur ou une adaptation incrémentale. Cela correspond à une conversion dans un contexte particulier où il existe déjà de nombreux agriculteurs en AB ayant démontré sur plusieurs années la viabilité de leur système. Il y a aussi des agriculteurs conventionnels ayant adopté tout ou partie des pratiques biologiques sans pour autant avoir demandé la certification, comme ce que (Sutherland 2011) appelle « effectively-organic farmers » ou « semi-organic farmers ». Nous précisons toutefois que des régions agricoles dans lesquelles l'AB est déjà suffisamment implantée pour apparaître comme une norme majoritaire guidant les choix des agriculteurs sont très rares.

Dans la suite, nous étudions plus particulièrement, au travers des implémentations de notre modèle, la conversion à l'AB des éleveurs laitiers. Depuis quelques années, les agriculteurs, et tout particulièrement les éleveurs laitiers, doivent relever de nombreux challenges pour faire face aux changements globaux, climatiques et socioéconomiques. Ils doivent en effet s'adapter aux nombreuses crises de prix du lait, à la suppression de quota, à l'augmentation de demande de lait biologique, à la diminution du nombre des éleveurs laitiers...

Pour initialiser nos populations virtuelles d'agriculteurs de façon à ce qu'ils soient dotés de propriétés statistiquement significantes (voir articles des chapitres 4 et 5), nous avons

utilisé les données du recensement général agricole (RGA). Le RGA est une enquête réalisée environ tous les 10 ans. Les derniers recensements ont eu lieu en 1998, puis en 2000 et enfin en 2010. Le RGA est disponible au grand public sous forme de données agrégées à une échelle spatiale, la plus fine étant la commune. La source d'informations que nous avons utilisée pour l'initialisation de la population est le RGA 2000. D'après le recensement général agricole (RGA) 2010, l'exploitation bovine dont la production majoritaire est « bovins lait » correspond à l'OTEX (orientation technico-économique des exploitations) numéro 45. Dans le RGA 2000, elle est désignée par l'OTEX 41 (ancienne nomenclature).

La figure 6 montre la part des éleveurs laitiers parmi tous les agriculteurs en France. Les zones ayant une part importante d'éleveurs laitiers sont considérées comme des zones où la production laitière est la filière principale. Ces zones correspondent aux régions Bretagne, Auvergne-Rhône-Alpes et Bourgogne Franche-Comté. Les cantons d'éleveurs laitiers étudiés dans la thèse sont choisis parmi ces régions-là.

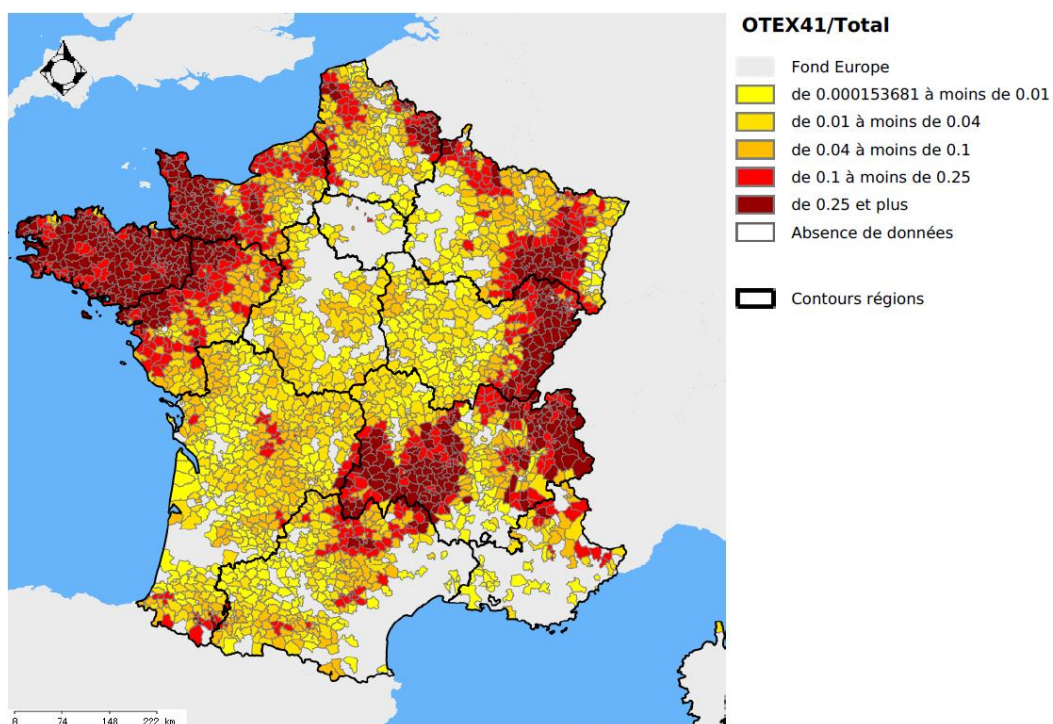


Figure 6. Part d'OTEX 41 pour tous les OTEX en 2000, source RGA 2000

La figure 7 illustre l'évolution du nombre d'exploitations laitières en France et de leur quota moyen depuis 1995. Nous y voyons que les effectifs des exploitations laitières ont fortement diminué en 20 ans, tandis que leur droit à produire (ie quota) moyen a

beaucoup progressé. Nous nous sommes attachés dans notre article présenté en chapitre 5 à comprendre, du point de vue du modèle, l'effet d'une telle évolution sur la diffusion de la conversion à l'AB.

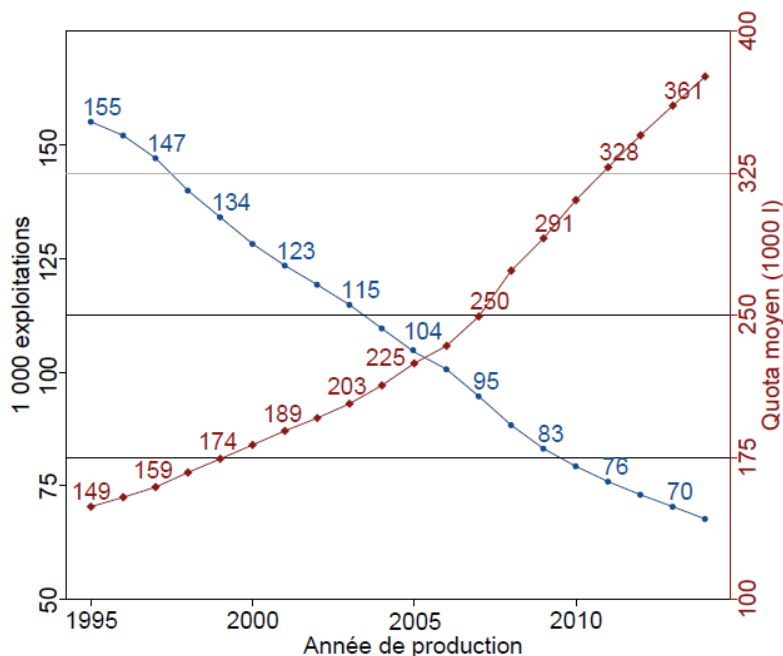
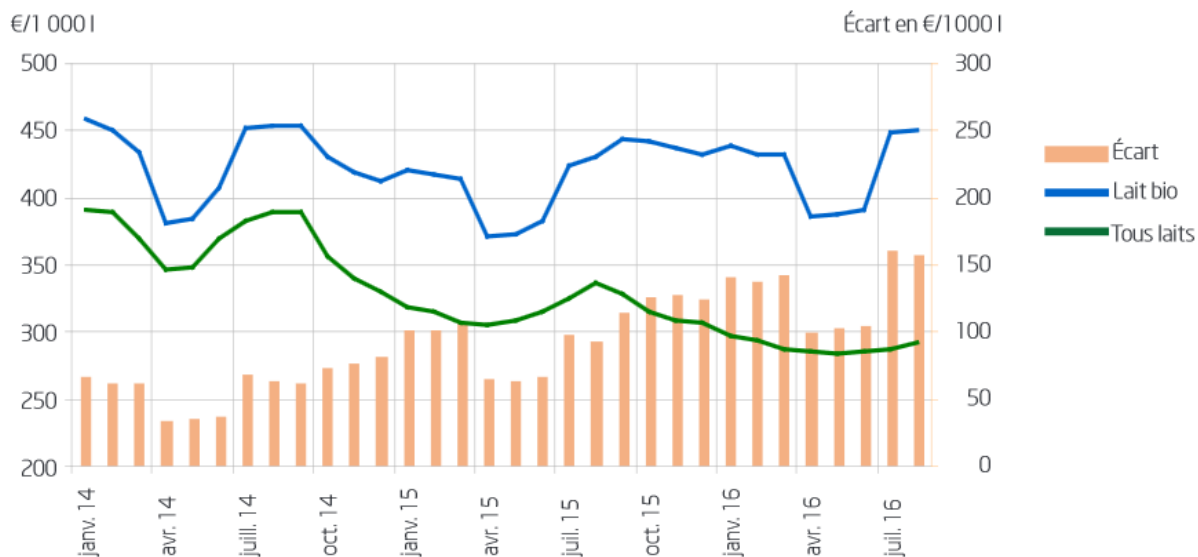


Figure 7. Evolution du nombre d'exploitations laitières et de leur droit à produire moyen (ie appelé communément quota, en milliers de litres de lait) entre 1995 et 2014, source: Myriam Ennifar, d'après données FranceAgriMer

Les quotas ont existé entre 1984 et 2015. La mise en place des quotas est considérée comme un moyen de garantir un marché intérieur français stable (RAJADE et al. 2015; Ennifar et Allain 2016). Les quotas laitiers ont été instaurés en 1984 pour stopper la dérive de surproduction globale. Si l'éleveur dépasse le quota qui lui est fixé, il paie une amende. Bien qu'ayant fait fortement baissé la production globale, les quotas ont aussi favorisé une augmentation moyenne de cette production, tout au moins, lors des premières années de leur mise en place. Ils ont en effet défavorisés les plus petites et moyennes exploitations qui n'ont pas pu bénéficier de quota, ou n'ont pas pu se développer, et ont finalement disparu<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> <http://www.lafranceagricole.fr/1er-avril-1984-l-europe-instaure-la-politique-des-quotas-1,0,3439751696.html>

Même après la suppression des quotas, la production laitière d'un éleveur est en pratique, en France, encore limitée par ce que sa coopérative s'engage à lui acheter à un prix particulier.



Source : FranceAgriMer

Figure 8. Prix de lait conventionnel et bio payé aux producteurs français

Dans notre travail, nous avons retenu le quota, disponible dans les données RGA, comme étant la production maximale possible d'une exploitation. En cohérence avec les normes d'intensivité en place, nous avons considéré que la performance d'une exploitation en termes de production de lait se mesure comme le volume de lait annuel produit par vache.

De nos jours, la conversion à l'AB est socialement et économiquement (illustré partiellement en figure 8) intéressante pour les éleveurs laitiers (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara, et Latruffe 2011). Il est donc tout à fait pertinent de se demander pourquoi l'AB reste une pratique fortement minoritaire alors que sa diffusion est soutenue par l'Europe depuis le début des années 1990 (voire plus tôt dans certaines petites régions agricoles).

## Etudes par simulation de la diffusion de l'agriculture biologique

Notre modèle conçu, et notre cas d'application retenu, nous avons pour buts : (1) d'évaluer la capacité de notre modèle global en termes d'implémentation ; (2) de



déterminer l'impact de nos choix de modélisation des dynamiques individuelles sur la distribution des modes de production au niveau des populations. Cette dernière question est, en pratique, celle d'estimer le niveau de diffusion de l'AB chez les éleveurs laitiers français. C'est la raison pour laquelle nos populations initiales virtuelles ne sont composées que d'agriculteurs en conventionnel (ie aucun agriculteur en agriculture biologique).

D'un point de vue applicatif, nous nous interrogeons sur ce que ce modèle individu centré apporte à l'étude du taux d'adoption de la conversion à l'AB ? Plus précisément en quoi apporte-t'il un éclairage nouveau sur les raisons du faible taux d'adoption de l'AB, et des variations de ce taux d'adoption d'une région à une autre ? Nous nous attachons à répondre à cette question avec trois versions différentes de l'implémentation :

- une implémentation sur une population théorique.
- une implémentation sur une population réaliste avec les données issues du Recensement Général Agricole (RGA).
- une implémentation sur une population réaliste dynamique (prenant en compte l'évolution de la démographie) avec les données de Recensement Général Agricole (RGA).

### **Le premier travail implémente le modèle de changements mineur/majeur pour l'étude d'une population théorique d'agriculteurs.**

Outre une première évaluation des concepts du modèle générique, cette première implémentation a pour objectif d'identifier les raisons de la non-adoption. L'article paru sur cette étude fait l'objet du chapitre 3 (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018).

Du fait de l'hypothèse d'accessibilité entre tous les agriculteurs, nos populations virtuelles théoriques correspondent à la population de petites régions agricoles composées de 100 agriculteurs. Elles se composent de petites, moyennes et grandes exploitations se caractérisant par leur volume maximal de production de lait, et une production environnementale d'autant plus forte que la production de lait est faible. La conversion à l'AB engendre chez elles une perte de production correspondant à la perte de rendement observée la plupart du temps suite à une conversion. Elle engendre également une augmentation de la production environnementale, l'AB impliquant à la

fois des rendements et des impacts environnementaux plus faibles. Ces pertes et ces gains sont proportionnels et paramétrables dans le modèle.

Ces paramètres, de même que les paramètres inhérents à la dynamique de l'individu (pente de la fonction de crédibilité, durée des périodes de réflexion et de confirmation, seuils de décision, perte de production lors de la conversion, importances données à chacune des deux dimensions d'évaluation des pratiques, niveaux de production des petites, moyennes et grandes exploitations) forment un ensemble de 9 paramètres dont nous faisons varier les valeurs. Les paramètres les plus significatifs sont déterminés à partir d'une étude de sensibilité du modèle.

Notre étude est in fine réalisée en considérant la variation des paramètres les plus significatifs de façon à identifier les trajectoires typiques d'évolution des pratiques des agriculteurs. L'évolution des pratiques, exprimée en termes de niveau de production, et l'évolution de la satisfaction (basée sur des comparaisons de production) sont très liées dans notre modèle. Ce lien explique l'adoption ou la non-adoption. Nous pouvons donc, à partir de ces trajectoires, identifier les raisons de la non-adoption de l'AB et leur fréquence relative. Ces raisons varient en fonction de la taille de l'exploitation.

Les résultats montrent que la raison la plus fréquente de non adoption de l'AB est la satisfaction de la situation courante. Du fait de cette satisfaction, les agriculteurs ne s'intéressent pas aux alternatives à leur mode de production courant. Notamment, ils ne cherchent pas à les évaluer pour leur propre exploitation. Cette raison est souvent ignorée par les experts. Dans le modèle, cette raison est la raison de tous, mais plus particulièrement celle des grandes exploitations qui, servant de référence aux autres exploitations, bénéficient d'une excellente norme subjective.

La seconde raison la plus fréquente est le fait que la norme subjective sur l'AB est négative. Elle est la raison des petites et moyennes exploitations qui se sentent mal évaluées par la norme subjective fondées sur les exploitations beaucoup plus grandes qu'elles. Elles sont insatisfaites de leur situation courante mais ne sont pas non plus satisfaites de l'alternative qui souffre elle aussi d'une norme subjective négative.

La troisième et la quatrième raisons les plus fréquentes sont le fait que l'insatisfaction pour la situation courante n'est pas suffisamment longue par rapport à la période de réflexion. C'est la raison des petites et des grandes exploitations, avec toutefois deux

explications différentes. C'est en effet souvent la raison des petites exploitations, initialement insatisfaites du fait de la norme subjective à leur égard, mais qui dans une population dont les pratiques deviennent relativement homogènes au cours du temps, bénéficient in fine d'une norme subjective faiblement négative. C'est également la raison des grandes exploitations qui, différemment des petites, sont insatisfaites du fait de leur évaluation personnelle initiale, mais qui au cours du temps améliore cette évaluation.

Le lien détaillé de chacune de ces raisons avec la dynamique des pratiques est décrit plus en détail dans le chapitre 3. Globalement les taux d'adoption sont faibles. Ce sont majoritairement les petites exploitations qui adoptent. Dans la plupart des cas, un agriculteur ayant une grande ou une moyenne exploitation en termes de niveau de production ne change pas de stratégie due à sa satisfaction de la situation courante.

Notre modélisation du changement intégrant changement mineur et changement majeur apporte un éclairage nouveau sur les raisons de la non-adoption et les trajectoires des agriculteurs. Il souligne que ces derniers adaptent, au travers de changements mineurs réguliers, leurs pratiques en interaction avec leurs pairs pour élaborer leur propre réponse collective aux changements externes. Du fait de ces changements mineurs, des changements progressifs du volume produit (ie de la pratique) s'opèrent, et peuvent empêcher ou faciliter le changement majeur.

L'importance des interactions entre exploitations de différentes tailles, qui fonde l'évolution des pratiques et la norme subjective est un des résultats saillants de cette première étude. Nous regrettons donc le peu de variations des caractéristiques de la population théorique testées dans cette étude. De même les populations réelles sont dotées de caractéristiques beaucoup plus continues que ne le sont nos exploitations types, dotées de valeurs très tranchées, qui interdisent dans certains cas les interactions d'influence entre les types différents.

Une autre critique de ce premier travail porte sur le fait que le niveau de production et la performance de l'exploitation ne sont pas dissociés. Ils ne sont en effet traduits qu'au travers d'un seul et même indicateur.

Pour dépasser ces limites, un second travail s'attache à varier les populations considérées, leur attribuer des caractéristiques proches de celles des populations du

Recensement Général Agricole, et à affiner le modèle de façon à distinguer volume total produit et performance en termes de production par vache laitière.

**La seconde étude porte sur l'impact sur la diffusion des différents éléments du modèle à partir d'une population « réaliste », dotée des propriétés statistiques des exploitations du RGA.**

Deux publications ont été réalisées dans le cadre de cette seconde étude : a) une publication acceptée par la Social Simulation Conference 2018 (SSC 2018, Xu et al 2018 présentée en annexe B, à paraître dans LNCS, revue par trois « reviewers ») ; b) une publication acceptée à la conférence SocInfo 2018 (revue par trois « reviewers », soumise à JASSS). Cette dernière publication fait l'objet du chapitre 4.

Cette étude considère des populations représentant la population d'éleveurs laitiers à l'échelle du canton. Tant la description de l'agriculteur que celle de son exploitation sont beaucoup plus riches que dans l'étude précédente.

Chaque exploitation du modèle est dotée d'une surface (variable SAU, surface agricole utile du RGA), d'un volume maximum possible de production de lait (variable quota du RGA), d'un nombre de vaches laitières, d'une production effective de lait et d'une production environnementale. A l'initialisation, la production effective de lait est égale au volume maximum possible. Pour chaque canton simulé, les valeurs caractérisant l'exploitation sont tirées aléatoirement dans la distribution croisée SAU-quota du canton, à concurrence de 100 exploitations. Les exploitations se voient également attribuer des vaches laitières. Le nombre de vaches est déterminé à partir d'une loi linéaire déduisant le nombre de vaches laitières d'une exploitation de sa SAU et de son quota ( $r^2$  à 0,95). L'agriculteur est doté d'une performance sur chacune des dimensions d'évaluation de pratiques : production de lait et environnement. Les calculs permettant d'établir la relation entre productions et performances d'une part, entre production de lait et production environnementale d'autre part, ont été formalisés à partir de la littérature et sont présentés en annexe C. Il inclut notamment un modèle simple et original de calcul de l'impact environnemental de l'agriculture conventionnel d'une part, de l'agriculture biologique d'autre part. Ces travaux montrent que, comme supposé dans la première étude, la production environnementale est effectivement en moyenne d'autant plus faible que la production de lait est forte.

Cette implémentation d'une population plus réaliste a amené à une modification du modèle de façon à déterminer ce que signifient deux exploitations similaires, pertinentes pour la recherche d'information d'un agriculteur en termes de pratiques et de stratégie alternative. Ce concept de similarité se résumait, dans la version avec une population théorique, à une population « de même type ». Dans notre population, les exploitations ne sont plus typées. Une fonction de similarité permet à un agriculteur de déterminer si une exploitation est similaire à la sienne. Cette fonction détermine une différence seuil en termes de surface d'une part, de nombre de vaches laitières d'autre part. Si l'exploitation évaluée a davantage de différence, en termes de nombre de vaches laitières ou de surface, que le seuil, elle est jugée dissimilaire.

Pour cette première étude, mais aussi pour les suivantes, nous optons donc pour un plan d'expériences faisant varier les paramètres principaux du modèle en considérant trois valeurs pour chacun d'entre eux. Ces paramètres principaux ont été déterminés par une analyse de sensibilité (détail présenté en chapitre 3). Chacun des cantons étudiés est simulé sur la base de 81 jeux de paramètres différents, répliqués 100 fois chacun. La durée de la simulation est de 30 ans. Dans la mesure où l'analyse de sensibilité du modèle a été réalisée dans notre première étude, où aucun paramétrage ne nous semble plus pertinent qu'un autre d'une part, et où nous nous intéressons aux impacts globaux du modèle sur la diffusion de l'AB d'autre part, nous prenons comme résultat de base la moyenne, sur tous les jeux de paramètres et sur toutes les répliques, du taux d'adoption de l'AB à un temps donné pour un canton donné. Nous illustrons souvent par ailleurs nos résultats en considérant les moyennes sur les répliques pour chaque canton et chaque jeu de paramètres.

Des premiers travaux, présentés à la SSC 2018 (visibles en annexe B), portaient sur 6 populations cantonales choisies pour leur différence moyenne de mode de production (plus ou moins intensive). La simulation à partir de populations ayant des caractéristiques réalistes confirme les résultats de l'étude théorique présentée dans le chapitre 3, et souligne l'importance des caractéristiques de l'exploitation comme facteur explicatif de l'adoption. Elle montre également toutefois que les dynamiques sociales du modèle peuvent freiner ou favoriser l'adoption à l'AB par rapport au potentiel d'adoption théorique calculé à partir des caractéristiques des exploitations. Du point de vue du modèle, ces premiers travaux ont permis : de vérifier son potentiel applicatif pour des populations non théoriques ; de raffiner les concepts du modèle et

notamment la description de l'exploitation et de l'agriculteur.

Les travaux suivants ont porté sur un nombre de populations réalistes plus grand, de façon à déterminer plus exhaustivement l'impact des dynamiques sociales par rapport à celui des caractéristiques de l'exploitation. Ils ont fait l'objet d'une publication reproduite en chapitre 4 (présentée à SocInfo 2018 et soumise à JASSS). L'évolution de 27 cantons de 100 agriculteurs chacun a ainsi été simulée. Ces 27 cantons ont été sélectionnés dans les trois grandes régions « laitières » françaises. Leur production agricole majoritaire est « bovin-lait ». Leur niveau moyen d'intensivité et de production totale moyenne varient de façon à déterminer l'impact de différents composants du modèle sur le taux d'adoption sur un large ensemble de conditions initiales.

Les résultats présentés en chapitre 4 ont été « reconditionnés » pour être présentés en figure 9 de façon à souligner l'impact sur le taux d'adoption des changements mineurs d'une part ; mineurs et majeurs d'autre part, par rapport aux taux d'adoption potentiel, déduit des seules caractéristiques de l'exploitation. La question de « Comment distinguer le rôle des caractéristiques des exploitations agricoles de celui des dynamiques sociales dans le processus d'adoption de l'AB? » est en effet particulièrement intéressante. La position varie selon l'approche disciplinaire choisie pour examiner la question. Les agronomes argumentent en effet généralement que l'adoption est déterminée par les caractéristiques de l'exploitation (Neumeister, Fourdin, et Dockès 2011; Pavie, Dockès, et Echevarria 2002; De Buck et al. 2001). Des auteurs comme (Lamine et Bellon 2009; Padel 2001; R. J. F. Burton et Wilson 2006; Mzoughi 2011; Stock 2007) argumentent toutefois de l'importance pour l'adoption des normes et les identités professionnelles.

Nous avons comparé différents taux d'adoption dans trois cas : (1) le taux d'adoption « potentiel » sur la seule base des caractéristiques des exploitations initiales ; (2) le taux d'adoption du fait des changements mineurs simulés de ces exploitations ; (3) le taux d'adoption déterminés par la simulation des changements majeurs et des changements mineurs de ces exploitations. L'étude confirme l'importance des caractéristiques des exploitations, illustré par ailleurs en figure 9 par la proximité de la grande majorité des taux d'adoption moyen à la diagonale représentée en tireté violet.

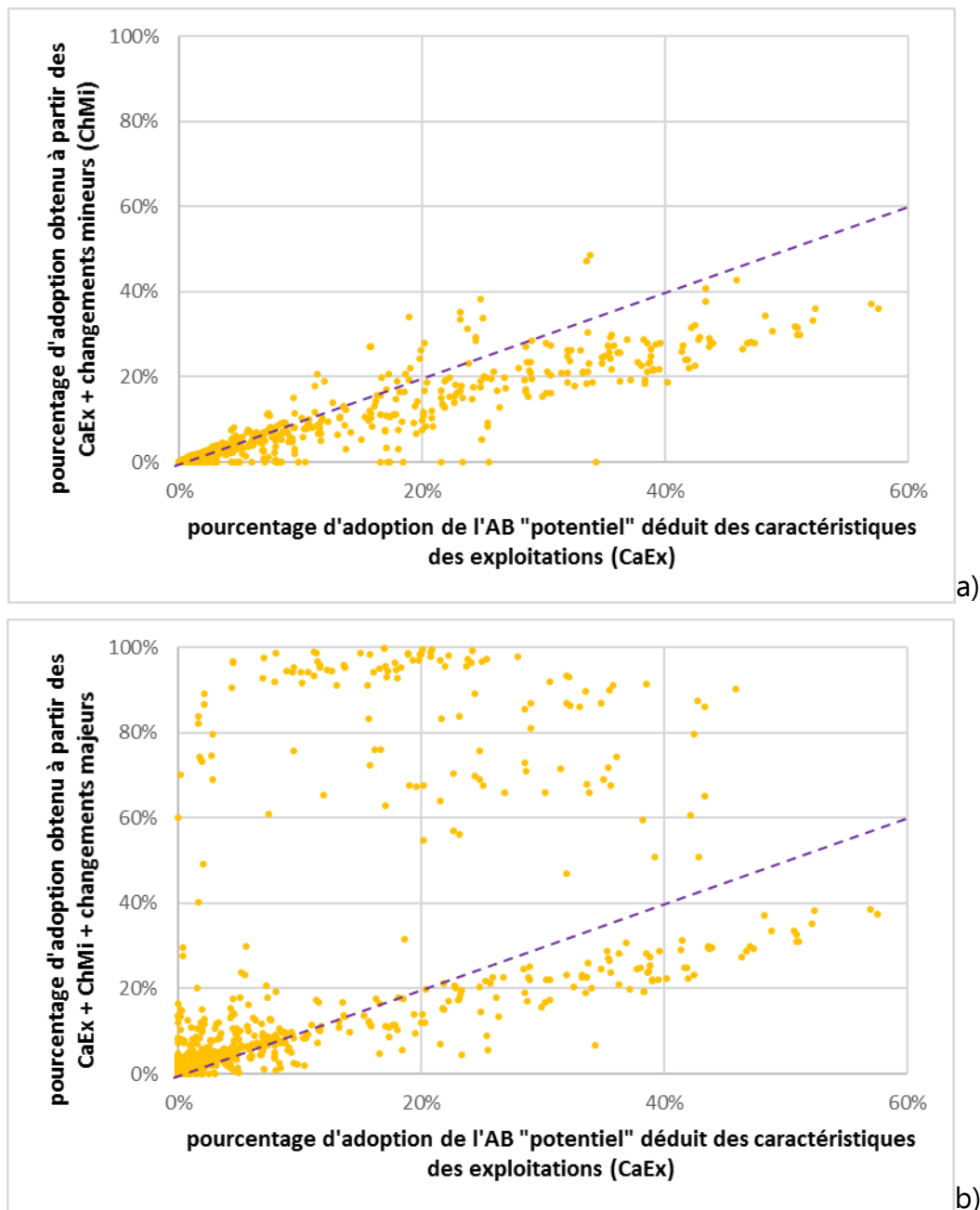


Figure 9. Comparaison du pourcentage d'adoption de l'AB « potentiel » déduit des caractéristiques des exploitations (CaEx) et du pourcentage d'adoption obtenu a) en haut, à partir de la simulation des changements mineurs (ChMin) ; b) en bas, à partir de la simulation des changements mineurs et majeurs. Chaque point représente le résultat d'une population (un canton) pour un jeu de paramètre. La tireté violette en diagonale nous aide à voir l'impact spécifique du mode de calcul présenté en ordonnée. Nous notons que les changements mineurs entraînent une diminution de l'adoption potentielle calculée à partir des caractéristiques de l'exploitation (ie les points sont au-dessous de la diagonale). Ceci s'explique pour l'essentiel par une diminution des

volumes de production de lait des plus grandes exploitations, du fait de l'influence faible, mais continue, des petites exploitations. Cette diminution des volumes produits par les leaders de la population implique une diminution de l'insatisfaction des petites exploitations – d'ordinaire plus à même de se convertir car perdant moins en production lorsqu'elles se convertissent. Cette diminution d'insatisfaction permet aux petites exploitations de redevenir satisfaites et de ne plus s'intéresser à la conversion. Cette influence inattendue des petites exploitations est liée au fait que les exploitations, contraintes par les quotas, ne peuvent pas augmenter leur production de lait. Les grandes exploitations ne peuvent donc pas inciter les petites à augmenter leur production. Les petites exploitations, au contraire, peuvent inciter les grandes à diminuer leur production.

La figure 9 montre également l'effet des changements mineurs et majeurs. Bien qu'un grand nombre de simulations demeurent avec le même taux d'adoption que celui induit par les changements mineurs (points sous la diagonale), une partie des simulations est fortement affectée par l'ajout des changements majeurs et affiche des taux d'adoption très élevés indiquant une forte diffusion de l'AB.

Les résultats globaux confirment que les caractéristiques des exploitations (i.e. SAU, nombre de vaches laitières et production de lait) sont bien les principaux déterminants de l'adoption. Les interactions sociales entre les agriculteurs ont des impacts variables sur l'évolution des pratiques et l'évaluation que chacun fait de soi. Ces impacts diffèrent notamment du fait de la distribution des caractéristiques des exploitations. Les interactions sociales de nos deux processus de décision peuvent ainsi avoir un effet important sur la décision de la conversion à l'AB : l'heuristique de copie des performances des agriculteurs les plus crédibles tend à diminuer la conversion ; les processus de calcul des satisfactions courante et alternative de la TRA dynamique tendent à favoriser l'adoption (i.e. plus il y a d'adoptants, plus l'information sur l'alternative est disponible, et plus la norme subjective sur l'alternative est susceptible d'être favorable).

Nous avons par ailleurs construit des classes d'exploitations observables, petites, moyennes et grandes exploitations, de façon à déterminer si nos premiers résultats soulignant l'importance de ces classes sont confirmés. En complément de l'importance des caractéristiques de l'exploitation, les résultats des simulations montrent que :



- les exploitations plus extensives se convertissent en général davantage que les exploitations plus intensives ;
- les petites exploitations ayant une production totale de lait faible et une production totale environnementale élevée se convertissent davantage que les autres. Ces exploitations ont des pratiques extensives et sont plus susceptibles de se convertir. Ce dernier point est en accord avec l'opinion des experts ;
- l'évolution des pratiques vers davantage d'intensivité ou d'extensivité dépend de la composition de la population et des paramètres du modèle.

La distribution de la population dans ces classes peut aussi avoir un effet important sur le taux d'adoption. En effet, certains cantons ont davantage de petites et moyennes exploitations, et ces exploitations ont davantage tendance à se convertir que les autres. Les cantons plus intensifs (ceux de la région bretonne) n'ont que peu de conversions par rapport aux cantons plus extensifs (ceux situés en zone montagneuse). Nous notons toutefois que des cantons ayant des caractéristiques assez similaires et une infime différence en termes de distribution en classes d'exploitation peuvent avoir des taux d'adoption finaux très différents. Cela est dû au caractère plus ou moins continu des exploitations dans l'espace défini par la fonction de similarité. Selon cet espace, les exploitations utiliseront plus ou moins l'information idéalisée délivrée par le « media » pour évaluer l'intérêt de la conversion, mais aussi plus ou moins l'information délivrée par les pairs convertis ayant plus ou moins d'influence sur eux. Pour résumer, malgré l'équivalence des caractéristiques des cantons, le taux d'adoption variera plus ou moins en fonction de la source d'information des évaluateurs de l'alternative (media ou pairs), et du niveau de production des premiers convertis (i.e. les pairs susceptibles d'informer et d'influencer sur l'intérêt de l'alternative).

Dans l'ensemble, nous concluons que malgré leur faible valeur sociale, les petites exploitations, si elles sont suffisamment nombreuses, peuvent avoir un impact répété lent sur les grandes exploitations. Leurs changements de pratiques peuvent les amener à s'intéresser à l'AB et à adopter. Elles peuvent également changer de pratique sans adopter. Ces deux évolutions possibles sont conformes à (Sutherland 2011; Sutherland, Burton, et al. 2012) et dépendent des répartitions de la population dans les classes de taille d'exploitation.

Nous avons vu que les caractéristiques des exploitations, et notamment son niveau de production de lait, expliquent fortement le taux d'adoption. De même, le taux

d'adoption est affecté par la distribution en classes de taille d'exploitation. Nous avons également noté l'influence particulière des petites exploitations, influence liée au fait que les exploitations ne peuvent pas augmenter leur production de lait. Nous avons par ailleurs dans la section dédiée à la présentation de notre cas d'étude, souligné l'évolution des exploitations agricoles ces dernières décennies. Ces évolutions affectent le nombre des exploitations, leur production moyenne et leur distribution en classes de taille. Il nous est donc apparu nécessaire, du fait du pouvoir explicatif de ces éléments dans notre modèle, de mieux comprendre l'impact de l'évolution de la démographie sur le taux d'adoption.

**La troisième étude porte sur l'impact couplé de la dynamique de la démographie et de la dynamique de changements mineurs et majeurs menant à l'adoption de l'AB sur le taux de conversion à l'AB.**

Elle a donné lieu à la rédaction d'une publication présentée en chapitre 5. Elle va également être soumise à un journal avant que la thèse ne soit soutenue.

Nos travaux précédents montrent de façon consistante avec le discours des agronomes (Neumeister, Fourdin, et Dockès 2011; Jérôme Pavie, Dockès, et Echevarria 2002; De Buck et al. 2001), que les caractéristiques de l'exploitation, et notamment leur volume de production, sont déterminantes pour le changement majeur que constitue la conversion à l'AB. Ces caractéristiques de l'exploitation sont fortement influencées par les changements démographiques. Nombre et type d'agriculteurs, niveau de production, mais aussi distribution des âges sont des éléments clés de la démographie agricole. Ils sont donc très importants pour l'étude des changements adoptés par l'agriculteur, notamment la conversion à l'AB.

Il est en conséquence tout à fait légitime de s'interroger sur l'impact sur le taux d'adoption des changements démographiques des exploitations qui impliquent, ces dernières décennies en France, une diminution de leur nombre et un accroissement de la production moyenne de lait. Cette évolution démographique est-elle en frein à la conversion en tant qu'elle implique que les exploitations produisent plus et ont donc plus à perdre en se convertissant ? Ou bien alors, permet-elle aux petites exploitations converties depuis longtemps et ayant eu l'opportunité de s'agrandir une fois en « bio » de servir d'exemples de réussites à suivre, facilitant ainsi la diffusion de l'AB ?

Pour répondre à ces questions, nous avons repris les populations définies à partir du RGA 2000 et les fonctions des productions et des performances liant dimension productiviste et dimension environnementale définies par notre étude précédente présentée en chapitre 4 (Xu, Huet, Perret, et Deffuant 2018). La description de l'agriculteur, inexistant dans notre première étude, doté de performances dans la seconde étude, est ici encore enrichie puisqu'il se voit doté d'un âge (déterminé aléatoirement selon une loi Normale en fonction du lien dans les données du RGA 2000 entre âge des exploitants et quotas des exploitations, montré en figure 10).

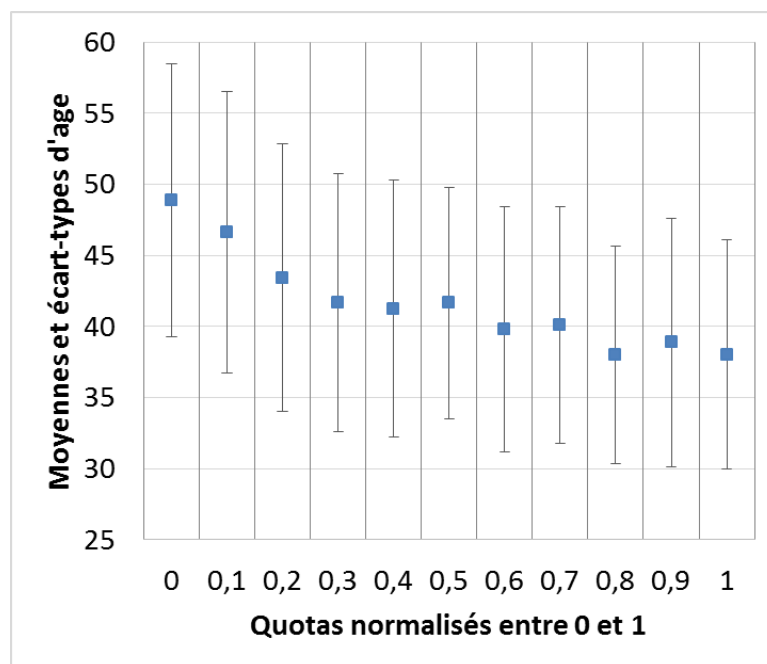


Figure 10. Moyennes et écart-types des âges de la population d'éleveurs laitiers des cantons français dont la production dominante est le lait, par classes de quotas (i.e. volume maximal annuel de production de lait, normalisé entre 0 et 1) (source : RGA 2000) - un exploitant dont l'exploitation a un quota élément de la classe de quota  $x$ , se voit attribué un âge tiré aléatoirement dans une loi Normale dont les paramètres sont la moyenne et l'écart-type d'âge pour cette classe  $x$ ).

Nous avons conçu un module de démographie des exploitations et déterminé des règles d'arrêt d'activité et de reprise des exploitations agricoles. Ce module considère des reprises d'exploitations du fait d'achat ou « d'héritage anticipé ». Ces reprises sont permises par les départs en retraite (déterminée par l'âge des agriculteurs) et permettent des augmentations de surface, de nombre de vaches et de volume de lait produits des exploitations reprenantes.

Des augmentations de volume de lait produit peuvent également intervenir du fait de la redistribution des quotas associés aux cessations d'activités. Ces cessations d'activités sont motivées entre autres par l'insatisfaction de l'exploitant, la taille de l'exploitation et les contraintes de façon à respecter le nombre d'exploitations à atteindre (ie celui du RGA suivant).

Ces processus permettent à nos populations virtuelles d'évoluer en étant dotées de valeurs de propriétés (nombre d'exploitations, taille des exploitations, ...) correspondant aux valeurs observées par les recensements agricoles. Nous avons pour ce faire utilisé les données du Recensement Général Agricole (2000 et 2010) et la littérature relative à l'évolution des exploitations laitières en France métropolitaine (Perrot et Cébron 2013) de façon à étudier l'évolution de 24 cantons français dont la production agricole majoritaire est « bovin-lait ».

Après avoir déterminé notre mode d'évolution de la démographie, la réponse à notre question passait alors par la comparaison de l'évolution de la conversion à l'AB d'une population statique, avec celle d'une population dont la démographie est dynamique.

Cette comparaison nous a permis de montrer que globalement l'évolution de la démographie défavorise dans un premier temps la conversion, puis, dans un second temps, la favorise fortement. Les résultats ont par ailleurs montré que le taux de conversion est particulièrement sensible aux trajectoires d'exploitation. Différentes trajectoires peuvent avoir un effet positif ou négatif sur le taux de conversion selon que l'agriculteur agrandit son exploitation avant de se convertir ou l'inverse.

Un agriculteur qui agrandit son exploitation au début de la période simulée, et alors qu'il est en conventionnel, est moins susceptible d'envisager la conversion. L'« agrandissement » du modèle implique toujours une hausse de la production de lait. De façon générale, plus la production est forte, plus le taux d'adoption est faible. En effet, les exploitations très productives sont généralement bien valorisées socialement parce qu'elles sont jugées exemplaires du point de vue de leur volume de production. Elles restent donc plus longtemps satisfaites de leur situation courante et ne considèrent pas un possible changement de stratégie. Même lorsqu'elles sont insatisfaites et l'envisagent alors, elles ont beaucoup à perdre du fait de la conversion à l'AB car celle-ci implique une baisse des rendements proportionnelle aux rendements initiaux (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018; Xu,

Huet, Perret, et Deffuant 2018).

En revanche, si l'agriculteur qui « s'agrandit » est déjà en « bio », il va avoir plus d'influence sur ses pairs qui vont lui accorder davantage de crédibilité du fait de son augmentation de production associée à son agrandissement. Son agrandissement a pour effet de laisser identique ou de diminuer sa pratique en termes de performance. En d'autres termes, il conserve le même niveau d'intensification ou s'extensifie.

Les autres agriculteurs vont alors, d'une part imiter davantage sa pratique du fait d'un surplus de crédibilité, d'autre part imiter le caractère plus extensif de sa nouvelle pratique. Il participe donc d'une forte diminution du niveau d'intensification des autres agriculteurs et les met probablement en situation : (1) d'être insatisfaits du fait de leurs productions moindres, et donc de considérer la stratégie alternative ; (2) de trouver, lorsqu'ils l'examinent, l'alternative AB intéressante car ils perdent moins en production lors de la conversion. Il va également servir, aux agriculteurs ayant une production proche de sa nouvelle production augmentée, de source d'information pour évaluer leur intérêt à se convertir. Il est alors en position d'influencer ces agriculteurs ayant de « grandes » exploitations et de leur proposer une référence quant à la valeur de la stratégie alternative plus intéressante que celle proposée par les médias.

Ces éléments favorisant la conversion au sein de la population lorsque l'agrandissement de suffisamment d'exploitations intervient après des conversions précoces d'une part, les éléments défavorisant la conversion lorsque l'agrandissement intervient dans les premiers temps de la simulation et avant la conversion d'autre part, expliquent les effets paradoxaux des changements démographiques. Nous notons ainsi une sensibilité du taux de conversion global à l'ordre des événements « agrandir » et « adopter » pour les exploitations. Cette sensibilité renvoie aux trajectoires des exploitations qui peuvent s'agrandir et se convertir, ou l'inverse. Les trajectoires des exploitations sont donc particulièrement importantes pour l'évolution des distributions des modes de production (conventionnel ou AB) au sein de la population.

Les éléments explicatifs des résultats paradoxaux de l'augmentation de production de lait expliquent aussi l'effet global temporel moyen des changements démographiques. Au début de la simulation, les agrandissements précoces peuvent empêcher de se convertir un certain nombre d'exploitations qui se seraient converties si elles ne s'étaient

pas agrandies (et ce d'autant plus que la conversion nécessite un temps de réflexion). Ceci explique la diminution des adoptions sur la première période de la simulation, les dix premières années. Durant les décennies suivantes, les agriculteurs s'étant convertis précocément vont pouvoir agrandir leurs exploitations, et diffuser l'AB comme expliqué précédemment. Ceci explique l'impact positif des changements démographiques durant la deuxième et la troisième décennie.

Globalement cette nouvelle implémentation du modèle permet de vérifier encore davantage le potentiel applicatif du modèle et de raffiner ses concepts du modèle, notamment la description de l'agriculteur. Elle confirme les résultats observés dans les travaux précédents quand à l'importance des caractéristiques de l'exploitation pour la prédiction de la conversion à l'AB. Elle montre également que, du fait des interactions entre agriculteurs, les trajectoires des exploitations et de leurs exploitants, dans une vision élargie aux changements de leur structure (surface, nombre de vaches, ...), sont déterminantes pour la distribution globale des modes de production au sein de la population.

Les évènements que nous avons considéré comme affectant la structure de l'exploitation (reprise, héritage, ...) sont liés d'une part aux départs en retraite, d'autre part à la cessation d'activité. Il apparaît donc que la distribution des âges d'une population peut être déterminants pour la diffusion de l'AB. Une population plus âgée en moyenne implique de nombreux départs en retraite dès le début de la simulation. Ces départs impliqueront des agrandissements qui défavoriseront la diffusion de l'AB. Au contraire, une population moins âgée en moyenne impliquera des départs en retraite plus tardifs et tendra donc à favoriser la diffusion de l'AB.

Les départs en retraite ne sont pas les seules causes d'augmentation de la production dans la première période simulée (2000-2010). Les cessations d'activité sont également nombreuses du fait de la politique des quotas qui a défavorisé les petites exploitations d'une part, de la libéralisation des prix du lait d'autre part (qui a notamment provoqué une grave crise des prix du lait conventionnel en 2009). Dans notre modèle, ces cessations donnent lieu à une redistribution de leurs quotas (mais pas leurs surfaces et vaches laitières) aux autres exploitations. Les augmentations de production induites par cette redistribution en première période simulée tendent également à défavoriser la diffusion de l'AB. Ces deux derniers points mettent en avant, sous un angle nouveau

l'importance de la démographie et des politiques publiques dans la diffusion de l'AB.

Après les chapitres 2 à 5 détaillant plus avant nos résultats, une discussion générale en chapitre 6 revient sur ce que nous venons de présenter en s'efforçant d'en dégager les avantages et les limites.

# Chapitre 2. Clarifier les concepts de changement et formaliser le processus dans le cadre de la décision des agriculteurs

L'article objet de ce chapitre a été publié dans la revue *Agricultural Sciences* le 26 mars 2018. Les principales contributions de cet article sont :

- Une analyse des définitions du changement majeur/adaptation transformationnelle et changement mineur/adaptation incrémentale.
- La proposition d'une vision intégratrice de ces deux types de changement pour formaliser le processus de décision d'un agriculteur face à un changement.



Agricultural Sciences, 2018, 9, 340-350  
<http://www.scirp.org/journal/as>  
ISSN Online: 2156-8561  
ISSN Print: 2156-8553

## Toward Modelling of Transformational Change Processes in Farm Decision-Making

S. Huet<sup>1\*</sup>, C. Rigolot<sup>2\*</sup>, Q. Xu<sup>2</sup>, Y. De Cacqueray-Valmenier<sup>1</sup>, I. Boisdon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lisc, Irstea, Aubière, France

<sup>2</sup>Université Clermont Auvergne, Agro ParisTech, Inra, Irstea, VetAgro Sup, UMR Territoires, Clermont-Ferrand, France

Email: \*sylvie.huet@irstea.fr, \*cyril.rigolot@inra.fr

How to cite this paper: Huet, S., Rigolot, C., Xu, Q., De Cacqueray-Valmenier, Y. and Boisdon, I. (2018) Toward Modelling of Transformational Change Processes in Farm Decision-Making. *Agricultural Sciences*, 9, 340-350.  
<https://doi.org/10.4236/as.2018.93024>

Received: January 31, 2018

Accepted: March 23, 2018

Published: March 26, 2018

Copyright © 2018 by authors and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### Abstract

In the coming decades, agricultural systems will have to adapt to tremendous challenges. Behavioral models have important potential to better understand and steer changes toward sustainability brought about by this context. Relying on a literature review, we distinguish incremental changes (extensions of what is already done) and transformational changes, which involve the reorientation of a considerable amount of farming activities. Transformational changes are particularly important in the context of global change. Existing integrated modelling frameworks based on behavioral theories are suited for incremental changes, but remain limited for transformational changes. Qualitative studies provide important insights on two key aspects of transformational changes, learning and social relations, but they have not been explicitly oriented toward computer modelling yet. Based on this literature and three seminal decision-making approaches, we propose a description of transformational change processes in farm decision-making, as a first step toward an implementation in agent-based models.

### Keywords

Transformation, Adaptation, Modelling, Decision-Making, Farmer

### 1. Introduction

In the coming decades, agriculture will be faced with huge challenges: agricultural systems will have to decrease their environmental impact while producing enough food for a growing population. Meanwhile, they will have to cope with important uncertainties: climatic, economic, politic... [1] [2] [3]. In this context, agricultural systems will have to adapt to remain sustainable.

\*These two authors contributed equally to the paper.



# Toward modelling of transformational change processes in farm decision-making\*

S. Huet<sup>1\*</sup>, C. Rigolot<sup>2\*</sup>, Q. Xu<sup>2</sup>, Y. De Cacqueray-Valmenier<sup>1</sup>, I. Boisdon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lisc, Irstea, 9 avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière, France

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, Inra, Irstea, VetAgro Sup, UMR Territoires, F-63000 Clermont-Ferrand, France

Email: sylvie.huet@irstea.fr cyrile.rigolot@inra.fr

**How to cite this paper:** Author 1, Author 2 and Author 3 (2017) Paper Title. \*\*\*\*\* , \* , \* .

[http://dx.doi.org/10.4236/\\*\\*\\*\\*.2017.\\*\\*\\*\\*\\*](http://dx.doi.org/10.4236/****.2017.*****)

**Received:** \*\*\*\* \*\* , \*\*\*

**Accepted:** \*\*\*\* \*\* , \*\*\*

**Published:** \*\*\*\* \*\* , \*\*\*

Copyright © 2017 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In the coming decades, agricultural systems will have to adapt to tremendous challenges. Behavioral models have important potential to better understand and steer changes toward sustainability brought about by this context. Relying on a literature review, we distinguish incremental changes (extensions of what is already done) and transformational changes, which involve the reorientation of a considerable amount of farming activities. Transformational changes are particularly important in the context of global change. Existing integrated modelling frameworks based on behavioral theories are suited for incremental changes, but remain limited for transformational changes. Qualitative studies provide important insights on two key aspects of transformational changes, learning and social relations, but they have not been explicitly oriented toward computer modelling yet. Based on this literature and three seminal decision-making approaches, we propose a description of transformational change processes in farm decision-making, as a first step toward an implementation in agent-based models.

## Keywords

Transformation, Adaptation, Modelling, Decision-making, Farmer

---

## 1. Introduction

In the coming decades, agriculture will be faced with huge challenges: agricultural systems will have to decrease their environmental impact while producing enough food for a growing population. Meanwhile, they will have to cope with important uncertainties: climatic, economic, politic... [1-3]. In this context, agricultural systems will have to adapt to remain sustainable.

To understand agricultural adaptations and transitions, modelling has become an essential methodology [4-6]. Until recently, most agronomic models remained mainly driven by an economic optimization approach, focusing on the farm and its technical and economic characteristics [7, 8]. They generally present the farm decision-making in terms of factors, barriers and motivations [9]. To better understand changing dynamics, [10] identify a need for integrated and dynamic

modelling frameworks, based on explicit and well-motivated cognitive and social behavioral theories. Complementarily, [8] shows that adaptation is better understood by focusing on the “how” instead of “why”, and by considering the time dynamics of the farmer’s relationships to others. The modelling of decision-making has grown from the review of [7] more than 10 years ago to the recent one of [6]. Insights from psychology have been more and more integrated in the models in order to understand how farmers decide, innovate and change. Among the various models of farmer decision-making, the agent-based models have particularly developed in the last few years. Agent-based models integrate cognitive and social behavioral theories, as well as farmers’ relation with other people and the environment [4, 11-12]. Moreover, studying the evolution of a population of interdependent farmers is particularly appropriate to design and test different policy options favoring innovation or adaptation.

In this paper, we first introduce the notions of incremental and transformational changes in agriculture, relying on a literature review on adaptations. Transformational changes are particularly important in the context of global change, to cope with the tremendous challenges ahead. Then, we show that existing modelling frameworks based on behavioral theories are well suited for the description of incremental changes, but remain limited for understanding transformational changes. We also point out that key qualitative studies have described transformational changes, but a conceptualization clearly oriented toward modelling is missing. Finally, we propose a description of transformational change processes in farm decision-making, with the perspective of implementation in agent-based models.

## **2. Incremental and transformational changes**

Recently, the focus has progressively shifted towards transformational change in agriculture as a response to global change [13, 14]. Transformational change can be distinguished from “incremental adaptations”, which have been described as extensions of “what is already being done” [15]. By contrast, [15] identify at least three classes of adaptations as transformational: “1) those that are adopted at a much larger scale or intensity; 2) those that are truly new to a particular region or resource system; and 3) those that transform places and shift locations”. As incremental adaptations, transformational changes can be autonomous or planned, responsive or proactive [13]. Following another definition, transformational adaptation involves not only radical technical

change but also changes in “meaning making” (i.e. changes in intentions and attitude behind behavior) [16]. This last definition is close to the concept of “major change” proposed by [17], with the example of conversion to organic farming, which is also considered by [13] as a transformational adaptation. Indeed, a major change involves “the reorientation of a considerable amount of farming activities or resources, for example through transition from commercial farming to care farming or other diversification activity” by contrast with a minor change, which is just “an alteration to farming activities which does not change the direction or focus to the farm system” [17].

To cope with challenges ahead, incremental adaptation will not be enough: transformational changes are required [13, 15]. For example, incremental adaptation will only provide resilience to modest climate change and some larger scale adaptation options will be required in order to ensure long-term viability [18]. Reducing greenhouse gas emissions to sustainability targets also implies transformational changes [16, 18]. Transformational changes are required, but their implementation remains a tremendous challenge. For example, in the European context, organic agriculture is far from having grown as much as the demand for organic products, even in places where conversion would be obviously profitable for farmers [19]. To foster transformational changes of agricultural systems, modelling can play an important role [4]. In the next section, however, we show that the current state of the art is limited when it comes to understanding and modelling transformational change processes on farms.

### **3. The modelling of decision-making in agriculture is focused on incremental changes**

Many researchers and policy makers still tend to view the farm throughout a simplistic lens [4-6, 20]. Yet, some conceptualizations have been proposed to show how various factors influence farmer’s decision, including education, professional experience, information network and farm characteristics [7, 10, 21]. However, according to [20], most of these studies do not consider the dynamic process by which actions are decided in specific situations. To overcome this limit, Martin-Clouaire [20] proposes a framework for modelling a flexible operational decision-making in agriculture. This framework reconciles three seminal cognitive decision-making approaches by proposing a revised Belief, Desire, Intention rational agency architecture [22]. The key role of heuristics is incorporated by giving the possibility to

implement the “Decision Ladder” process control proposed by [23], or the recognition-primed decision protocols [24] to represent the various ways people decide (i.e. relying on more or less reasoning in the process and/or their experience as tacit standard for expectations to find out quickly a satisfying solution). Overall, this framework structures the decision-making behavior along a set of cognitive processes such as perception, interpretation, goal reasoning, planning and judgement to model a dynamic adaptation of the farmer to the situation [20].

Although Martin-Clouaire’s flexible view of decision-making is particularly relevant for adaptation issues, it remains primarily focused on incremental changes, as most of models of farmers’ decision-making. Indeed, [20] identifies two main limits to his framework: i) a poor representation of learning; and ii) “a restrictive view of farmer as single agent, paying little attention to social relations”. As we develop in the next section, these two weak elements (learning and social relations) are precisely crucial elements to deal with transformational adaptation.

#### **4. Key factors of transformational changes and first steps toward a conceptualization**

To study transformational change such as conversion to organic farming, [25] argue for the study of trajectories. This consists in studying the family-farming system in the medium and long runs [26]. Such trajectory analyses are typically based on comprehensive interviews with farmers. They reveal the importance of key factors, such as farmers trying new methods on the farm, peer group exchanges and collective co-construction of changes [27]. Then, following this principle, many studies have drawn typical trajectories of adaptation [28-31]. These studies appear as an appropriated source of information to conceive and evaluate agent-based models. Particularly, [32] have shown how farmers learn a new practice through experimentation (on their farm or another farm), possibly discussing them with farmers or advisors. For this author, learning continues until what farmers have tested or seen can be assessed, based on references associated to their usual practice. All these studies show how farmers change not only their practices, but also possibly the entire view they have of their profession and their way of life [33].

These agent-level elements are typically not included in most existing modelling frameworks, such as proposed by [20]. This is also true for the collective construction observable at the population level. Indeed, according to the review of [34]

current “representations [of farm evolution] are built according to a stable professional norm of the evolving farming system that doesn’t allow important shift in the farming system over the long run”. A growing literature is currently challenging these representations, arguing norms evolve during the adaptation of farmers and from interactions between farmers [35]. In a key contribution toward a comprehensive conceptualization of transformational changes, Sutherland et al [17] introduce the idea of a “triggering change cycle”. For these authors, “as a result of path dependency, major [transformational] changes in farming practices primarily occur in response to “trigger events”, after which farm managers intensify their considerations for the options open to them, and may set a new course of action”. Additionally, [36] develop the concept of “good farmer” to highlight farmers’ value changes in the transformational process. [37] [17] conceptualization of farmer engagement in the transformational change and the associated cognitive effort is consistent with socio-psychological theories such as the “elaboration likelihood model” [38], as well as the transition management theory [39]. Although highly relevant, this conceptualization remains limited in the way the interactions between the farmer and other actors, especially peers, are dynamically represented. Complementarily, other studies focus on the role of networks rather than on the sole farm level. Particularly, [40] have begun to identify key characteristics of social and informational networks for transformational changes (strong access to knowledge and weak ties). The next section is intended to go further toward an implementation of transformational change in agent-based models, with a focus on learning and social relations specific dimensions of transformational change.

## **5. Modelling transformational change processes: a proposal**

Similarly to Martin-Clouaire’s framework [20], our proposal is based on a critical analysis of three seminal decision-making approaches. They have been grounded from a social or anthropological perspective instead a cognitive one: i) The management study of [41] deals with the decision process of an organization facing a totally new situation diagnosed as a problem; ii) The diffusion of innovation theory [42], initially focused on farmers, particularly stresses out the role of network of peers who inform and reinsure farmers. These roles has been modeled by [43, 44]; iii). In social psychology, the Theory of Planned Behavior (TPB), extended from the theory

of reasoned action [45, 46] stresses out the role of the intention to act in the decision-making process. This intention is not only based on self-assessment of the action, but also on its perceived value from farmer's relevant relations (i.e. subjective norm), as well as the farmer's feeling of control over the performance of the action.

Consistently with Sutherland et al. [17], a proper model of a transformational change process can be based on two different phases for farmers and two different related regimes: i) the path-dependency regime during which only incremental changes occur and ii) the transitory regime which is specific to a transformational change, allowing to transit from a stable path-dependency phase to another one. The dynamics associated to these regimes are different.

The first regime is the one for "incremental" adaptations in a stable context, or perceived as such due to various socio-cognitive barriers [47]. Farmers' references, values or norms do not change; some strategic change can occur but remain "under control" from the farmers' point of view, allowing them to make a living from their practice and keeping their "good farmer" identity [36]. Farmers evaluate possible changes in terms of similarity to previous changes [24]. The more experiences they have, the less they rely on peers or external sources to assess and decide. The conceptual framework of [20] appears totally relevant for modelling this phase.

Entering in the second regime begins with a realization. This can be due to one or several "trigger events" [17, 27, 31]. Trigger events can be related to economic difficulties, climatic or health issues amplified by the instability of the context (external or internal to the farming household). The farmer may also come to realize that his system has become untenable [48]. This phase is a particularly uncomfortable state in which farmers doubt the relevance of their definition of "good farming". Then, this state makes them open up to different opportunities, options and different ways of farming.

Farmers actively look [40, 41] for more convenient practices and associated "good farming" definitions, remaining open to opportunities which can help them evolve. Farmers are highly sensitive to new information, especially when their uncertainty is strong [49]. They favor the more consistent one with their moral values and current unsatisfied goals. Developing a new complex option for adaptation is often very costly in terms of time, cognition and affect, as shown by [41] and consistently with [38]. Therefore, farmers focus quickly on learning and assessment of one possible transformational strategy at once. They can also return to the previous regime [49] if new

information comforts their current set of practices.

Change is closely related to the feeling of control over the considered practice [45], and more generally to the uncertainty in the process. During the whole transitory phase, the farmer acts to reduce uncertainty (by choosing more confident source of information, preferring simpler options, trying new things on his farm, looking for relationships and knowledge reinforcing already made choices [10, 41, 49-52]. Farmers are susceptible to changing their sources of information, the peers to whom they talk, and their advisers [41, 42] in order to find information and knowledge about a new practice, as well as to be reassured after they have chosen to adopt it. Their social network is dynamic: during the process, farmers adopt a more effective social environment in which to perform the new practice for achieving a desired outcome. They can also change their idea of what is a “good farmer” [31, 36], as well as the criteria used to evaluate their practice (for example, by giving more weight to the environmental impacts). To implement the process in agent-based models, the intent to adopt a new practice (as defined by the TPB) can be used as a proxy. The intent becomes high when: (1) the searching farmer has observed and memorized enough successful experiences of other farmers; (2) his social environment is perceived as sufficiently in favor of this new practice; (3) he feels confident enough in his ability to perform the practice. The proxy can be compared to a personal threshold beyond which change is considered. This threshold varies from one farmer to another, depending on how risk-averse or risk-taking he is [53].

After transformational change is engaged, the next issue is to understand how farmers re-enter a path-dependency period. According to the diffusion of innovation theory [42], the decision-making process is finished since the “new idea” is not “new” anymore for the decider and totally integrated as his own practice. During all the process, the farmer has made operational decisions driven both by the previous practice and the new practice, with the aim to acquire knowledge and reduce uncertainty. When the intention to remain in the transformed system is high enough, the farmer enters again a stable period dominated by incremental adaptations.

## **6. Discussion and perspectives**

From the literature, we have pointed out the current need for transformational changes in agriculture. Modelling decision-making is promising, but it remains focused on incremental changes despite important qualitative studies on transformational changes [17]. Our proposal for a description

of transformational change processes is an important step further toward the implementation of transformational change in computer models. As a perspective, we believe that agent-based models are particularly interesting to tackle transformational changes, rather than sole farm models, due to the crucial importance of collective aspects in decision-making processes. Moreover, existing agent-based models provide a relevant basis and can be improved in the light of our proposals. For example, the agent-based model of [54] considers the social influence as the key to enter into a decision process. In this model, if the initial opinion about the change is negative or low, the agents do not consider the decision. They are not really considering the innovation until their social opinion is high enough. Our description of transformational change provides new insights on key parameters, processes and threshold effects to be implemented in such models to tackle transformational changes.

It is important to point out that transformational change is neither opposed to nor independent from incremental changes: as [48], we have an integrated view of incremental and transformative adaptations in a unique cycle to adapt to global change. Finally, while some behavioral processes may remain fundamentally impossible to model [4], we believe behavioral models of transformational change could provide important insights to foster the required rapid sustainability transformations.

### **Acknowledgements**

We acknowledge funding from the Auvergne-Rhône-Alpes region (France).



## References

- [1] Darnhofer, I., et al., Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 2010. 30(3): p. 545-555.
- [2] Tscharntke, T., et al., Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, 2012. 151(1): p. 53-59.
- [3] Tilman, D., et al., Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002. 418: p. 671.
- [4] Brown, C., et al., Behavioral models of climate change adaptation and mitigation in land-based sectors. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2017. 8(2): p. e448-n/a.
- [5] Janssen, S. and M.K. van Ittersum, Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 2007. 94(3): p. 622-636.
- [6] Robert, M., A. Thomas, and J.-E. Bergez, Processes of adaptation in farm decision-making models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016. 36(4): p. 64.
- [7] Edwards-Jones, G., Modelling farmer decision-making: concepts progress and challenges. *Animal science*, 2006. 82(06): p. 783-790.
- [8] McGregor, M.J., M.F. Rola-Rubzen, and R. Murray-Prior, Micro and macro-level approaches to modelling decision-making. *Agricultural Systems*, 2001. 69(1-2): p. 63-83.
- [9] Latruffe, L., C. Nauges, and Y. Desjeux, The role of economic factors in driving conversion to organic farming. *Innovations Agronomiques*, 2013. 32: p. 259-269.
- [10] Feola, G. and C.R. Binder, Toward an improved understanding of farmers' behaviour: The integrative agent-centred (IAC) framework. *Ecological Economics*, 2010. 69(12): p. 2323-2333.
- [11] Goldstone, R.L. and M.A. Janssen, Computational models of collective behavior. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005. 9(9): p. 424-430.
- [12] Heckbert, S., T. Baynes, and A. Reeson, Agent-based modeling in ecological economics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010. 1185(1): p. 39-53.
- [13] Rickards, L. and S.M. Howden, Transformational adaptation: agriculture and climate change. *Crop and Pasture Science*, 2012. 63(3): p. 240-250.
- [14] Pelling, M., K. O'Brien, and D. Matyas, Adaptation and transformation. *Climatic Change*, 2015. 133(1): p. 113-127.
- [15] Kates, R.W., W.R. Travis, and T.J. Wilbanks, Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012. 109(19): p. 7156-7161.
- [16] O'Brien, K. and G. Hochachka, Integral Adaptation to Climate Change. *Journal of Integral Theory & Practice*, 2010. 5(1): p. 89-102.
- [17] Sutherland, L.-A., et al., Triggering change: Towards a conceptualisation of major change processes in farm decision-making. *Journal of Environmental Management*, 2012. 104: p. 142-151.
- [18] Herrero, M., et al., Livestock and the Environment: What Have We Learned in the Past Decade? *Annual Review of Environment and Resources*, 2015. 40(1): p. 177-202.
- [19] Dedieu, M.S., et al., The organic farms : which economic performances? Les acteurs économiques et l'environnement, I. References, Editor 2017: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3280932?sommaire=3280952>. p. 44.
- [20] Martin-Clouaire, R., Modelling Operational Decision-Making in Agriculture. *Agricultural Sciences*, 2017. 8(7): p. 527-544.
- [21] McCown, R.L., New thinking about farmer decision makers, in *The Farmer's Decision : Balancing Economic Agriculture Production with Environmental Quality*, J.L. Hatfield, Editor. 2005, Soil and Water Conservation Society: Ankeny. p. 11-44.
- [22] Bratman, M.E., D.J. Israel, and M.E. Pollack, Plans and resource-bounded practical reasoning. *Computational Intelligence*, 1988. 4(3): p. 349-355.
- [23] Rasmussen, J., Outlines of a hybrid model of the process plant operator, in *Monitoring behavior and supervisory control*. 1976. p. 371-383.
- [24] Klein, G., The recognition-primed decision (RPD) model: Looking back, looking forward. *Naturalistic decision-making*, 1997: p. 285-292.
- [25] Lamine, C. and S. Bellon, Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social

- sciences. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009. 29(1): p. 97-112.
- [26] Moulin C.H., Ingrand S., Lasseur J., Madelrieux S., Napoléone M., Pluvinage J., Thénard V., Understanding and analyzing organisational and livestock management practices changes in farms: methodological proposal., in *L'élevage en mouvement : flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, E.C. Eds B Dedieu, B Leclerc, CH Moulin, M Tichit) pp, 23-36, Editor. 2008, Éditions Quae. p. 23-36.
- [27] Barbier, C., M. Cerf, and J.-M. Lussou, Life stories of farmers to low input practices: the pleasures associated to the change of practices. *Activités*, 2015. 12(2): p. 27.
- [28] Boisdon, I., et al., Typology of trajectories of conversion to organic farming of mountainous dairy farms. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 2013.
- [29] Chantre, E., M. Cerf, and M. Le Bail, Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2015. 13(1): p. 69-86.
- [30] Lamine, C., Meynard J.M., Perrot N., Bellon S., Analysis of forms of transition toward more ecological farming: the organic farming and the integrated protection. *Innovations agronomiques*, 2009. 4: p. 483-493.
- [31] Alavoine-Mornas, F. and S. Madelrieux, Paths to organic farming. A variety of process. *Économie rurale*, 2014. 339-340(1): p. 65-79.
- [32] Chantre, E. and A. Cardona, Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2014. 38(5): p. 573-602.
- [33] Coquil, X., B. Dedieu, and P. Béguin, Professional transitions towards sustainable farming systems: the development of farmers' professional worlds. *IOS Press*, 2017. 57: p. 325-337.
- [34] Coquil, X., B. Dedieu, and P. Béguin. How do livestock and crop sciences represent evolutions of farming systems? A review. in 9. *European IFSA Symposium*. 2010. Vienne, Austria: University of Natural Resources and Applied Life Sciences.
- [35] Farrow, K., G. Grolleau, and L. Ibanez, Social Norms and Pro-environmental Behavior: A Review of the Evidence. *Ecological Economics*, 2017. 140: p. 1-13.
- [36] Sutherland, L.-A., Can organic farmers be 'good farmers'? Adding the 'taste of necessity' to the conventionalization debate. *Agriculture and Human Values*, 2013. 30(3): p. 429-441.
- [37] Sutherland, L.-A., "Effectively organic": Environmental gains on conventional farms through the market? *Land Use Policy*, 2011. 28(4): p. 815-824.
- [38] Petty, R.E. and J.T. Cacioppo, The Elaboration Likelihood Model of Persuasion, in *Advances in Experimental Social Psychology*, L. Berkowitz, Editor. 1986, Academic Press. p. 123-205.
- [39] Geels, F.W., From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, 2004. 33(6): p. 897-920.
- [40] Dowd, A.-M., et al., The role of networks in transforming Australian agriculture. *Nature Clim. Change*, 2014. 4(7): p. 558-563.
- [41] Mintzberg, H., D. Raisinghani, and A. Theoret, The Structure of "Unstructured" Decision Processes. *Administrative Science Quarterly*, 1976. 21(2): p. 246-275.
- [42] Rogers, E.M., *Diffusion of innovations*. 4th ed. 1995, 2010: Simon & Schuster Adult Publishing Group.
- [43] Valente, T.W., *Networks Models of the Diffusion of Innovations*. 1995: Hampton Press, Inc 23 Broadway, Cresskill, NJ 07626. 171.
- [44] Valente, T.W., Social network thresholds in the diffusion of innovations. *Social Networks*, 1996. 18(1): p. 69-89.
- [45] Ajzen, I., From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior, in *Action Control: From Cognition to Behavior*, J. Kuhl and J. Beckmann, Editors. 1985, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 11-39.
- [46] Fishbein, M., *A theory of reasoned action: some applications and implications*. 1979.
- [47] Moser, S.C. and J.A. Ekstrom, A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010. 107(51): p. 22026-22031.

- [48] Park, S.E., et al., Informing adaptation responses to climate change through theories of transformation. *Global Environmental Change*, 2012. 22(1): p. 115-126.
- [49] Öhlmér, B., K. Olson, and B. Brehmer, Understanding farmers' decision-making processes and improving managerial assistance. *Agricultural Economics*, 1998. 18(3): p. 273-290.
- [50] Ajzen, I., The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1991. 50(2): p. 179-211.
- [51] Deffuant, G., et al., Agent-based simulation of organic farming conversion in Allier département, in *Agent-based simulation of organic farming conversion in Allier département*, M.A. Janssen, Editor. 2002, Edward Elgar Publishing Limited: Cheltenham, UK - Northampton, USA. p. 158-187.
- [52] Sutherland, L.-A., et al., The 'Neighbourhood Effect': A multidisciplinary assessment of the case for farmer co-ordination in agri-environmental programmes. *Land Use Policy*, 2012. 29(3): p. 502-512.
- [53] Willock, J., et al., Farmers' Attitudes, Objectives, Behaviors, and Personality Traits: The Edinburgh Study of Decision-making on Farms. *Journal of Vocational Behavior*, 1999. 54(1): p. 5-36.
- [54] Deffuant, G., S. Huet, and F. Amblard, An individual-based model of innovation diffusion mixing social value and individual payoff dynamics. *American Journal of Sociology*, 2005. 110 (January)(4): p. 1041-1069.


## Chapitre 3. Raisons de ne pas adopter l'agriculture biologique

Cet article a été publié le 19 mars 2018 dans la revue *Natural Resource Modeling*.

Received: 20 October 2017 | Accepted: 19 March 2018  
DOI: 10.1111/nrm.12171

WILEY  Natural Resource Modeling

### Why do farmers not convert to organic farming? Modeling conversion to organic farming as a major change

Qing Xu<sup>1</sup>  | Sylvie Huet<sup>2</sup> | Christophe Poix<sup>1</sup> | Isabelle Boisdon<sup>1</sup> |  
Guillaume Deffuant<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, Inra, Irstea, VetAgro Sup, UMR Territoires, 63000, Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>Lisc - Irstea, 9 avenue Blaise Pascal, 63178, Aubière, France

#### Correspondence

Qing Xu, Université Clermont Auvergne,  
AgroParisTech, Inra, Irstea, VetAgro Sup,  
UMR Territoires, 63000, Clermont-Ferrand,  
France.  
Email: qing.xu@irstea.fr

#### Abstract

This study aims to better understand why farmers do not convert to organic farming by studying decision trajectories in a dynamic agent-based model. In this model, an agent's decision on transitioning to organic is based on the comparison between satisfaction with its current situation and potential satisfaction with an alternative farming strategy. A farmer's satisfaction was modeled by borrowing from the Theory of Reasoned Action and computed by comparing the farmer's performance over time against the farming practices of other farmers to which he/she lends great credibility ("important others"). Analysis identified five different reasons why a farmer does not change strategy. Three are due to satisfaction or recovered satisfaction with the current situation. The conversion to organic farming is effectively a major change and cannot be envisaged if the farmer is currently satisfied. Satisfaction can be recovered when evaluation by the farmer or "important others" finds an improvement of the current situation. A farmer's decision to not convert can also be due to negative evaluations of organic farming by "important others," or to dissatisfaction with the current situation being too transient to prompt the effort to convert.

# **Why do farmers not convert to organic farming?**

## **Modeling conversion to organic farming as a major change**

### **Abstract.**

This study aims to better understand why farmers do not convert to organic farming by studying decision trajectories in a dynamic agent-based model. In this model, an agent's decision on transitioning to organic is based on the comparison between satisfaction with its current situation and potential satisfaction with an alternative farming strategy. A farmer's satisfaction was modeled by borrowing from the Theory of Reasoned Action and computed by comparing the farmer's performance over time against the farming practices of other farmers to which he/she lends great credibility ("important others"). Analysis identified five different reasons why a farmer does not change strategy. Three are due to satisfaction or recovered satisfaction with the current situation. The conversion to organic farming is effectively a major change and cannot be envisaged if the farmer is currently satisfied. Satisfaction can be recovered when evaluation by the farmer or 'important others' finds an improvement of the current situation. A farmer's decision to not convert can also be due to negative evaluations of organic farming by 'important others', or to dissatisfaction with the current situation being too transient to prompt the effort to convert.

### **Recommendations for resource managers.**

- A farmer's decision on whether or not to convert to organic farming is deeply influenced by his/her satisfaction with the current strategy and potential satisfaction under an alternative farming strategy.
- A farmer's satisfaction is computed by comparing the farmer's performance over time against the farming practices of other farmers to which he/she lends great credibility.
- The conversion to organic farming is effectively a major change, and a farmer will not envisage a change of strategy if he/she is satisfied with their current situation.
- A farmer's satisfaction can be recovered when evaluation by the farmer or social peers finds an improvement of the current situation.

- If a farmer's credible peers have a negative assessment of organic farming or if his/her own dissatisfaction with the current situation is too short-lived, then the farmer will not convert to organic farming.

**Key words.**

Organic farming, decision-making, major change, theory of reasoned action, agent-based model, social influence, credibility

## Introduction

The recent dairy crisis combined with increasing consumer demand for organic food have made conversion to organic farming a socially and economically interesting move for dairy farmers (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara & Latruffe 2011). However, many of them still do not convert. Why not? Numerous studies point out that the dynamics of the decision depend significantly on how the agents view this decision. Michelsen (2001) and Tovey (1997) highlight that ethical and lifestyle factors shape farmers' decisions on going organic. To some scholars, organic farming is not just a set of techniques and practices but also a social movement (Fairweather et al. 2009; Darnhofer, Schneeberger & Freyer 2005; Rigby, Young & Burton 2001; Sutherland, Gabriel, et al. 2012; Pavie, Dockès & Echevarria 2002), and the conversion to organic farming has recently been qualified as a major change (Sutherland, Burton, et al. 2012) or a transformational adaptation (Rickards & Howden 2012; Dowd et al. 2014). Conversion thus implies strong changes in a farmer's identity, social network and worldview, and begins with a strong need for change (Barbier, Cerf & Lusson 2015; Sutherland, Burton, et al. 2012). More studies are needed to better understand this type of change that engages a number of social processes as well as a farmer's own changes in terms of relations with other farmers and the farmer's environment.

Agent-based modeling (Goldstone et Janssen 2005) or individual-based modeling (Grimm 1999) appear relevant and well-gearred to studying such farmer dynamics. However, a look at the reviews and model development literature show that there are practically no agent-based models for a major change (Brown et al. 2017; Janssen & van Ittersum 2007; Martin-Clouaire 2017; Robert, Thomas & Bergez 2016). One of the most recognized social behavioral models concerning agents in relation with others and their environment is the Theory of Reasoned Action (TRA; Fishbein 1979) and its extension, the Theory of Planned Behavior (TPB; Armitage & Conner 2001; Beedell & Rehman 1999; Beedell & Rehman 2000; Fielding et al. 2008; Hansson, Ferguson & Olofsson 2012; Lynne et al. 1995). However, these models are static. Here we propose a dynamic version of TRA to define a farmer's current or potential satisfaction regarding a behavior. These satisfactions are computed by an individual-based approach in which individuals represent farmers. We aim to investigate how the socio-psychological bases of TRA can explain the non-adoption of organic farming practices.

Our dynamic model was conceived through empirical study of dairy farmers in French mountainous areas, which offer a particularly relevant context for studying the socio-psychological dimensions of farmers' evolutions. Indeed, for these farmers, located in small villages with homogeneous farming production and practices, organic farming is high-value-added (Boisdon et al. 2013; Dockès et al. 2013b). The focus on these regions allows us to consider the economic issue of conversion to organic farming through a simple heuristic lens. A farmer is supposed to approximate how beneficial the conversion is through a simple observation of the "already converted" farmers. This approximation has been shown to be relevant (Bui et al. 2016; Chantre, Cerf & Le Bail 2015; Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2017; Lamine and Bellon 2009; Alavoine-Mornas and Madelrieux 2014), and organic farming practices have also been shown economically neutral or beneficial for a majority of dairy farmers (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara & Latruffe 2011). To gain more practical perspective, we have also interviewed a number of farming advisors and farmers from a similar region (in the departments of Loire and Haute-Loire) in France. The Loire is one of the departments in France that counts the most organic dairy farmers, yet for a long time these farmers did not benefit from an economic diagnosis of the conversion since there was no official advisor to do it. Most of them converted to organic farming without a "rational" or "official" economic impact assessment on the conversion move. Instead of focusing solely on economic issues, farmers told their stories on how they evolved in terms of strategy and practices (Barbier, Cerf & Lusson 2015; Boisdon et al. 2013; Bui et al. 2016; Chantre, Cerf & Le Bail 2015; Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2017; Dockès et al. 2013) .

The literature on organic farming simulation models is surprisingly poor. Most classical approaches focus on static motivations and barriers related to farm characteristics, like farm size, altitude, herd size, etc. (Gardebreek 2002; Boisdon et al. 2013; Fairweather 1999; Schneeberger, Darnhofer & Eder 2002; Dockès et al. 2013). Louhichi, Alary & Grimaud (2004) propose a linear mathematical model to study how dairy farmers change techniques in different policy contexts. Such decision-making models are very relevant for technical or financial decisions that fit the farm's main management trajectory.

Previous research has used agent-based models to understand such a process. In particular, the IMAGES agent-based model (Deffuant, Huet & Weisbuch 2002; Deffuant,



Huet & Amblard 2005) targets the diffusion of agri-environmental measures (AEM). In this model, a farmer decides to invest in assessing the economic benefit of the conversion only after reaching a certain threshold of his/her general social interest. If a farmer has a strong negative social interest in the conversion, he/she may never assess the economic interest on his/her own farm. This conclusion arises from the actual situations observed in the interviews with farmers at that time (between 1997 and 2001). The data from the European IDARI project<sup>6</sup> show also the same properties. In IMAGES, a farmer's general social interest is influenced by his/her discussions with peers. In the chosen dynamics, this influence is conditioned by a level of proximity in opinions (Deffuant, Amblard, et al. 2002). A farmer can thus keep a different opinion to the majority of his/her peers, which means a farmer can adopt an alternative farming strategy if he/she holds a strong positive opinion on the alternative, even though he/she is isolated in his/her social network and embedded in a local context that holds a negative opinion on his/her new strategy. This is not in line with data and literature. Indeed, data from the European IDARI project and the theory of innovation diffusion (Rogers 1983) argue that a converted agent changes relationships in order to reinforce its choice and stay well informed on its new practice. Thus, instead of keeping the same close relation with conventional farmers as before, a new organic farmer connects to other organic farmers. Moreover, in the IMAGES model, neither the current economic situation of a farm, nor a farmer's satisfaction with his/her current practice, has an impact on the motivation to seriously assess the alternative strategy. Obviously, the process does not start with a farmer's need for change.

The principles of the IMAGES model are similar to a number of theories in social psychology, including TRA (Ajzen & Fishbein 1975). TRA proposes a model to predict behavioral intentions with two conceptually distinct sets: attitude and subjective norm. Attitude is determined by beliefs about the possible outcomes of the behavior on various issues (economy, environment, autonomy, quality, etc.) as well as the importance given to these issues by the agent. Subjective norm is about how the agent perceives the opinions of others on the evaluated behavior, and reflects social pressure that encourages or discourages the behavior. This theory, extended by TPB (Ajzen

---

<sup>6</sup> IDARI (QLK5-CT-2002-02718): Integrated development of agricultural and rural institutions (IDARI) in Central and Eastern European Countries.

1991), has been shown to reliably predict the adoption of a wide range of behaviors, including environmentally responsible behaviors such as recycling, composting, energy use, water conservation, and sustainable agriculture practices (Boldero 1995; J. Beedell & Rehman 2000; Fielding et al. 2008).

Kaufmann, Stagl & Franks (2009) couple the IMAGES project's principles of social influence with TPB (Ajzen 1991), for which they propose a dynamic version. Their model is initialized with empirical data to measure the variables in the TPB. Each component of the theory is shown by a global variable. Only the subjective norm is made dynamic with the same social influence model as in IMAGES (Deffuant, Amblard, et al. 2002). Personal attitude and perceived behavioral control are static.

More recently, Deffuant, Carletti & Huet (2012) and Huet & Deffuant (2015) propose a complementary model of social influence in which influence does not depend on the difference between two people's beliefs but on the credibility one agent gives to another. This credibility depends on one's level of esteem for another.

Olabisi, Wang & Ligmann-Zielinska (2015) propose an exploratory agent-based model with an abstract social network to explain why there are not more farmers going organic. In their model, at the initialization, farmer agents are randomly distributed in social space and any two agents having a small enough difference in the social space can pass information. However, the social network is static.

Like Kaufmann, Stagl & Franks (2009), we propose a dynamic model of TRA (Ajzen & Fishbein 1975), which we use to compute a farmer's satisfaction. In our model, an agent's decision on conversion is based on comparing his/her satisfaction with current strategy against his/her potential satisfaction with an alternative farming strategy. These satisfactions are computed with attitude and subjective norm related to the current or alternative strategy. Both attitude and subjective norm are dynamic and based on the difference in performances of practices. Consistently with TRA (Ajzen & Fishbein 1975), our model integrates decomposed variables—in this case attitude and subjective norm—instead of global variables as in Kaufmann, Stagl & Franks (2009). Our work thus advances that a farmer's evaluation is based on his/her concrete strategy and practice instead of an abstract general opinion. The evaluation relates to his/her own experiences and his/her peers' strategies and practices.

A farmer's attitude regarding his/her current strategy is the difference between his/her performances with current strategy in memory and his/her current performance. Mintzberg, Raisinghani & Theoret (1976) and Öhlmér, Olson & Brehmer (1998) argue that a farmer's earlier practices are a hugely influential factor in his/her decision on a future practice.

Regarding an alternative strategy, since a farmer may have no memory about it, the attitude is the difference between his/her performances with current strategy in memory and the performances of other farmers who have already adopted the strategy or the performances of this strategy in the media.

Regarding the subjective norm, our model introduces a very different social influence process that is based on the credibility that an agent lends to another. This credibility is computed by a personal evaluation of another agent through the difference between their performances. This difference is appreciated through a value system that tells how good or bad the difference is. For example, for a conventional farmer, another farmer who produces more milk than he/she does will be evaluated positively and given high credibility. Our social influence model is closely related to the definition of professional identity and appears appropriate for the conversion to organic farming, as the conversion to organic farming is a major change that leads to deep shift in professional identity and possibly also personal values and social relations (Sutherland, Burton, et al. 2012). Note that the term "practice" in the model is not really a farmer's actual practice but the associated outcome on which it is evaluated.

Darré (1985) studied chat among dairy farmers and found that farmers co-construct their practices. Our model exemplifies the recent trend in cognitive sciences by considering individual-level cognition and behavior not in isolation but in a context of many interacting individuals (Mason, Conrey & Smith 2007). In the model, a farmer's practice is updated by comparing it against other farmers' practices.

Another important feature of our model is tied to the decision process integrating the concept of "major change". Major change is only considered in certain situations that are critical, as the various costs involved (economic, cognitive, emotional, etc.) are so expensive. Otherwise, actors do not even consider changing their major options. In a stable period, if a farmer is satisfied enough with his/her current farming strategy, he/she does not envisage an alternative one. Only a certain level of frustration or critical

event (succession, major change in the farm, etc.) will prompt a farmer consider an alternative to his/her current strategy.

Our dynamic model of TRA emerges a number of reasons why farmers do not change. In most cases, a farmer does not change because he/she is satisfied with his/her current strategy. This is often seen with farmers on large or medium farms in terms of production level. In some cases, a farmer does not change because he/she does not consider conversion as a better strategy than his/her own. In other cases, the farmer may not stay dissatisfied for long enough to decide a change strategy. Sometimes a farmer who is dissatisfied with his/her strategy can return to being satisfied due to an improvement of attitude or subjective norm. All these reasons are extracted from our dynamic model and studied in this paper.

After presenting the principles of our model, we outline the model's behaviors and give explanations related to them, especially the reasons for not changing farming strategy, before going on to synthesizing and discuss our conclusions.

## **Materials and Methods**

Here we describe the model: its basic elements and its dynamics.

### **The basic elements**

#### **The farmer**

The model studies the evolution of a population composed of  $N$  farmer agents. Each farmer agent is characterized by its farm, its farming strategy, its practice defined on several dimensions  $i$  which are evaluated through performances (where "practice" is not really a farmer's actual practice but the associated outcome on which it is evaluated), the importance  $W_i$  it gives to each dimension of practice, the credibility ( $C(f,v)$ ) it lends to each other farmer, and its memory of applied strategies and practices during the last  $M$  periods. Each agent can also have satisfactions with current farming strategy ( $I_D$ ) and with alternative ( $I_A$ ) farming strategy.

$DD$  and  $DC$  are an agent's attributes that capture the duration between two events related to the decision process.  $DD$  counts the duration of an agent's dissatisfaction

with its current strategy. In the model, an agent has to be dissatisfied long enough with its current strategy to change it.  $DC$  counts the duration of an agent's wait after changing strategy. After changing strategy, there is a confirmation period during which an agent cannot consider changing strategy again even if it is dissatisfied with the new one, which is consistent with innovation diffusion theory (Rogers 1983) in which an agent has a confirmation period just after adopting a new strategy. Both counters are necessary to simulate an agent's stability and consistency. The corresponding delayed action of both counters can only occur when the counter is above the parameter  $TD$ .

Except for  $W_i$ , all these attributes are dynamic during the simulation, and are described in detail below.

### *Credibility*

Each agent  $f$  gives a credibility  $C(f, v)$  to another agent  $v$  by comparing their practices. If the credibility given is below 0.01, we consider it as null, i.e. 0. Credibility is assumed to be between 0 (no credibility at all) and 1 (huge credibility).

### *Satisfaction*

Each agent has a satisfaction with its current farming strategy ( $I_C$ ) that corresponds to an evaluation of that strategy. If it is dissatisfied with its current farming strategy, the agent will also evaluate its satisfaction with the alternative one ( $I_A$ ). Satisfaction with a farming strategy lies between 0 (not satisfied at all) and 1 (very satisfied).

If an agent is satisfied with its current farming strategy, then it does not consider an alternative. Otherwise, its satisfactions with current farming strategy ( $I_C$ ) and with alternative farming strategy ( $I_A$ ) are computed and compared. If  $I_A$  is sufficiently better than  $I_C$  the agent will change farming strategy.  $I_C$  is thus computed at every iteration, whereas  $I_A$  is only computed when the agent is dissatisfied with its current farming strategy.

In accordance with TRA, the satisfaction  $I_S$  with a farming strategy  $S$  depends on two elements: attitude  $A_S$  and subjective norm  $SN_S$  toward  $S$ . In the original theory, the interaction between these two elements varies with different agents facing different situations. Here, in order to keep the model simple, satisfaction is assumed to be the

average value of these two elements.

$$I_s = \frac{A_s + SN_s}{2} \quad (1)$$

Both attitude and subjective norm lie between -1 (very negative attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate) and 1 (very positive attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate). They are computed with the farmers' practices, strategies, and credibilities. See the section below headed "Farmers' dynamics" for details of the computations.

Considering the value range of attitude and subjective norm towards a farming strategy, satisfaction should also have been between -1 and 1. However, to facilitate other calculations, satisfaction is normalized to between 0 and 1.

### *Practice*

As stated above, the term "practice" in the model is not really a farmer's actual practice, but the way he/she evaluates it. A practice is evaluated over two dimensions: level of production of the farm output (i.e. the productivity impact, in our case milk production), and the level of production of environmental amenities (i.e. the environmental impact), respectively called productivity performance ( $P_0$ ) and environmental performance ( $P_1$ ) in what follows. We assume  $P_0$  and  $P_1$  lie between 0 (very bad in this dimension of practice) and 1 (very good in this dimension of practice).

### *Importance given to each dimension of practice*

The importance given to productivity performance is termed  $W_0$ , and the importance given to environmental performance is termed  $W_1$ .  $W_0$  and  $W_1$  lie between 0 (not important at all) and 1 (most important) and they sum to one.

$$W_0 + W_1 = 1 \quad (2)$$

Importance here defines an agent's personal values. An agent uses its own lens to judge the information it receives and the other agents it meets. In this model, both  $W_0$  and  $W_1$  are kept constant if an agent does not change its farming strategy.

### *Farming strategy*

Farming strategy is defined by initialized environmental performance ( $P_1$ ) and the farmer's importance given to each dimension of practice. Here we are dealing with two farming strategies: organic and conventional. Farmers running an organic farming strategy lend more importance to environmental performance and less importance to productivity performance, whereas farmers employing a conventional farming strategy lend more importance to productivity performance and less importance to environmental performance.

### **Farm**

In the model, each farmer has a farm, which is very simply defined by two variables: level of production, and reference.

- Level of production is a synthetic indicator of a farm's characteristics. It defines the capacity to produce on the farm in terms of maximum level of milk production.
- Reference represents the capacity to produce on a farm under the corresponding farming strategy, and is less than or equal to level of production.

### *Level of production*

Our model is used to study French dairy farms in mountainous areas, where practice is production-capped by a quota system that in France has existed from 1970 (1984 in Europe) to 2015. Even since the end of the milk quotas system, a farmer's production is still more or less limited by the contract he/she has with the dairy enterprise that collects his/her milk. Under this contract, the dairy enterprise committed to buy a certain level of milk produced (that we will continue to call level of production for the sake of simplicity) at a certain price. If production is higher, the farmer gets a heavy fine in the first period (until 2015) or has to sell his/her surplus milk at a far lower price in the second period. Thus, in the model, a farm is constrained to produce less than a certain level of milk production. This maximum production is called  $Q$ . For the sake of simplicity, we call farms with a low level of production ( $Q0$ ) 'small farms', with a medium level of production ( $Q1$ ) 'medium farms', and with a high level of production ( $Q2$ ) 'large farms'.

In this model, there is no “dairy enterprise” object considered, and level of production remains constant over the time.

### *Reference*

On each farm, there is a reference corresponding to a farmer’s capacity to produce. This reference ( $R$ ) depends on the farm’s characteristics and farming strategy.

Analysis of the interviews and the experts’ arguments shows that the reference for farms applying a conventional strategy is very similar to their level of production, whereas references for organic farms are slightly lower than their level of production. This difference between conventional and organic farms is given by the parameter  $YLD$ .

Conventional farms are given the level of production ( $Q$ ) as reference while organic farms have a smaller reference which is considered to be ( $Q(1-YLD)$ ), where  $YLD$  is a parameter in the model ( $0 < YLD < 0.3$ ).

$$R^f = \begin{cases} Q^f & \text{if } f \text{ applies conventional strategy} \\ Q^f(1 - YLD) & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

### **Media**

When an agent is dissatisfied with its current farming strategy and looks for an alternative in the population, it first searches for other agents having its same level of production but applying an alternative farming strategy. If it cannot find one in the population, it has access to the media to benefit from the idealized description of the alternative farming strategy. In the media, there is one model for each farming strategy and each level of production. Each model has the best practice (highest value for both dimensions of a practice) it can have with its farming strategy and level of production. Media is kept constant during the simulation.

The next section presents the dynamics of the model.



# Farmers' dynamics

## Overview of a farmer's dynamics over years

One time-step (iteration)  $t \rightarrow t+1$  represents one year in real life, i.e. farmers decide their farming strategies, their practices, and so on, once a year.

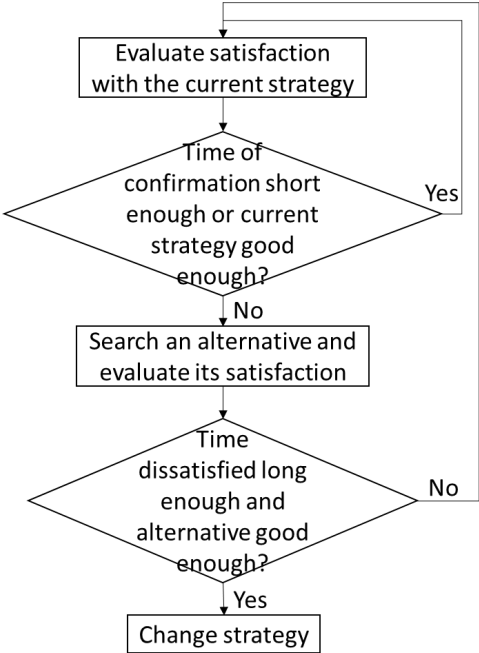


Figure 1—Overview of the farmer's update

As shown in Figure 1 and the pseudocode of algorithm 1, during each iteration, an agent evaluates its satisfaction with current farming strategy. If the agent is in a stable period and is satisfied with the current strategy, it does not consider a change. Otherwise, the agent looks for an alternative and evaluates it. If the agent has been dissatisfied for long enough and the alternative is good enough, the agent will change. Otherwise, the agent stays with its current farming strategy. It will then update the credibility given to other agents and practices.

```

For each iteration {
  Generate the order of the population
  For each agent  $f$  in the population {
    Compute  $I_C$ 
    If  $DC > TD$  and  $I_C < TA$ , compute  $I_A$ 
    If  $DD > TD$  and  $I_A > I_C + TO$ , change strategy and compute  $W_0, W_1$ 
    For each agent  $v$  that is different from agent  $f$  in the population, compute  $C(f, v)$ 
  }
  Compute  $P_0, P_1$ 
}

```

Algorithm 1— Population updating loop.  $I_C$  is satisfaction with the current strategy,  $I_A$  is satisfaction with the alternative strategy,  $DC$  is duration of an agent's confirmation state,  $DD$  is duration of an agent's dissatisfaction state,  $TD$  is minimum wait-time required comparing with  $DC$  and  $DD$ ,  $TA$  is threshold of  $I_C$  to consider an alternative,  $TO$  is threshold above  $(I_A - I_C)$  to change strategy,  $W_0$  is importance given to productivity performance,  $W_1$  is importance given to environmental performance,  $C(f, v)$  is the credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$ ,  $P_0$  is productivity performance,  $P_1$  is environmental performance.

During an iteration, the order of farmers to be updated is picked up at random using a uniform law.

### Farming strategy change

An agent changes its farming strategy according to its evaluations of satisfaction with the current farming strategy ( $I_C$ ) and with the alternative farming strategy ( $I_A$ ). As shown before, satisfaction  $I$  with a strategy ( $C$  for current strategy,  $A$  for alternative strategy) is the average sum of the related attitude and subjective norm. If an agent is stable, that is to say its duration of confirmation ( $DC$ ) is above a certain threshold ( $TD$ ) and it is still dissatisfied with its current farming strategy ( $I_C$  is less than a certain threshold  $TA$ ), it will consider an alternative. If the agent's duration of dissatisfaction since being stable ( $DD$ ) is above  $TD$  and  $I_A$  is better than the sum of  $I_C$  and a certain threshold  $TO$ , it will change farming strategy. The following shows how a farmer's attitude and subjective norm towards each strategy are computed.

In equation (1), attitude ( $A_s$ ) represents an agent's personal view of the difference between its experience and the practice to be evaluated. The agent's experience is its average practice  $(\overline{P_{C,0}}, \overline{P_{C,1}})$  with current farming strategy ( $S$ ) in its memory ( $M$ ). It is

computed like this:

$$\overline{P_{C,l}} = \frac{\sum_{t \text{ and } S^t=S}^M P_i^t}{Nb(S^t = S)} \quad (4)$$

The practice to be evaluated depends on the strategy to be evaluated. For the evaluation of agent  $f$ 's current farming strategy, the practice to be evaluated is each dimension of  $f$ 's current performance ( $P_i^f$ ).

So, agent  $f$ 's attitude toward the current farming strategy ( $A_C$ ) is like this:

$$A_C^f = \sum_{i=1}^2 (W_i^f (P_i^f - \overline{P_{C,l}})) \quad (5)$$

If an agent changes its practice, and this change is considered to be better than experience,  $A_C$  will be positive and strengthen the agent's decision to keep its current strategy. Otherwise, if its practice is worse than its experience,  $A_C$  will be negative and may influence  $I_C$  in such a way the agent will be dissatisfied and evaluate  $I_A$ .

For agent  $f$ 's evaluation of the alternative farming strategy, the practice to be evaluated is the average practice ( $\overline{P_{A,0}^f}, \overline{P_{A,1}^f}$ ) of other agents having the same initial level of production as  $f$  but applying the alternative farming strategy. The practice to be evaluated is computed as follows:

$$\overline{P_{A,l}^f} = \frac{\sum_{Q^v=Q^f \text{ and } S^v \neq S^f}^N P_i^v}{Nb(Q^v = Q^f \text{ and } S^v \neq S^f)} \quad (6)$$

If there is no corresponding peer (no other agents having the same initial level of production as  $f$  and applying the alternative farming strategy), then the agent will search the media for a stereotypical farm having a similar level of production in order to evaluate the alternative.

$$\overline{P_{A,l}^f} = P_{model,i}^f \quad (7)$$

So, agent  $f$ 's attitude toward an alternative is like this:

$$A_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 (W_i^f (\overline{P_{A,l}^f} - \overline{P_{C,l}^f})) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

Attitude is one component of satisfaction. The following shows how subjective norm, the second component, is valued.

Subjective norm represents how an agent considers others' opinions on the evaluated farming strategy. The strategy is evaluated through the agents' practices, i.e. the way they implement their strategy. Subjective norm is thus an agent's perceived difference between the practice to be evaluated and the average of other agents' practices.

For agent  $f$ 's evaluation of current farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_C^f = \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( P_i^f - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f P_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) \quad (9)$$

An agent will be very socially satisfied if it perceives that other agents, especially those to whom it lends great credibility ("important others"), consider him as a 'good farmer'. An agent may be so happy to have a good image in the peer group that it will never consider changing farming strategy. Otherwise, if the agent feels in a socially bad situation, it may try to change to become like others in the peer group or to change groups to get a better image in the lens of others. So, the situation can be bad enough to provoke an agent to decide to change strategy.

For the evaluation of alternative farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( \overline{P_{A,l}^f} - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f P_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

If, in the opinion of other agents, especially those to whom agent  $f$  lends great credibility ("important others") the alternative is not better, then it is judged not good enough to improve the bad situation. Agent  $f$  will thus tend to stay with its current strategy. Otherwise, if the alternative is better, it is considered a useful option to improve the bad situation. Agent  $f$ 's subjective norm will thus strengthen its intention to change to the alternative by increasing its satisfaction on the alternative strategy.

If an agent changes farming strategy, it will also change the importance given to each dimension of practice.

$$\text{For the agents applying conventional strategy: } W_0 = W(0, 0); W_1 = 1 - W(0, 0) \quad (11)$$

$$\text{For the agents applying organic strategy: } W_0 = 1 - W(0, 0); W_1 = W(0, 0) \quad (12)$$

### Credibility update

The relationship between agents is characterized by the credibility one gives to another, which depends on an agent's personal view of its difference in practice to another agent. For agent  $f$ , its difference to agent  $v$  is the sum of the difference for each dimension of practice weighted by the importance given to each dimension.

$$D_v^f = \sum_{i=1}^2 (W_i^f (P_i^v - P_i^f)) \quad (13)$$

The credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$  is calculated with  $f$ 's difference to  $v$ :

$$C_v^f = \frac{1}{1 + e^{-\alpha D_v^f}} \quad (14)$$

Where  $\alpha$  is the parameter used to characterize the slope of logistic function.

If agent  $v$ 's practice is worse than agent  $f$ 's,  $f$  gives little credibility to  $v$ . If agent  $v$ 's practice is better compared to  $f$ 's,  $f$  gives large credibility to  $v$ .

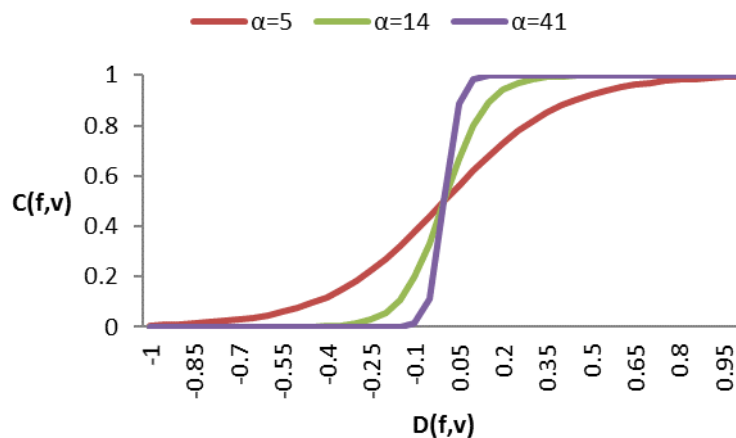


Figure 2—The credibility ( $y$ -axis) agent  $f$  gives to  $v$  depends on  $f$ 's difference ( $x$ -axis) to  $v$  for three values of parameter  $\alpha$  (different-colored lines)

In Figure 2, the difference between  $f$  and  $v$  is plotted on the x-axis. When this difference is negative, it means that  $v$  has a worse practice than  $f$ , and  $f$  gives little credibility to  $v$ . When the difference is positive,  $v$  has a better practice than  $f$ , and  $f$  gives greater credibility to  $v$ .

The lines with different colors represent the variation in different  $\alpha$ .  $\alpha$  characterizes the degree of bias that an agent has for others with better practices. When  $\alpha$  is small, the bias is small. An agent tends to give the same credibility to others, whether or not they have better practices. If  $\alpha$  is big, the bias is strong. Only other agents with better practices are credible.

In this model, every two agents are connected. As we know, credibility depends on an agent's perceived difference in practice to another. This credibility is then used to update the agent's practice which can change the perceived difference. Thus, the relationship associated to credibility is dynamic.

### Practice update

In our model, practice is updated by comparing against others' practices. In particular, an agent's practice can be strongly influenced by the practice of more credible peers, i.e; "important others".

$$\Delta P_i^f = \frac{\sum_{v \neq f}^N C_v^f (P_i^v - P_i^f)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \quad (15)$$

Both dimensions of practice are between 0 and 1. The productivity performance of a farm  $f$  is also limited by its farmer's reference.

$$P_0^{f,t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } (P_0^{f,t} + \Delta P_0^f < 0) \\ R^f & \text{if } ((P_0^{f,t} + \Delta P_0^f) > R^f) \\ P_0^{f,t} + \Delta P_0^f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

Environmental performance is updated as follows:

$$P_1^{f,t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } (P_1^{f,t} + \Delta P_1^f < 0) \\ 1 & \text{if } ((P_1^{f,t} + \Delta P_1^f) > 1) \\ P_1^{f,t} + \Delta P_1^f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

A special case: if agent  $f$  looks for an alternative and cannot find a peer at  $f$ 's initial level of production applying  $f$ 's alternative strategy, it will look for an alternative in the media. If, after evaluation, agent  $f$  adopts the alternative found in the media, then it will also copy the practice:

$$P_i^f = P_{model,i}^f \quad (18)$$

## Model behaviors

The model aims to study why some agents do not change farming strategy. The number of agents having changed farming strategy during the simulation is measured to diagnose the dynamic behavior. This part of the paper studies the behaviors of the model considering the impact of the most determinant parameters.

<i>Notation</i>	<i>Definition</i>	<i>Value(s)</i>
N	Number of agents in the population	100
ITE	Number of iterations in the simulation	100
M	Size of memory of agent's farming strategies and practices	10
F0	Proportion of small-farm farmers among all farmers	0.3
F1	Proportion of medium-farms farmers among all farmers	0.5
E0	Environmental performance of small conventional farms	0.5
E1	Environmental performance of medium conventional farms	0.4
E2	Environmental performance of large conventional farms	0.2
$\alpha$	Slope of the logistic function in the computation of credibility	[5,41]
TA	Threshold to consider an alternative farming strategy	[0.4,0.5]
TO	Threshold to change farming strategy	[0.01,0.1]
Q0	Level of production for small farms	[0.1,0.3]
Q1	Level of production for medium farms	[0.4,0.6]
Q2	Level of production for large farms	[0.7,0.9]
W(0,0)	Importance given to the dimension of practice corresponding to an agent's farming strategy	[0.6,0.1]
YLD	Proportional decrease in productivity performance after the conversion to organic farming strategy	[0.05,0.3]
TD	Threshold for the duration of confirmation and dissatisfaction before changing farming strategy	{5,6,...,10}

Table 1—Parameters and variables included in the model

Table 1 gives the definitions and values of the variables and parameters included in the

model. Sobol sensitivity analysis was used to identify main parameters responsible for the proportion of agents having changed farming strategy at the end of simulation. See Appendix 1 for details. Sobol sensitivity analysis showed that the most important parameter is  $TA$  (threshold to consider an alternative farming strategy), followed by  $TO$  (threshold to change farming strategy),  $W(0, 0)$  (importance given to the dimension of practice corresponding to an agent's farming strategy) and  $\alpha$  (slope of the logistic function in the computation credibility). In what follows, these important parameters are then varied while other less important ones are kept constant.

According to the hypothesis and simulation results of the model,  $Q0$  (level of production for small farms) is considered to be 0.2,  $Q1$  (level of production for medium farms) is 0.6,  $Q2$  (level of production for large farms) is 0.9,  $TD$  (threshold for two durations in the change process) is 5, and  $YLD$  (decrease of productivity performance after conversion) is 0.05.

As stated in the "basic elements" part, satisfaction with current farming strategy is between 0 and 1, with 0.5 the neutral satisfaction value. Satisfaction below 0.5 is considered dissatisfaction. Otherwise, the agent is satisfied. So,  $TA$  is considered to be a value below 0.5. We varied it from 0.41 to 0.49 in increments of 0.02, since in simulation practice it is rare for satisfaction to go below 0.41.

Change of strategy depends on how satisfaction compares between current and alternative farming strategy. Some changes are relatively easy to adopt while others can only be adopted when the alternative is clearly much better than current farming strategy.  $TO$  represents how much higher satisfaction with alternative farming strategy should be compared to satisfaction with the current one in order to adopt the alternative (i.e. to change farming strategy). We varied it from 0.01 to 0.09 in increments of 0.02.

$\alpha$  characterizes the degree of an agent's bias in credibility given to others having better practices. If  $\alpha$  is small, the agent tends to give a mid-range credibility (about 0.5) to everyone in the population. When  $\alpha$  is big, the agent has a strong bias for others having better practices. To explore different biases, we varied  $\alpha$  from 5 to 41 in increments of 9.

The importance given to each dimension of practice represents personal values. The



importance given to the dimension representing farming strategy, called  $W(0, 0)$  in what follows, was varied at initialization from 0.6 to 1 in increments of 0.1. As we only have conventional farmers at initialization,  $W(0,0)$  is the importance given to productivity performance whereas the importance given to environmental performance is the complementary to 1. 30 replications computed for each parameter set.

## **Parameters that influence an agent's decision**

Here we present parameters that have an important influence in prompting a change of farming strategy, and investigate various reasons for agents not changing farming strategy.

### **Changes due to $TA$ and $TO$**

Table 2 shows the average proportion of agents having changed farming strategy for 30 replications considering all variations of parameters  $\alpha$  (slope of the logistic function in the computation of credibility) and  $W(0,0)$  (importance given to the dimension of practice corresponding to an agent's farming strategy) for each value of  $TO$  (threshold to change farming strategy) and  $TA$  (threshold to consider an alternative farming strategy). The results show that the proportion of agents having changed farming strategy is smaller when  $TA$  is smaller and  $TO$  is larger.

The proportion of agents having changed farming strategy is lowest when  $TA$  equals 0.41 and  $TO$  equals 0.09. ' $TA$  equals 0.41' means that agent is dissatisfied only when its satisfaction with current farming strategy is below 0.41. ' $TO$  equals 0.09' means that satisfaction with the alternative strategy has to be at least 0.09 better than satisfaction with the current strategy for an agent to change farming strategy. Both conditions are the strictest, so the proportion of conversion is the least in this situation.

The proportion of agents having changed farming strategy is the highest when  $TA$  equals 0.49 and  $TO$  equals 0.01. In this case, the agent is easily dissatisfied with its current farming strategy and only has to be a little more satisfied with the alternative to adopt it.

### Changes due to $\alpha$ and $W(0, 0)$

Average proportion of change					
TO \	0.41	0.43	0.45	0.47	0.49
0.01	0.00	0.03	0.06	0.14	0.26
0.03	0.00	0.01	0.02	0.05	0.10
0.05	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06
0.07	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04
0.09	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03

Table 2—Proportion of changes for different values of  $TO$  and  $TA$  averaged over all the values given by the variations of parameters  $\alpha$  and  $W(0, 0)$  and their related 30 replications

Average proportion of change					
$W(0,0)$ \	5	14	23	32	41
0.6	0.06	0.03	0.06	0.06	0.07
0.7	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06
0.8	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03
0.9	0.07	0.01	0.01	0.03	0.03
1	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00

Table 3—Proportion of change for different values of  $W(0, 0)$  and  $\alpha$  averaged over all the values given by the variations of parameters  $TA$  and  $TO$  and their related 30 replications

Table 3 shows the results with  $\alpha$  and  $W(0, 0)$ . As expected, the length of the value distribution (0 to 0.074) shows that the results are less sensitive to  $\alpha$  and  $W(0, 0)$  than to  $TO$  and  $TA$ .

### Changes due to level of production

Outside the important indicators that emerged through the Sobol sensitivity analysis, we find that proportion of agents having changed farming strategy also depends on the farm's level of production. Indeed, as shown in Figure 3, farms having changed strategy are mostly small and large farms—medium farms convert the least. Level of production represents an agent's right or capacity to produce in terms of productivity performance. Thus farms with different levels of production may have different mechanisms driving their decisions on whether to change strategy.

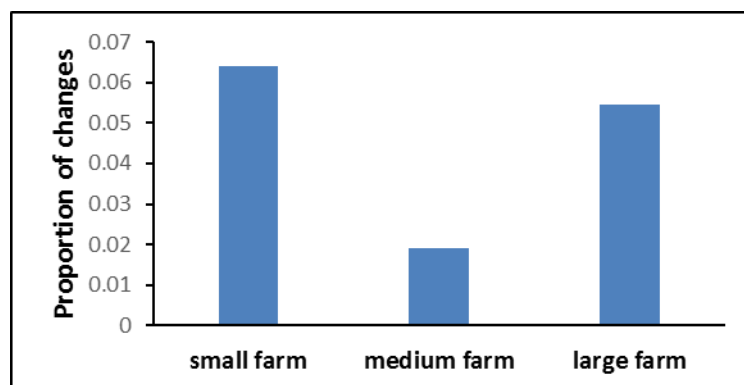


Figure 3—Average proportion of change according to type of farm (averaged over all the values given by the variations of parameters  $TA$ ,  $TO$ ,  $W(0, 0)$  and  $\alpha$  and their related 30 replications)

Knowing this particular sensitivity to level of production that Sobol analysis failed to reveal, we now turn to further investigate the reasons for not changing farming strategy for each farm type.

### **Different reasons not to convert for different farm types**

In our model, the computation of satisfaction is based on farming practices: an agent's own current practice, its practices in memory, and its perceived practices of other agents. Change of strategy is thus strongly related to the evolution of practices. The next subsections first give elements from an analytical study on the evolution of practices, then show the trajectories of "no conversion" in different cases, and lastly collect the corresponding reasons more or less related to evolution of practices.

### **Evolution of farming practices: analytical study**

As shown in equations (19) to (21), an agent updates its practice by comparing against other agents' practices. If agents give the same credibility to others, then all agents in the population will converge to the same practice. Otherwise, if agents have strong bias for others with better practices, there will be several groups of practices. This is deduced from analysis of the dynamics of credibility.

$$C_v^f = \frac{1}{1 + e^{-\alpha D_v^f}} = \begin{cases} 0.5 & \text{if } \alpha = 0 \text{ or } D_v^f = 0 \\ 1 & \text{if } \alpha \rightarrow \infty \text{ and } D_v^f > 0 \\ -1 & \text{if } \alpha \rightarrow \infty \text{ and } D_v^f < 0 \end{cases} \quad (19)$$

When  $\alpha = 0$ , agent  $f$  gives the same credibility (0.5) to all other agents.

$$\Delta P_i^f = \frac{\sum_{v \neq f}^N C_v^f (P_i^{v,t} - P_i^{f,t})}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} = \frac{\sum_{v \neq f}^N (P_i^{v,t} - P_i^{f,t})}{N} \quad (20)$$

$$P_i^{f,t} + \Delta P_i^f = P_i^{f,t} + \frac{\sum_{v \neq f}^N (P_i^{v,t} - P_i^{f,t})}{N} = \frac{\sum_v^N P_i^{v,t}}{N} \quad (21)$$

Agents try to have the averaged practice of the population. However, there are some agents that cannot reach it due to level-of-production limitations, as shown in equation (16). For example, small farms cannot have the productivity performance as the productivity performance initialized for medium farms because the maximum productivity performance of small farms is their level of production. However, medium and large farms can decrease their productivity performances. Consequently, small

farms will keep nearly the same productivity performance whereas medium and large farms will have a lower productivity performance. After a certain period, all agents will convert to a same productivity performance that is the level of production of small farms.

Equation (17) shows that agents have no particular constraint in terms of environmental performance, so after a certain period, agents will converge to a same value for environmental performance.

Thus, when  $\alpha = 0$ , agents give the same credibility to each other and convert to the same practice.

When  $\alpha \rightarrow \infty$ , agents have strong bias for other agents with better practices and try to imitate their practices. This means that large farms cannot be influenced by medium and small farms. Medium farms try to imitate large farms' practices. In terms of productivity performance, medium farms can only reach their medium-farm level of production, which is lower than the productivity performance of large farms. However, in terms of environmental performance, medium farms will decrease it to be like large farms. Small farms are influenced by medium and large farms. With the same mechanism of updating practice as medium farms, small farms will keep their level of production as productivity performance, and decrease their environmental performance to be like large and medium farms.

$$\Delta P_i^f = \frac{\sum_{v \neq f}^N C_v^f (P_i^{v,t} - P_i^{f,t})}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} = \frac{\sum_{v \text{ and } D_v^f > 0}^N (P_i^{v,t} - P_i^{f,t})}{Nb(D_v^f > 0)} \quad (22)$$

$$P_i^{f,t} + \Delta P_i^f = P_i^{f,t} + \frac{\sum_{D_v^f > 0}^N (P_i^{v,t} - P_i^{f,t})}{Nb(D_v^f > 0)} = \frac{\sum_{D_v^f > 0}^N P_i^{v,t}}{Nb(D_v^f > 0)} \quad (23)$$

Thus, when  $\alpha \rightarrow \infty$  (large enough), agents have strong bias for other agents with better practices, so there will be several different sets of practice in the population due to level-of-production constraints.

Next we look at how evolutions of practices can explain the lack of farmers converting to organic.

## Different types of farms have different reasons and trajectories

To further explain the reasons why an agent does not change, we studied agents' trajectories. For the sake of clarity, we consider a population of only 3 agents with 1 small farm, 1 medium farm, and 1 large farm. The simulations take 50 iterations. The results for each agent are analyzed with different variations of  $\alpha$  and  $W(0,0)$  and the maximum and minimum value of  $TA$  and  $TO$ .

The other parameters are kept constant. All farmers are initialized as conventional farmers, and each farmer has a memory of its last 10 chosen strategies and practices ( $M=10$ ). The proportional decrease in productivity performance with the conversion to an organic farming strategy is 0.05 ( $YLD=0.05$ ). The value for the delay mechanism  $D$  is 5. Level of production, initialized productivity performance and environmental performance for each type of farm are shown in Table 4.

	Level of production	Initialized productivity performance	Initialized environmental performance	Synthesis
Small farms	0.2	0.2	0.5	$Q0=P0=0.2, P1=0.5$
Medium farms	0.6	0.6	0.4	$Q1= P0=0.6, P1=0.4$
Large farms	0.9	0.9	0.2	$Q2= P0=0.9, P1=0.2$

Table 4—Initialized level of production, productivity performance and environmental performance by farm type

Overall, the analysis identified five reasons for non-conversion:

- An agent has never evaluated an alternative because it is always satisfied with its current strategy (**1. Current situation satisfactory**).
- An agent has evaluated an alternative:
  - But after a certain period, it no longer considers the alternative.
    - Because subjective norm was the principle reason for its dissatisfaction, and the value of its subjective norm has increased (**2. Dissatisfaction solved by subjective norm improvement**).
    - Because attitude was the principle reason for its dissatisfaction, and the value of its attitude has increased (**3. Dissatisfaction solved by attitude improvement**).
  - It continues to evaluate the alternative, but the alternative is not good (**4. Negative subjective norm of alternative**).

- The alternative is much better than the current strategy, but the duration of dissatisfaction is not long enough when the reason was diagnosed (**5. Short dissatisfaction duration**).

The related trajectories are described in further detail below.

*Trajectories of the different farm types show reasons for non-conversion*

In what follows, we present figures considering a 3-agent-population's evolution over time (from 1 to 10 iterations). Each agent has a different level of production. After the 10<sup>th</sup> iteration, the result does not change.

Reason 1. Current situation satisfactory: an agent is socially favored by its peers and satisfied with current strategy

This is **true for large and medium farms** in Figure 4. Their satisfactions with current farming strategy ( $I_C$ ) are high enough, and higher than  $TA$  (threshold to consider an alternative farming strategy, the value here is 0.41), to not consider an alternative. Conversely, the small farm is dissatisfied, as its  $I_C$  is lower than  $TA$  (0.41), but the computed satisfaction with the alternative farming strategy ( $I_A$ ) is not high enough to adopt it (i.e.  $I_A - I_C$  is lower than  $TO$  (threshold to change farming strategy, the value here is 0.01)). This difference satisfaction levels between the 3 agents is due to the difference in their subjective norms for the current farming strategy ( $SN_C$  in green) even though they share the same neutral attitude for current strategy ( $A_C$  in red).

The large farm has the highest productivity performance and is considered by other farms as having the best practice (because productivity performance is more important than environmental performance for conventional farmers), so the large farm is given the highest credibility and has the best subjective norm. Compared to the small farm, the medium farm has practice closer to the large farm, and is also given great credibility by the small farm, so it has a fairly good subjective norm. Conversely, the small farm has the lowest productivity performance, which is the worst practice in the population, so it is given poor credibility by others. It has a negative subjective norm. This makes it dissatisfied, and so it evaluates the alternative.

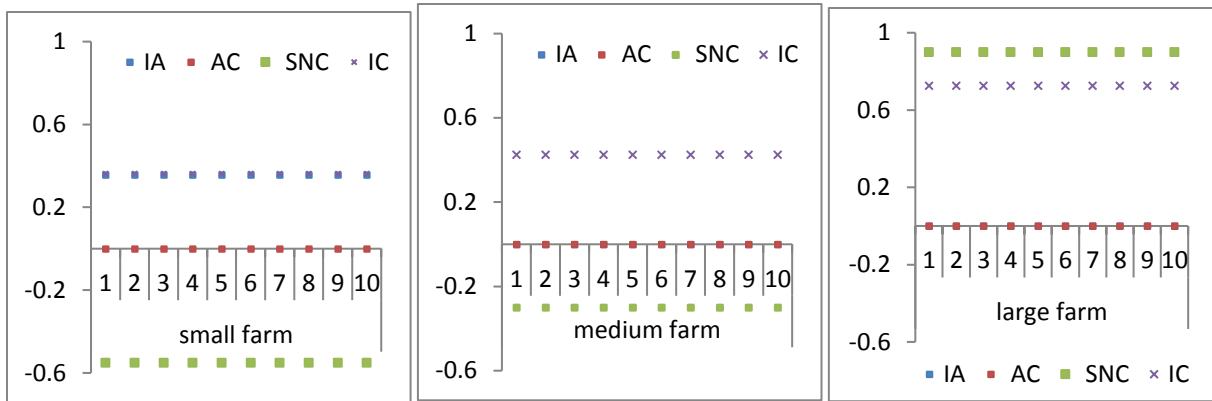


Figure 4—Evolution for each farm with different levels of production (large, medium and small) over time (in the x-axis above type of farm,  $I_A$  is satisfaction with the alternative farming strategy,  $A_C$  is attitude towards the current farming strategy,  $SN_C$  is subjective norm for the current farming strategy and  $I_C$  is satisfaction with the current farming strategy),  $\alpha=41$ ,  $TA=0.41$ ,  $TO=0.01$ , and  $W(0, 0)=1$ .

So if a farmer who owns a medium or large farm benefits from a positive subjective norm regarding its current strategy, it can be socially satisfied enough. In this case, it does not even consider a change of farming strategy, and so does not evaluate the alternative.

Reason 2. Dissatisfaction solved by subjective norm improvement: an agent returns to being satisfied because of the convergence of agents' practices and the associated improvement of current subjective norm

This is **true for the small farm** in Figure 5. The small farm is at first dissatisfied and evaluates an alternative. The dissatisfaction does not last long enough to change farming strategy ( $DD < TD$ ). Later it returns to being satisfied and no longer considers an alternative. Note that the agent stops evaluating the alternative ( $I_A$  in dark blue) with a strong increase of subjective norm for current farming strategy ( $SN_C$  in green). This increase is due to the convergence of all agents' practices.

At first, the small-farm agent has a negative subjective norm because its productivity performance is the worst in the population. It tries to improve its practice by imitating the practices of its credible peers, particularly the large farm which is lower on environmental performance and higher on productivity performance. However, it can only decrease its environmental performance because its productivity performance is limited by level of production.

The medium farm can be influenced by the small farm and the large farm. On environmental performance, the small farm has a better result and the large farm has a worse result. Thus the medium farm does not change its environmental performance too much. On productivity performance, with the level-of-production constraint, the medium farm can only decrease its productivity performance to be like the small farm. The initialized practice of the medium farm is close enough to that of the large farm, so the large farm gives credibility to the medium farm and also updates its practice by looking at the medium farm's practice. Thus, the large farm decreases its productivity performance and increases its environmental performance. Finally, all agents converge to the same practice.

This convergence of practice reduces the practice differential between the small farm and the others. The small farm thus has a better subjective norm than before, which can make it return to being satisfied with current strategy.

In this case, with convergence of all agents' practices, an agent dissatisfied due to negative subjective norm can recover a neutral or positive subjective norm and become re-satisfied with current strategy.

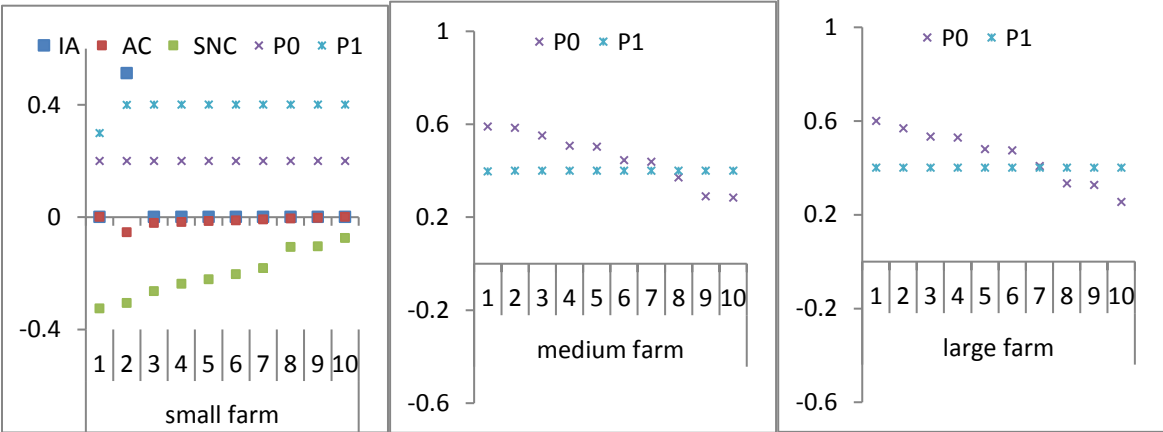


Figure 5—Evolution for each farm with different levels of production (large, medium and small) over time (in the  $x$ -axis above type of farm,  $IA$  is satisfaction with the alternative farming strategy,  $AC$  is attitude towards the current farming strategy,  $SNC$  is subjective norm for the current farming strategy,  $P0$  is productivity performance o and  $P1$  is environmental performance),  $\alpha=14$ ,  $TA=0.41$ ,  $TO=0.01$ , and  $W(0, 0)=0.7$

In fact, this convergence of practice can arrive at many different levels according to different initializations of the population. When we change to a 10-agent population with 3 small farms, 5 medium farms and 2 large farms, the convergence of practice can



encompass a part of the population instead of all agents.

Figure 6 shows the trajectory for one agent from each level of production in a 10-agent population. Farms with the same level of production show the same pattern of behavior along the trajectory. As in the previous example presented in Figure 5, the small farm is dissatisfied at first and returns to being satisfied later and this change is again due to convergence of other agents' practices, but this time its own practice remains different from the practice of others. The medium farm is influenced by and influences the large farm's practice, as in the previous example, but this time it is not influenced by the small farm. The large farm converges to the medium farm's practice as in the previous example.

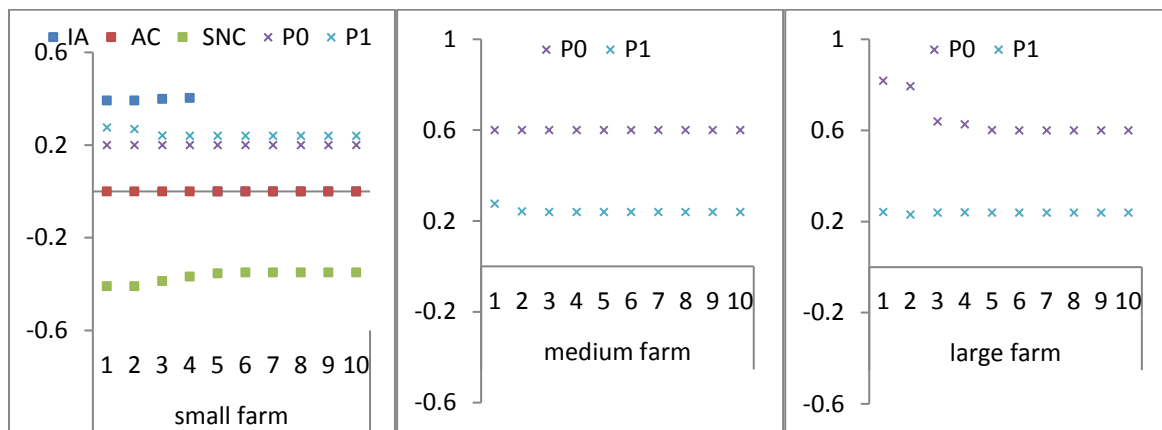


Figure 6—Evolution for each farm with different levels of production (large, medium and small) over time (in the  $x$ -axis above type of farm,  $IA$  is satisfaction with the alternative farming strategy,  $AC$  is attitude toward the current farming strategy,  $SNC$  is subjective norm for the current farming strategy,  $PO$  is productivity performance and  $P1$  is environmental performance),  $\alpha=14$ ,  $TA=0.41$ ,  $TO=0.09$ , and  $W(0, 0)=1$

In this example, the medium farm does not give credibility to the small farm so its practice is not influenced by the small farm, whereas in the previous example, the medium farm gave credibility to the small farm, which influenced its practice. Thus, the convergence is partial in this example and total in the previous example. This difference is due to different initializations of population.

So with the convergence of agents' practices, an agent can have a better subjective norm, which can bring it back to being satisfied with current strategy. This convergence can be partial or total with different initializations of population, and can change the practices of different farms in different ways.

Reason 3. Dissatisfaction solved by attitude improvement: an agent returns to being satisfied because its practice is stabilized and its experience is updated

As shown in Figure 7, this reason is **true for the large farm**. For a short period, it is dissatisfied and evaluates an alternative. The dissatisfaction does not last long enough to change farming strategy ( $DD < TD$ ). Later it returns to being satisfied and no longer considers an alternative. The variation in its evaluation of alternative ( $I_A$  in dark blue) is strongly influenced by its attitude to current farming strategy ( $A_C$  in red). This change is because its practice is stabilized and its experience is updated.

With a small  $\alpha$  equal to 5, agents in this population tend to give nearly the same credibility to others regardless of whether their practices are better or not, so the convergence of practice happens quickly in this population. The small and the medium farms, being limited by level of production, cannot increase their productivity performance despite the large farm's influence. Thus, the large farm decreases its productivity performance a lot due to the credibility given to the medium and small farms. These farms with different levels of production are closer on environmental performance, so each agent can then freely update its environmental performance in a trade-off between credibility and environmental performance results.

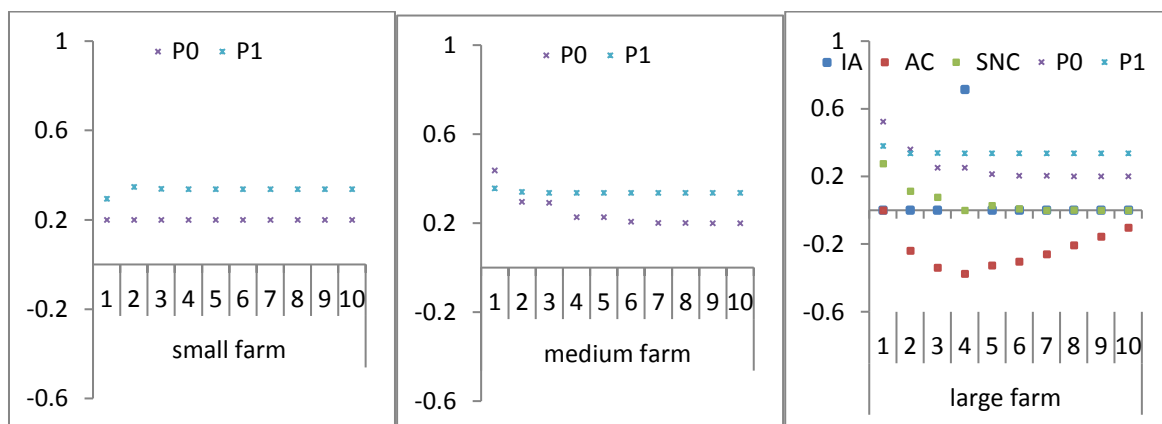


Figure 7—Evolution for each farm with different levels of production (large, medium and small) over time (in the  $x$ -axis above type of farm,  $I_A$  is satisfaction with the alternative farming strategy,  $A_C$  is attitude toward the current farming strategy,  $SNC$  is subjective norm for the current farming strategy,  $PO$  is productivity performance and  $P1$  is environmental performance),  $\alpha=5$ ,  $TA=0.41$ ,  $TO=0.01$ , and  $W(0, 0)=0.8$

Due to influence of other farms' productivity performance, the large farm experiences strong drop of productivity performance. This adds dissatisfaction to its attitude, which is the comparison between current practice and practices in memory. Its attitude

toward the current strategy continues to deteriorate because its updated practice continues to fall lower compared to its experience. It keeps updating experience with new practices which are worse than before, and continues to have a negative attitude until the practices have converged and its experience stabilizes to reach a par with its current practice. If the time required to recover a neutral attitude is shorter than the threshold of dissatisfaction duration ( $TD$ ) before changing strategy ( $DD < TD$ ), the agent can return to being satisfied with its current strategy, just as shown in Figure 7.

In fact, if the speed of practice convergence, size of memory duration ( $M$ ), and threshold of duration before changing strategy ( $TD$ ) are different, we may have different outcomes.

Reason 4. Negative subjective norm of alternative: an agent keeps being dissatisfied and keeps evaluating the alternative which has a negative subjective norm

This reason is **true for the small farm** in Figure 8. The small farm keeps being dissatisfied and keeps evaluating the alternative. However, its satisfaction with the alternative ( $I_A$  in dark blue) does not change and is never good enough, i.e. less than the sum of its satisfaction with current farming strategy and threshold of changing farming strategy,  $I_A < I_C + TO$  (*threshold to change farming strategy*)).

Conversely, the medium and large farms are satisfied with their current strategy. The difference is due to their subjective norm, because all farms have a same attitude ( $A_C$  in red). The small farm is dissatisfied because of its bad subjective norm ( $SN_C$  in green).

As the large farm has a bias for agents with better practices, it does not give credibility to medium and small farms. The medium farm does not give credibility to the small farm neither. So as the small and the medium farms give high credibility to the large farm, they try to copy its practice. They decrease environmental performance to be like the large farm. On productivity performance, they cannot change because of their level-of-production constraint. Finally, all farms arrive at the same environmental performance ( $P_I$  in light green) and productivity performance ( $P_O$  in purple) corresponding to their respective levels of production.

Thus, the large farm is satisfied because it has the best practice among all farms. As they are all conventional farms, they all consider productivity performance as the most

important. The medium farm is also satisfied because its productivity performance is similar to the large farm's and better than the small farm's.

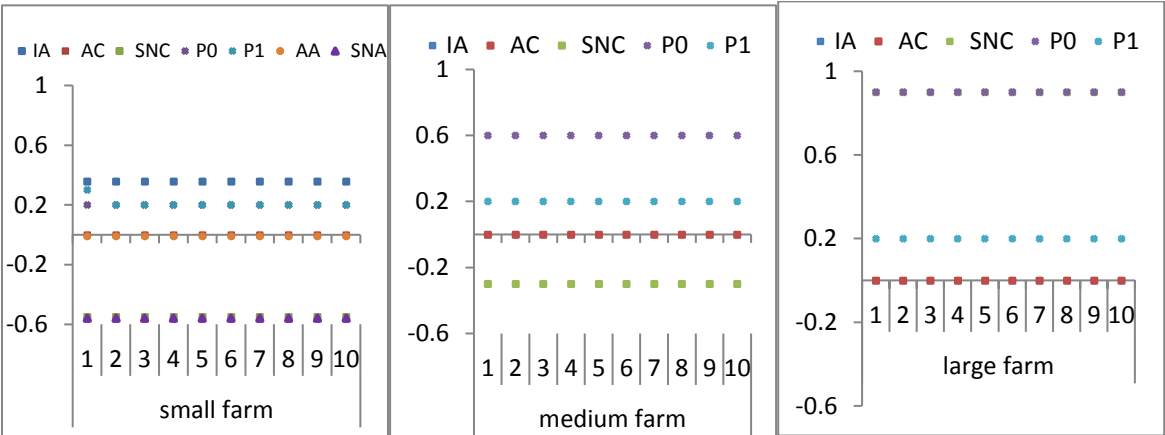


Figure 8—Evolution for each farm with different levels of production (large, medium and small) over time (in the  $x$ -axis above type of farm,  $IA$  is satisfaction with the alternative farming strategy,  $AC$  is attitude toward the current farming strategy,  $SNC$  is subjective norm for the current farming strategy,  $PO$  is productivity performance,  $P1$  is environmental performance,  $AA$  is attitude toward the alternative farming strategy and  $SNA$  is subjective norm for the alternative farming strategy),  $\alpha=23$ ,  $TA=0.41$ ,  $TO=0.01$ , and  $W(0, 0)=1$

The small farm has a negative social norm, and so it looks for an alternative. However, with the level-of-production constraint, the alternative also has a negative subjective norm ( $SN_A$  in dark purple) and is not good enough to trigger the change of strategy. The small farm thus stays dissatisfied and evaluates the alternative as not good enough to move for change.

An agent can keep its current farming strategy with dissatisfaction, because alternative is not good enough, particularly from a subjective norm point of view.

Reason 5. Short dissatisfaction duration: an agent does not change even though it has a good alternative, because it does not stay dissatisfied for long enough

Figure 9 shows the evolution of the large farm as presented in Figure 7. During certain iterations (e.g. iteration 4), the large farm is dissatisfied and evaluates the alternative. Its satisfaction with the alternative farming strategy is much higher than its satisfaction with current farming strategy ( $IA > IC+TO$ ). However, it does not change because it does not stay dissatisfied for long enough ( $DD < TD$ ).

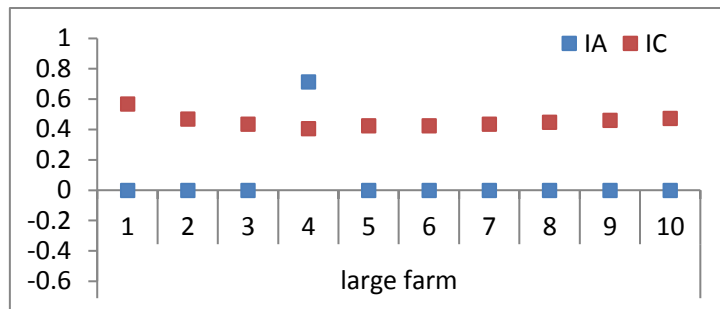


Figure 9—Evolution for the large farm over time (in the  $x$ -axis above type of farm,  $IA$  is satisfaction with alternative farming strategy,  $IC$  is satisfaction with current farming strategy),  $\alpha=5$ ,  $TA=0.41$ ,  $TO=0.01$ , and  $W(0, 0)=0.8$ .

So an agent can keep its current farming strategy with dissatisfaction despite having a good alternative, because it does not stay dissatisfied with the current strategy for long enough.

*Overview of reasons for non-changing farming strategy on different types of farms*

A detection algorithm is applied in the model to diagnose reasons for non-changing strategy (see Appendix 2). Table 5 shows the results of this automatic diagnosis for a 3-agent population with different levels of production (1 small, 1 medium, 1 large). The results present the most frequent reasons for non-changing farming strategy with different parameter sets, which are the combination of different values of  $\alpha$  (slope of the logistic function in the computation of credibility) and  $W(0, 0)$  (importance given to the dimension of practice corresponding to the agent’s farming strategy), and the maximum and the minimum values of  $TO$  (threshold to change farming strategy) and  $TA$  (threshold to consider an alternative farming strategy). Each number associated to a color in each cell corresponds to the most frequent reasons over 1000 replications. An empty cell means that the agent changes farming strategy in this parameter-set.

The results show that reason 1 is the most frequent reasons, followed by reason 4, reason 2 and reason 3. Reason 5 does not appear in these tables as it is the most tightly conditioned reason.

When the importance of productivity performance is not substantially higher than the importance of environmental performance (top of the top table), a small farm can be satisfied with current strategy and does not consider the alternative at all because it is socially favored by its peers – reason 1 (current situation satisfactory). For the medium

and large farms, most of the time they keep their current strategy with reason 1 (current situation satisfactory), especially the large farm. As they have a higher productivity performance in the population, they usually have a good evaluation of current strategy, particularly from a subjective norm point of view. So most of the time, they do not change farming strategy due to current situation satisfactory.

W00 \ α	small farm	5		14		23		32		41	
small farm	TO \ TA	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49
0.6	0.01	1		1		1		1		1	
	0.09	1		1		1		1		1	
0.7	0.01	1		1							
	0.09	1		1							
0.8	0.01	1		2,3							
	0.09	2	2	2,3	2	4	4	4	4	4	4
0.9	0.01	2									
	0.09	2	2	3	2	4	4	4	4	4	4
1	0.01	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4
	0.09	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4

W00 \ α	medium farm	5		14		23		32		41	
medium farm	TO \ TA	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49
0.6	0.01	1		1		1		1		1	
	0.09	1		1		1		1		1	
0.7	0.01	1		1		1		1		1	
	0.09	1		1		1		1		1	
0.8	0.01	1		1		1		1		1	
	0.09	1		1		1	4	1	4	1	4
0.9	0.01	1		1		1		1		1	
	0.09	1		1		1	4	1	4	1	4
1	0.01	1		1		1	4	1	4	1	4
	0.09	1		1		1	4	1	4	1	4

W00 \ α	large farm	5		14		23		32		41	
large farm	TO \ TA	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49	0.41	0.49
0.6	0.01	1		1		1		1		1	1
	0.09	1		1		1		1		1	1
0.7	0.01	1		1		1		1		1	1
	0.09	1		1		1		1		1	1
0.8	0.01	1		1		1		1		1	
	0.09	1		1		1	1	1	1	1	1
0.9	0.01	2,3		1		1	1	1	1	1	1
	0.09	2,3		1		1	1	1	1	1	1
1	0.01	3		1		1	1	1	1	1	1
	0.09	3		1		1	1	1	1	1	1

Tables 5—Different reasons for which farms do not change (from top to bottom: for small farms at top, medium farms at middle, and large farms at bottom). Reason 1 is current situation satisfactory; reason 2 is dissatisfaction solved by subjective norm

improvement; reason 3 is dissatisfaction solved by attitude improvement; reason 4 is negative subjective norm of alternative; reason 5 is short dissatisfaction duration.

Reason 4 (negative subjective norm of alternative) is also an important reason for small and medium farms. This reason can be true when  $\alpha$  (slope of the logistic function in the computation of credibility) and  $W(0, 0)$  (importance given to the dimension of practice corresponding to the agent's farming strategy) are big (bottom-right corner of the top and middle tables). Large farms are not influenced by small and medium farms when  $\alpha$  is big, which implies a strong bias for credible farms (farms with better practices), so the difference between farms remains large, especially on productivity performance to which these conventional farms give more importance. Thus small and medium farms remain dissatisfied with their current strategy while neither current nor alternative strategy is satisfactory (impact of  $\alpha$  and  $W(0, 0)$ ).

Reason 2 (dissatisfaction solved by subjective norm improvement) is usually found for small farms in a population with strong convergence of practice (impact of  $\alpha$ ). The small farm has a negative subjective norm because of the level-of-production constraint. However, its difference to other agents can decrease as practice in the population converges, which can improve its subjective norm and make it return to be satisfied with current strategy.

Reason 3 (dissatisfaction solved by attitude improvement) also relates to a convergence of practice that can make an agent feel dissatisfied because of its worse practice than in memory, which can provoke a negative attitude. However, with the update of experience and stabilization of practice, the agent can return to be satisfied.

## **Discussion**

The model proposes various possible farmer trajectories leading to the non-adoption of organic farming. It shows that the reason most farmers do not change strategy is because they are satisfied with their current situation. In some cases, farmers stay with their current strategy because they do not consider the alternative as a substantially better strategy than the current one. Sometimes, farmers dissatisfied with their current strategy become satisfied again because of an improvement of their personal evaluation or perceived evaluation by others of their current situation. In certain cases, they are sufficiently dissatisfied to evaluate the alternative which is interesting enough,

but do not make the decision to convert because they are not dissatisfied for long enough.

The discussion below looks at the value of each simulated reason for non-adoption of organic farming in light of the literature.

### **The reason “alternative is badly evaluated”**

This reason corresponds to classical vision of farmer non-conversion. Most of the literature grounds non-conversion in features of organic farming (Kirchmann & Thorvaldsson 2000; Edwards-Jones & Howells 2001; Rigby & Cáceres 2001; Trewavas 2001; Hill & Lynchhaun 2002). The majority of conventional farmers interviewed in the Associati<sup>2</sup> project also argue that their reasons for non-converting are related to features of organic farming, like market uncertainty or tough specifications.

In fact, farmers’ concerns over converting to organic farming stem from their uncertainty over the future, which is consistent with an insufficient perceived behavioral control in TPA (Ajzen 1991). This could be an informative element to integrate in the next version of model.

This reason is the most frequent in the literature and in real-world interviews. However, it can result from a deep introspection or just social opinion. Indeed, a farmer satisfied with his/her current situation almost never considers conversion (Deffuant et al, 2002), in which case his/her opinion on organic farming is more due to how he/she perceives the social norm, as in our model, than any deep introspection.

### **The reason “satisfied with current strategy”**

As proposed by many researchers, a major change like the conversion to organic farming is always related to dissatisfaction with the current situation (Sutherland, Burton, et al. 2012; Chantre, Cerf & Le Bail 2015; Huet et al. 2018), and ultimately a need for profound transformation (Barbier, Cerf & Lusson 2015). Farmers who perceive the current situation as satisfactory do not make any big changes (Öhlmér, Olson & Brehmer 1998).

In the model, this reason mainly applies for “high-production” farms (schematically



called 'large farms' here). The stereotype of a farmer's main task is to produce more to feed the world. Farmers with large farms produce more than others and are considered as leaders of the system. Compared to others, especially lower-producing farms, they are more often satisfied with their current situation and do not consider changing. Their trajectories will be to continue with conventional farming and intensify more. This type of trajectory is also confirmed elsewhere (Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2017; X. Coquil et al. 2013; Alavoine-Mornas & Madelrieux 2014; Lamine et al. 2009). Bos, Smit & Schröder (2013) and Groeneveld et al. (2016) also argue that large farms intensify more than small farms.

Conversely, farmers with a low level of production (small farms) are heavily burdened with production pressures and are more sensitive to external events, and so are more likely to be dissatisfied with the current situation. Thus, real small farms, but also our virtual small farms, are more likely to convert, as shown by the farmer interviews led under the Associatione<sup>7</sup> project.

In the model, each farm has a fixed initial level of production without any external effect. In fact, farmers can increase/decrease their level of production by expanding/selling milking herd, etc. According to Dervillé et al. (2017), Barthélemy & David (2001), and Gouin, (1988), levels of production can be either transferred directly between farmers via land sales or exchanged through a departmental commission, either with or without compensatory payments. Over the last 20 years, farms have increased their overall level of production, as shown by Depeyrot (2017) for French dairy farms. This potential to increase, as well as actual effective increase, have meant that farmers have remained fairly satisfied with their current situation and delayed their change of strategy. A valuably informative next step in the modeling work would thus be to give virtual farmers the possibility to increase their level of production.

External events, such as price collapse or climate shock, are also essential drivers of farmers' strategy decisions. Contrary to Deffuant, Huet & Weisbuch (2002), Kaufmann, Stagl & Franks (2009) argue that economic factors are more influential than social

---

<sup>7</sup> ASSOCIATIONE. Projet "Thématiques émergentes" [Emerging issues]. Auvergne-Rhône-Alpes regional council, 2015-2019

factors in farmers' conversion decisions. Opportunities, especially market opportunities, are also considered as an important driver of transition by other authors (Barbier, Cerf & Lusson 2015; Lamine et al. 2009; X. Coquil et al. 2013; Martin-Clouaire 2017; Chantre, Cerf & Le Bail 2015; Alavoine-Mornas & Madelrieux 2014). Thus external events, negative or positive, should be taken into account in future development of the model, since they can facilitate or impede the change.

### **The reason “dissatisfaction solved by subjective norm improvement”**

As shown by Darré (1985) and the Associatione<sup>2</sup> project interviews, farmers co-construct their practices, and most of them are now using less pesticides and other chemical inputs. Various studies provide useful insights into the roles of social evaluation (Barbier, Cerf & Lusson 2015; Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2017; Chantre, Cerf & Le Bail 2015). To have a good enough social identity, a farmer in dissonance with his/her social group may change groups by changing strategy, or simply imitate the practice of other in-group members. This phenomenon also appears in our model: the convergence of farmers' practices sometimes prevents them from changing strategy. In such a case, the commonly adopted practice becomes a norm that dictates whether farmers are satisfied with themselves.

However, the complete convergence of practice shown in the model is quite rare in reality. As argued by Martin-Clouaire (2017), farmers always make decisions with neighbors or partners, even for daily routines, but their practices are rarely exactly duplicated. The complete convergence of practice in the model is due to the oversimplified initial distribution of farms' levels of production, as well as the impossibility of increasing level of production (as discussed in the previous subsection). Using our model to investigate initial populations built from real-world data, for example from the French census of farms, would be valuably informative here.

### **The reason “dissatisfaction solved by attitude improvement”**

Earlier performance is very important for a farmer to evaluate his/her current situation (Öhlmér, Olson & Brehmer 1998; Mintzberg, Raisinghani & Theoret 1976; Wärneryd 1988). A farmer's decision on whether to convert can be strongly influenced by his/her experience. In addition, many authors consider learning from experience as an indispensable process of farming-system evolutions over the long term (Xavier Coquil,

Dedieu & Béguin 2017; Martin-Clouaire 2017; Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2010). In the model, a farmer can have a better self-evaluation and return to be satisfied with his/her current situation by regularly integrating his/her experience and updating his/her personal attitude.

Similar to the reason "dissatisfaction solved by subjective norm improvement", updating attitude with experience can also lead to a progressive change of practice that, in turn, can lead the farmer to a more satisfactory social status.

Farmers learn with their experience, and this can usually reverse a change of their values, as shown by the importance given to each dimension of practice (Sutherland, Burton, et al. 2012; Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2017). The dynamics of this importance warrant integration in future work.

### **The reason "short dissatisfaction duration"**

Mintzberg, Raisinghani & Theoret (1976), Öhlmér, Olson & Brehmer (1998) and Sutherland et al. (2012) argue that a major change in farming activities occurs only when there is an accumulation of experiences and events resulting in the farm manager recognizing and realizing a need for change. They also argue that the decision process needs to mature over a long period of time. Many converted farmers interviewed in the Associatione<sup>2</sup> project also declared that they waited long after a socio-technical diagnostic of the conversion impact before actually completing the final conversion. Alavoine-Mornas & Madelrieux (2014) also observed this type of trajectory where some farmers wait for a long time to convert to organic farming even though everything is ready.

In order to understand long-term processes of change, some agronomists argue that professional transition processes such as the conversion to organic farming reflect the dichotomies not only between the farmer's wishes for the future and what proves possible, but also between problems that arise and the solutions that can be implemented (Martin-Clouaire 2017; Chantre, Cerf & Le Bail 2015; Xavier Coquil, Dedieu & Béguin 2017). Going organic can thus prove a slow and deliberative process that may take a really long time. However, different people will embrace change at a different pace. Some are more likely to be innovators than others. Some are risk-adverse and prefer being confirmed by the observation of others' lasting successes, as

well as by their own experiments, thus making incremental changes (Hamal & Anderson 1982; Girdžiūtė 2012). Most farmers who experiment and progressively change their practices become quasi-organic farmers without deciding to convert (Sutherland 2011; Alavoine-Mornas & Madelrieux 2014).

## **Conclusions**

We built a dynamic version of the Theory of Reasoned Action to investigate how socio-psychological factors can explain why French dairy farmers in mountainous areas are not adopting organic farming practices despite the profitable economic opportunities involved. Our individual-based model defines a farmer's current or potential satisfaction regarding a farming strategy. We found that in most cases, a farmer with a large or medium farm in terms of level of production does not change strategy because he/she is satisfied with his/her current situation. The evaluation of the conversion to organic farming as an alternative is a highly influential factor in agents' decisions to go organic, especially for small farms. In many cases, even with the conversion to organic farming, small farms cannot improve their situation in terms of productivity performance compared to others, and so do not convert. In other cases, not being dissatisfied with the current situation for long enough is also a barrier to convert. The model reveals that a farmer dissatisfied with his/her strategy can return to be satisfied if his/her personal attitude or subjective norm improves. Farmers continuously adapt their practices with peers to build their own collective response to external changes. Due to interaction between farmers, there are some progressive changes of practice that impede major change, and others that facilitate it. The change of farming practices appears central to understanding organic adoption, and thus warrants further research and modeling scholarship. It has to be considered not only at farm level but also at the population-of-farmers level. In addition, more research is needed on farmers' trajectories, as a major change can be effectuated via progressive minor changes or by a sudden rupture. These processes are complex and driven by interactions between social, individual and external factors. Further research on farmers' decision-making processes will help gain further insights into their decision-making environment and constraints.

## **Acknowledgements**

We thank the Slovak Academy of Sciences, particularly Peter Kaufmann and Daniel W.

Franks, for providing us with the IDARI survey data.

We thank the Associatione project and Auvergne–Rhône-Alpes regional council for providing us with the interviews with dairy farmers in “Pilats”.

## References

- Ajzen I. 1991. The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50 (2): 179–211.
- Ajzen I & Fishbein M. 1975. *Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Alavoine-Mornas F & Madelrieux S. 2014. Passages à l’agriculture biologique. Une diversité de processus. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*. 339–340: 65–79.
- Armitage CJ & Conner M. 2001. Efficacy of the Theory of Planned Behaviour: a meta-analytic review. *British Journal of Social Psychology* 40 (4): 471–499.
- Barbier C, Cerf M & Lusson JM. 2015. Cours de vie d’agriculteurs allant vers l’économie en intrants: Les plaisirs associés aux changements de pratiques. *Activités* 12 (12–2).
- Barthélemy D & David J. 2001. *Production Rights in European Agriculture*. Elsevier.
- Beedell JDC & Rehman T. 1999. Explaining farmers’ conservation behaviour: Why do farmers behave the way they do? *Journal of Environmental Management* 57 (3): 165–176.
- Beedell J & Rehman T. 2000. Using social-psychology models to understand farmers’ conservation behaviour. *Journal of Rural Studies* 16 (1): 117–127.
- Boisdon I, Ott AS, Fourdin S & Dockès A-C. 2013. “Typologie des trajectoires de conversion à l’agriculture biologique d’exploitations laitières de montagne. *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants* 20.
- Boldero J. 1995. The prediction of household recycling of newspapers: The role of attitudes, intentions, and situational factors. *Journal of Applied Social Psychology* 25 (5): 440–462.
- Bos J, Smit A & Schröder JJ. 2013. “Is agricultural intensification in The Netherlands running up to its limits?” *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 66: 65–73.
- Brown C, Alexander P, Holzhauer S & Rounsevell MDA. 2017. Behavioral models of climate change adaptation and mitigation in land-based sectors. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 8 (2).
- Bui S, Cardona A, Lamine C & Cerf M. 2016. Sustainability transitions: Insights on processes of niche-regime interaction and regime reconfiguration in agri-food systems. *Journal of Rural Studies* 48: 92–103.
- Chantre E, Cerf M & Le Bail M. 2015. Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. *International Journal of Agricultural Sustainability* 13 (1): 69–86.
- Coello Coello CA, Lamont GB & Van Veldhuizen DA. 2007. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Vol. 5. Springer.
- Coquil X, Lusson JM, Beguin B & Dedieu B. 2013. Itinéraires vers des systèmes autonomes et économes en intrants: motivations, transition, apprentissages. *Rencontres Recherches Ruminants* 20.
- Coquil X, Dedieu B & Beguin P. 2010. How do livestock and crop sciences represent evolutions of farming systems? A review. 9th International Farming Systems Association.
- Coquil X, Dedieu B & Beguin P. 2017. “Professional transitions towards sustainable farming systems: The development of farmers’ professional worlds. *Work* 57 (3): 325–337.
- Darnhofer I, Schneeberger W & Freyer B. 2005. Converting or not converting to organic farming in Austria: Farmer types and their rationale. *Agriculture and Human Values* 22 (1): 39–52.
- Darré J-P. 1985. *La Parole et La Technique: L’univers de Pensée Des Éleveurs Du Ternois*. Vol. 10. Editions

L'Harmattan.

- Dedieu M-S, Lorge A, Louveau O & Marcus V. 2017. "Les Exploitations En Agriculture Biologique: Quelles Performances Économiques?".
- Deffuant G, Amblard F, Weisbuch G & Faure T. 2002. How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5 (4).
- Deffuant G, Carletti T & Huet S. 2012. The Leviathan Model: absolute dominance, generalised distrust, small worlds and other patterns emerging from combining vanity with opinion propagation. *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 16 (1).
- Deffuant G, Huet S & Amblard F. 2005. An individual - based model of innovation diffusion mixing social value and individual benefit. *American Journal of Sociology* 110 (4): 1041 - 1069.
- Deffuant G, Huet S & Weisbuch G. 2002. *Agent Based Simulation of Organic Farming Conversion in Allier Département*. Edward Elgar Publishers.
- Depeyrot J-N. 2017. "Les Transformations Du Paysage Laitier Français Avant La Sortie Des Quotas."
- Dervillé M, Allaire G, Maigné E & Cahuzac E. 2017. Internal and contextual drivers of dairy restructuring: Evidence from French mountainous areas and post-quota prospects. *Agricultural Economics* 48 (1): 91–103.
- Dockès A-C, Boisdon I, Experton C & Fourdin S. 2013. Mise au point de méthodes et outils innovants pour développer l'élevage laitier biologique en zones de Piémont et montagne. *Innovations Agronomiques* 32: 243–257.
- Dollé J-B, Delaby L, Plantureux S, Moreau S, Amiaud B, Charpiot A, Manneville V, Chanseaume A, Chambaut H & Le Gall A. 2013. Impact environnemental des systèmes bovins laitiers français. *INRA Prod. Anim* 26 (2): 207–220.
- Dowd A-M, Marshall N, Fleming A, Jakku E, Gaillard E & Howden M. 2014. The role of networks in transforming Australian agriculture. *Nature Climate Change* 4 (7): 558–563.
- Edwards-Jones G & Howells O. 2001. The origin and hazard of inputs to crop protection in organic farming systems: Are they sustainable?" *Agricultural Systems* 67 (1): 31–47.
- Fairweather JR. 1999. Understanding how farmers choose between organic and conventional production: Results from New Zealand and policy implications. *Agriculture and Human Values* 16 (1): 51–63.
- Fairweather JR, Hunt LM, Rosin CJ & Campbell HR. 2009. Are conventional farmers conventional? Analysis of the environmental orientations of conventional New Zealand farmers. *Rural Sociology* 74 (3): 430–454.
- Fielding KS, Terry DJ, Masser BM & Hogg MA. 2008. Integrating social identity theory and the theory of planned behaviour to explain decisions to engage in sustainable agricultural practices. *British Journal of Social Psychology* 47 (1): 23–48.
- Fishbein M. 1980. "A theory of reasoned action: Some applications and implications. *Nebraska Symposium on Motivation* 27: 65–116.
- Gardebroek C. 2002. Farm-specific factors affecting the choice between conventional and organic dairy farming. *EAAE 2002 International Congress, Zaragoza (Spain)* 28: 31.
- Girdžiūtė L. 2012. Risks in agriculture and opportunities of their integrated evaluation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, World Conference on Business, Economics and Management (BEM-2012), May 4–6 2012, Antalya, Turkey*, 62 (Supplement C): 783–790.
- Goldstone RL & Janssen MA. 2005. Computational models of collective behavior. *Trends in Cognitive Sciences* 9 (9): 424–430.
- Gouin DM. 1988. "Peut-on se passer d'un marché des quotas? *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 7 (2): 179–192.
- Grimm V. 1999. "Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we Learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling* 115 (2): 129–148.
- Groeneveld A, Peerlings J, Bakker M & Heijman W. 2016. The effect of milk quota abolishment on farm intensity: shifts and stability." *Wageningen Journal of Life Sciences* 77 (Suppl.C): 25–37.
- Hamal KB & Anderson JR. 1982. A note on decreasing absolute risk aversion among farmers in Nepal. *Australian Journal of Agricultural Economics* 26 (3): 220–225.

- Hansson H, Ferguson R & Olofsson C. 2012. Psychological constructs underlying farmers' decisions to diversify or specialise their businesses – An application of theory of planned behaviour. *Journal of Agricultural Economics* 63 (2): 465–482.
- Hill H & Lynchehaun F. 2002. Organic milk: Attitudes and consumption patterns. *British Food Journal* 104 (7): 526–542.
- Huet S & Deffuant G. 2015. The Leviathan model without gossips and vanity: The richness of influence based on perceived hierarchy. In *Social Simulation Conference 2015*, 13–p.
- Huet S, Rigolot C, Xu Q, de Cacqueray-Valmenier Y & Boisdon I. 2018. Toward modelling of transformational change processes in farm decision-making. *Agricultural Sciences*.
- Janssen S & van Ittersum MK. 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems* 94 (3): 622–636.
- Kaufmann P, Stagl S & Franks DW. 2009. Simulating the diffusion of organic farming practices in two new EU member states. *Ecological Economics* 68 (10): 2580–2593.
- Kirchmann H & Thorvaldsson G. 2000. Challenging targets for future agriculture. *European Journal of Agronomy* 12 (3): 145–161.
- Lamine C & Bellon S. 2009. Conversion to organic farming: A multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1): 97–112.
- Lamine C, Meynard J-M, Perrot N & Bellon S. 2009. Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques: Les cas de l'agriculture biologique et de la protection intégrée. *Innovations Agronomiques* 4: 483–493.
- Louhichi K, Alary V & Grimaud P. 2004. A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on Réunion Island. *Animal Research* 53 (5): 363–382.
- Lynne GD, Casey CF, Hodges A & Rahmani M. 1995. Conservation technology adoption decisions and the theory of planned behavior. *Journal of Economic Psychology* 16 (4): 581–598.
- Martin-Clouaire R. 2017. Modelling operational decision-making in agriculture. *Agricultural Sciences* 8 (7): 527–544.
- Mason WA, Conrey FR & Smith ER. 2007. Situating social influence processes: dynamic, multidirectional flows of influence within social networks. *Personality and Social Psychology Review* 11 (3): 279–300.
- Michelsen J. 2001. Organic farming in a regulatory perspective. The Danish case. *Sociologia Ruralis* 41 (1): 62–84.
- Mintzberg H, Raisinghani D & Theoret A. 1976. The structure of 'unstructured' decision processes. *Administrative Science Quarterly* 21 (2): 246.
- Öhlmér B, Olson K & Brehmer B. 1998. Understanding farmers' decision making processes and improving managerial assistance. *Agricultural Economics* 18 (3): 273–290.
- Olabisi LS, Qi Wang R & Ligmann-Zielinska A. 2015. Why don't more farmers go organic? Using a stakeholder-informed exploratory agent-based model to represent the dynamics of farming practices in the Philippines. *Land* 4 (4): 979–1002.
- Pavie J, Dockès A-C & Echevarria L. 2002. Etude des freins à la conversion à l'agriculture biologique des exploitations laitières bovines. Institut de L'Élevage.
- Rickards L & Howden SM. 2012. Transformational adaptation: agriculture and climate change. *Crop and Pasture Science* 63 (3): 240.
- Rigby D & Cáceres D. 2001. Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems* 68 (1): 21–40.
- Rigby D, Young T & Burton M. 2001. The development of and prospects for organic farming in the UK. *Food Policy* 26: 599–613.
- Robert M, Thomas A & Bergez J-E. 2016. Processes of adaptation in farm decision-making models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36 (4): 64.
- Rogers EM. 1983. *Diffusion of Innovations*. 3rd ed. New York : London: Free Press ; Collier Macmillan.

- Sainte-Beuve J, Bougherara D & Latruffe L. 2011. Performance économique des exploitations biologiques et conventionnelles: Levier économique à la conversion." In: Les Transversalités de l'agriculture Biologique, Strasbourg, 10pp.
- Saltelli A, 2008. Global Sensitivity Analysis: The Primer. Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley.
- Schneeberger W, Darnhofer I & Eder M. 2002. Barriers to the adoption of organic farming by cash-crop producers in Austria. *American Journal of Alternative Agriculture* 17 (01): 24–31.
- Sobol IM. 1993. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments* 1 (4): 407–414.
- Sutherland L-A. 2011. 'Effectively Organic': environmental gains on conventional farms through the market? *Land Use Policy* 28 (4): 815–824.
- Sutherland L-A, Burton RJF, Ingram J, Blackstock K, SleeB & Gotts N. 2012. Triggering change: towards a conceptualisation of major change processes in farm decision-making. *Journal of Environmental Management* 104: 142–151.
- Sutherland L-A, Gabriel D, Hathaway-Jenkins L, Pascual U, Schmutz U, Rigby D, Godwin R, et al. 2012. The 'Neighbourhood Effect': a multidisciplinary assessment of the case for farmer co-ordination in agri-environmental programmes. *Land Use Policy* 29 (3): 502–512.
- Tovey H. 1997. Food, environmentalism and rural sociology: On the organic farming movement in Ireland. *Sociologia Ruralis* 37 (1): 21–37.
- Trewavas A. 2001. Urban myths of organic farming. *Nature* 410 (6827): 409.
- Wärneryd KE. 1988. Social influence on economic behavior. In: van Raaij WF, van Veldhoven GM, Wärneryd KE. (eds) *Handbook of Economic Psychology*. Springer, Dordrecht.
- Zhang X-Y, Trame MN, Lesko LJ & Schmidt S. 2015. Sobol sensitivity analysis: a tool to guide the development and evaluation of systems pharmacology models *CPT Pharmacometrics & Systems Pharmacology* 4 (2): 69–79.



## **Appendix 1. Sobol sensitivity analysis to identify the main parameters for the proportion of agents changing farming strategy**

The model aims to study why some agents do not convert. The number of agents having changed their farming strategies during the simulation is measured to diagnose their dynamic behavior.

In the model, some parameters are considered as constant. However, the model still has 9 parameters to vary. Having so many parameters in the model makes it difficult to analyze how all these parameters can influence our results. We thus started with a global sensitivity analysis aiming to evaluate the extent to which changes in the model parameters will affect model output (Zhang et al. 2015). We opted for a Sobol analysis (Sobol 1993). This method uses straightforward Monte-Carlo integration of multidimensional integrals to compute ANOVA-like decompositions of the output variance, as well as the main effects, the interaction terms and the higher-order terms. It is implemented using the MultiObjective Evolutionary Algorithm (MOEA) framework in Java. The MOEA framework is a library of multiple-objective evolutionary optimization algorithms, with Sobol sensitivity analysis being one of the optimization libraries (Coello, Lamont & Van Veldhuizen 2007; Saltelli 2008).

### **Experimental design**

#### **Initialization**

As presented in the model description, level of production can be a synthetic indicator that represents farm characteristics like farm size or herd number ... In the model, we consider 3 different levels of production, which correspond to three types of farm: small, medium and large.

Based on analysis of interviews and experts' arguments, for the conventional farms, we assume that the larger the farm, the stronger its intensification and the worse its environmental performance (Dollé et al. 2013). So at initialization, the farms with a low level of production have the best environmental performance and the farms with a high level of production have the worst environmental performance.

As we know, an agent lends more importance to the dimension that represents its

farming strategy (conventional farming strategy: productivity performance; organic farming strategy: environmental performance). The sum of the importance given to these two dimensions is 1. So at initialization, the importance given to the dimension defining the farming strategy is above 0.5. The exact value depends on the initialization. In the model, this is a parameter that varies between 0.5 and 1.

### **Constant parameters**

To simplify the analysis of agents' dynamic behaviors, the following parameters are kept constant.

- $N$ : the number of agents in the population, takes the value 100;
- $ITE$ : the number of iterations, takes the value 100;
- $M$ : the size of the memory of agent's farming strategies and practices, takes the value 10;
- $F0$ : the proportion of small-farm farmers among all farmers at initialization, takes the value 0.3;
- $F1$ : the proportion of medium-farm farmers among all farmers at initialization, takes the value 0.5;
- $E0$ : the environmental performance of small conventional farms, takes the value 0.5;
- $E1$ : the environmental performance of medium conventional farms, takes the value 0.4;
- $E2$ : the environmental performance of large conventional farms, takes the value 0.2.

Note that there are no organic farmers in the population at initialization. We assume that organic farmers have to emerge from the dynamics.

### **Parameters which vary**

We decided to vary the following parameters to study the model's dynamics, with a focus on the decision-making function based on the theory of reasoned action:

- $\alpha$ : slope of the logistic function in the computation of credibility, takes a value between 5 and 41;

- *TA*: the threshold to consider an alternative farming strategy, takes a value between 0.4 and 0.5;
- *TO*: the threshold to change farming strategy, takes a value between 0.01 and 0.1;
- *Q0*: the level of production for small farms, takes a value between 0.1 and 0.3;
- *Q1*: the level of production for medium farms, takes a value between 0.4 and 0.6;
- *Q2*: the level of production for large farms, takes a value between 0.7 and 0.9;
- *W(0,0)*: the initialized importance for the dimension of practice corresponding to an agent's farming strategy, takes a value between 0.6 and 1;
- *YLD*: the proportional decrease in productivity performance after the conversion to organic farming strategy, takes a value between 0.05 and 0.3;
- *TD*: the threshold for the duration of confirmation and of dissatisfaction before changing farming strategy, takes a value between 5 and 10.

### **Sobol analysis parameter**

We generate 10000 initial samples from the pseudorandom Sobol sequence. There are 9 parameters that vary, and the number of total parameter-sets considered for the sensitivity analysis is  $2^{10,000} \cdot (9+1) = 200,000$ .

### **Results of the Sobol test**

Figure A1 shows the results of the sensitivity analysis for the number of agents having changed their farming strategies during the simulation. The results indicate that parameter *TA* is the most important parameter, contributing to nearly 80% of the model output variability related to the number of agents having changed farming strategy at the end of the simulation. It is followed by the important parameters *TO*, *W(0, 0)* and  $\alpha$ . Error bars in the figure represent the bootstrap confidence intervals ( $1.96 \cdot \text{standard error}$ ).

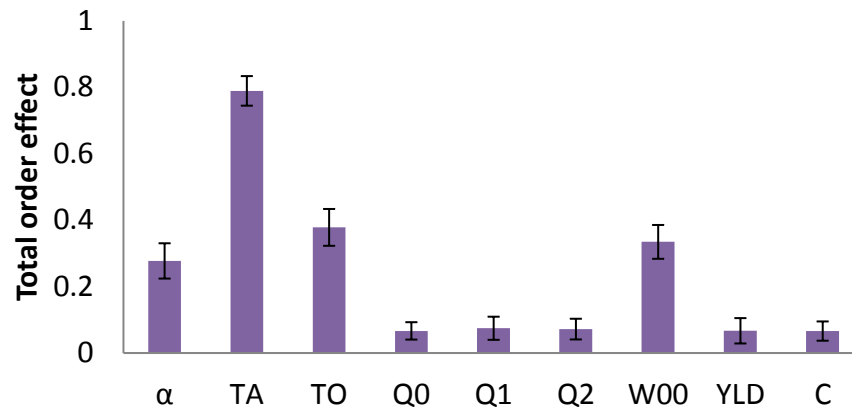


Figure A1—Results of the Sobol analysis.  $TA$ ,  $TO$ ,  $W(0, 0)$  and  $\alpha$  are the most determinant parameters

We can thus focus on these four important parameters to deeply study the dynamics of our model.

## Appendix 2. Reason for not changing detection algorithm

```

For each iteration {
  For each agent  $f$  in the population {
    If  $f$  does not change its farming strategy {
      If  $I_A(t) = 0$  {
        If  $DD = 0$  Reason 1
        Else if  $I_A(t-1) \neq 0$  {
          If  $SN_C(t) > SN_C(t-1)$  {
            If  $A_C(t) > A_C(t-1)$  Reasons 2 and 3
            Else Reason 2
          }
          Else if  $A_C(t) > A_C(t-1)$  Reason 3
        }
      }
    }
    Else if  $DD < TD$  and  $I_A(t) > (I_C(t) + TO)$  Reason 5
    Else Reason 4
  }
}

```

Algorithm 1—Overview of how reasons are identified.  $I_A(t)$  is satisfaction with the alternative farming strategy at time  $t$ ,  $I_A(t-1)$  is satisfaction with the alternative farming strategy at time  $t-1$ ,  $I_C(t)$  is satisfaction with the current farming strategy at time  $t$ ,  $DD$  is an agent's dissatisfaction duration,  $TD$  is the threshold of dissatisfaction duration for changing farming strategy,  $SN_C(t)$  is the subjective norm with the current farming strategy at time  $t$ ,  $A_C(t)$  is the attitude on the current farming strategy at time  $t$ ,  $TO$  is threshold of  $I_A - I_C$  to change farming strategy.

## **Chapitre 4. L'impact de différents composants du modèle sur le taux d'adoption: implémentation RGA**

Ce chapitre est actuellement soumis dans la revue *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Il a par ailleurs été accepté pour une présentation à la conférence SocInfo 2018. Il a été pour ce faire évalué par trois reviewers.

# Which of farms' characteristics or social dynamics better explain a dairy farmer's conversion to organic farming?

Xu Q. [1], Huet S. [2], Perret E. [1], Deffuant G. [2]

<sup>1</sup> UCA, AgroParisTech, Inra, Irstea, VetAgro Sup, Territoires; <sup>2</sup> Lisc – Irstea

*9 avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière, France*

**Abstract.** We propose an agent-based model in which an agent's decision on the conversion to organic farming is based on the comparison between the satisfaction with its current farming strategy and the potential satisfaction with an alternative farming strategy. A farmer agent's satisfaction is modeled with the Theory of Reasoned Action. It is computed by comparing the agent's outcomes over time and comparing its outcomes against those of other agents to whom it lends great credibility ("important others"). We initialize the model with the Agricultural Census' data about the farm characteristics in 27 French "cantons". The model aims to study the interaction effect of farm characteristics and social dynamics on the conversion to organic farming. The analysis of the simulations shows that farm characteristics are very important to predict the conversion. However, their distribution in the population can also strongly influence the simulation results due to social dynamics. Indeed the interaction between farms having similar or different characteristics can decrease or increase the adoption rate compared to what can be inferred only from farm characteristics.

**Keywords:** organic farming, decision making, major change, Theory of Reasoned Action, agent-based model, social influence, credibility.

## Introduction

How to disentangle the role of farm characteristics from the one of social dynamics in the process of organic farming adoption? The position varies with the disciplinary approach chosen to consider the question in this strong debate. Agronomists argue for the farm characteristics (Neumeister, Fourdin, et Dockès 2011; Jérôme Pavie, Dockès, et Echevarria 2002; De Buck et al. 2001), economists argue for prices and funding (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009; Kerselaers et al. 2007; Latruffe, Nauges, et Desjeux 2013), and social psychologists for subjective norm and professional identities (Lamine et Bellon 2009; Padel 2001; R. J. F. Burton et Wilson 2006; Mzoughi 2011; Stock 2007). Our work tries to address this issue by studying a simple agent-based model involving farm characteristics and social dynamics. It is implemented with dairy farms in different French regions. The dairy production is particularly interesting. Indeed, the numerous dairy crises and an increasing knowledge about how to farm organically have made the conversion interesting from an economical point of view (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara, et Latruffe 2011). This allows our model to put apart the economic issue and to focus on farm characteristics and social dynamics.

The literature identifies a broad range of factors associated with the adoption and non-adoption of organic farming (Darnhofer, Schneeberger, et Freyer 2005; Fairweather 1999; Lamine et Bellon 2009; Rigby, Young, et Burton 2001). A strand of research takes a behavioral approach (R. J. F. Burton 2004) suggesting that motives, values and attitudes determine farmers' decision-making processes. Recently, the conversion to organic farming has been qualified as a major change (Sutherland, Burton, et al. 2012) or a transformational adaptation (Dowd et al. 2014; Rickards et Howden 2012), as well as a social movement (Sutherland, Burton, et al. 2012; Fairweather et al. 2009; Darnhofer, Schneeberger, et Freyer 2005; Rigby, Young, et Burton 2001; Jérôme Pavie, Dockès, et Echevarria 2002). Conversion often implies strong changes of worldview and social network, and generally begins with a strong need for change (Barbier, Cerf, et Lusson 2015; Sutherland, Burton, et al. 2012). Such a change that engages a number of social processes involving the farm, the farmer agent, its peers and its environment has rarely been studied (M. Burton, Rigby, et Young 2003).

Agent-based modeling (Goldstone et Janssen 2005) or individual-based modeling



(Grimm 1999) appear relevant and well-gearred to help identifying the main drivers that can explain the observed dynamics. However, as pointed out in (Huet, Rigolot et al. 2018; Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018), none of current agent models is well fit to represent the decision process about a major change that is at stake in the conversion to organic farming. This is the reason why our model, argued and described with details in relation to the literature (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018), has proposed a dynamic version of the Theory of Reasoned Action (TRA); and showed its potential to explain why farmers do not convert to organic farming in a prototypical farmer population. The main original features of the model are the following:

Like (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009), we propose a dynamic model of TRA (Ajzen et Fishbein 1975) to compute a farmer's satisfaction. In the model, an agent's decision on conversion is based on comparing its satisfaction with its current strategy against its potential satisfaction with an alternative one. These satisfactions are computed with the attitude and the subjective norm related to the current or alternative strategy. Both attitude and subjective norm are dynamic and based on the difference in practice outcomes. Consistently with TRA (Ajzen et Fishbein 1975), our model integrates decomposed variables: attitude and subjective norm—instead of global variables as in (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009). Our work thus assumes that a farmer agent's evaluation is based on its concrete strategy and practice instead of an abstract general opinion. The evaluation relates to its own experiences and its peers' strategies and practices.

A farmer agent's attitude about its current strategy is modelled as the difference between its past outcomes with current strategy and its current outcome. This choice is grounded in (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976; Öhlmér, Olson, et Brehmer 1998) who argue that a farmer agent's earlier practices are very influential for its decision on a future practice. Regarding an alternative strategy which can be new to the farmer agent, the attitude is the difference between its past outcomes with the current strategy and the outcomes of other peers with a similar farm and adopting the alternative or the outcomes of the alternative in the media.

The subjective norm involves a comparison with peers, weighted by their credibility. This credibility is based on the difference between outcomes (i.e. total production).

As (Darré 1985) showed that farmers co-construct their practices, in the model, farmers update their practices by copying the performances of their credible peers having a similar farm (Centola 2015). Consistently with (Sutherland 2013; Sutherland et Darnhofer 2012), farmers' activities are identified by two dimensions: producing on the one hand, and managing the nature on the other hand.

Finally, an important feature of our model is tied to the decision process about a "major change" (Sutherland, Burton, et al. 2012; Rickards et Howden 2012; Dowd et al. 2014). It is assumed that a major change is only considered in critical situations where the agent faces high costs (economic, cognitive, emotional, etc.). Otherwise, agents do not even consider changing their major options. In a stable period, if a farmer agent is satisfied enough with its current farming strategy, it does not envisage an alternative one. Only a certain level of frustration or critical event (succession, major change in the farm, etc.) will suggest to consider an alternative to a farmer's current strategy. The research of alternative begins with the farmer agent's pairs having similar farm characteristics (Centola 2015).

In (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018), the model is studied with prototypical farm populations and shows different reasons for the lack of conversion to organic farming. (Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018) shows how to implement the model with real French dairy farms' characteristics given by the French Agricultural Census 2000. It outlines the importance of farm characteristics for the adoption. The present work goes further by implementing with more numerous French "cantons" (27 "cantons") varying in farm type distributions. It aims to better understand the role of social dynamics compared to farm characteristics for the adoption. In general, final adoption rates depend strongly on farm characteristics. However, the conversion explanation is more complex since farmers' social interactions can decrease or increase the adoption rate compared to what can be inferred from farm characteristics. After presenting the model's principles, we outline the model behaviors and some explanations before going on to synthesis and discuss our conclusions.

## Materials and Methods

### The model

#### Basic elements.

*Farmer.*

The model studies the evolution of a population with  $N$  farmer agents. Each agent is characterized by its farm; its farming strategy; its performance defined on several dimensions  $i$  to evaluate a practice; the importance  $W_i$  given to each dimension of practice; the credibility  $(C(f, \nu))$  it lends to each other agent; its memory of applied strategies and performances during the last  $M$  periods; its satisfactions with current farming strategy ( $I_C$ ) and with an alternative one ( $I_A$ ); and its duration for staying with a strategy ( $DC$ ) and for being dissatisfied for a strategy ( $DD$ ).

**$DC$  and  $DD$**  capture the duration between two events related to the decision process.  $DD$  counts an agent's dissatisfaction duration with its current strategy. In the model, an agent has to be dissatisfied long enough with its current strategy to change it.  $DC$  counts the duration since last strategy change. An agent cannot consider changing strategy again even if the agent is dissatisfied with it during the confirmation period. This is consistent with the theory of innovation diffusion (Rogers 1983) in which an agent has a confirmation period just after adopting a new strategy. Both durations are necessary to account for an agent's stability and consistency. The delayed action of both can only occur when the corresponding duration is above the parameter  $TD$ .

Except for  $W_i$  all these attributes of a farmer agent are dynamic during the simulation, and their changing rules are described in detail below.

**Credibility.** Each agent  $f$  gives a credibility  $C(f, \nu)$  to another agent  $\nu$  by comparing their outcomes. Thus, each two agents are connected by a credibility. Credibility is between 0 (not credible at all) and 1 (very credible).

**Satisfaction.** Each agent has a satisfaction with its current farming strategy ( $I_C$ ) that

corresponds to an evaluation of that strategy. It may also evaluate an alternative strategy in certain cases and have a satisfaction for it ( $I_A$ ). Satisfaction with a farming strategy lies between 0 (not satisfied at all) and 1 (very satisfied).

If an agent is satisfied with its current farming strategy, it does not consider an alternative. Otherwise, its satisfactions with its current farming strategy ( $I_C$ ) and with an alternative one ( $I_A$ ) are computed and compared. If  $I_A$  is higher enough than  $I_C$  the agent will change its farming strategy.  $I_C$  is thus computed at every iteration, whereas  $I_A$  is only computed when a stable agent is dissatisfied with its current farming strategy.

In accordance with TRA, the satisfaction  $I_S$  with a farming strategy  $S$  depends on two elements: attitude  $A_S$  and subjective norm  $SN_S$  toward  $S$ . In the original theory, the interaction between these two elements varies with different agents facing different situations. In order to keep the model simple, satisfaction is assumed as the average value of these two elements.

$$I_S = \frac{A_S + SN_S}{2} \quad (1)$$

Both attitude and subjective norm lie between -1 (very negative attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate) and 1 (very positive attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate). They are computed with farms' outcomes, farmers' strategies, and credibility. See the section "Farmers' dynamics" for the computation details.

Considering the value range of attitude and subjective norm towards a farming strategy, the satisfaction should also lie between -1 and 1. However, to facilitate other calculations, the satisfaction is normalized between 0 and 1.

**Performance.** The performance is evaluated over two dimensions: the level of the output production (i.e. the productivity impact, in our case milk production), and the level of environmental amenities production (i.e. the environmental impact), respectively called productivity performance ( $P_0$ ) and environmental performance ( $P_1$ ) in the paper. We assume  $P_0$  and  $P_1$  lie between 0 (very bad on this performance dimension) and 1 (very good on this performance dimension).

**Importance given to each dimension.** The importance given to productivity dimension is termed  $W_0$  and the one given to environmental dimension is termed  $W_1$ .  $W_0$  and  $W_1$  lie between 0 (not important at all) and 1 (most important). They sum to 1.

$$W_0 + W_1 = 1 \quad (2)$$

Importance defines an agent's personal values. An agent uses its own lens to judge the information it receives and the other agents it meets. In this model, both  $W_0$  and  $W_1$  are kept constant if an agent does not change its farming strategy.

**Farming strategy.** It is defined by the importance that a farmer gives to each dimension of practice. Two farming strategies are considered: organic and conventional. The organic strategy lends more importance to environmental dimension and less to productivity dimension, whereas the conventional strategy lends more importance to productivity dimension and less to environmental dimension. It is assumed that when a farmer agent changes its strategy it changes accordingly the importance given to the different dimensions.

*Farm.*

A farm has three attributes: its farming total production (productivity outcome)  $T_0$ , its environmental amenities outcome  $T_1$  and its reference  $R$ .  $R$  is the maximum possible productivity performance considering a farm's all characteristics and evolution. Interviews and experts' arguments show that conventional farms' references are grounded on the negotiations with dairy enterprises (often expressed by "quota" in Europe in the past). Organic farms have more constraints in terms of reference due to stricter regulations. So a conventional farm  $f$ 's reference is considered as its farmer  $f$ 's initial productivity performance  $P_0^f(t=0)$  and that for an organic farm is a function  $l$  of  $P_0^f(t=0)$ .

$$R^f = \begin{cases} P_0^f(t=0) & \text{if } f \text{ is a conventional farm/farmer} \\ l(P_0^f(t=0)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

The implementation of a farm may need more attributes for different use cases. The

detailed computation of  $T_0$  and  $T_1$  are defined in the model's implementation (see 2.2).

### *Media.*

When an agent is dissatisfied with its current farming strategy and looks for an alternative, it first searches in the population for other agents having similar characteristics but applying an alternative farming strategy. If it cannot find one, it has access to the media for an alternative farming strategy's model. These models are given by some functions depending on the farm's current outcomes.

### **Dynamics.**

#### *Overview of a farmer's dynamics over years.*

One time-step (iteration)  $t \rightarrow t+1$  represents one year, i.e. once a year, farmers decide their farming strategies, their performances and so on. During an iteration, farmers' update order is picked up at random by a uniform law.

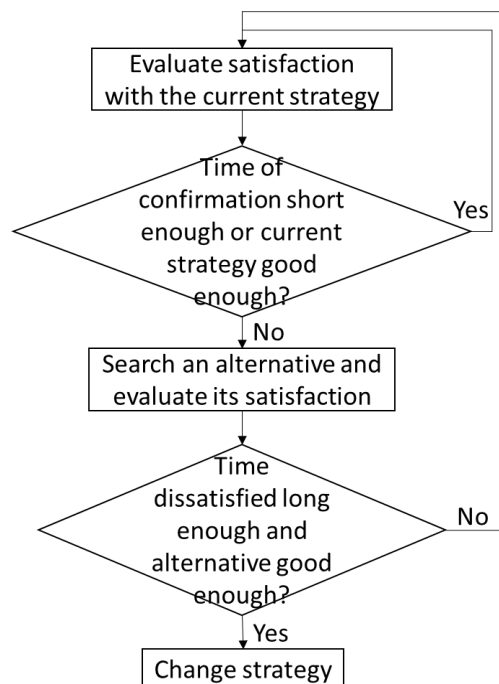


Fig. 1. —Overview of the farmer's update

As shown in Figure 1 and the pseudocode of algorithm 1, during each iteration, an agent evaluates its satisfaction with its current farming strategy. If the agent is in a stable period and is satisfied with its current strategy, it does not consider a change. Otherwise, the agent looks for an alternative and evaluates it. If the agent has been dissatisfied for long enough and the alternative is good enough, it will change. Otherwise, the agent stays with its current farming strategy. It will then update its credibility given to other agents and its performance. See the detail in the following.

```

For each iteration {
  Generate the order of the population
  For each agent  $f$  in the population {
    Compute  $I_C$ 
    If  $DC > TD$  and  $I_C < TA$ , compute  $I_A$ 
    If  $DD > TD$  and  $I_A > I_C + TO$ , change strategy and update  $W_0, W_1$ 
    For each agent  $v$  that is different from agent  $f$  in the population, compute  $C(f, v)$ 
    Compute  $P_0, P_1$ 
  }
}

```

Algorithm 1— Population updating loop.  $I_C$  is the satisfaction with a current strategy;  $I_A$  is the satisfaction with an alternative one.  $DC$  is an agent's confirmation duration;  $DD$  is an agent's dissatisfaction duration.  $TD$  is the minimum time of dissatisfaction before considering the alternative.  $TA$  is threshold of  $I_C$  to consider an alternative.  $TO$  is the threshold of  $I_A$  to change strategy.  $W_0$  is the importance given to productivity performance,  $W_1$  is the importance given to environmental performance.  $C(f, v)$  is the credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$ .  $P_0$  is the productivity performance,  $P_1$  is the environmental performance.

#### *Credibility update.*

Every relationship between two agents is characterized by the credibility one gives to another, and depends on an agent's personal view of its difference to another in outcome (i.e. total production). For agent  $f$ , its difference to agent  $v$  is the sum of differences on each outcome dimension weighted by the importance given to that dimension.

$$D_v^f = \sum_{i=1}^2 (W_i^f (T_i^v - T_i^f)) \quad (4)$$

The credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$  is calculated with  $f$ 's difference to  $v$ :

$$C_v^f = \frac{1}{1 + e^{-\alpha D_v^f}} \quad (5)$$

With  $\alpha$  the parameter of the logistic function.

In Figure 2, agent  $f$ 's difference and credibility to  $v$  are respectively plotted on the x-axis and y-axis. When the difference is negative, it means that  $v$  has a worse outcome than  $f$ , thus  $f$  gives little credibility to  $v$ . When the difference is positive,  $v$  has a better outcome than  $f$ , thus  $f$  gives big credibility to  $v$ .

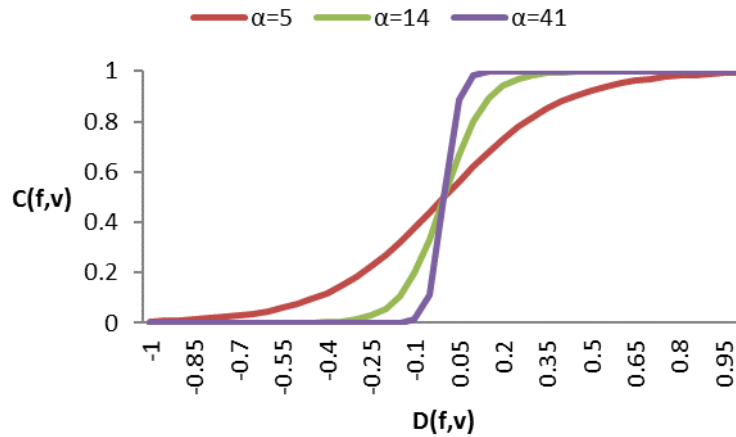


Fig. 2. —The credibility ( $y$ -axis) agent  $f$  gives to  $v$  depends on  $f$ 's difference ( $x$ -axis) to  $v$  for three values of parameter  $\alpha$  (different-colored lines)

The lines with different colors represent  $\alpha$  variations to characterize the bias degree that an agent has for others with better outcomes. When  $\alpha$  is small, the bias is small. An agent tends to give same credibility to others, whether or not with better outcomes. If  $\alpha$  is big, the bias is strong. Only others with better outcomes are credible.

In the model, every two agents are connected. Credibility depends on an agent's perceived difference in outcome to another and it is then used to update the agent's outcome which can change the perceived difference. Thus, the relationship associated



to credibility is dynamic.

*Farming strategy change.*

An agent changes its farming strategy according to its satisfaction evaluations with its current farming strategy ( $I_C$ ) and with the alternative one ( $I_A$ ). If an agent is in a stable state (its confirmation duration  $DC >$  threshold  $TD$ ) and it is still dissatisfied with its current farming strategy ( $I_C <$  threshold  $TA$ ), it will consider an alternative one. If the agent is dissatisfied long enough (its dissatisfaction duration since being stable  $DD > TD$ ) and its satisfaction evaluation of the alternative is better enough than that with its current one ( $I_A > I_C (1 + \text{threshold } TO)$ ), it will change farming strategy. As stated in equation (1), satisfaction  $I$  with a strategy is the average sum of the related attitude  $A$  and subjective norm  $SN$ .

In equation (1), attitude ( $A_S$ ) represents an agent's personal view of the difference between its experience and the (potential) outcome of evaluated strategy  $S$ . The agent  $f$ 's experience is its average outcome on the farm ( $\overline{T_{C,0}}, \overline{T_{C,1}}$ ) with its current farming strategy ( $S^f$ ) in memory ( $M$ ). It is computed like this:

$$\overline{T_{C,l}} = \frac{\sum_{t \text{ and } s^t = S^f}^M T_i^t}{Nb(S^t = S^f)} \quad (6)$$

The evaluated outcome depends on the strategy to be evaluated. For agent  $f$ 's current farming strategy evaluation, the evaluated outcome is  $f$ 's current outcome ( $T_i^f$ ).

Agent  $f$ 's attitude toward the current farming strategy ( $A_C$ ) is like this:

$$A_C^f = \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( T_i^f - \overline{T_{C,l}}^f \right) \right) \quad (7)$$

If an agent's outcome on its farm changes and this change is considered better than its experience,  $A_C$  will be positive and strengthen the agent's decision to keep its current strategy. Otherwise,  $A_C$  will be negative and may influence  $I_C$ . Then the agent may be dissatisfied and evaluate  $I_A$ .

For agent  $f$ 's evaluation of an alternative farming strategy, the evaluated outcome is the average outcome ( $\overline{T_{A,0}^f}, \overline{T_{A,1}^f}$ ) of other agents having similar characteristics as  $f$  but applying the alternative. The similarity is defined by a function  $Y$  over the farm's characteristics and is compared with a distance threshold ( $sim$ ).  $Y$  is designed in the model's implementation (see 2.2). The evaluated outcome is computed as follows:

$$\overline{T_{A,l}^f} = \frac{\sum_{Y_v^f < simi \text{ and } S^v \neq S^f} T_i^v}{Nb(Y_v^f < simi \text{ and } S^v \neq S^f)} \quad (8)$$

If there is no corresponding peer (no other agents similar to  $f$  and applying the alternative farming strategy), agent  $f$  will search the media for a stereotypical farm to evaluate the alternative.

$$\overline{T_{A,l}^f} = T_{model,i}^f \quad (9)$$

Therefore, agent  $f$ 's attitude toward an alternative is:

$$A_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_c^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 (W_i^f (\overline{T_{A,l}^f} - \overline{T_{C,l}^f})) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

Another component of satisfaction is the subjective norm, which represents how an agent considers others' opinions on the evaluated farming strategy through outcomes, i.e. the strategy's implementation results. It is thus an agent's perceived difference between the outcome to be evaluated and the average of other agents' outcomes.

For agent  $f$ 's evaluation of current farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_C^f = \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( T_i^f - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f T_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) \quad (11)$$

An agent will be socially satisfied if it perceives that other agents, especially those to whom it lends great credibility ("important others"), consider it as a 'good farmer'. The

agent may be so satisfied to have a good social image that it will never consider a major change. Otherwise, if the agent feels socially bad, it may try to become more similar to others in the group or to change of group. This can be done with a change of strategy.

For the evaluation of an alternative farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( \frac{T_{A,i}^f}{T_{A,i}^f} - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f T_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

If in other agents' opinions, especially those to whom agent  $f$  lends great credibility ("important others"), the alternative is not better, then it is judged not good enough to improve the situation. Agent  $f$  will tend to keep its current strategy. Otherwise, the agent's subjective norm strengthens its intention to change its strategy.

If an agent changes its strategy, it also changes the importance given to each dimension of practice. The parameter  $W$  is the conventional farmers' initial importance given to the productivity dimension.

$$\text{For conventional agents: } W_0 = W; W_1 = 1 - W \quad (13)$$

$$\text{For organic agents: } W_0 = 1 - W; W_1 = W \quad (14)$$

*Performance update.*

As farmers co-construct their practices (Darré 1985), at each time  $t$ , a farmer agent updates its performance by copying the practices of its credible peers with a similar farm.

$$\Delta P_i^f = \frac{\sum_{v \neq f \text{ and } Y_v^f < \text{simi}}^N C_v^f (P_i^v - P_i^f)}{\sum_{v \neq f \text{ and } Y_v^f < \text{simi}}^N C_v^f} \quad (15)$$

Both performance dimensions are between 0 and 1. A farmer's productivity performance is also limited by the reference on its farm.

$$P_0^{f,t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } (P_0^{f,t} + \Delta P_0^f < 0) \\ R^f & \text{if } ((P_0^{f,t} + \Delta P_0^f) > R^f) \\ P_0^{f,t} + \Delta P_0^f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

A special case: if agent  $f$  looks for an alternative and cannot find a similar peer applying an alternative strategy, it will look for an alternative in the media. If agent  $f$  adopts the alternative found in the media after evaluation, then it will also copy the performance.

### **The design of use cases based on agricultural data**

The model is implemented with data from Agricultural General French Census (RGA 2000). In each of the three main dairy production French regions, we have selected one or two "départements" and their related "cantons" having at least 60 dairy farmers, on average 113 farms with a standard deviation of 34.6. We have simulated 27 French "cantons" where there are many dairy farmers and the dairy industry is the main activity. For sake of comparison, each of our virtual cantons has 100 farmers. These "cantons" have strong variations on practice intensity and homogeneity of farm types. According to expertise and literature (J. Pavie et al. 2012; Chambaut et al. 2011), a farmer's farm is defined by three variables: the utilized agricultural area ( $UAA$ ), the number of dairy cows ( $NC$ ), and the quota ( $Q$ ) which is a synthetic indicator of the farm's maximum milk production. A farm's intensity can be measured by the average  $UAA$ /the average  $NC$ . The implementations of a farm, a farmer and the media are presented in the following.

#### **Farmer.**

A farmer agent is designed by its practice with productivity performance  $P_0$  and environmental performance  $P_1$  designed from data.  $P_0$  is directly deduced from the farm's initial characteristics and corresponds to the normalized average milk volume produced by one cow in one year. For farmer/farm  $f$ , at the initial time  $t=0$ ,  $P_0^f = Q^f / NC^f$ . At every time  $t$ ,  $P_1^f = T_1^f / UAA^f$ , the equation (15) is only used to update  $P_0^f$ .

The  $Y$  function telling how two farmers are judged similar is based on a similarity of their farms' characteristics regarding  $UAA$  and  $NC$ . For agent  $f$ , agent  $v$  is a similar peer if  $\frac{|UAA^f - UAA^v|}{UAA^f} < simi$  and  $\frac{|NC^f - NC^v|}{NC^f} < simi$ . The value of threshold  $simi$  is fixed at 0.1 in the model.

### **Farm.**

As shown above, each farm is initialized by the crossed distribution of discretized utilized agricultural areas ( $UAA$ ) and quotas ( $Q$ ) of its "canton" from the RGA 2000. They remain constant all along the simulation. The number of dairy cows ( $NC$ ) is computed from a law extracted from data (with a regression  $r^2 = 0.9563$ ):

$$NC = 0.2463 UAA + 0.0001106 Q \quad (17)$$

$Q$  and  $UAA$  are respectively the real value of quota given in the liters and the real value of utilized agricultural area given in the ares.  $Q$  have a value much larger than  $UAA$ , so it seems to have a small impact in terms of coefficient.

As shown in figure 3, from databases regarding farmers' production and various sources<sup>8</sup>, a law is built to compute the potential maximum milk production of an organic farm starting with the conventional strategy, knowing its initial productivity performance  $P_0$  after the normalization and  $P_0'$  before the normalization. A farm  $f$ 's normalized reference  $R$  and reference  $R'$  before the normalization are computed as follows:

$$\text{For a conventional farm: } R = P_0(t = 0) \quad (18)$$

---

<sup>8</sup> <http://www.cantal.chambagri.fr/fileadmin/documents/Internet/Autres%20articles/pdf/2014/Bio/ABBL2008-2012.pdf>

<http://www.tech-n-bio.com/>

<http://www.agrobio-bretagne.org/>

$$\text{For an organic farm: } R' = 0.6046 P_0(t = 0) + 1913 NC \quad (19)$$

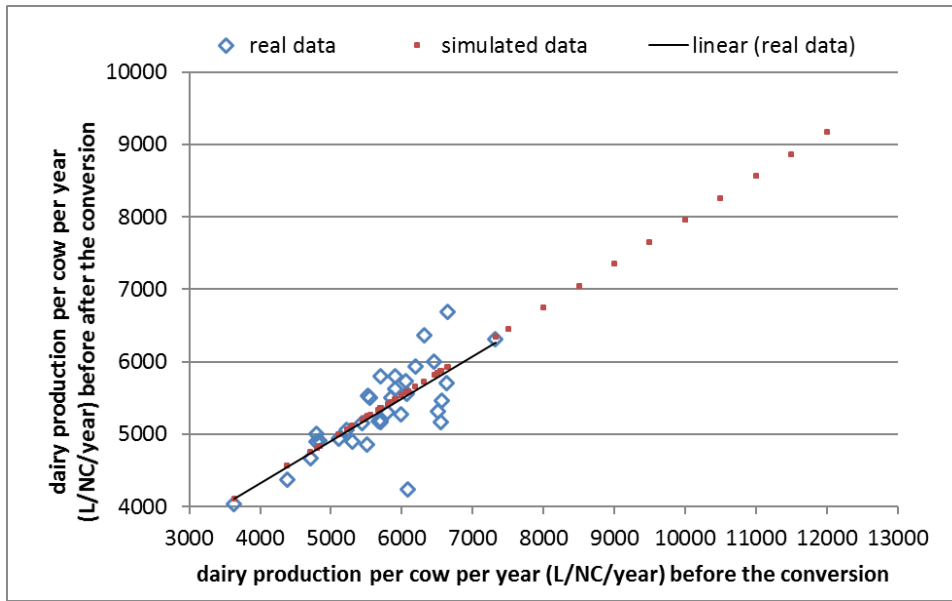


Fig. 3. — Real and simulated productivity performance before the conversion ( $x$ -axis) and after the conversion ( $y$ -axis)

Given by the unity "liters/cow",  $R'$  and  $P_0'$  are much larger than  $NC$ . Thus, the coefficient of  $NC$  is much larger than  $P_0'$ . In terms of the conversion effect, when  $P_0'$  is sufficiently small,  $R$  can be larger with large  $NC$  than  $R$  of conventional. On the contrary,  $R$  will be smaller if  $P_0'$  is large than  $R$  of conventional.

The environmental amenities outcome  $T_I$  is computed at every time by an aggregated function of literature (J. Pavie et al. 2012; Chambaut et al. 2011). It considers mineral impacts and energy consumption related to the total milk production and the farm's agricultural surface:

$$\text{For a conventional farm: } T_I = (53 UAA + 2.918 T_0)/2 \quad (20)$$

$$\text{For an organic farm: } T_I = (-10 UAA + 2.588 T_0)/2 \quad (21)$$

Using French dairy farms' database in RGA 2000,  $R'$  is to be normalized between 0 (very low production) and 1 (very high production). 53  $UAA$ , 2.918  $T_0$ , -10  $UAA$  and 2.588  $T_0$  are normalized values between 0 and 1. The normalization is:

$$x = (x' - \min) / (\max - \min) \quad (22)$$

With:  $\min$  = minimum real value in the database;  $\max$  = maximum real value in the database;  $x$  is the normalized value of real value  $x'$ .

### The media.

Farmers' alternative models are designed according to the change of productivity outcomes in the data. When a conventional farmer  $f$  wants to evaluate the organic strategy at time  $t+1$ , it computes  $T_o(t+1)$  as follows and its related  $T_i(t+1)$  with the equation (20). Noting that  $T_o'$  is the farmer's real productivity outcome on the farm (before the normalization).

$$T_o(t+1) = 0.6046 T_o(t) + 1913 \text{ NC} \quad (23)$$

When an organic farmer  $f$  wants to evaluate the conventional strategy at time  $t+1$ , it computes  $T_o(t+1)$  as follows and its related  $T_i(t+1)$  with the equation (21).

$$T_o(t+1) = (T_o(t) - 1913 \text{ NC}) / 0.6046 \quad (24)$$

### Experimental design

(Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) has studied a large set of 625 parameter values identifying all the qualitative behaviors of the model explaining the absence of conversion. This work aims to study conversion in different French "cantons". A larger interval of parameter variation with 81 parameter sets gives the same conclusion as the 625 parameter sets in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018). The main parameters to vary are:  $\alpha$  (slope of logistic function) with values: 5, 23 and 41,  $TA$  (threshold to consider an alternative) with values: 0.41, 0.45 and 0.49,  $TO$  (threshold to consider an alternative) with values: 0.01, 0.05 and 0.09,  $W$  (importance given to the dimension representing farming strategy) with values: 0.6, 0.8 and 1.  $TD$  (threshold for two counters of duration) is kept constant with the value 5. Agents' memory is also kept constant at 10 years, as well as the distance for similarity,  $sim_i$ , valued 0.1. The evolution of each "canton" with a population of 100 conventional farmers (no organic farming at

the beginning) is simulated for 30 years and replicate 100 times.

The measures presented in what follows are averages over the 81 parameter sets and their related 100 replicas. The details corresponding to the variations due to a particular parameter set are not investigated here since they have been presented further in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018). These averages are used as global indicators of the coupled dynamics instead of particular indicators of a particular dynamics. This approach is relevant to compare what is explained by farm characteristics to what is explained by social dynamics.

## **Model behaviors**

(Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018) shows that farm characteristics are very important for farmers' decisions towards the conversion to organic farming. In the following study, we distinguish:

- Virtual conversions which would only be explained by initial farm characteristics (at time 0), or after the first 5 years (value of the "waiting" period  $TD$ ) during which a conversion is not possible but farms' performances can be changed due to the model dynamics. Virtual conversions indicate the potential adoptions in a "canton".
- Real conversions which can be explained by farm characteristics, but also by the social dynamics of interacting farms. These real conversions are measured at time 6, the first date at which a farm can adopt an alternative strategy, and at time 29, the end of the simulation.

## **Adoption rate evolution in 27 "cantons"**

In figure 4, different colors represent "cantons" in different "départements". In the first three figures,  $x$ -axis represent the adoption rates at time 0 (initial farm characteristics),  $y$ -axis represent respectively the adoption rates at time 5 (initial practice evolution effect), 6 (decision effect) and 29 (complete effect) considering average values over 100 replications of each parameter set. The fourth one shows the adoption rates at time 0 and 29 of average values over all the 81 parameter sets and their related 100 replicas.



As shown in figure 4, all the conversion rates at these times keep the same tendency as the virtual conversion at time 0 depending only on the farms' characteristics. "Département" 22 converts the least, 25 and 42 have nearly the same conversion rates, 15 converts the most. This indicates that the principal determinant of the conversion to organic farming is probably the initial farm characteristics.

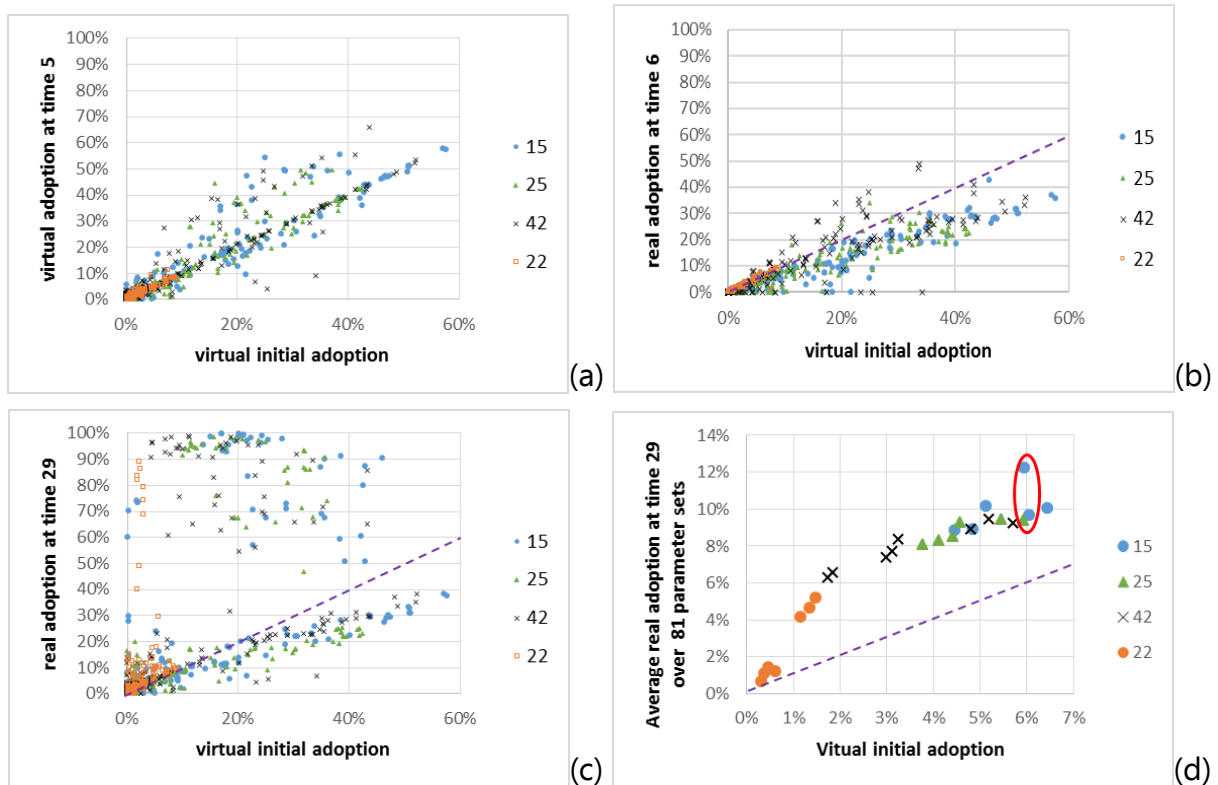


Fig. 4. (a-c) The average virtual/real adoption rates of each parameter set over its 100 replicas at time 5, 6 and 29 comparing to the virtual adoption rates at time 0, (d) the average real adoption rates over all the 81 parameter sets and their related 100 replicas. Purple lines represent the virtual adoption rates at time 0. Points with different colors represent different "cantons" from the four different "départements" to which they belong (15 in blue, 25 in green, 42 in purple and 22 in orange).

The average level of adoption in the fourth figure is nearly divided by 10 compared to the first 3 figures. It shows the high frequency of "0 adoption" which lowers the average aggregated adoption rates. Overall, we have noticed from our simulation non-adoption rates: 63%, 53%, 68%, 52% at time 0, 5, 6 and 29 for all "cantons" over the experimental design (social dynamics impact: +5% of non-adoption at time 6, but -11% of non-adoption at time 29). The details corresponding to the variations due to a particular

parameter set is not investigated here since it has been presented further in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018).

In some cases, the social dynamics can favor adoption until a 100% adoption rate; in some cases, the social dynamics can impede the adoption and give the adoption rate inferior to the virtual one at time 0. Indeed, at time 5, the virtual adoption rates are slightly higher than the initial rates in most "cantons". The adoption rates measured at time 6 are lower than at time 5. However, the adoption rates at time 29 are finally better than at other times. It indicates that the adoption rate depends also on social dynamics.

During the first 5 times, an agent cannot change its farming strategy. The variation of adoption rate is only due to the performance evolution. Less productive farms cannot increase their performances much due to the maximum production  $R$  while more productive ones can decrease theirs. Then more productive farms will have less total productions and negative personal evaluations compared to their experiences, and eventually worse satisfactions with the current situation. Thus, the virtual adoption rate at time 5 is larger than at time 0, especially for more productive farms.

At time 6, less productive farms convert immediately since they can gain in total production (equation 18 to equation 19). This can make the alternative less interesting for other agents searching an alternative. For first adopters, referring to the media, the alternative evaluation depends directly on their own farm characteristics. Then they can be referred to by other "similar" farms (on farm characteristics) which are looking for an alternative. Since these first adopters are rather less productive farms, they give a worse evaluation of the alternative than that given by the media. Therefore, the adoption rate at time 6 is lower than at time 5.

Later, with the adoption diffusion, there are more and more adopters. At time 29, the adoption rates are larger than initial virtual rates due to the social dynamics.

For the selected "cantons", the conversion to organic farming depends mainly on farm characteristics. However, social dynamics also have a strong impact on the decision. Indeed, as shown by the red circles in figure 4d, some "cantons" have similar initial virtual adoption rates among which some have also similar real final ones while others

have different real final ones. They correspond to “cantons” with INSEE code 1512 (Murat in Cantal), 1515 (Riom-ès-Montagnes in Cantal) and 2517 (Mouthe in Doubs). They have a similar virtual adoption rate at time 0. At time 29, 1515 and 2517 still have a similar final adoption rate while the adoption rate in 1512 is much higher than in other “cantons”. In the following, we aim at understanding these variations.

## Understand the “cantons” impact on the adoption rate

To better understand the detailed situations, the three typical “cantons” (1512, 1515 and 2517) outlined in figure 4d are studied through different points: (1) farm characteristics of each “canton”; (2) temporal adoption rates of different farm types in each “canton”; (3) distribution of individual trajectories towards alternative in each “canton”.

### Farm characteristics of each “canton” from RGA

As shown in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018), different farms in terms of quota have quite different behaviors. According to each farm’s quota ( $Q$ ), three farm types are classified for the following behavior analysis.  $Q$  inferior to 133000 liters are considered as small farms, between 133000 and 257000 liters as medium farms, superior to 257000 liters as large farms.

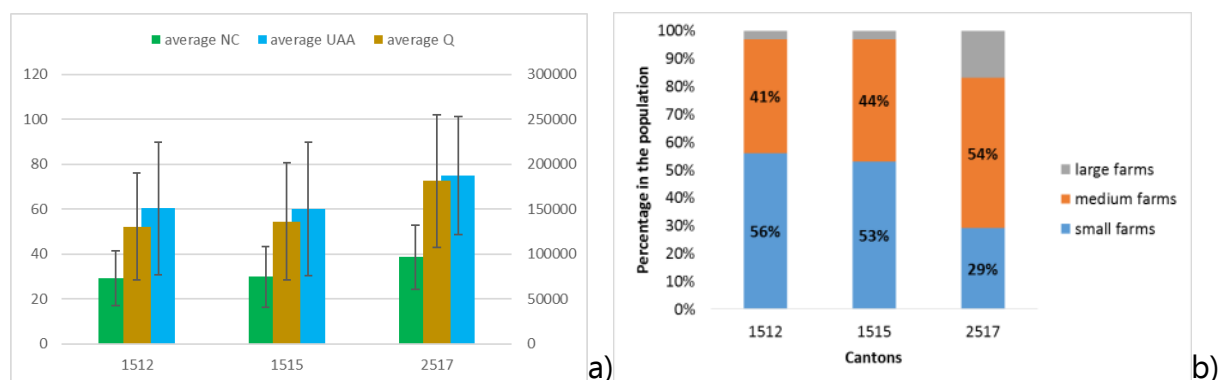


Fig. 5. (a) on the left: farm characteristics of each « canton » in terms of average number of cows ( $NC$ ), average utilized agricultural area ( $UAA$ ) in are and average quota ( $Q$ ) in liters,  $NC$  and  $UAA$  use the left dimension and quota  $Q$  uses the right dimension. Error bars indicate standard deviation. (b) on the right: distribution of farm types in terms of quota  $Q$  in each « canton ».

As shown in figure 5, "cantons" 1512 and 1515 are similar in farm characteristics and type distributions, while 2517 is quite different from others. The comparison is explained in detail in the following.

**Temporal adoption rates for each farm type in each "canton"**

Figure 6 shows the average virtual/real adoption rates for each farm type in each "canton" at time 0, 5, 6 and 29 (averaged over the 81 parameter sets and their replicas). In general, small farms convert the most except for the "canton" 2517. Large farms convert the least in all cases. The comparison is explained in detail in the following.

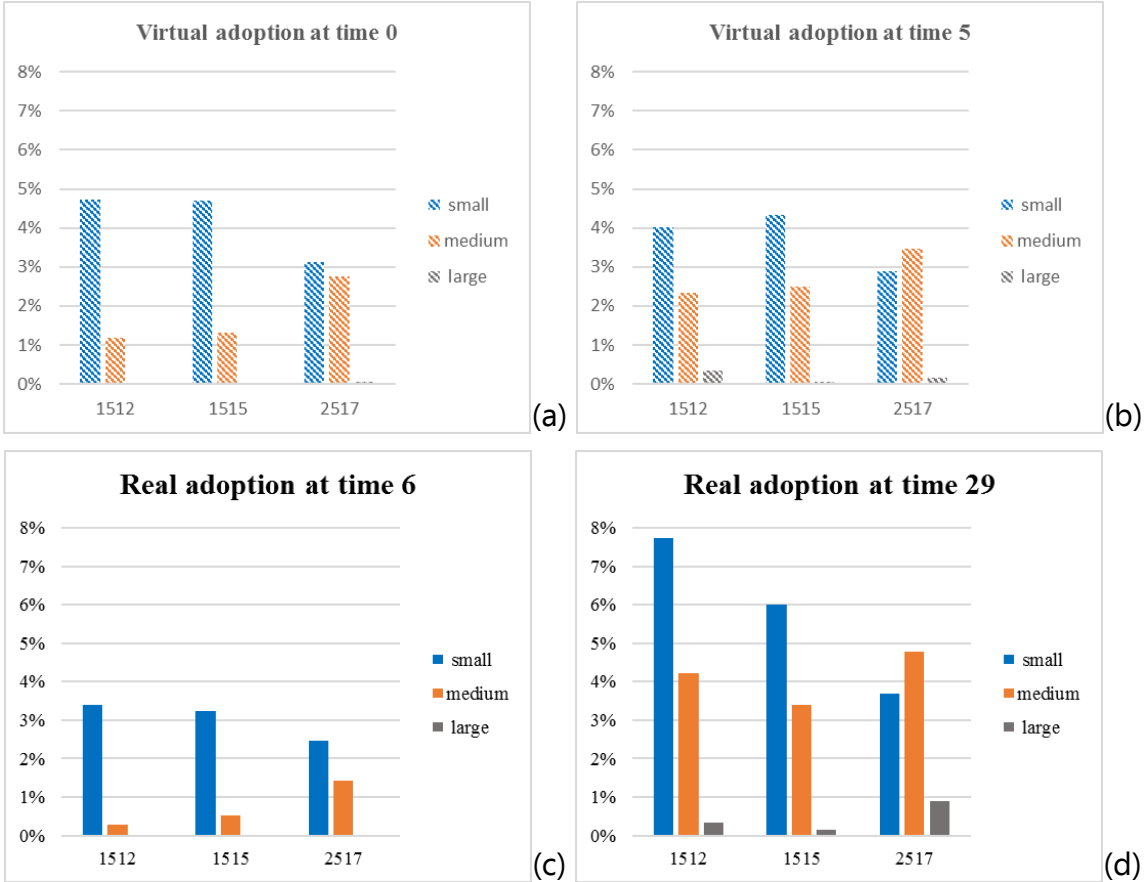


Fig. 6. Average temporal adoption rates over the 81 parameter sets for each farm type in each "canton".

**Distribution of agents' typical trajectories regarding the decision states**

Figure 7 shows the average distribution over the 81 parameter sets of agents' states

for each farm type in each "canton". It indicates an agent's story regarding the decision. All bars, except the green bars representing "has adopted the alternative", lead to the non-adoption of organic farming. They are presented further in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018).

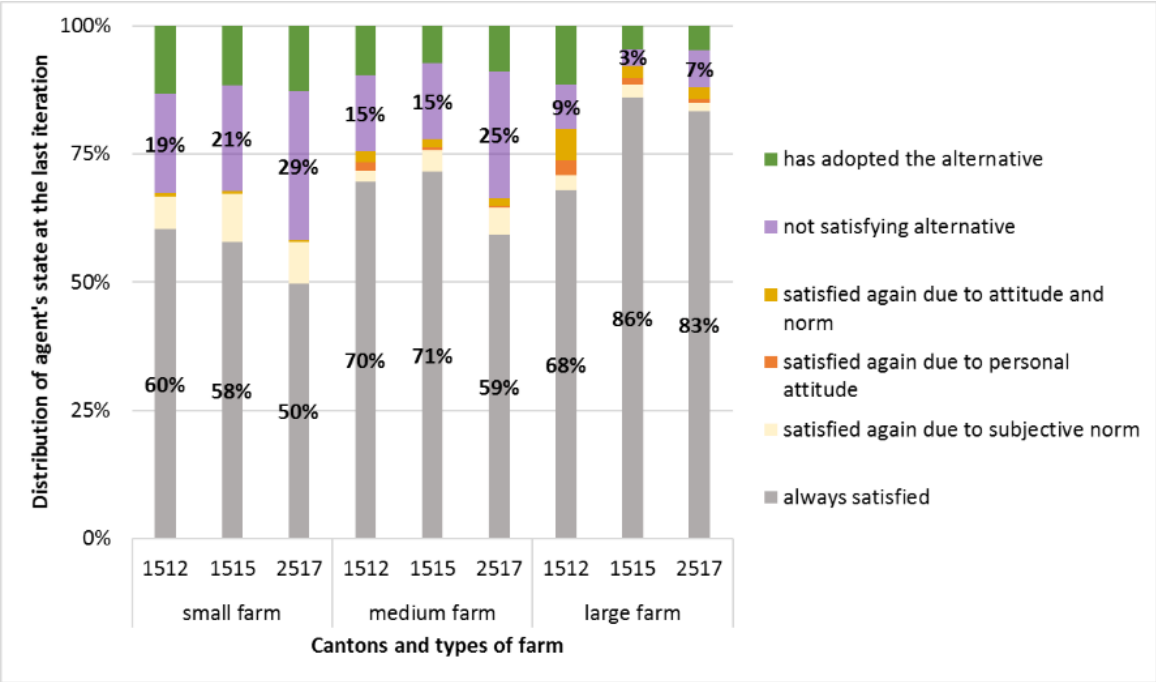


Fig. 7. Average distribution over the 81 parameter sets of agents' states for each farm type in each "canton"

**Overall comparison to explain evolutions**

This section gives the detailed comparison among those three typical "cantons" (1512, 1515 and 2517). These comparisons are based not only on agents' trajectory distributions presented in figure 7, but also on figures 5 and 6 with supplementary information.

**Comparison between 1512 and 1515.**

Having similar characteristics, "cantons" 1512 and 1515 have a similar adoption rate at first (time 0, 5 and 6), but different ones at the end of the simulation (time 29). They are also compared in terms of the following detailed characteristics:

- Similar average basic characteristics (figure 5a), a slightly more small farms (56%) in 1512 compared to 1515 (53%) (figure 5b);
- Similar initial virtual adoption rate (figure 6a), larger final adoption rate in 1512 than 1515, especially small farms (figure 6d);
- Small farms in 1512 have less frequent “dissatisfied alternative” and “satisfied again” whatever the reason than in 1515; 1512’s medium and large farms are less frequent “always satisfied” than 1515 (figure 7).

Compared with “canton” 1515, 1512 has more small farms that cannot increase their total productions due to their maximum possible productions (i.e. their quota). So 1512’s other farms’ performances are more influenced through the imitation process (equation 15). With the performance evolution, the difference of total production between small farms and large ones decreases. Small farms can have larger credibility given by larger farms but give them smaller credibility in return. As a result, small farms can influence even much larger ones. This process allows small farms to be better and better socially evaluated (subjective norm) by the larger ones.

If the number of small farms is smaller, like “canton” 1515, small farms can less influence large farms’ performances. Thus, small farms can have a worse social evaluation than in “canton” 1512 (purple circles in figure 8).

This worse social evaluation explains the smaller proportion of “canton” 1515’s small farms’ “always satisfied” with the current situation (grey bars in figure 7). It also explains why 1512’s small farms have less “dissatisfied alternative” (purple bars in figure 7), since the subjective norm is similar whatever the evaluated strategy. Having less negative subjective norms, a small farm in 1512 has an easier time increasing its satisfaction with the alternative compared to that with the current situation by more than  $\tau_0$  (threshold to change to an alternative). Such an increase before the agent returns to “satisfied again” implies the satisfaction and adoption of an alternative strategy. Thus, small farms of 1512 converts more than in 1515.

Medium and large farms in “canton” 1512 adopt also more than in 1515. This is due to the same mechanism. More influenced by small farms, 1512’s larger farms decrease their intensive practices. This leads them to a lower subjective norm (black circles in

figure 8) and a lower personal attitude (red circles in figure 8), making them dissatisfied. On the contrary, 1515's medium and large farms, less influenced by small ones, have better evaluations with the current situation. This allows them to be satisfied and not to consider an alternative.

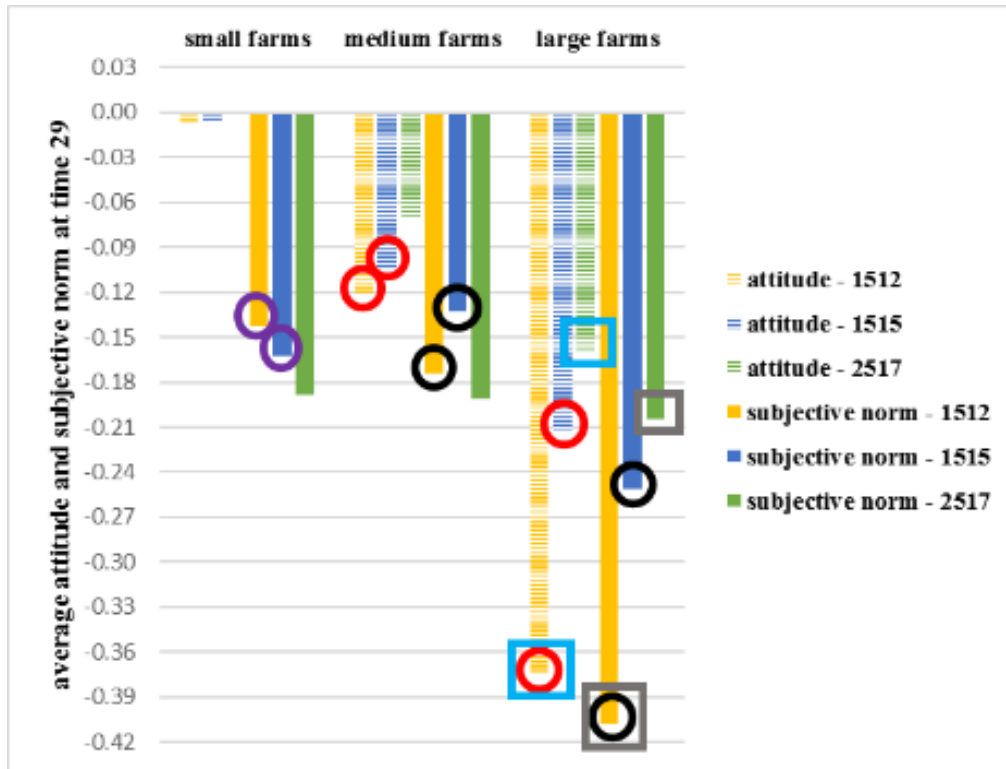


Fig. 8. Average subjective norm over the 81 parameter sets of agents' states for each farm type in each "canton"

### Comparison between 1515 and 2517.

"Cantons" 1515 and 2517 have different farm characteristics and different initial adoption rates for each farm types, but similar conversion rates at the end of the simulation. They are also compared in terms of the following detailed characteristics:

- "Canton" 2517 has a larger number of dairy cows ( $NC$ ), more utilized agricultural area ( $UAA$ ), more quota ( $Q$ ) and is more intensive ( $UAA/Q$ ) than "canton" 1515 (figure 5a). Nearly half of all farms in "Canton" 2517 are small, while 1515 has many more medium and large farms (figure 5b).

- The global virtual/real adoption rates are similar in both cantons at time 0 and 29 (figure 4). In fact, more small adopters exist in 1515, while there are more medium and large adopters in 2517 (figure 6).
- They have similar conversion rates by farm type (green bars in figure 7).

Despite different farm characteristics and different adoption rates for each farm type, these “cantons” have similar total adoption rates due to the differences in farm type distributions (figure 5b). In addition, for both “cantons”, the adoption rates in each farm type are similar (green bars in figure 7).

According to the farm type distribution shown in figure 5b, “canton” 1515 has more small farms, less medium and large farms than 2517. With their similar adoption rates in each farm type, they can have different adopters in each type. However, they can also have similar global adoption rates.

### **Comparison between 1512 and 2517.**

Having different characteristics, “cantons” 1512 and 2517 have also a similar virtual adoption rate at time 0, but different adoption rates at the end of the simulation. They also compare as follows:

- “Canton” 2517 has a larger number of dairy cows ( $NC$ ), more utilized agricultural area ( $UAA$ ), more quota ( $Q$ ) and is more intensive ( $UAA/Q$ ) than “canton” 1512 (figure 5a). Nearly half of all farms in “Canton” 2517 are small, while 1512 has many more medium and large farms (figure 5b).
- Regarding the global virtual adoption rates (figure 4d), they are similar in both cantons at time 0 while “canton” 1512 has much more conversion than 2517 at time 29. Regarding each farm type, 2517 has less small farm adopters, more medium and large adopters (figure 6).
- In each farm type, small and medium farms have similar adoption rates, while large farms in 1512 have a larger adoption rate and less frequent “always satisfied” than in 2517 (green and grey bars in figure 7).

The dynamics of 1512 compared to 2517 is close to the one of 1515 compared to 2517.



The difference between the adoption rates are mainly explained by the influence of small farms which are even more numerous in 1512 than in 1515 (figure 5b, 56 % versus 53 % against only 29 % of small farms in 2517).

Another difference, which does not appear in the comparison between 1515 and 2517, is about the large farm dynamics regarding the decisions (figure 7). Much more influenced by smaller ones, large farms in "canton" 1512 decrease their performance longer and have a lower personal attitude than 2517 (blue squares in figure 8). In addition, comparing to large farms in "canton" 2517, those in 1512 have a worse subjective norm due to the loss of total production superiority (grey squares in figure 8). As a result, large farms of 1512 are more frequently dissatisfied with the current situation and have a larger adoption rate than those of 2517.

## **Conclusion discussion**

(S. Huet et al. 2018) and (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) argue that the organic farming adoption is strongly influenced by the imitation of the practices of "important others" and is very sensitive to the distance between farms. (Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018) shows the impact of population characteristics on the adoption rate. In this paper, we focus on the impact of social dynamics for different farm type distributions (initialization of 27 "cantons" from the data of the French 2000 Agricultural Census) on the adoption rate predicted by an agent-based model.

At the individual farm level, as in (Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018), we notice the importance of farm types. Indeed, small farms with low total milk production and high environmental total production convert more than others. Such farms have extensive practices and are more likely to convert according to the experts. Accordingly, (Bos, Smit, et Schröder 2013; Groeneveld et al. 2016) also argue that large farms intensify more than small farms, developing characteristics preventing them from converting.

At the population level, we globally notice the same impact of characteristics on the level of adoption, but the adoption can be impeded or favored by the social dynamics of interacting farms.

Indeed, some “cantons” have more small and medium farms convert more than others. “Cantons” that are more intensive (those located in the Brittany region) have almost no conversion compared to extensive ones (those located in mountainous areas).

However, “cantons” having rather similar characteristics and just a tiny difference of their type distributions can have very different final adoption rates. This is due to the effect of the interaction among farmers, which are very sensitive to farm type distributions and can change the alternative referred to in the population. Another particular remark, populations with different characteristics can also have a similar final global adoption rate but different rates regarding each farm type. This is also often due to different population distributions. Overall, we conclude that despite their low social value, small farms, if they are numerous enough, can have a slow repeated impact on larger farms. They can change their practices in such way they are interested in adopting organic farming. However, they can also change their practice without adopting. These two possible evolutions are in accordance with (Sutherland, Burton, et al. 2012; Sutherland 2011) and depend on the farm type distributions of the population. This is also due to constraint in terms of level of total production, as the agronomic characteristics of the soil and/or regions, the size of the farm and the quota, which limit the total possible production.

We cannot compare our adoption rates for the chosen French regions to real adoption rates: firstly, because the data is not so easy to obtain; secondly very important dynamics are not presented in the model and make the comparison hardly relevant. Adding to the model external factors such as the economy crashing, but also demographic evolution implying an increasing average size of farms and consequently of maximum possible production, are the next steps for research about this model. Indeed, as already said, most of the results obtained in this study are due to the fact that the maximum total production is limited.

## Reference

- Ajzen, Icek, and Martin Fishbein. 1975. *Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Barbier, Cécile, Marianne Cerf, and Jean-Marie Lussan. 2015. "Cours de Vie d'agriculteurs Allant Vers l'économie En Intrants: Les Plaisirs Associés Aux Changements de Pratiques." *Activités* 12 (12–2).
- Bos, Jules F. F. P., A. (Bert) L. Smit, and Jaap J. Schröder. 2013. "Is Agricultural Intensification in The Netherlands Running up to Its Limits?" *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, On careful livestock farming*, 66 (Supplement C): 65–73.
- Burton, Michael, Dan Rigby, and Trevor Young. 2003. "Modelling the Adoption of Organic Horticultural Technology in the UK Using Duration Analysis." *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 47 (1): 29–54.
- Burton, Rob J. F., and Geoff A. Wilson. 2006. "Injecting Social Psychology Theory into Conceptualisations of Agricultural Agency: Towards a Post-Productivist Farmer Self-Identity?" *Journal of Rural Studies* 22 (1): 95–115.
- Burton, Rob J.F. 2004. "Reconceptualising the 'Behavioural Approach' in Agricultural Studies: A Socio-Psychological Perspective." *Journal of Rural Studies* 20 (3): 359–371.
- Centola, Damon. 2015. "The Social Origins of Networks and Diffusion." *American Journal of Sociology* 120 (5): 1295–1338.
- Chambaut, Hélène, Erika Moussel, Jérôme Pavie, Jean Paul Coutard, Bertrand Galisson, Jean-Louis Fiorelli, and Joannie Leroyer. 2011. "Profils Environnementaux Des Exploitations d'élevage Bovins Lait et Viande En Agriculture Biologique et Conventiionnelle: Enseignements Du Projet CedABio." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*, 53–56.
- Darnhofer, Ika, Walter Schneeberger, and Bernhard Freyer. 2005. "Converting or Not Converting to Organic Farming in Austria: Farmer Types and Their Rationale." *Agriculture and Human Values* 22 (1): 39–52.
- Darré, Jean-Pierre. 1985. *La Parole et La Technique: L'univers de Pensée Des Éleveurs Du Ternois*. Vol. 10. Editions L'Harmattan.
- De Buck, A. J., I. Van Rijn, N. G. Roling, and G. A. A. Wossink. 2001. "Farmers' Reasons for Changing or Not Changing to More Sustainable Practices: An Exploratory Study of Arable Farming in the Netherlands." *The Journal of Agricultural Education and Extension* 7 (3): 153–166.
- Dedieu, Marie-Sophie, Alice Lorge, Olivier Louveau, and Vincent Marcus. 2017. "Les Exploitations En Agriculture Biologique: Quelles Performances Économiques?"
- Dowd, Anne-Maree, Nadine Marshall, Aysha Fleming, Emma Jakku, Estelle Gaillard, and Mark Howden. 2014. "The Role of Networks in Transforming Australian Agriculture." *Nature Climate Change* 4 (7): 558–563.
- Fairweather, John R. 1999. "Understanding How Farmers Choose between Organic and Conventional Production: Results from New Zealand and Policy Implications." *Agriculture and Human Values* 16 (1): 51–63.
- Fairweather, John R., Lesley M. Hunt, Chris J. Rosin, and Hugh R. Campbell. 2009. "Are Conventional Farmers Conventional? Analysis of the Environmental Orientations of Conventional New Zealand Farmers." *Rural Sociology* 74 (3): 430–454.
- Goldstone, Robert L., and Marco A. Janssen. 2005. "Computational Models of Collective Behavior." *Trends in Cognitive Sciences* 9 (9): 424–430.
- Grimm, Volker. 1999. "Ten Years of Individual-Based Modelling in Ecology: What Have We Learned and What Could We Learn in the Future?" *Ecological Modelling* 115 (2): 129–148.
- Groeneveld, Anouschka, Jack Peerlings, Martha Bakker, and Wim Heijman. 2016. "The Effect of Milk

- Quota Abolishment on Farm Intensity: Shifts and Stability." *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, Social science perspectives on the bio-economy*, 77 (Supplement C): 25–37.
- Huet, S., C. Rigolot, Q. Xu, Y. De Cacqueray-Valmenier, and I. Boisdon. 2018. "Toward Modelling of Transformational Change Processes in Farm Decision-Making." *Agricultural Sciences* 09 (03): 340–350.
- Kaufmann, Peter, Sigrid Stagl, and Daniel W. Franks. 2009. "Simulating the Diffusion of Organic Farming Practices in Two New EU Member States." *Ecological Economics* 68 (10): 2580–2593.
- Kerselaers, Eva, Lieve De Cock, Ludwig Lauwers, and Guido Van Huylenbroeck. 2007. "Modelling Farm-Level Economic Potential for Conversion to Organic Farming." *Agricultural Systems* 94 (3): 671–682.
- Lamine, Claire, and Stéphane Bellon. 2009. "Conversion to Organic Farming: A Multidimensional Research Object at the Crossroads of Agricultural and Social Sciences. A Review." *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1): 97–112.
- Latruffe, Laure, Céline Nauges, and Yann Desjeux. 2013. "Le Rôle Des Facteurs Économiques Dans La Décision de Conversion à l'agriculture Biologique." *Innovations Agronomiques* 32: 259–269.
- Mintzberg, Henry, Duru Raïsinghani, and Andre Theoret. 1976. "The Structure of 'Unstructured' Decision Processes." *Administrative Science Quarterly* 21 (2): 246.
- Mzoughi, Naoufel. 2011. "Farmers Adoption of Integrated Crop Protection and Organic Farming: Do Moral and Social Concerns Matter?" *Ecological Economics* 70 (8): 1536–1545.
- Neumeister, D., Simon Fourdin, and Anne-Charlotte Dockès. 2011. "Etude Des Freins et Motivations Des Éleveurs Laitiers Au Passage En Agriculture Biologique Dans Les Zones de Piémont et de Montagne." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*.
- Öhlmér, Bo, Kent Olson, and Berndt Brehmer. 1998. "Understanding Farmers' Decision Making Processes and Improving Managerial Assistance." *Agricultural Economics* 18 (3): 273–290.
- Padel, Susanne. 2001. "Conversion to Organic Farming: A Typical Example of the Diffusion of an Innovation?" *Sociologia Ruralis* 41 (1): 40–61.
- Pavie, J., H. Chambaut, E. Moussel, J. Leroyer, and V. Simonin. 2012. "Évaluations et Comparaisons Des Performances Environnementales, Économiques et Sociales Des Systèmes Bovins Biologiques et Conventionnels Dans Le Cadre Du Projet CedABio." *Renc. Rech. Ruminants* 19: 37–40.
- Pavie, Jérôme, Anne-Charlotte Dockès, and Laurence Echevarria. 2002. *Etude Des Freins à La Conversion à l'agriculture Biologique Des Exploitations Laitières Bovines*. Paris Cedex 12: Institut de l'Élevage.
- Rickards, L., and S. M. Howden. 2012. "Transformational Adaptation: Agriculture and Climate Change." *Crop and Pasture Science* 63 (3): 240.
- Rigby, Dan, Trevor Young, and Michael Burton. 2001. "The Development of and Prospects for Organic Farming in the UK." *Food Policy* 26 (December): 599–613.
- Rogers, Everett. 1983. *Diffusion of Innovations*. 3rd ed. New York : London: Free Press ; Collier Mac-millan.
- Sainte-Beuve, Jasmin, Douadia Bougherara, and Laure Latruffe. 2011. "Performance Économique Des Exploitations Biologiques et Conventionnelles: Levier Économique à La Conversion." 10p. in *Les Transversalités de l'agriculture Biologique Strasbourg*.
- Stock, Paul V. 2007. "'Good Farmers' as Reflexive Producers: An Examination of Family Organic Farmers in the US Midwest." *Sociologia Ruralis* 47 (2): 83–102.
- Sutherland, Lee-Ann. 2011. "'Effectively Organic': Environmental Gains on Conventional Farms through the Market?" *Land Use Policy* 28 (4): 815–824.
- . 2013. "Can Organic Farmers Be 'Good Farmers'? Adding the 'Taste of Necessity' to the Conventionalization Debate." *Agriculture and Human Values* 30 (3): 429–441.
- Sutherland, Lee-Ann, Rob J.F. Burton, Julie Ingram, Kirsty Blackstock, Bill Slee, and Nick Gotts. 2012. "Triggering Change: Towards a Conceptualisation of Major Change Processes in Farm Decision-Making." *Journal of Environmental Management* 104: 142–151.

- Sutherland, Lee-Ann, and Ika Darnhofer. 2012. "Of Organic Farmers and 'Good Farmers': Changing Habitus in Rural England." *Journal of Rural Studies* 28 (3): 232–240.
- Xu, Q., S. Huet, E. Perret, I. Boisdon, and G. Deffuant. 2018. "Population Characteristics and the Decision to Convert to Organic Farming."
- Xu, Q., S. Huet, C. Poix, I. Boisdon, and G. Deffuant. 2018. "Why Do Farmers Not Convert to Organic Farming? Modelling Conversion to Organic Farming as a Major Change." *Natural Resource Modeling*.

## **Chapitre 5. L'impact de la démographie dynamique du modèle sur le taux d'adoption: implémentation RGA**

Ce chapitre est actuellement soumis à la revue Computational Social Science.

# Major and minor changes, demographic dynamics and dairy farmers' conversions to organic farming

**Abstract.** Farmers now adopt many changes to adapt to the global environmental changes. We have designed an agent-based model of farmer's decision-process considering two types of change: minor changes corresponding to regular decisions based on the imitation of the practices of credible agents; major changes corresponding to a change of worldview implying a different way to assess peers and practices. We have studied the capacity of this new model to explain the lack of conversion, and determine the impact of the interaction between the model dynamics and farm characteristics on the conversion rate. This model includes deep changes in terms of number and characteristics of the agricultural population due to demographic issues. Overall, the number of farms strongly decreases while their average size strongly increases. We initialize the model, and determine proper rules of retirement, activity cessation, inheritance and purchase, based on the Agricultural Census' data about the farm characteristics in 24 French "cantons". This paper aims to understand how these demographic issues change the conversion rate compared to static populations. We show that overall the dynamic demography at first impedes and then favors the conversion. Moreover, we notice a particular sensitivity to farm trajectories, which can lead either to an increase or to a decrease of the population conversion rate depending if they convert before growing or the contrary.

**Keywords:** organic farming, decision making, major change, Theory of Reasoned Action, agent-based model, social influence, credibility.

## Introduction

Agriculture has undergone many transformations for a century in France (Michel-Guillou 2010). Two main phenomena illustrate them: (1) the change of practices, especially the increase of production to meet the needs of a growing world population; (2) the professionalization of industry, and the aging of the farm population. These phenomena lead to a sharp decrease in the number of farms on the one hand, and the

expansion of the remaining farms on the other hand (Perrot and Cébron 2013; Depeyrot 2017). The first point has been the subject of many research studies. The second point was rather investigated by the organizations in charge of the agricultural census. The question of how these two phenomena interact and jointly explain the evolution of agriculture remains a research question. Our aim here is to investigate it by relying on an original agent based model (Huet et al. 2018; Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, and Deffuant 2018) considering a population of farmers operating two types of changes: minor change and major change. Minor changes correspond to practice changes that do not fundamentally challenge the farmers' worldview. Major changes imply a change of a farmer's worldview, after a strong dissatisfaction with what he considered until then as determining his orientations and his decisions (Sutherland et al. 2012; Rickards and Howden 2012; Dowd et al. 2014; Barbier, Cerf, and Lusson 2015; Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018).

(Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, and Deffuant 2018) studied the dynamics of farmers' changes through an agent model simulating French dairy farmers' conversions to organic farming. The dairy production is particularly interesting to study because the numerous dairy crises and an increasing knowledge about how to farm organically have made the conversion economically profitable (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara, et Latruffe 2011). This also allows our model to neglect the economic issue and to focus on agronomic, social and dynamic demography. Like most works in this area, whether based on dynamic models or not, studies of (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, and Deffuant 2018) assume that the number and characteristics of farms do not change over time. However the implemented model postulates in agreement with the recent literature presenting the changes as part of trajectories (Alavoine-Mornas et Madelrieux 2014; Boisdon et al. 2013; E. Chantre et Cardona 2014; Emilia Chantre 2013; Dockès et al. 2013b, 2013a; Lamine et al. 2009; Brédart et Stassart 2017). They argue that major and minor changes are inscribed in the trajectory of a farm. Parts of trajectories are also business interruptions, retirements, expansions in production due to purchase and inheritance, or to getting complementary rights to produce. Therefore, they are important to be taken into account to better understand the transformations of agriculture.



Moreover, in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, and Deffuant 2018)'s models, the farm characteristics, and in particular their production volume, are decisive for a major change such as a conversion to organic farming. These features are consistent with agronomists' discourses (Neumeister, Fourdin, et Dockès 2011; Jérôme Pavie, Dockès, et Echevarria 2002; De Buck et al. 2001). It seems that large farms, highly valued socially as exemplars in terms of production volume, are thus more satisfied with their current situations and continue to opt for intensification solutions, instead of considering possible changes. Even when they are dissatisfied, and then consider changes such as conversion, they have more to lose from the conversion to organic farming than small farms. Indeed, the conversion implies a fall in yields proportional to their production volume. Moreover, they have a very unfavorable social assessment of their environmental results as the higher is the milk production volume, the worse is the environment result (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018). On the contrary, for small farms, having little or nothing to lose in terms of yield, and much to gain socially by valuing their good environmental results, the conversion seems to be interesting. Therefore, they are usually the first – and sometimes the only ones to convert in the simulations.

(Xu, Huet, Perret, et Deffuant 2018) show that the number of farms in each farm category (small, medium, large) is important for the determination of local practice standards, at the scale of small agricultural areas (in our applications, the French "Cantons"). Indeed, this number, as well as how people interact with each other, determines the social balance around the determination of "good practices" that define the "good farmer" (Lamine et Bellon 2009; Padel 2001; R. J. F. Burton et Wilson 2006; Mzoughi 2011; Stock 2007; Sutherland 2013; Darré, Le Guen, et Lemery 1989; Brédart et Stassart 2017; Compagnone et Hellec 2015).

All these results are based on the study of static populations with a size and characteristics constant in time. Indeed, their initial quotas, defining their right to produce in terms of volume, do not change during the simulation. However, the farming production, and particularly the dairy production, has greatly increased over the last years (Depeyrot 2017; Perrot and Cébron 2013). The number of farms has considerably decreased as well as the farm size has increased (Depeyrot 2017; Perrot and Cébron 2013).

Number and type of farms, levels and rights of production, but also age distribution of farmers with their farm sizes, are therefore important for the study of dairy farmers' changes, including the conversion to organic farming. It is therefore entirely legitimate to question the impact of farm demography and its associated increase of milk production volume on the conversion rate. Is this demography slowing down the conversion as it implies a farm expansion leading to larger loss by converting? Alternatively, does it allow small, long-converted farms to expand once in organic becoming success stories to follow, thus facilitating the spread of organic farming?

To answer this question, a farm demography module is designed from the work already done with the agent-based model (Xu, Huet, Perret, et Deffuant 2018). The problem was to determine the rules of activity stopping and farm reattribution for the dynamic of our virtual populations with proper values (number of farms, size of farms ...) corresponding to the values observed by agricultural censuses. To do this, we use data from the French Agricultural Census (2000 and 2010), and the literature on the evolution of dairy farms in France (Depeyrot 2017; Perrot and Cébron 2013), to study the evolution of 24 French cantons producing mainly cow's milk.

To study the effect of this demography, we compare the organic farming adoption rate of a static population with that of a population whose demography is changing. In the following, for sake of simplicity, we designate this second population by "dynamic demography". This comparison shows that, overall, dynamic demography at first impedes and then favors the conversion. Indeed, demographic evolution implies on average a decrease of the number of farms and an increase of milk production volume. On the one hand, we confirm previous results: the larger is the production, the smaller is the adoption rate. On the other hand, the impact of the production increase on the adoption rate relates also to two different farm trajectories. A same increase of production leads to a larger adoption rate when it takes place after the conversion to organic farming than when it takes place before the conversion.

In the following section, we present the model, its background in the literature and its implementation on use cases of French dairy farmers' conversions to organic farming. Then we show the various impacts of demography on simulated conversion. We end with a synthesis of our results and discuss our conclusions.

## **Materials and Methods**

### **The model**

#### **General principles.**

(Rickards et Howden 2012; R. J. F. Burton 2004; Sutherland, Burton, et al. 2012) point out the existence of two types of change for a farmer: (1) minor changes, or incremental adaptations, and (2) major changes, or transformational adaptations.

A minor change corresponds to a regular decision made without very costly cognitive effort compared to a major change. The former is decided accordingly to the pathway followed by the farm and the farmer until the moment of decision and is made in a context known by the decider. Minor changes do not change the norm, the relationships, or the worldview of the farmer.

On the contrary, a major change requires a great cognitive effort to face a new situation without already known solutions. It is initiated by a strong need for change due to a high level of dissatisfaction. This dissatisfaction leads the farmer to consider previously not envisaged solutions, to learn about them and to evaluate them. This implies that the farmer changes his worldview. He can give large importance to what was neglected before and decrease the importance of what appeared essential. He can also change at least a part of his social network to get reliable information and social support related to the new activity. Such a change engages social processes involving the farm, the farmer agent, its peers and its environment. It has rarely been studied (M. Burton, Rigby, et Young 2003). Though its study is very important for sustainability as outlined by (Rigolot 2018).

Agent-based modeling (Goldstone and Janssen 2005; Hedström and Ylikoski 2010) or individual-based modeling (Grimm 1999) appear a relevant and well-gearred approach to help identifying the main drivers that can explain the observed dynamics at the population level. It then appears as a relevant tool to study the major change, also because it allows studying farm trajectories as recommended by scholars.

However, as pointed out in (Huet et al. 2018; Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018), none of current agent models is well fit to represent the decision process about major change and minor change in a unified framework, to study for example what is at stake in the conversion to organic farming. This is the reason why our model, includes an integrated process of two types of change, grounded precisely in the literature (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018).

Minor change is assumed to be an annual practice update. It is based on imitation of the practices of credible agents (Darré, Le Guen, and Lemery 1989). Major change is envisaged by farmers only when they are very dissatisfied (Sutherland, Burton, et al. 2012). It corresponds to a change of worldview implying a different way to assess peers and practices. The passage between these two types of change is computed with decision functions based on a dynamic version of the Theory of Reasoned Action (TRA) (Ajzen and Fishbein 1975).

The main original features of the model are the following:

- As (Darré 1985) showed that farmers co-construct their practices, in the model, farmers do minor change, ie update their practices by imitating their credible peers having a similar farm (Centola 2015).
- Consistently with (Sutherland 2013; Sutherland et Darnhofer 2012), farmers' activities are identified by two dimensions: producing on the one hand, and managing the nature on the other hand.
- An important feature of our model is tied to the decision process about a major change (Sutherland, Burton, et al. 2012; Rickards et Howden 2012; Dowd et al. 2014). It is assumed that a major change is only considered in critical situations as the agent faces high costs (economic, cognitive, emotional, etc.). Otherwise, agents do not even consider changing their major options. In a stable period, if a farmer is satisfied enough with his current farming strategy, he does not envisage an alternative one. Only a certain level of frustration or critical event (succession, major change in the farm, etc.) will suggest considering an alternative to a farmer's current strategy. The research and evaluation of an alternative is done with the farmer agent's credible peers having similar farm characteristics (Centola 2015).

- Like (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009), we use TRA (Ajzen et Fishbein 1975) to compute a farmer's satisfaction. In the model, if an agent is sufficiently dissatisfied with its current situation, its decision on conversion is based on comparing its satisfaction with its current strategy against its potential satisfaction with an alternative one. These satisfactions are computed with the attitude and the subjective norm related to the current or alternative strategy. Both attitude and subjective norm are dynamic and based on the difference in practice outcomes. Consistently with TRA (Ajzen et Fishbein 1975), our model integrates decomposed variables: attitude and subjective norm—instead of global variables as in (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009). Our work thus assumes that a farmer agent's evaluation is based on its concrete strategy and practice instead of an abstract general opinion. The evaluation relates to its own experiences and its peers' strategies and practices.
- A farmer agent's attitude about its current strategy is modelled as the difference between its past outcomes with current strategy and its current outcome. This choice is grounded in (Mintzberg, Raisinghani, and Theoret 1976; Öhlmér, Olson, and Brehmer 1998) who argue that a farmer agent's earlier practices are very influential on its decision on a future practice. Regarding an alternative strategy which can be new to the farmer agent, the attitude is the difference between its past outcomes with the current strategy and the outcomes of the alternative. Depending on where is found the alternative, the outcomes of the alternative are either the average of other peers with a similar farm and adopting the alternative or the outcomes of the alternative in the media.
- The subjective norm involves a comparison with peers, weighted by their credibility. This credibility is based on the difference between outcomes (i.e. total production).

The following described in details the basic elements and the dynamics of the model.

### **Basic elements.**

*Farmer.*

The model studies the evolution of a population with  $N$  farmer agents. Each agent is

characterized by its farm; its farming strategy; its performance defined on several dimensions  $i$  to evaluate a practice; the importance  $W_i$  given to each dimension of practice; the credibility ( $C(f, \nu)$ ) it lends to each other agent; its memory of applied strategies and performances during the last  $M$  periods; its satisfactions with current farming strategy ( $I_C$ ) and with an alternative one ( $I_A$ ); and the duration of its staying with a strategy ( $DC$ ) and the duration of its being dissatisfied of a strategy ( $DD$ ).

**$DC$  and  $DD$**  capture the duration between two events related to the decision process.  $DD$  counts an agent's dissatisfaction duration with its current strategy. In the model, an agent has to be dissatisfied long enough with its current strategy to change it.  $DC$  counts the duration since last strategy change. An agent cannot consider changing strategy again even if the agent is dissatisfied with it during the confirmation period. This is consistent with the theory of innovation diffusion (Rogers 1983) in which an agent has a confirmation period just after adopting a new strategy. Both durations are necessary to account for an agent's stability and consistency. The delayed action of both can only occur when the corresponding duration is above the parameter  $TD$ .

Except for  $W_i$ , all these attributes of a farmer agent are dynamic during the simulation, and their changing rules are described in detail below.

**Credibility.** Each agent  $f$  gives a credibility  $C(f, \nu)$  to another agent  $\nu$  by comparing their outcomes. Thus, each two agents are connected by a credibility. Credibility is between 0 (not credible at all) and 1 (very credible).

**Satisfaction.** Each agent has a satisfaction with its current farming strategy ( $I_C$ ) that corresponds to an evaluation of that strategy. It may also evaluate an alternative strategy in certain cases and have a satisfaction for it ( $I_A$ ). Satisfaction with a farming strategy lies between 0 (not satisfied at all) and 1 (very satisfied).

If an agent is satisfied with its current farming strategy, it does not consider an alternative. Otherwise, its satisfactions with its current farming strategy ( $I_C$ ) and with an alternative one ( $I_A$ ) are computed and compared. If  $I_A$  is higher enough than  $I_C$  the agent will change its farming strategy.  $I_C$  is thus computed at every iteration, whereas  $I_A$  is only computed when a stable agent is dissatisfied with its current farming strategy.

In accordance with TRA, the satisfaction  $I_S$  with a farming strategy  $S$  depends on two elements: attitude  $A_S$  and subjective norm  $SN_S$  toward  $S$ . In the original theory, the interaction between these two elements varies with different agents facing different situations. In order to keep the model simple, satisfaction is assumed as the average value of these two elements.

$$I_S = \frac{A_S + SN_S}{2} \quad (1)$$

Both attitude and subjective norm lie between -1 (very negative attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate) and 1 (very positive attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate). They are computed with farms' outcomes, farmers' strategies, and credibility. See the section "Farmers' dynamics" for the computation details.

Considering the value range of attitude and subjective norm towards a farming strategy, the satisfaction should also lie between -1 and 1. However, to facilitate other calculations, the satisfaction is normalized between 0 and 1.

**Performance.** The performance is evaluated over two dimensions: the level of the output production (i.e. the productivity impact, in our case milk production), and the level of environmental amenities production (i.e. the environmental impact), respectively called productivity performance ( $P_0$ ) and environmental performance ( $P_1$ ) in the paper. We assume  $P_0$  and  $P_1$  lie between 0 (very bad on this performance dimension) and 1 (very good on this performance dimension).

**Importance given to each dimension.** The importance given to productivity dimension is termed  $W_0$  and the one given to environmental dimension is termed  $W_1$ .  $W_0$  and  $W_1$  lie between 0 (not important at all) and 1 (most important). They sum to 1.

$$W_0 + W_1 = 1 \quad (2)$$

Importance defines an agent's personal values. An agent uses its own lens to judge the information it receives and the other agents it meets. In this model, both  $W_0$  and  $W_1$  are kept constant if an agent does not change its farming strategy.

**Farming strategy.** It is defined by the importance that a farmer gives to each dimension of practice. Two farming strategies are considered: organic and conventional. The organic strategy lends more importance to environmental dimension and less to productivity dimension, whereas the conventional strategy lends more importance to productivity dimension and less to environmental dimension. It is assumed that when a farmer agent changes its strategy it changes accordingly the importance given to the different dimensions.

*Farm.*

A farm has three attributes: its farming total production (productivity outcome)  $T_0$ , its environmental amenities outcome  $T_1$  and its reference  $R$ .  $R$  is the maximum possible productivity performance considering a farm's all characteristics and evolution. Interviews and experts' arguments show that conventional farms' references are grounded on the negotiations with dairy enterprises (often expressed by "quota" in Europe in the past). Organic farms have more constraints in terms of reference due to stricter regulations. So a conventional farm  $f$ 's reference  $R^f$  is considered as its farmer  $f$ 's initial productivity performance  $P_0^f(t=0)$  and that for an organic farm is a function  $l$  of  $P_0^f(t=0)$ .

$$R^f = \begin{cases} P_0^f(t=0) & \text{if } f \text{ is a conventional farm/farmer} \\ l(P_0^f(t=0)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

The implementation of a farm may need more attributes for different use cases. The detailed computation of  $T_0$  and  $T_1$  are defined in the model's implementation (see 2.2).

*Media.*

When an agent is dissatisfied with its current farming strategy and looks for an alternative, it first searches in the population for other agents having similar characteristics but applying an alternative farming strategy. If it cannot find one, it has access to the media for an alternative farming strategy's model. These models are given by some functions depending on the farm's current outcomes.



## Dynamics.

*Overview of a farmer's dynamics over years.*

One time-step (iteration)  $t \rightarrow t+1$  represents one year, i.e. once a year, farmers decide their farming strategies, their performances and so on. During an iteration, farmers' update order is picked up at random by a uniform law.

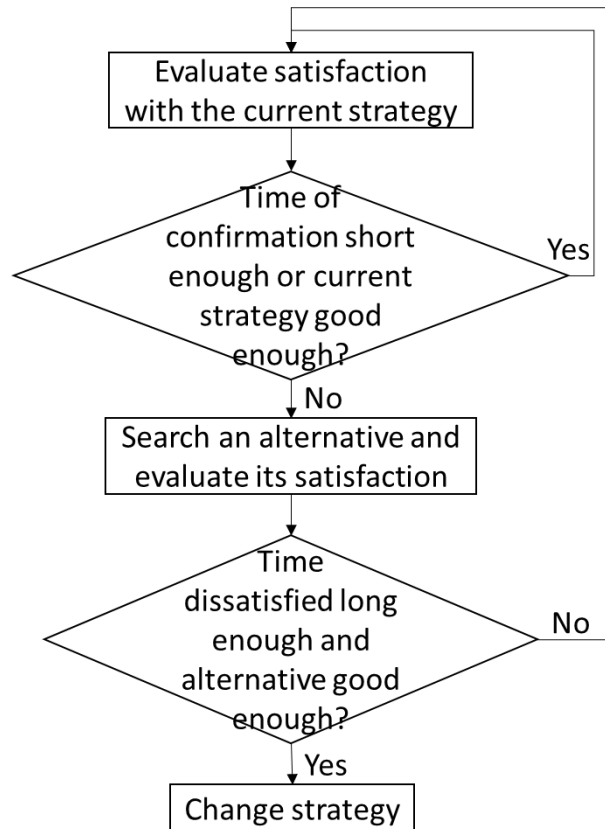


Fig. 1. —Overview of the farmer's update.

As shown in Figure 1 and the pseudocode of algorithm 1, during each iteration, an agent evaluates its satisfaction with its current farming strategy. If the agent is in a stable period and is satisfied with its current strategy, it does not consider a change. Otherwise, the agent looks for an alternative and evaluates it. If the agent has been dissatisfied for long enough and the alternative is good enough, it will change. Otherwise, the agent stays with its current farming strategy. It will then update its credibility given to other agents and its performance. See the detail in the following.

```

For each iteration {
  Generate the order of the population
  For each agent  $f$  in the population {
    For each agent  $v$  that is different from agent  $f$  in the population,
    compute credibility of  $v$  for  $f$   $C(f, v)$  (minor changes)
    Compute farm performances  $P_0, P_1$  (minor changes)
    Compute satisfaction with current strategy ( $I_C$ )
    If time since last strategy change higher than threshold ( $DC > TD$ ) and  $I_C <$ 
    Threshold  $TA$ , {
      Compute satisfaction with alternative  $I_A$ 
      If dissatisfaction duration higher than threshold  $DD > TD$  and satisfaction
      with alternative higher than satisfaction for current strategy plus threshold
       $I_A > I_C + TO$ , change strategy and update  $W_0, W_1$ 
    }
  }
}

```

Algorithm 1— Population updating loop.  $I_C$  is the satisfaction with a current strategy;  $I_A$  is the satisfaction with an alternative one.  $DC$  is an agent's confirmation duration;  $DD$  is an agent's dissatisfaction duration.  $TD$  is the minimum time of dissatisfaction before considering the alternative.  $TA$  is threshold of  $I_C$  to consider an alternative.  $TO$  is the threshold of  $I_A$  to change strategy.  $W_0$  is the importance given to productivity performance,  $W_1$  is the importance given to environmental performance.  $C(f, v)$  is the credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$ .  $P_0$  is the productivity performance,  $P_1$  is the environmental performance.

### *Credibility update.*

Every relationship between two agents is characterized by the credibility one gives to another, and depends on an agent's personal view of its difference to another in outcome (i.e. total production). For agent  $f$ , its difference to agent  $v$  is the sum of differences on each outcome dimension weighted by the importance given to that dimension.

$$D_v^f = \sum_{i=1}^2 (W_i^f (T_i^v - T_i^f)) \quad (4)$$

The credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$  is calculated with  $f$ 's difference to  $v$ :

$$C_v^f = \frac{1}{1 + e^{-\alpha D_v^f}} \quad (5)$$

with  $\alpha$  the parameter of the logistic function.

In Figure 2, agent  $f$ 's difference and credibility to  $v$  are respectively plotted on the  $x$ -axis and  $y$ -axis. When the difference is negative, it means that  $v$  has a worse outcome than  $f$ , thus  $f$  gives little credibility to  $v$ . When the difference is positive,  $v$  has a better outcome than  $f$ , thus  $f$  gives big credibility to  $v$ .

The lines with different colors represent  $\alpha$  variations to characterize the bias degree that an agent has for others with better outcomes. When  $\alpha$  is small, the bias is small. An agent tends to give same credibility to others, whether or not with better outcomes. If  $\alpha$  is big, the bias is strong. Only others with better outcomes are credible.

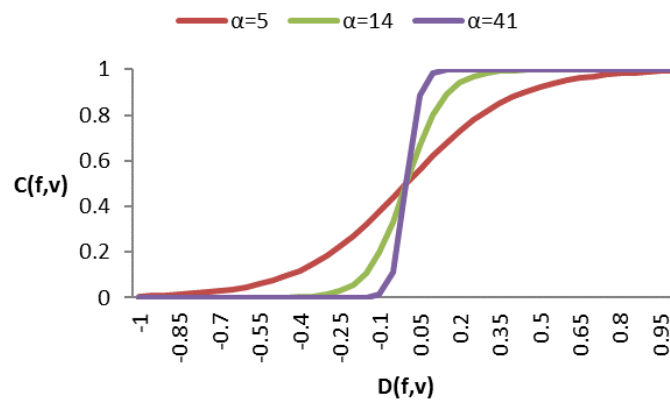


Fig. 2. —The credibility ( $y$ -axis) agent  $f$  gives to  $v$  depends on  $f$ 's difference ( $x$ -axis) to  $v$  for three values of parameter  $\alpha$  (different-colored lines)

In the model, every two agents are connected. Credibility depends on an agent's perceived difference in outcome to another and it is then used to update the agent's outcome which can change the perceived difference. Thus, the relationship associated to credibility is dynamic.

#### *Farming strategy change.*

An agent changes its farming strategy according to its satisfaction evaluations with its

current farming strategy ( $I_C$ ) and with the alternative one ( $I_A$ ). If an agent is in a stable state (its confirmation duration  $DC >$  threshold  $TD$ ) and it is still dissatisfied with its current farming strategy ( $I_C <$  threshold  $TA$ ), it will consider an alternative one. If the agent is dissatisfied long enough (its dissatisfaction duration since being stable  $DD > TD$ ) and its satisfaction evaluation of the alternative is better enough than that with its current one ( $I_A > I_C (1 + \text{threshold } TO)$ ), it will change farming strategy. As stated in equation (1), satisfaction  $I$  with a strategy is the average sum of the related attitude  $A$  and subjective norm  $SN$ .

In equation (1), attitude ( $A_S$ ) represents an agent's personal view of the difference between its experience and the (potential) outcome of evaluated strategy  $S$ . The agent  $f$ 's experience is its average outcome on the farm ( $\overline{T_{C,0}}, \overline{T_{C,1}}$ ) with its current farming strategy ( $S^f$ ) in memory ( $M$ ). It is computed like this:

$$\overline{T_{C,t}} = \frac{\sum_{t \text{ and } S^t = S^f}^M T_i^t}{Nb(S^t = S^f)} \quad (6)$$

The evaluated outcome depends on the strategy to be evaluated. For agent  $f$ 's current farming strategy evaluation, the evaluated outcome is  $f$ 's current outcome ( $T_i^f$ ).

Agent  $f$ 's attitude toward the current farming strategy ( $A_C$ ) is like this:

$$A_C^f = \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f (T_i^f - \overline{T_{C,t}}^f) \right) \quad (7)$$

If an agent's outcome on its farm changes and this change is considered better than its experience,  $A_C$  will be positive and strengthen the agent's decision to keep its current strategy. Otherwise,  $A_C$  will be negative and may influence  $I_C$ . Then the agent may be dissatisfied and evaluate  $I_A$ .

For agent  $f$ 's evaluation of an alternative farming strategy, the evaluated outcome is the average outcome ( $\overline{T_{A,0}}^f, \overline{T_{A,1}}^f$ ) of other agents having similar characteristics as  $f$  but applying the alternative. The similarity is defined by a function  $Y$  over the farm's characteristics and is compared with a distance threshold ( $sim$ ).  $Y$  is designed in the

model's implementation (see 2.2). The evaluated outcome is computed as follows:

$$\overline{T_{A,l}^f} = \frac{\sum_{Y_v^f < \text{simi and } S^v \neq S^f} T_i^v}{Nb(Y_v^f < \text{simi and } S^v \neq S^f)} \quad (8)$$

If there is no corresponding peer (no other agents similar to  $f$  and applying the alternative farming strategy), agent  $f$  will search the media for a stereotypical farm to evaluate the alternative.

$$\overline{T_{A,l}^f} = T_{model,i}^f \quad (9)$$

Therefore, agent  $f$ 's attitude toward an alternative is:

$$A_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 (W_i^f (\overline{T_{A,l}^f} - \overline{T_{C,l}^f})) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

Another component of satisfaction is the subjective norm, which represents how an agent considers others' opinions on the evaluated farming strategy through outcomes, i.e. the strategy's implementation results. It is thus an agent's perceived difference between the outcome to be evaluated and the average of other agents' outcomes.

For agent  $f$ 's evaluation of current farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_C^f = \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( T_i^f - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f T_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) \quad (11)$$

An agent will be socially satisfied if it perceives that other agents, especially those to whom it lends great credibility ("important others"), consider it as a 'good farmer'. The agent may be so satisfied to have a good social image that it will never consider a major change. Otherwise, if the agent feels socially bad, it may try to become more similar to others in the group or to change of group. This can be done with a change of strategy.

For the evaluation of an alternative farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( \frac{1}{T_{A,i}^f} - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f T_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

If in other agents' opinions, especially those to whom agent  $f$  lends great credibility ("important others"), the alternative is not better, then it is judged not good enough to improve the situation. Agent  $f$  will tend to keep its current strategy. Otherwise, the agent's subjective norm strengthens its intention to change its strategy.

If an agent changes its strategy, it also changes the importance given to each dimension of practice. The parameter  $W$  is the conventional farmers' initial importance given to the productivity dimension.

$$\text{For conventional agents: } W_0 = W; W_1 = 1 - W \quad (13)$$

$$\text{For organic agents: } W_0 = 1 - W; W_1 = W \quad (14)$$

*Performance update.*

As farmers co-construct their practices (Huet, Rigolot et al. 2018), at each time  $t$ , a farmer agent updates its performance by imitating the practices of its credible peers with a similar farm.

$$\Delta P_i^f = \frac{\sum_{v \neq f \text{ and } Y_v^f < \text{simi}}^N C_v^f (P_i^v - P_i^f)}{\sum_{v \neq f \text{ and } Y_v^f < \text{simi}}^N C_v^f} \quad (15)$$

Both performance dimensions are between 0 and 1. A farmer's productivity performance is also limited by the reference on its farm.

$$P_0^{f,t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } (P_0^{f,t} + \Delta P_0^f < 0) \\ R^f & \text{if } ((P_0^{f,t} + \Delta P_0^f) > R^f) \\ P_0^{f,t} + \Delta P_0^f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

A special case: if agent  $f$  looks for an alternative and cannot find a similar peer applying an alternative strategy, it will look for an alternative in the media. If agent  $f$  adopts the alternative found in the media after evaluation, then it will also imitate the performance expressed in the media.

### **The design of use cases based on agricultural data**

Recently, the conversion to organic farming has been qualified as a major change (Sutherland, Burton, et al. 2012) or a transformational adaptation (Rickards et Howden 2012; Dowd et al. 2014), as well as a social movement (Sutherland, Burton, et al. 2012; Fairweather et al. 2009; Darnhofer, Schneeberger, et Freyer 2005; Rigby, Young, et Burton 2001; Jérôme Pavie, Dockès, et Echevarria 2002). Conversion often implies strong changes of worldview and social network, and generally begins with a strong need for change (Barbier, Cerf, et Lusson 2015; Sutherland, Burton, et al. 2012). This is why we have chosen the issue of conversion to implement our model.

The model is implemented with data from Agricultural General French Census (RGA 2000). In each of three main dairy production French regions, we have selected one or two "départements" and their related "cantons" having at least 60 dairy farmers. We have simulated 24 French "cantons" in these "départements" where there are many dairy farmers and the dairy industry is the main activity. For sake of comparison, each of our virtual cantons has 100 farmers. These "cantons" have strong variations on practice intensity and homogeneity of farm types. According to expertise and literature (J. Pavie et al. 2012; Chambaut et al. 2011), a farm is defined by three variables: the utilized agricultural area ( $UAA$ ), the number of dairy cows ( $NC$ ), and the quota ( $Q$ ) which is a synthetic indicator of the farm's maximum milk production. A farm's intensity can be measured by  $UAA/NC$ .

The ways to implement the basic objects and their update are presented in the following, before explaining the implementation of dynamic demography.

## Basic object and their update

### *Farmer.*

A farmer agent is designed by its practice with productivity performance  $P_0$  and environmental performance  $P_1$  designed from data.  $P_0$  is directly deduced from the farm's initial characteristics and corresponds to the normalized average milk volume produced by one cow in one year. For farmer  $f$ , at the initial time  $t=0$ ,  $P_0^f = Q^f / NC^f$ . At every time  $t$ ,  $P_1^f = T_1^f / UAA^f$ , the equation (15) is only used to update  $P_0^f$ .

The  $Y$  function telling how two farmers are judged similar is based on a similarity of their farms' characteristics regarding  $UAA$  and  $NC$ . For agent  $f$ , agent  $v$  is a similar peer if  $\frac{|UAA^f - UAA^v|}{UAA^f} < simi$  and  $\frac{|NC^f - NC^v|}{NC^f} < simi$ . The value of threshold  $simi$  is fixed at 0.1 in the model.

A farm is supposed to be managed only by one farmer agent who updates its age annually. The initialization of a farmer agent's age depends on the quota (discretized in quota classes) on its farm. The age of a farmer is picked out from a normal law with an average and a standard deviation corresponding to the average age and the related standard deviation of farmers having the same quota class in data from FAGC 2000. During the simulation, each farmer agent annually updates its age.

### *Farm.*

As shown above, each farm is initialized by the crossed distribution of discretized utilized agricultural areas ( $UAA$ ) and quotas ( $Q$ ) of its "canton" from the RGA 2000. The number of dairy cows ( $NC$ ) is computed from a law extracted from data (with a regression  $r^2 = 0.9563$ ):

$$NC = 0.2463 UAA + 0.0001106 Q \quad (17)$$

$Q$  and  $UAA$  are respectively the real value of quota given in the liters and the real value of utilized agricultural area given in ares.  $Q$  has a value much larger than  $UAA$ , so it seems to have a small impact in terms of coefficient. All along the simulation,  $Q$ ,  $UAA$



and  $UC$  can only change with the demographic dynamics.

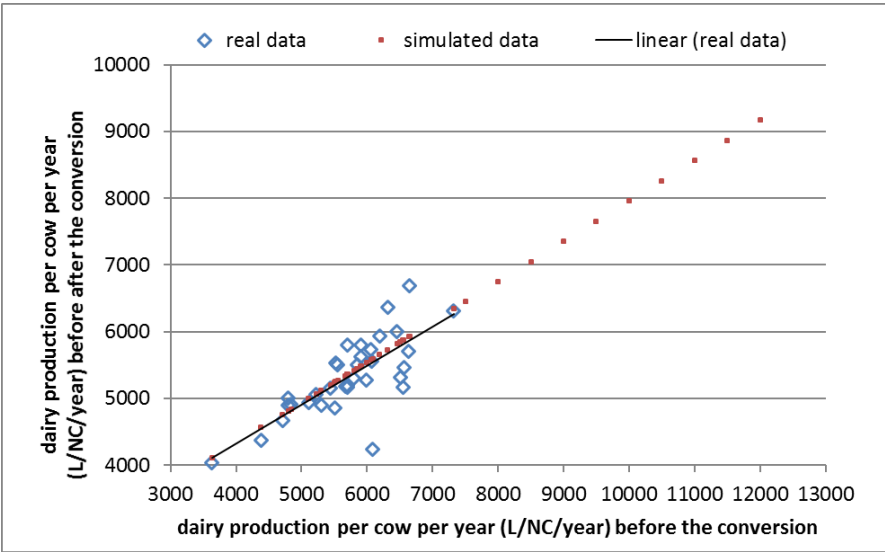


Fig. 3. — Real and simulated productivity performance before the conversion ( $x$ -axis) and after the conversion ( $y$ -axis)

As shown in figure 3, from databases of farmers’ production and various sources<sup>9</sup>, a linear regression is derived to estimate the potential maximum milk production of an organic farm starting with the conventional strategy. Knowing the initial productivity performance  $P_0$  after the normalization and  $P_0'$  before the normalization, a farm  $f$ 's normalized reference  $R$  and reference before the normalization  $R'$  are computed as follows:

$$\text{For a conventional farm: } R = P_0(t = 0) \tag{18}$$

$$\text{For an organic farm: } R' = 0.6046 P_0'(t = 0) + 1913 NC \tag{19}$$

Given by the unity liters/cow,  $R'$  and  $P_0'$  are much larger than  $NC$ . Thus, the coefficient

---

<sup>9</sup><http://www.cantal.chambagri.fr/fileadmin/documents/Internet/Autres%20articles/pdf/2014/Bio/ABBL2008-2012.pdf>  
<http://www.tech-n-bio.com/>  
<http://www.agrobio-bretagne.org/>

of  $NC$  is much larger than  $P_0'$ . In terms of the conversion effect, when  $P_0'$  is sufficiently small,  $R$  can be larger with large  $NC$ . On the contrary,  $R$  will be smaller if  $P_0'$  is large.

The environmental amenities outcome  $T_I$  is computed at every time by an aggregated function extracted from the literature (J. Pavie et al. 2012; Chambaut et al. 2011). It considers mineral impacts and energy consumption related to the total milk production and the farm's agricultural surface:

$$\text{For a conventional farm: } T_I = (53 \text{ UAA} + 2.918 \text{ } T_0)/2 \quad (20)$$

$$\text{For an organic farm: } T_I = (-10 \text{ UAA} + 2.588 \text{ } T_0)/2 \quad (21)$$

Using French dairy farms' database in RGA 2000,  $R'$  is to be normalized between 0 (very low production) and 1 (very high production). 53 UAA, 2.918  $T_0$ , -10 UAA and 2.588  $T_0$  are also normalized values between 0 and 1. The normalization is:

$$x = (x' - \min) / (\max - \min) \quad (22)$$

With:  $\min$  = minimum real value in the database;  $\max$  = maximum real value in the database;  $x$  is the normalized value of real value  $x'$ .

#### *Media.*

Farmers' alternative models are designed according to the change of productivity outcomes in the data. When a conventional farmer  $f$  wants to evaluate the organic strategy at time  $t+1$ , it computes  $T_0'(t+1)$  as follows and its related  $T_I'(t+1)$  with the equation (20). Noting that  $T_0'$  is the farmer's real productivity outcome on the farm (before the normalization).

$$T_0'(t+1) = 0.6046 \text{ } T_0'(t) + 1913 \text{ } NC \quad (23)$$

When an organic farmer  $f$  wants to evaluate the conventional strategy at time  $t+1$ , it computes  $T_0'(t+1)$  as follows and its related  $T_I'(t+1)$  with the equation (21).

$$T_o(t+1) = (T_o(t) - 1913 \text{ NC}) / 0.6046 \quad (24)$$

### **Demographic dynamics.**

All the last French Agricultural General Censuses (FAGC) have pointed out the strong decreases of the number of farms over the last decades as well as the increase of the remaining farm sizes, especially for dairy farms (Depeyrot 2017). To get a similar evolution of dairy farms in our simulated "cantons", we built an algorithm allowing farmers to quit their activity (by retirement or cessation), to purchase or inherit farms, to receive a supplementary right to produce (quota) from their dairy cooperative. What follows sum-ups the procedure to update annually the number of dairy farms in our simulated "cantons". This update ensures the number of farms of each "canton" in 2000 and 2010 are similar to what is given by FAGC. We call this procedure "demographic dynamics". Details regarding the procedure are given in Annex A.

The decrease of the number of farms is realized by two processes: farmers' retirement depending on their ages; and farmers' cessation of their dairy activity. To ensure a proper size of the population compared to the FAGC data size, purchase and inheritance of farms are associated to retirement, while receiving quota from the cooperative follows cessation of activity.

Each year, every farmer agent older than the age of retirement decides stochastically whether to retire or not (see details further). The farm left by a retired farmer is reattributed, i.e. its *UAA* (utilized agricultural area), its *NC* (number of dairy cows), and its *Quota*, to a new young farmer or to an existing farmer (see "retirement" for more details). At the end of this phase, the number of farms in the virtual population is compared to the number of farms computed from the FAGC data.

If the virtual population is too large, the "cessation activity" procedure is applied until the number of farms this year is consistent with the expected number of farms given by the FAGC. The "cessation activity" procedure assumes that farmers quit their dairy activity due to their dissatisfaction or their too low production level. Agents dissatisfied with their current situations always quit earlier than those satisfied. However, in all cases,

the probability to quit is negatively correlated to the *quota* on the farm. The quotas of these quitted farms are redistributed to remaining farms in the population following a probability given by the quota distribution in the population. We assume that dairy cooperatives attribute supplementary rights to produce (coming from abandoned farms for activity changing reason) to farmers depending on their actual right to produce. The *UAA* and the *NC* are not redistributed since data from FAGC shows total *UAA* and total *NC* decrease over the last decades.

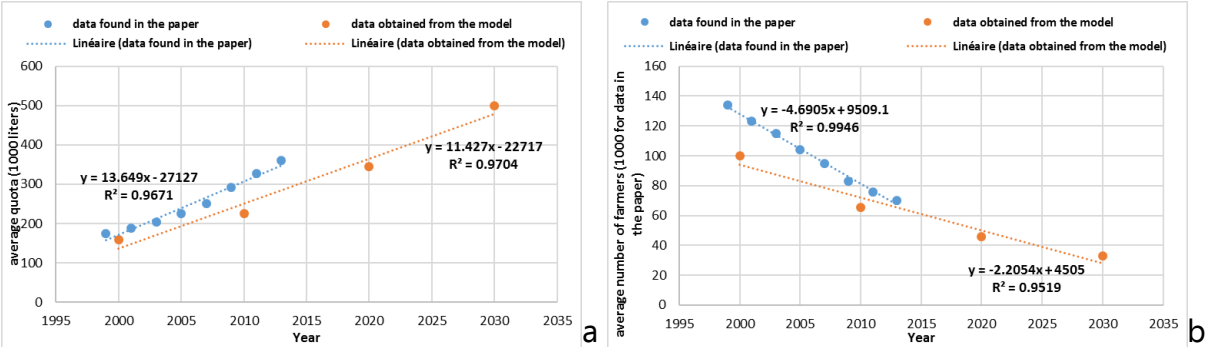


Figure 4 a) Comparison of model results (orange dots) with real data found in the literature (blue dots) in terms of average quota per farm from 2000. b) Comparison of model results (orange dots) with real data found in the literature (blue dots) in terms of farmer numbers from 2000.

To evaluate the quality of the algorithm and our hypothesis about annual decrease of farms, we compare the evolution of the number of farms and average quota since 2000 at the national level found in (Depeyrot 2017) to the corresponding simulated results of our 24 "cantons". The comparison is shown in figure 4. Despite the fact we do not have quota in 2010, and no data after 2010, we can see that the model globally follows the same evolution as the data found in (Depeyrot 2017). Comparing to the data found in the literature, the simulated number of farmers is lower, as well as the simulated average quota since our 24 "cantons" have not been built to be representative of all the dairy farms in France.

The demographic dynamics has a particular impact on the total productions and the performances of the virtual population (see Annex B for details). Regarding the performance, a farmer agent who has increased its farm size can either keep its original productive performance ( $P_0$ ) or decrease its  $P_0$  if this  $P_0$  is larger than the one of the

retired farmer agent, even larger than its reference. Regarding the total production, a farmer agent who has increased its farm size always increases its total production.

Practically, it means that a farmer agent who has increased its farm size can have a better personal evaluation (due to its better actual total production than that in its memory), and a better social evaluation (due to being more credible for others with its better total production) than before. These processes can make the agent being more satisfied with its current situation. For other agents, since they give a larger credibility to the agent who has increased its farm size, they will imitate more its performance which keeps the same or decreases. As a result, they will have a same or even smaller total production. Compared to the agent who has increased its total production, they will be even more dissatisfied with their current situations.

## **Experimental design**

(Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) has studied a large set of 625 parameter values identifying all the qualitative behaviors of the model explaining the absence of conversion. This work aims to study the conversion in different French "cantons". A larger interval of parameter variation with 81 parameter sets gives the same conclusion as the 625 parameter sets in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018). The main parameters to vary are:  $\alpha$  (slope of logistic function) with values: 5, 23 and 41,  $TA$  (threshold to consider an alternative) with values: 0.41, 0.45 and 0.49,  $TO$  (threshold to adopt the option) with values: 0.01, 0.05 and 0.09,  $W$  (importance given to the dimension representing farming strategy) with values: 0.6, 0.8 and 1.  $TD$  (threshold for two counters of duration) is kept constant with the value 5. Agents' memory is also kept constant at 10 years, as well as the distance for similarity,  $sim_i$ , valued 0.1. The evolution of each "canton" with a population of 100 conventional farmers (no organic farming at the beginning) is simulated for 30 years and replicated 10 times.

## **Model behaviors**

In the following, we study the impact of demographic dynamics on farm characteristics and adoption rates. To better understand how demographic dynamics and social dynamics interact in the model, we compare the adoption rate to previous results

obtained with a static population. This is the purpose of the following subsection. The next subsection explains how such an impact can emerge from the model dynamics.

To focus on the difference between a static and a dynamic population (ie with a dynamic demography), we only considered the difference between the averages of simulated results obtained for all the tested parameter values. The details about the sensitivity of adoption rates to the parameter values are not the focus here – it has been investigated in details in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018).

### **Impact of demographic dynamics on the adoption rate**

The adoption rates in various “cantons” and their evolutions are presented in figure 5 a to c. From these figures, we notice:

- the impact of the dynamic demography increases over the time (the dispersion of the dots from the diagonal increases over the time);
- the dynamic demography can favor or impede the adoption compared to the static population simulations, i.e. “without” dynamic demography .

In figure 5 a to c, each figure has 24 dots representing our studied 24 “cantons”. Each dot represents the adoption rates of a “canton” with and without demographic dynamics at time 10, 20, 30 considering average values of 81 parameter sets with respective 10 replications of each parameter set. These three figures show that the impact of the demographic dynamics varies from one “canton” (i.e. one dot) to another. Comparing to “without” demographic dynamics simulations, sometimes the dynamics can favor the adoption (see dots above the diagonal); while sometimes, they can impede the adoption (see dots below the diagonal).

The fourth graph shows the difference of adoption rates between “with” and “without” demographic dynamics simulations at time 10, 20, 30 considering average values over all 24 “cantons” of 81 parameter sets with 10 replications of each parameter set. This figure shows that the impact of demographic dynamics not only varies from one “canton” to another, but also over the time. The dynamic demography impedes the adoption in a first phase (ie see negative difference at time 10 in fig. 5d), and favors in

a second phase (see positive differences at time 20 and 30 in fig. 5d).

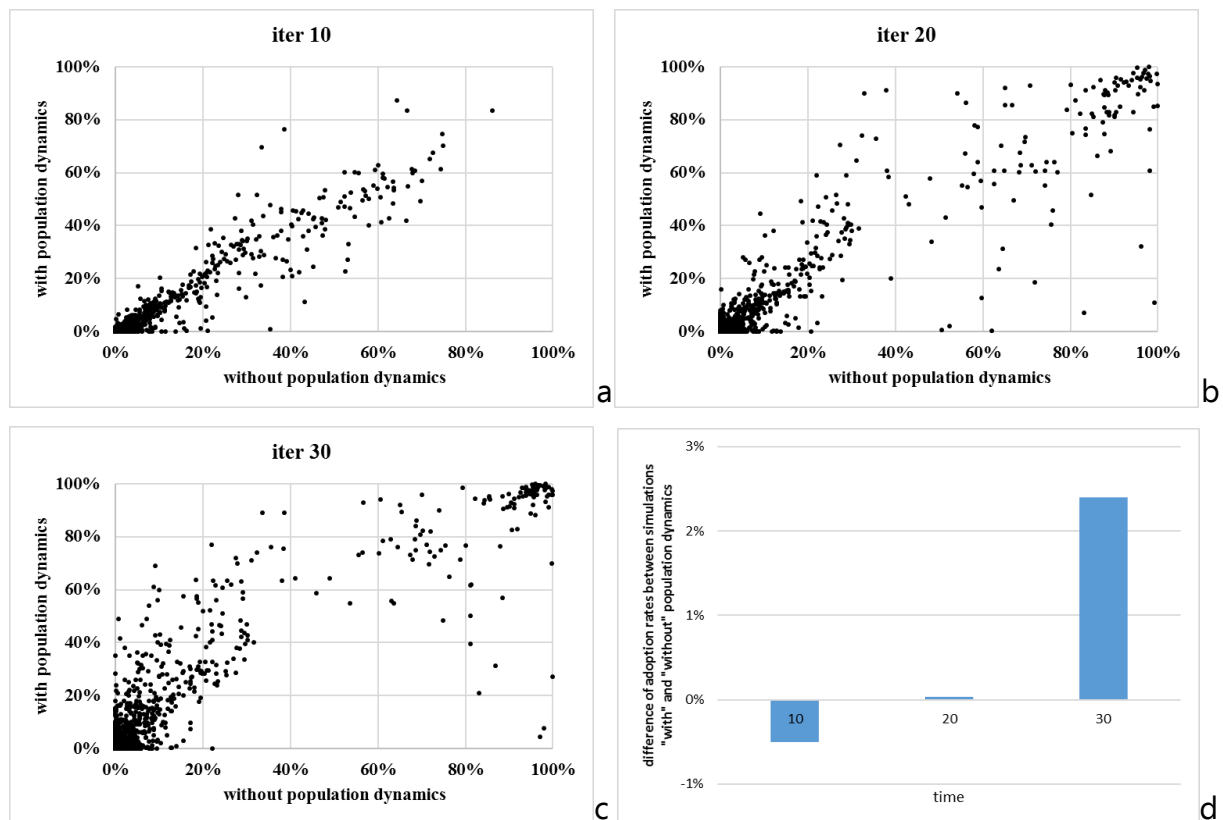


Fig. 5. (a-c) The average adoption rates with demographic dynamics of 81 parameter sets with respective 10 replicas at time 10, 20, and 30 comparing to the adoption rates without dynamic demography at each time. Each dot represents the result of a "canton". (d) The difference of adoption rates between the "with" and the "without" dynamic demography simulations at time 10, 20, 30 considering average values over all "cantons" of 81 parameter sets with respective 10 replicas.

These figures (particularly fig. 5c) also show that the adoption rates evolution follows two different regimes leading to two different states: a null or low adoption rate (see on the left corners), and a large or maximum adoption rate (see on the right corners). Intermediate adoption rates, ie between 40% and 60 %, appear as states rarely reached during the evolution of the adoption diffusion.

### Understand the impact of demographic dynamics on the adoption rate

We have seen in introduction that one can equally argue that demographic dynamics can favor or impede the adoption of organic farming in a given "canton", or at a given

time. Indeed, on the one hand, farms become larger and more intensive, and then are less able to convert to organic farming due to their more satisfying total production preventing them to consider change (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018), and a larger loss of total production when they consider a potential conversion. This phenomenon is also confirmed by agricultural experts. On the other hand, farms, which have adopted for long and then become larger and larger over the time, can be good social examples of the conversion interest and convince conventional farmers to convert.

As indicated in the “demographic dynamics” section, the main effect on farm characteristics of demographic dynamics is that farms become larger and larger in terms of quota due to the decrease of the number of farms. In the model, quota is the maximum right of total production ( $T0$ ) in each farm.  $T0$  varies with the social dynamics in the model. Figure 6 shows the variation of average total production ( $T0$ ) and average quota for simulations with and without demographic dynamics. Consistently with our expectation (see Annex B), with demographic dynamics, farms become not only larger and larger in terms of quota, but also in terms of production  $T0$ .

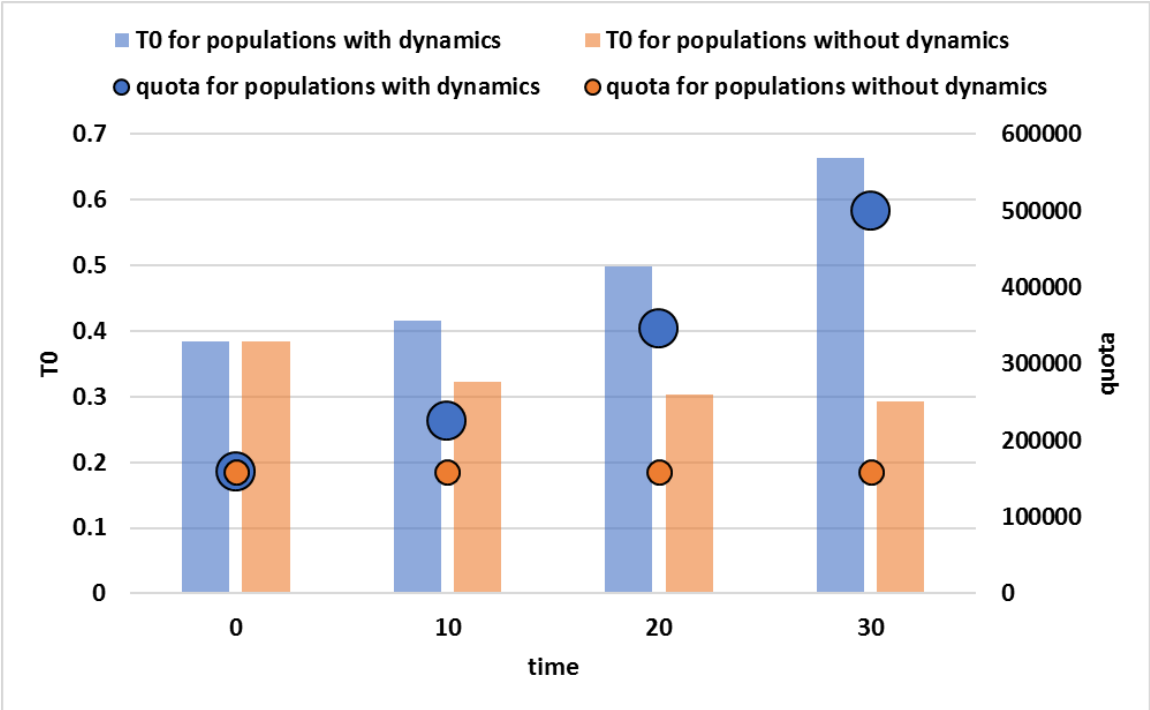


Figure 6. Variation of total production ( $T0$ ) on the left axis and quota on the right axis for “without” and “with” demographic dynamics simulations at time 10, 20, 30 (average values over all the parameter sets and their related 10 replications for all the “cantons”).



The orange bars in figure 6 show the evolution of  $TO$  with static population, due to the convergence to lower performances (see (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) for more details) in the population, the effect of social dynamics without demographic dynamics makes  $TO$  decreasing before reaching a stable state. With demographic dynamics,  $TO$  becomes larger and larger over the time, as shown by blue bars in the figure. This is mainly due to the enlargement of quota (see “demographic dynamics” and Annex B part).

We have seen that the demographic dynamic always implies an increase of the production  $TO$ . How can we explain the different impact of the demographic dynamics on the conversion to organic farming? We make two hypotheses related to the impact of the production increase due to the demographic dynamics:

- H1: larger production impedes the adoption;
- H2: the comparison of the time to increase the production and the time to convert is important to explain if dynamic demography impedes or favors the conversion to organic farming.

For H1, larger production leads to larger satisfaction with the current strategy and larger loss of production with the conversion. That is why larger production impedes the adoption, as shown by previous studies.

For H2, the production  $TO$  of a farm increases with the increase of the quota and the farm size. We showed that an “increased  $TO$ ” farmer agent could have a better personal evaluation and a better social evaluation than before. Thus, it is more satisfied with its current situation.

If this “increased  $TO$ ” farmer agent is conventional, it does not consider the conversion. This is the basic explanation to the impact of the increase of  $TO$ . However, if the agent is already organic, its impact over the other farmers will become greater. The other farmers will imitate more its performance that keeps the same or decreases (see the detail in Annex B). As a result, they will have a same or a smaller total production and will be more dissatisfied with their current situations. This growing dissatisfaction leading to consider the conversion, as well as the decrease of performance implying a

lower loss of production if they convert, tend to favor the conversion. Moreover, the organic "increased  $T0$ " farmer agent can be chosen by others with large farms to assess their interest of the conversion since the agent now can appear as sufficiently similar to them. The organic "increased  $T0$ " farmer agent can thus diffuse the conversion to conventional agents, even those having large farms. Overall, an increase of production after the conversion can have a positive effect on the diffusion of conversion. On the contrary, an earlier increase of production can have a negative impact on the conversion.

We check these hypotheses further in the simulated results.

**H1 is verified: the larger is the production, the smaller is the adoption rate**

Figure 7 shows the evolution of the adoption rate with  $T0$ . Globally, the larger is the  $T0$ , the smaller is the adoption rate. This is true for all observed times (time 10, 20 and 30) and for both static and dynamic populations.

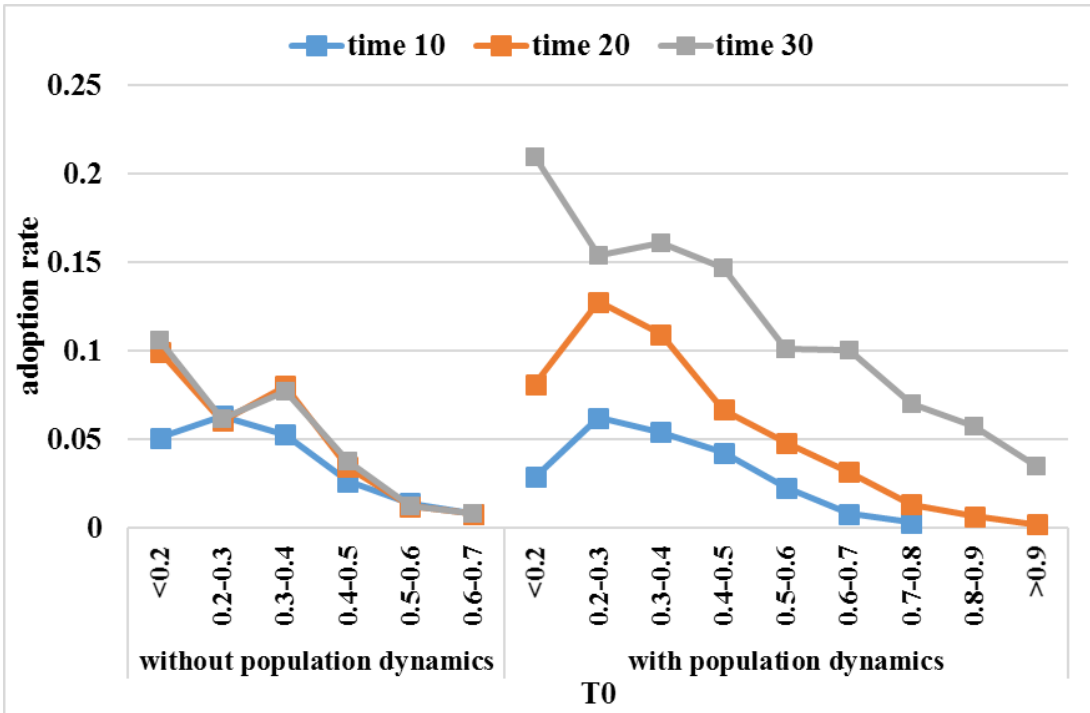


Figure 7. The average adoption rate of each parameter set over all the 81 parameter sets and their related 10 replicas at time 10, 20, 30 for each corresponding averaged  $T0$  interval for the case without and with demographic dynamics.

However, figure 7 shows that, comparing to static populations, dynamic populations can have larger  $T0$  (total production) and larger adoption rates for a same  $T0$  (particularly for time 20 and 30). In fact, as shown by H2, the farm trajectory regarding the production increase is also very sensitive for the adoption rates.

**H2 is verified: the impact of production increase on the adoption rate depends on the farm trajectory**

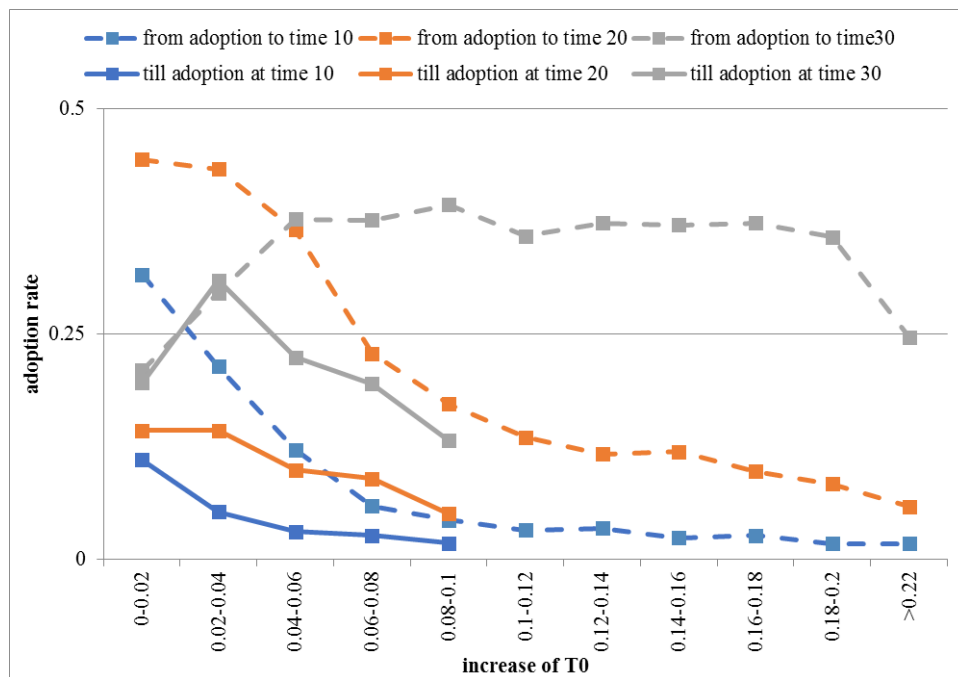


Figure 8. The average adoption rate of all "cantons" over all the 81 parameter sets and their related 10 replicas at time 10, 20, 30 for each corresponding interval of average increase of production  $T0$  for adopted farmers at each measure time with demographic dynamics.

In order to test H2, we compare the average population adoption rate for various increases of total production  $T0$  indicating if the farm has increased and then converted, or if the farm has converted and then increased:

- The average population rate is measured in relation to the average increase of  $T0$  of converted agents considering  $T0$  at the date of adoption minus the initial  $T0$  – this indicates if the farm has increased before converting at each measure time (solid lines in figure 8).

- The average population rate is measured in relation to the average increase of  $T0$  of converted agents considering  $T0$  at each measure time minus  $T0$  at the date of adoption – this indicates if the farm has increased after converting (dotted lines in figure 8).

We clearly see on Figure 8 that the dotted lines always indicate a higher adoption rate than the solid lines. The difference even tends to increase with the time: the difference at time 30 is higher than the difference at time 10. On the other hand, figure 8 also globally confirms the hypothesis H1 that larger farm tends to decrease the conversion rate since most of the curves decrease with the increase of the “increase of  $T0$ ”.

In fact, this hypothesis explains also that overall the dynamic demography at first impedes and then favors the conversion as shown in figure 5d. At first, there are generally more cases of production increase than of conversion with the reflection phase. This increase of production impedes the adoption. That is why the dynamic demography at first impedes the conversion.

Later, with the production increase of converted agents, they are good examples of conversion for other conventional farmers. Thus, more and more conventional farmers are attracted by the conversion. That is why the dynamic demography favors the diffusion of the conversion to organic farming in a second time.

## **Conclusion discussion**

(S. Huet et al. 2018) and (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) argue that the organic farming adoption is strongly influenced by the imitation of the practices of “important others” and is very sensitive to the distance between farms. (Xu, Huet, Perret, Boisdon, et al. 2018) and (Xu, Huet, Perret, et Deffuant 2018) show the impact of population characteristics on the adoption rate. In this paper, we focus on the impact of demographic dynamics with different initial distributions of population (24 “cantons” from the data of the French Agricultural Census 2000), on the adoption rate of organic farming.

At the general framework level, this work of further implementation allows to validate

its extension. The model can be added with different modules and can have different complexities according to the availability of data and the focus of research.

At the detailed model level, the model confirms results found by the previous works: farm characteristics are very important for the adoption rate, also because they are key-clues in the social processes determining others' credibility, similarity and relevance as a source of information. However, the farm and farmer trajectories are also very important. Similar events can have different impacts according to their order of appearance in time.

Indeed, we show that the larger is the average milk production volume of a local region, the lower is the adoption rate in this region. Complementary, the larger is the average increase of farms, the lower is the average adoption rate.

This result is however nuanced since the average adoption rate of the population is sensitive to the order of the conversion relatively to the increase of the farm (due to demographic events such as purchase, inheritance or reception of complementary rights to produce). An increase of production after the conversion can have a positive effect on the diffusion of conversion. On the contrary, an earlier increase of production can have a negative impact on the conversion.

Overall, the dynamic demography disfavors at first and then favors the conversion to organic farming. It increases the diffusion of organic farming when a sufficient number of farms have converted before increasing their size. This tends to indicate that the dynamic demography can favor the diffusion in "cantons" having an initial age distribution implying late retire of farmers in the simulation. If they retire early during the simulation, they will probably impede the diffusion of conversion.

For now, we cannot compare our adoption rates for the chosen French regions to real adoption rates owing to the availability of data. This is one of the next steps for our research. Other next steps about this model consist in adding more elements to the model, for example, adding to the model external factors such as crisis on the price of milk and farmers' uncertainty.

## Reference

- Ajzen, Icek, and Martin Fishbein. 1975. *Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Alavoine-Mornas, Françoise, and Sophie Madelrieux. 2014. "Passages à l'agriculture biologique. Une diversité de processus." *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, no. 339–340 (January): 65–79.
- Barbier, Cécile, Marianne Cerf, and Jean-Marie Lusson. 2015. "Cours de Vie d'agriculteurs Allant Vers l'économie En Intrants: Les Plaisirs Associés Aux Changements de Pratiques." *Activités* 12 (12–2).
- Boisdon, Isabelle, AS OTT, Simon Fourdin, and Anne-Charlotte Dockès. 2013. "Typologie Des Trajectoires de Conversion à l'agriculture Biologique d'exploitations Laitières de Montagne." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*.
- Bredart, David, and Pierre M. Stassart. 2017. "When Farmers Learn through Dialog with Their Practices: A Proposal for a Theory of Action for Agricultural Trajectories." *Journal of Rural Studies* 53 (July): 1–13.
- Burton, Michael, Dan Rigby, and Trevor Young. 2003. "Modelling the Adoption of Organic Horticultural Technology in the UK Using Duration Analysis." *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 47 (1): 29–54.
- Burton, Rob J. F., and Geoff A. Wilson. 2006. "Injecting Social Psychology Theory into Conceptualisations of Agricultural Agency: Towards a Post-Productivist Farmer Self-Identity?" *Journal of Rural Studies* 22 (1): 95–115.
- Burton, Rob J.F. 2004. "Reconceptualising the 'Behavioural Approach' in Agricultural Studies: A Socio-Psychological Perspective." *Journal of Rural Studies* 20 (3): 359–371.
- Centola, Damon. 2015. "The Social Origins of Networks and Diffusion." *American Journal of Sociology* 120 (5): 1295–1338.
- Chambaut, Hélène, Erika Moussel, Jérôme Pavie, Jean Paul Coutard, Bertrand Galisson, Jean-Louis Fiorelli, and Joannie Leroyer. 2011. "Profils Environnementaux Des Exploitations d'élevage Bovins Lait et Viande En Agriculture Biologique et Conventionnelle: Enseignements Du Projet CedABio." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*, 53–56.
- Chantre, E., and A. Cardona. 2014. "Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services." *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38 (5): 573–602.
- Chantre, Emilia. 2013. "L'apprentissage des agriculteurs en transition agroenvironnementale." *Pour*, no. 219: 141–150.
- Compagnone, Claude, and Florence Hellec. 2015. "Farmers' Professional Dialogue Networks and Dynamics of Change: The Case of ICP and No-Tillage Adoption in Burgundy (France)." *Rural Sociology* 80 (2): 248–273.
- Darnhofer, Ika, Walter Schneeberger, and Bernhard Freyer. 2005. "Converting or Not Converting to Organic Farming in Austria: Farmer Types and Their Rationale." *Agriculture and Human Values* 22 (1): 39–52.
- Darré, Jean-Pierre. 1985. *La Parole et La Technique: L'univers de Pensée Des Éleveurs Du Ternois*. Vol. 10. Editions L'Harmattan.
- Darré, Jean-Pierre, Roger Le Guen, and Bruno Lemery. 1989. "Changement technique et structure professionnelle locale en agriculture." *Économie rurale* 192 (1): 115–222.
- De Buck, A. J., I. Van Rijn, N. G. Roling, and G. A. A. Wossink. 2001. "Farmers' Reasons for Changing or Not Changing to More Sustainable Practices: An Exploratory Study of Arable Farming in the Netherlands." *The Journal of Agricultural Education and Extension* 7 (3): 153–166.

- Dedieu, Marie-Sophie, Alice Lorge, Olivier Louveau, and Vincent Marcus. 2017. "Les Exploitations En Agriculture Biologique: Quelles Performances Économiques?"
- Depeyrot, Jean-Noël. 2017. "Les Transformations Du Paysage Laitier Français Avant La Sortie Des Quotas."
- Dockès, Anne-Charlotte, Isabelle Boisdon, Catherine Experton, and S. Fourdin. 2013a. "Creation of Innovative Tools for the Development of Organic Dairy Production in Mountain Areas." *Innovations Agronomiques* 32: 243–257.
- Dockès, Anne-Charlotte, Isabelle Boisdon, Catherine Experton, and Simon Fourdin. 2013b. "Mise Au Point Deméthodes et Outils Innovants Pour Développer l'élevage Laitierbiologique En Zones de Piémont et Montagne." *Innovations Agronomiques*, 243–257.
- Dowd, Anne-Maree, Nadine Marshall, Aysha Fleming, Emma Jakku, Estelle Gaillard, and Mark Howden. 2014. "The Role of Networks in Transforming Australian Agriculture." *Nature Climate Change* 4 (7): 558–563.
- Fairweather, John R., Lesley M. Hunt, Chris J. Rosin, and Hugh R. Campbell. 2009. "Are Conventional Farmers Conventional? Analysis of the Environmental Orientations of Conventional New Zealand Farmers." *Rural Sociology* 74 (3): 430–454.
- Goldstone, Robert L., and Marco A. Janssen. 2005. "Computational Models of Collective Behavior." *Trends in Cognitive Sciences* 9 (9): 424–430.
- Grimm, Volker. 1999. "Ten Years of Individual-Based Modelling in Ecology: What Have We Learned and What Could We Learn in the Future?" *Ecological Modelling* 115 (2): 129–148.
- Hedström, Peter, and Petri Ylikoski. 2010. "Causal Mechanisms in the Social Sciences." *Annual Review of Sociology* 36.
- Huet, S., C. Rigolot, Q. Xu, Y. De Cacqueray-Valmenier, and I. Boisdon. 2018. "Toward Modelling of Transformational Change Processes in Farm Decision-Making." *Agricultural Sciences* 09 (03): 340–350.
- Kaufmann, Peter, Sigrid Stagl, and Daniel W. Franks. 2009. "Simulating the Diffusion of Organic Farming Practices in Two New EU Member States." *Ecological Economics* 68 (10): 2580–2593.
- Lamine, Claire, and Stéphane Bellon. 2009. "Conversion to Organic Farming: A Multidimensional Research Object at the Crossroads of Agricultural and Social Sciences. A Review." *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1): 97–112.
- Lamine, Claire, Jean Marc Meynard, Nathalie Perrot, and Stéphane Bellon. 2009. "Analyse Des Formes de Transition Vers Des Agricultures plus Écologiques: Les Cas de l'Agriculture Biologique et de La Protection Intégrée." *Innovations Agronomiques* 4: 483–493.
- Lerbourg, Jérôme. 2015. "La Transmission Des Exploitations Agricoles."
- Michel-Guillou, E. 2010. "Agriculteur, Un Métier En Mutation: Analyse Psychosociale d'une Représentation Professionnelle." *Bulletin de Psychologie*, 15-27, 63 (1): 505.
- Mintzberg, Henry, Duru Raisinghani, and Andre Theoret. 1976. "The Structure of 'Unstructured' Decision Processes." *Administrative Science Quarterly* 21 (2): 246.
- Mzoughi, Naoufel. 2011. "Farmers Adoption of Integrated Crop Protection and Organic Farming: Do Moral and Social Concerns Matter?" *Ecological Economics* 70 (8): 1536–1545.
- Neumeister, D., Simon Fourdin, and Anne-Charlotte Dockès. 2011. "Etude Des Freins et Motivations Des Éleveurs Laitiers Au Passage En Agriculture Biologique Dans Les Zones de Piémont et de Montagne." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*.
- Öhlmér, Bo, Kent Olson, and Berndt Brehmer. 1998. "Understanding Farmers' Decision Making Processes and Improving Managerial Assistance." *Agricultural Economics* 18 (3): 273–290.
- Padel, Susanne. 2001. "Conversion to Organic Farming: A Typical Example of the Diffusion of an Innovation?" *Sociologia Ruralis* 41 (1): 40–61.
- Pavie, J., H. Chambaut, E. Moussel, J. Leroyer, and V. Simonin. 2012. "Evaluations et Comparaisons Des Performances Environnementales, Économiques et Sociales Des Systèmes Bovins Biologiques et

- Conventionnels Dans Le Cadre Du Projet CedABio." *Renc. Rech. Ruminants* 19: 37–40.
- Pavie, Jérôme, Anne-Charlotte Dockès, and Laurence Echevarria. 2002. *Etude Des Freins à La Conversion à l'agriculture Biologique Des Exploitations Laitières Bovines*. Paris Cedex 12: Institut de l'Elevage.
- Perrot, Christophe, and Didier Cébron. 2013. "Les Exploitations Laitières Bovines En France Métropolitaine - Des Territoires Laitiers Contrastés." *Agrreste Primeur* 308: 7–10.
- Rickards, L., and S. M. Howden. 2012. "Transformational Adaptation: Agriculture and Climate Change." *Crop and Pasture Science* 63 (3): 240.
- Rigby, Dan, Trevor Young, and Michael Burton. 2001. "The Development of and Prospects for Organic Farming in the UK." *Food Policy* 26 (December): 599–613.
- Rigolot, Cyrille. 2018. "Sustainability Transformations as Shifts in Worldviews: A Dynamic View of Complementarity Issues." *Ecology and Society* 23 (2): 1–4.
- Rogers, Everett. 1983. *Diffusion of Innovations*. 3rd ed. New York : London: Free Press ; Collier Macmillan.
- Sainte-Beuve, Jasmin, Douadia Bougherara, and Laure Latruffe. 2011. "Performance Économique Des Exploitations Biologiques et Conventiennelles: Levier Économique à La Conversion." 10p. in *Les Transversalités de l'agriculture Biologique Strasbourg*.
- Stock, Paul V. 2007. "'Good Farmers' as Reflexive Producers: An Examination of Family Organic Farmers in the US Midwest." *Sociologia Ruralis* 47 (2): 83–102.
- Sutherland, Lee-Ann. 2013. "Can Organic Farmers Be 'Good Farmers'? Adding the 'Taste of Necessity' to the Conventionalization Debate." *Agriculture and Human Values* 30 (3): 429–441.
- Sutherland, Lee-Ann, Rob J.F. Burton, Julie Ingram, Kirsty Blackstock, Bill Slee, and Nick Gotts. 2012. "Triggering Change: Towards a Conceptualisation of Major Change Processes in Farm Decision-Making." *Journal of Environmental Management* 104: 142–151.
- Sutherland, Lee-Ann, and Ika Darnhofer. 2012. "Of Organic Farmers and 'Good Farmers': Changing Habitus in Rural England." *Journal of Rural Studies* 28 (3): 232–240.
- Xu, Q., S. Huet, E. Perret, I. Boisdon, and G. Deffuant. 2018. "Population Characteristics and the Decision to Convert to Organic Farming."
- Xu, Q., S. Huet, E. Perret, and G. Deffuant. 2018. "Which of Farms' Characteristics or Social Dynamics Better Explain the Conversion to Organic Farming." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 09 (03): 340–350.
- Xu, Q., S. Huet, C. Poix, I. Boisdon, and G. Deffuant. 2018. "Why Do Farmers Not Convert to Organic Farming? Modeling Conversion to Organic Farming as a Major Change." *Natural Resource Modeling*.



## **Annex A. demographic dynamics to ensure an evolution of the agricultural population close to the evolution of the French Agricultural General Census population**

The difference between FAGC 2000 and 2010 gives a decrease rate each 10 years. We assume that a nearly constant number of farms disappears each year during these 10 years. From this hypothesis, we can compute the expected number of farms for each year in each "canton". The expected number cannot be too small. If its calculated value is inferior to  $NM$  that is the minimum size of a farm population, the expected number is supposed to be  $NM$ .  $NM$  is a parameter in the model. For the years after 2010, there is no document for the compute of the number of farms. As the studied "cantons" are dairy "cantons" in France, they are supposed to have more than  $NM$  (values 10) number of farms. The objective of our procedure "demographic dynamics" is to ensure in our virtual populations have the same size as the expected size computed from FAGC.

According to algorithm 2, each year, every farmer agent older than the age of retirement decides stochastically whether to retire or not (see details further). The farm left by a retired farmer is reattributed, i.e. its *UAA*, its cows, and its *Quota*, to a new young farmer or to an existing farmer (see further for more details). At the end of this phase, the number of farms in the virtual population is compared to the number of farms computed from the FAGC data. If the virtual population is too large, the "cessation activity" procedure is applied until the number of farms this year is consistent with the expected number of farms given by the FAGC.

The "cessation activity" procedure assumes farmers quit their dairy activity due to their dissatisfaction or their too low production level. Agents dissatisfied with their current situations always quit earlier than those satisfied. However, in all cases, the probability to quit is negatively correlated to the *quota* on the farm. Then we delete the extra number of agents to have a virtual population size corresponding to that expected. Agents are chosen to quit following their probabilities. The quotas of these quitted farms are redistributed to remaining farms in the population following a probability given by the quota distribution in the population. We assume dairy cooperatives attribute supplementary rights to produce (coming from abandoned farms for activity changing reason) to farmers depending on their actual right to produce. The *UAA* and

the cows are not redistributed since data from FAGC shows total *UAA* and total number of dairy cows decrease over the last decades.

The following subsection gives details about the process of retirement, reattribution and cessation of activity.

```

For each iteration {
  For each agent f in the population {
    The agent becomes older by one year ()
    if agent f is old enough and decides to retire{
      if the size of the population is large enough{
        f's farm is redistributed to a not too young agent s in the population {
          s.updateFarmIncreasingUAA, number of cows and references
          remove (f)}
      Else{
        f's farm is given to a new young farmer
      }
    }
  }
}

```

Algorithm 2— Age updating loop.

## Retirement

As shown in pseudocode in algorithm 2, during each iteration, each agent *f* adds one to its age *Y*.

$$Y^{f,t+1} = Y^{f,t} + 1 \quad (25)$$

Once the agent is the retired age (parameter *AR*) or more, it has the possibility to retire and to leave its farm. In the model, *AR* is considered as 60 (consistent with the literature about French farmers (Lerbourg 2015)). The older is the farmer agent, the larger is its possibility to retire (*PR*). All farmer agents are considered to leave before the maximum age (parameter *AM*). *AM* is valued 70 (Lerbourg 2015).

$$PR^{f,t} = \begin{cases} 0 & \text{if } (Y^{f,t} > AR) \\ \frac{Y^{f,t} - AR}{Y^{f,t} - AM} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

## Reattribution of the farm

The farm left by the retired farmer  $f$  is distributed either to another new young farmer  $n$  with its age  $A$  ( $A < AY$  and  $A > AL$ ) or to another not too young farmer  $b$  with its age  $A$  ( $A > AY$ ) in the population. A farmer is considered young if its age is included between  $AL$  and  $AY$ ; both  $AL$  and  $AY$  are parameters.  $AL$  is the minimum age of a dairy farmer. It is considered as 18 in the model. A too young farmer is not supposed to have the capacity to buy a farm for the enlargement,  $AY$  is supposed to be 35 in the model.

The farm left by its retired farmer is distributed to another new young farmer or to another not too young farmer in the population depending on the difference between the current virtual population size and the current expected population size. If the virtual population size is bigger than the expected size ( $NE$ ) and the minimum size ( $NM$ ) of a farm population, the farm will be bought by an existed farmer  $b$ . This existed farmer  $b$  increases the size of its farm ( $UAA$ ), its number of cows ( $NC$ ) and its quota ( $Q$ ).

$$UAA^{b,t+1} = UAA^{b,t} + UAA^{f,t} \quad (27)$$

$$NC^{b,t+1} = NC^{b,t} + NC^{f,t} \quad (28)$$

$$Q^{b,t+1} = Q^{b,t} + Q^{f,t} \quad (29)$$

$$R^{b,t+1} = \frac{Q^{b,t} + Q^{f,t}}{NC^{b,t+1}} \quad (30)$$

$$P_0^{b,t+1} = \begin{cases} R^{b,t+1} & \text{if } (P_0^{b,t} > R^{b,t+1}) \\ P_0^{b,t} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

$$T_0^{b,t+1} = P_0^{b,t+1} NC^{b,t+1} \quad (32)$$

If the virtual population size is not bigger than the expected size ( $NE$ ), the farm will be

distributed to a new young one with its age larger than  $AL$  and smaller than  $AY$ .

### **Cessation of the dairy activity**

As shown in pseudocode of algorithm 3, at the end of each iteration, if the population size ( $N$ ) is bigger than the expected ( $NE$ ) of a farm population, some agents are supposed to quit the profession. Agents who are less productive and are dissatisfied with their current situations have a higher probability to quit than satisfied agents. Their quota will be distributed to other remained agents proportionally to their existed quota.

```
For each iteration {
    while N>NE and N>NM {
        distribute to each agent f a probability to quit f.probaQuit (dissatisfied agents quit the first,
        the smaller is the quota, the more possible does the agent quit)
        random (0,1)<f.probaQuit
        distribute f.quota proportionally to other agents in according to their original quota
        remove f
    }
}}
```

Algorithm 3— Cessation activity updating loop.

This « quit dairy activity » modifies the population evolution and enlarges the constraint of quota for the left farmers. With this process, some less productive farms can increase their production through their mimetisme process and their increased quota.

The impact of a reattribution of a farm left by a retired farmer is more complex than the impact of the « quit dairy activity ».

## Annex B. Impact of the reattribution of a farm left by a retired farmer

The following analyses the impacts of the reattribution of a farm left by a retired farmer. The impact is mainly for the buyer farmer  $b$  and the other farmers. As shown by equation (31), the buyer  $b$  can either decrease its performance or keep its original performance. The following shows the conditions in which the performance decreases. According to equation (28), (30) and (31),

$$P_0^{b,t} > \frac{Q^{b,t} + Q^{f,t}}{NC^{b,t} + NC^{f,t}} \quad (33)$$

$$P_0^{b,t}NC^{b,t} + P_0^{b,t}NC^{f,t} > Q^{b,t} + Q^{f,t} \quad (34)$$

As we know for each agent,

$$P_0NC \leq Q \quad (35)$$

$$P \leq R \quad (36)$$

With (34) and (35), we have

$$P_0^{b,t}NC^{f,t} > Q^{f,t} \quad (37)$$

According (3) and (37),

$$P_0^{b,t} > R_0^{f,t} \quad (38)$$

With (36) and (38), we have

$$P_0^{b,t} > P_0^{f,t} \quad (39)$$

Thus, the buyer agent can either keep its original productive performance ( $P_0$ ) or decrease its original  $P_0$  if this  $P_0$  is larger than the one of the retired farmer, even larger than its reference.

Regarding the total production ( $T_0$ ), as for each agent:

$$T_0 = P_0 NC \quad (40)$$

For the buyer agent  $b$ ,

$$T_0^{b,t} = P_0^{b,t} NC^{b,t} \quad (41)$$

$$T_0^{b,t+1} = P_0^{b,t+1} NC^{b,t} + P_0^{b,t+1} NC^{f,t} \quad (42)$$

$$(41 - 42) = NC^{b,t}(P_0^{b,t} - P_0^{b,t+1}) - NC^{f,t}P_0^{b,t+1} \quad (43)$$

According to (29), (30) and (31),

$$(41 - 42) = \begin{cases} NC^{b,t}(P_0^{b,t} - \frac{Q^{b,t} + Q^{f,t}}{NC^{b,t} + NC^{f,t}}) - NC^{f,t} \frac{Q^{b,t} + Q^{f,t}}{NC^{b,t} + NC^{f,t}} & \text{if } (P_0^{b,t} > R^{b,t+1}) \\ - P_0^{b,t} NC^{f,t} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (44)$$

If  $(P_0^{b,t} > R^{b,t+1})$ ,

$$(NC^{b,t} + NC^{f,t})(41 - 42) = NC^{b,t}P_0^{b,t}(NC^{b,t} + NC^{f,t}) - NC^{b,t}(Q^{b,t} + Q^{f,t}) - NC^{f,t}(Q^{b,t} + Q^{f,t}) \quad (45)$$

$$(NC^{b,t} + NC^{f,t})(41 - 42) = NC^{b,t}P_0^{b,t}(NC^{b,t} + NC^{f,t}) - (Q^{b,t} + Q^{f,t})(NC^{b,t} + NC^{f,t}) \quad (46)$$

$$(NC^{b,t} + NC^{f,t})(41 - 42) = (NC^{b,t} + NC^{f,t})(NC^{b,t}P_0^{b,t} - Q^{b,t} - Q^{f,t}) \quad (47)$$

With (35), we know

$$(NC^{b,t} + NC^{f,t})(NC^{b,t}P_0^{b,t} - Q^{b,t} - Q^{f,t}) < 0 \quad (48)$$

So  $T_0^{b,t} < T_0^{b,t+1}$ . The production of  $b$  always increases. Practically, it means that the buyer  $b$  can have a better personal evaluation (due to its better actual total production than that in its memory), and a better social evaluation (due to being more credible for others with its better total production) than before. These processes can make the agent being more satisfied with its current situation.

For other agents, giving larger credibility to agent  $b$ , they will imitate more its performance which keeps the same or decreases. As a result, they will have a same or even smaller total production  $T_0$ . Compared to the agent  $b$ 's larger  $T_0$ , they will even be more dissatisfied with their current situations than before.

## **Chapitre 6. Discussion générale**

### **Modélisation : définitions et formalisations du processus de changements mineurs/majeurs**

#### **Plusieurs niveaux de formalisation**

Notre modélisation du processus intégrant changement mineur et changement majeur apporte un éclairage sur leurs définitions, leurs régimes ainsi que sur leur articulation. Nos différentes implémentations ont concrétisé et raffiné les concepts du modèle, notamment de ceux de l'agriculteur et de l'exploitation.

La première version de l'implémentation du modèle sur des populations théoriques ne considère qu'un indicateur global, la production, pour décrire la pratique d'un agriculteur sur son exploitation. Avec l'implémentation basée sur de vraies données, la deuxième version a enrichi le concept de l'exploitation en lui donnant une surface agricole utile (SAU), un quota et un nombre de vaches laitières. La description des pratiques a aussi été enrichie de deux indicateurs : la production et la performance de chaque dimension d'évaluation. La troisième version de l'implémentation a permis de raffiner le concept de l'agriculteur en lui donnant un âge et en ajoutant des mécanismes permettant l'évolution de la démographie.

Nos différents niveaux de formalisation du modèle, du cadre conceptuel au modèle dynamique détaillée, ainsi que le raffinement de nos concepts au gré des implémentations, ont de mieux en mieux défini notre vision de la dynamique intégrée du changement. Ce faisant, ce processus nous a également conduit à une fermeture des principes, une réduction des possibles quant aux déclinaisons envisageables des principes de changements mineurs et majeurs proposés par la littérature. Notre proposition de modèle peut toutefois être remise en cause à tout moment. D'autres modèles dynamiques peuvent être proposés. Les concepts peuvent être raffinés différemment. Il peut être pertinent par exemple d'affiner le concept d'agriculteurs en lui attribuant des traits de personnalité dont il a été montré qu'ils sont importants pour la prise de décision (Willock et al. 1999; Deutsch et Gerard 1955).



Nos implémentations ont par ailleurs montré le caractère modulable du modèle. Même si cela n'a pas été fait dans notre travail, il est ainsi tout à fait possible d'ajouter d'autres dimensions d'évaluation, par exemple : des évaluations en termes de sécurité, de gains économiques, de qualité de vie, ... Des ajouts d'événements externes sont aussi possibles pour compléter le modèle, qu'ils s'agissent de crises qui vont accentuer l'insatisfaction de l'agriculteur et le mettre en situation d'évaluer le changement majeur, ou d'opportunités qu'il va évaluer car elles se présentent à lui alors qu'il est très insatisfait de sa situation courante.

## **Deux modes de décision**

Une des propositions centrales de notre modélisation porte sur les deux processus de décision associés aux changements mineur et majeur.

### **Changement mineur**

Le changement mineur se fait sur une base décisionnelle heuristique simple : imitation des pratiques des pairs selon une intensité dépendant de leur similarité (homophilie) et de leur crédibilité. Beaucoup de modèles étudiant l'influence sociale ne considèrent que l'homophilie en disant que l'influence augmente avec la similarité entre les agents (Castellano, Fortunato, et Loreto 2009; Byrne 1997; Mark 2003; Takács, Flache, et Mäs 2014; Axelrod 1997; Deffuant, Huet, et Amblard 2005). En fait, des recherches en psychologie sociale montrent que la crédibilité est aussi très importante pour caractériser l'influence sociale entre les agents (S. Huet et Deffuant 2015; Wood et Forest 2011; Tost, Gino, et Larrick 2012; Crano et Cooper 1972; Pornpitakpan 2004; Tormala et Rucker 2007). Un agent a tendance à écouter davantage les agents perçus comme meilleurs, et à négliger l'avis de ceux qu'ils jugent moins bons. Notre proposition d'intégrer ces deux mécanismes fondamentaux pour la définition d'une heuristique de décision « simple » est donc à la fois novatrice et fondée. Elle est de plus tout à fait en cohérence avec les résultats de (Darré, Le Guen, et Lemery 1989) montrant que le changement technique chez les agriculteurs ne peut pas être vu comme une simple transmission de l'institution aux agriculteurs plus ou moins réticents, mais plutôt comme une co-construction des agriculteurs interagissant.

(Martin-Clouaire 2017) a également proposé des heuristiques pour modéliser le changement mineur au sein de son cadre pour la modélisation d'une prise de décision opérationnelle en agriculture. Le rôle clé des heuristiques dans son cadre est incorporé en donnant la possibilité de mettre en œuvre le contrôleur de processus « decision ladder » (Rasmussen 1976), ou les protocoles de décision « recognition-primed » (Klein 1997), de façon à représenter les différentes manières dont les gens décident (différents niveaux de coût cognitif selon différentes situations). Ces cadres sont issus de la psychologie cognitive. Alors notre heuristique s'inspire plutôt de la psychologie sociale. Ils sont toutefois tout à fait complémentaires.

### **Changement majeur**

Le changement majeur correspond à un processus de décision coûteux cognitivement, réflexif et nécessitant la détermination de la satisfaction vis-à-vis d'une situation effective ou possible.

Notre calcul de la satisfaction d'un individu conditionnant le changement majeur s'appuie sur une théorie solide en psychologie sociale : la théorie de l'action raisonnée (TRA) (Ajzen et Fishbein 1975). Cette théorie est une théorie applicative ayant identifiée un ensemble de concepts déterminant l'intention d'un individu pour un comportement. Elle est conçue pour calculer l'intention moyenne d'une population à un instant donné vis-à-vis d'un comportement. Les valeurs des concepts qu'elle mobilise sont déterminées par une enquête (codifiée dans le paradigme TRA) qui interroge également les individus sur leurs intentions. Une régression détermine in fine le poids à donner à chaque concept pour recalculer l'intention des individus. Cette théorie statique a été largement utilisée pour étudier les modifications des comportements dans de nombreux domaines (J. D. C. Beedell et Rehman 1999; J. Beedell et Rehman 2000; Fielding, McDonald, et Louis 2008; Hansson, Ferguson, et Olofsson 2012; Kaufmann, Stagl, et Franks 2009). Nous avons adapté cette théorie pour notre problématique en :

- la rendant « dynamique » au travers de la dynamique des concepts que son calcul mobilise (dans nos implémentations : importances, volume de production, crédibilité) ;

- l'assimilant à une fonction de calcul de satisfaction individuelle (et non plus un modèle linéaire du comportement moyen).

La TRA est composée de deux éléments : l'attitude et la norme subjective, pour étudier l'intention d'un agent d'adopter un comportement. Ces deux éléments sont considérés indépendants dans la TRA originale. Ce principe tel qu'il a été proposé à l'origine est très restrictif et fait objet de débats puisqu'il existe une relation compatible entre ces éléments (Giger 2008). Dans notre modèle, l'attitude et la norme subjective sont liés dans l'esprit de l'agriculteur calculant sa satisfaction par le concept de base permettant leur calcul : la valeur de production sur son exploitation sur chacune des dimensions d'évaluation. Attitude et norme subjective du modèle renvoie donc à des concepts différents, mais pas indépendants puisqu'issu de la réalité d'un même agriculteur.

La TRA de base estime les pondérations des deux composantes à partir d'une régression sur des données d'enquête réalisée à cette fin. Ces pondérations caractérisent les poids de chaque concept, en moyenne sur la population enquêtée, au temps du processus de diffusion du nouveau comportement correspondant à celui du moment où l'enquête est réalisée. Ce n'est pas pertinent pour notre approche individu-centré au sein de laquelle les pondérations ne peuvent être déterminées, le poids de chaque concept varie implicitement du fait de leur interdépendance et de leur évolution temporelle. Dans notre modèle, nous avons donc fait l'hypothèse que les deux composantes de l'évaluation de la satisfaction ont une même pondération constante. En pratique, la littérature tend à nous indiquer que la pondération donnée à chaque composante varie au cours du temps et même selon l'agent. Par exemple, l'évaluation d'un comportement déjà effectué et bien connu par une personne, se fait davantage sur la base de l'attitude que sur celle de la norme subjective (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976).

Par ailleurs (Ajzen 1991) souligne que l'attitude et les normes subjectives sont pertinentes pour prédire l'intention d'un comportement ne nécessitant pas un fort apprentissage (Ajzen et Fishbein 1975). Elles prédisent mal une intention pour un comportement nécessitant un apprentissage profond. (Ajzen 1991) a donc proposé l'ajout d'une troisième composante : le contrôle comportemental perçu qui est un médiateur de l'intention (mais a également un effet additionnel à celui de l'attitude et

de la norme subjective). Le contrôle comportemental perçu traduit la difficulté perçue à contrôler les performances associées à l'adoption du comportement. Le contrôle comportemental perçu est censé refléter l'expérience passée aussi bien que les empêchements et les obstacles anticipés. Dans notre cas, un changement majeur tel que la conversion à l'AB nécessite un apprentissage profond. L'évaluation du changement majeur nécessiterait donc la prise en compte de cette troisième composante : le contrôle comportemental perçu. Ce point est évoqué plus loin dans nos perspectives.

### **Focalisation sur l'aspect psycho-social**

Notre cas d'application – la conversion à l'AB – a été étudié par beaucoup de chercheurs issus de différentes disciplines et sous différents angles. Notre approche se focalise sur les aspects psycho-sociaux, et notamment l'impact des valeurs personnelles d'un individu et de ses interactions avec les autres. Notre modèle actuel ne considère pas les aspects économiques, ayant déjà donné lieu à de nombreuses études (M. Burton, Rigby, et Young 1999; Kaufmann, Stagl, et Franks 2009; Deffuant, Huet, et Amblard 2005; Olabisi, Wang, et Ligmann-Zielinska 2015).

Par ailleurs, les interviews réalisées dans le cadre du projet Associationne s'intéressant aux trajectoires de conversion des agriculteurs, de même que celles réalisées dans le cadre du projet Européen Images (1999-2001) montrent que :

- de nombreux éleveurs laitiers se sont convertis sans avoir bénéficié d'un diagnostic économique (réalisé par la Chambre d'Agriculture lorsqu'il existe) ; tel a été particulièrement le cas du département de la Haute Loire où de premiers diagnostics sommaires n'ont été mis en place qu'à partir de 2009 alors que de nombreux agriculteurs s'étaient déjà convertis (après 2009, seule une partie des agriculteurs convertis ont bénéficié de ce diagnostic) ;
- l'étape du diagnostic économique intervient en dernier dans le processus de maturation de la décision ; il est identifié par les techniciens comme « rassurant » et « confortant » les agriculteurs candidats à la conversion. Les enquêtes ont montré qu'au moins 80 % des agriculteurs ayant demandé un diagnostic se convertissent effectivement. Le diagnostic n'apparaît donc pas comme un fort

déterminant de la décision, déjà prise lorsque le diagnostic est demandé.

Quoi qu'il en soit, la modularité du modèle général que nous proposons autorise l'ajout de dimensions d'évaluation visant à prendre en compte le besoin d'un agriculteur en termes de sécurité économique, ou de valorisation sociale sous forme d'accroissement des gains.

## **Résultats observés (Applications/Implémentations) dans différentes populations évoluant en contexte**

### **Raisons et littératures, trajectoires**

Nous avons extrait, de l'étude de l'évolution de la population théorique, les trajectoires typiques d'évolution des agriculteurs et les raisons associées expliquant leur non-conversion. Nous avons également déterminé les fréquences d'apparition de ces raisons au sein d'un plan d'expérience faisant varier les paramètres les plus déterminants du taux de conversion du modèle.

Nous soutenons que la raison la plus fréquente de la non adoption est liée à la satisfaction de la situation courante. Un processus coûteux tel que la conversion à l'AB ne peut qu'être déclenché que par une forte insatisfaction (Sutherland, Burton, et al. 2012; Emilia Chantre, Cerf, et Le Bail 2015b; S. Huet et al. 2018). Aujourd'hui, l'objectif de la plupart des agriculteurs est encore de produire plus pour nourrir la planète. Les agriculteurs qui sont satisfaits de leurs situations courantes ont notamment des exploitations productives. Ils vont donc continuer à pratiquer l'agriculture conventionnelle et à s'intensifier. Ce type de trajectoire est aussi confirmé par des recherches en agronomie (Xavier Coquil, Dedieu, et Béguin 2017; Xavier Coquil et al. 2013; Dedieu et al. 2017; Alavoine-Mornas et Madelrieux 2014; Lamine et Bellon 2009).

La raison « l'alternative n'est pas intéressante » est la seconde raison la plus fréquente dans le modèle. Elle apparaît très fréquemment dans la littérature (Kirchmann et Thorvaldsson 2000; G. Edwards-Jones et Howells 2001; Rigby, Young, et Burton 2001; Trewavas 2001; Hill et Lynchehaun 2002). Dans notre modèle, cette raison n'est pas la plus fréquente. En fait, une alternative nécessite pour être perçue et évaluée par les

agriculteurs que ces derniers soient profondément insatisfaits de leurs situations et ressentent un fort besoin de changement. Or tel n'est probablement pas le cas la plupart du temps, mais les enquêtes n'évoquent pas ce point particulier et concluent donc autrement. En effet, dans la mesure où jusqu'à récemment, seuls étaient considérés les changements mineurs, dont nous faisons l'hypothèse qu'ils sont réalisés du fait de l'intérêt de l'alternative proposée, la question relative à la volonté de changement n'était pas abordée par la plupart des enquêtes ou analyses cherchant à expliquer le changement. Les enquêtes les plus récentes font toutefois apparaître des raisons telles que « besoin de changement », « prise de conscience » (Bély et Despeghel 2017).

Il est par ailleurs possible que la raison « l'alternative n'est pas intéressante » apparaîtrait plus fréquemment dans le modèle s'il permettait à l'agriculteur de conserver en mémoire le résultat de phases d'évaluation de l'alternative précédentes (i.e. alors qu'il est revenu en phase de satisfaction vis-à-vis de sa situation courante). Le souvenir d'évaluations précédentes affecterait sans doute sa décision s'il était pris en compte par le modèle. Le recueil de connaissances sur cette question est compliqué car lorsque la question sur les raisons de non-conversion est posée à l'agriculteur, il répond probablement en termes de non-intérêt de l'alternative déjà évaluée par le passé, et ne mentionne rien de son état courant en termes de satisfaction. Cette question mériterait donc davantage d'investigations, pour éventuellement, déterminer dans une prochaine version du modèle l'impact d'évaluation précédente d'une alternative sur la propension à évaluer de nouveau cette alternative lorsque l'individu est à nouveau fortement insatisfait d'une part, comprendre ce que l'agriculteur répond à une enquête dans de telles circonstances, d'autre part.

Le modèle mentionne d'autres raisons qui amène l'agriculteur à être de nouveau satisfait de sa situation courante du fait des changements de pratiques au sein de la population, notamment par une amélioration de son évaluation personnelle ou de son évaluation sociale. Ces raisons ne sont pas évoquées comme telles par l'agriculteur qui en termes d'évaluation parlent plus souvent du fait que son activité et sa production sont plus ou moins valorisée. Ce dernier terme est souvent perçu dans son acception économique, mais il revêt très probablement une connotation plus large de valorisation de son travail par la société et par ses pairs.

## **Changement majeur et mineur dans différents contextes**

### **Démographie particulière**

La démographie implémentée dans le modèle reproduit une diminution du nombre d'agriculteurs et une augmentation de la production moyenne (Depeyrot 2017). Dans le modèle, la diminution du nombre d'agriculteurs est plus particulièrement réalisée par le départ des agriculteurs ayant une petite exploitation en termes de volume de lait produit. Ces départs sont dus d'une part aux caractéristiques de la distribution d'âge et d'autres parts aux mécanismes permettant un arrêt d'activité. Ces choix sont consistents avec les données de RGA et la littérature. Les données du RGA 2000 montrent qu'en moyenne, les agriculteurs avec une petite exploitation sont plus âgés que ceux ayant une grande exploitation. Ils ont donc une plus forte probabilité de partir en retraite et de céder leur exploitation (par héritage ou vente). Le nombre de cessations d'activité correspond à la différence entre le nombre d'agriculteurs après les départs en retraite, et le nombre d'agriculteurs devant être présent dans la population selon les données du RGA. Les exploitations effectuant une cessation d'activité sont sélectionnées aléatoirement en prenant en compte leur satisfaction courante et leur niveau de production. Les agriculteurs avec une petite exploitation ont donc une plus grande probabilité d'être retenus pour une cessation d'activité et d'abandonner le métier que ceux avec une grande production (Depeyrot 2017). Notons que « petite » et « grande » sont ici définis en termes de volume de lait produit.

Notre démographie montre un effet d'ordre sur le taux de conversion de la population. Le taux est beaucoup plus faible lorsque les exploitations ont tendance dans un premier temps à s'agrandir, puis à adopter. Le taux est beaucoup plus élevé lorsque les exploitations adoptent dans un premier temps, puis s'agrandissent.

Ce résultat est très dépendant de l'évolution démographique reproduite par le modèle. Une autre évolution démographique, différente de celle reproduite (en France entre 2000 et 2010) aura des effets différents, qu'il est difficile de prédire, et qui nécessite de nouvelles études par simulation.

## **Contexte sociétal particulier**

Dans le modèle, quand un agent n'arrive pas à trouver une alternative dans la population, il s'adresse au média qui lui fournit toujours une évaluation de l'alternative idéale en fonction de ses caractéristiques d'exploitation. Nous supposons en effet que la conversion à l'AB fait l'objet de diffusion valorisante par les médias. Telle n'était pas le cas dans le modèle Images appliqué à la conversion à l'AB dans le département de l'Allier de 1992 à 1999 (Deffuant, Huet, et Amblard 2005). Ces travaux réalisés à une époque où la « bio » ne bénéficiait pas d'une image sociale aussi positive faisait l'hypothèse (fondée sur une étude des journaux locaux) que le media diffusait une évaluation neutre de la conversion à l'AB. En fait, le message du média peut évoluer au cours du temps, la conversion est à présent socialement valorisée alors qu'elle était davantage objet de débat – et confidentielle - il y a 20 ans. De nos jours, l'agriculture biologique bénéficie d'une image très positive d'agriculture minoritaire respectueuse de l'environnement et « bonne » pour la santé. Cette image est encore susceptible d'évoluer. Or elle est statique dans le modèle et il serait intéressant de modéliser son évolution en lien avec l'évolution de la diffusion de l'AB. Quoi qu'il en soit, la nature du message délivré par le média a un impact sur la conversion des agriculteurs et apparaît déterminante des résultats obtenus.

La société de notre simulation est actuellement toujours favorable aux changements majeurs, que ce soit la conversion à l'AB ou le retour au conventionnel. Cette société simulée correspond aussi à la société française actuelle. D'un côté, le gouvernement continue à favoriser l'intensification en agriculture. D'un autre côté, il annonce son soutien à l'agriculture biologique et cherche à en favoriser le développement. La société favorise donc différents types de changements majeurs et cela peut créer de l'instabilité en agriculture.

## **Changement de normes**

Le changement de norme correspond à un processus émergent des interactions au sein de la population. Ce n'est pas l'individu seul qui change de norme, c'est le fruit d'interactions avec les autres agriculteurs, voire avec les autres individus de la société en général. Au cours du temps, il y a deux façons pour un agriculteur de changer la



norme auquel il adhère : via une évolution de la norme comportementale de son groupe ; via un changement de groupe impliquant l'adhésion à une norme différente. L'évolution normative peut aussi être provoquée par un agriculteur qui adopte un comportement différent puis construit une nouvelle norme au fur et à mesure que d'autres agriculteurs adoptent le même comportement que lui.

Notre modèle étudie un processus intégrateur de changement majeur/adaptation transformationnelle et changement mineur/adaptation incrémentale. Pour le paradigme « changement », c'est un processus de changement de comportement individuel (Sutherland, Burton, et al. 2012). En effet, dans une population, la dynamique de changement de comportement individuel conduisant à retrouver une identité suffisamment satisfaisante de bon agriculteur contribue à l'émergence de nouvelles normes (Buunk et Gibbons 2007; Festinger 1954), ainsi qu'à celle de la diffusion de la pratique innovante (Rogers 1983). Cette nouvelle norme peut aussi devenir une norme majoritaire et participer d'une adaptation transformationnelle (O'Brien et Hochachka 2010; Rickards et Howden 2012; Dowd et al. 2014) impliquant les institutions, la société, la nation, etc. Du fait des processus du changement majeur individuel, il est possible d'observer une adaptation transformationnelle de la population.

## **Perspectives**

Notre modèle des changements mineurs/majeurs reste très simplifié par rapport à ce que nous observons sur le terrain. Nous identifions ici trois voies d'amélioration qui nous apparaissent comme des perspectives pertinentes. La première porte sur une meilleure prise en compte du « décideur » dans les différents processus de décision. La seconde porte sur les dimensions des valeurs personnelles et leurs évolutions. La dernière porte sur la prise en compte de l'incertitude.

## **Décideur**

Notre modèle actuel ne considère qu'un décideur quel que soit le mode de décision et le changement considéré (mineur ou majeur). La gestion des exploitations françaises est toutefois souvent liée à la famille, ou à un ensemble d'associés lorsque l'exploitation a une forme sociétaire, associés qui peuvent aussi être membres d'une même famille

(Lamarche 1992; Bélières et al. 2014; Schneider 2016). (Sutherland et al. 2012) ont souligné que certaines décisions sont prises par la famille agricole, tandis que d'autres sont prises par le gestionnaire de l'exploitation. Les décisions de changement régulier, en « terrain connu » sont généralement prises par l'exploitant seul. Ces changements s'apparentent à nos changements mineurs. Les décisions en terrain « inconnu », remettant en cause l'existence sociale et économique de la famille et/ou du GAEC, sont prises en commun et/ou en famille. Ces changements s'apparentent à nos changements majeurs.

Il apparaît pertinent dans des implémentations futures du modèle prennent en compte le fait que, non seulement la façon de décider dépend du type de changement (mineur ou majeur), mais que qui décide dépend aussi du type de changement. Des recherches spécifiques sont toutefois nécessaires, tant pour constituer la population des décideurs autour d'une exploitation et la rendre dynamique, que pour déterminer comment modéliser un processus de changement majeur en considérant non plus un agriculteur seul, mais un groupe d'individus.

### **Valeurs personnelles**

Dans le modèle, l'importance donnée à chaque dimension de pratique correspond aux valeurs personnelles d'un agent. Une des hypothèses est que la somme des importances données aux deux dimensions de pratique est une constante (valeur 1). Cette hypothèse vise à garantir qu'un agent ne peut pas considérer les deux dimensions d'évaluation comme étant simultanément très importantes, ou sans importance. Notre approche peut être traduite par la théorie des valeurs (Schwartz 1992) en considérant que les agriculteurs ne considèrent que deux dimensions : la réussite et l'universalisme. L'approche de notre modèle est toutefois très réductrice car il est possible d'observer des individus accordant beaucoup d'importance à la fois à la production et au respect de l'environnement (ou à la réussite et l'universalisme).

Une autre hypothèse du modèle est que l'importance ne change pas sauf lors d'un changement majeur. Lors d'un changement majeur, l'agriculteur a une rupture dans ses valeurs personnelles. Par contre, dans la vie quotidienne, il semble que la plupart des agriculteurs changent leurs valeurs personnelles, leurs identités petit à petit (Sutherland 2011; Lamine et Bellon 2009; Lamine et al. 2009). Il serait possible de

considérer un changement des valeurs plus progressif. Ce serait cohérent avec la définition du changement majeur et la littérature sur les valeurs personnelles (Gasson 1973; Schultz 2001; Mzoughi 2011; Dam, Nizet, et Streith 2012). Les valeurs personnelles sont en effet réputées stables. Un changement des valeurs représente un changement profond, très coûteux socialement, cognitivement et affectivement. Il est donc difficile de postuler, comme nous l'avons modélisé de façon simplifiée dans le modèle, qu'un tel changement se fait d'un seul coup.

Une étude particulière relative à la dynamique des valeurs lorsqu'un individu effectue un changement majeur permettrait d'améliorer grandement le modèle. Il s'agit là d'une perspective importante qui amènerait à une modélisation plus pertinente du changement majeur, et probablement de son lien aux changements mineurs.

### **Incertitude personnelle**

Une question importante dans notre processus de décision est de comprendre comment les agriculteurs entrent à nouveau dans une période stable de dépendance aux décisions passées (i.e. régime « pathway dependency ») après avoir décidé un changement majeur. (Rogers 1995, 2003) dans sa théorie de la diffusion de l'innovation, nous dit que le processus décisionnel est terminé lorsque, la nouvelle idée n'est plus «nouvelle» pour le décideur, et totalement intégrée par lui comme étant sa propre pratique. Cet état de stabilité, d'intégration d'une pratique comme n'étant plus nouvelle mais juste sienne, a quelque chose à voir avec le sentiment de contrôle de la pratique, et plus généralement avec l'incertitude sur le processus.

(Jager 2000; Jager et al. 2000; Jager et Janssen 2012) proposent un modèle de consommation pour étudier le comportement d'un agent à travers sa satisfaction de la situation courante et son incertitude. L'évaluation de ces deux dimensions amène l'agent à considérer quatre heuristiques pour sélectionner un ensemble d'opportunités comportementales à comparer : la répétition des choix précédents, l'imitation, la délibération et la comparaison sociale. Répétition et imitation interviennent lorsque l'individu est satisfait et se distingue par le fait que l'individu est certain pour la répétition, et ne l'est pas pour l'imitation. La délibération et la comparaison sociale interviennent lorsque l'individu n'est pas satisfait. Elles se distinguent par le fait que la

comparaison sociale intervient lorsque l'individu est certain, alors que la délibération intervient lorsqu'il ne l'est pas.

Dans notre modèle, seules sont considérées l'imitation pour le changement mineur, et la délibération pour le changement majeur. L'imitation et la délibération sont considérées comme des stratégies pour des situations jugées incertaines par l'individu. Cela correspond à notre contexte changeant, source d'incertitude permanente sur la bonne façon de s'adapter pour un décideur.

L'incertitude de l'agriculteur sur sa situation courante est donc très importante. L'incertitude associée à un comportement alternatif l'est également, surtout lorsque l'évaluation et l'adoption de ce comportement nécessite un effort socio-cognitif et un apprentissage important. Un changement majeur a ces caractéristiques. Notre modèle changements mineurs/majeurs intègre plus ou moins d'éléments prenant déjà ou non en compte l'incertitude associée aux processus. Nous essayons dans ce qui suit de déterminer si l'incertitude est déjà prise en compte ou pas dans notre modèle pour les changements mineurs tout d'abord, les changements majeurs ensuite.

### **Processus de changement mineur**

Ce processus de changement, comme indiqué par (Jager 2000; Jager et al. 2000; Jager et Janssen 2012), est une stratégie d'adaptation en situation perçue comme satisfaisante. Dans le modèle, il intervient alors que l'agriculteur est en phase stable. Il décide sa pratique quotidienne en accord avec ses décisions précédentes, en intégrant la pratique de ses pairs proches jugées crédibles. L'intégration de la pratique d'autrui en tant qu'ils sont suffisamment similaires (homophilie), et crédibles rassure sur la pertinence et la fiabilité de l'information par rapport au « bon » comportement.

Par ailleurs, dans le modèle, dans la mesure où les pairs sont également en régime stables, les décisions régulières sont prises sur la base de la mémoire des résultats passés. Ce comportement et cette notion de « chemin de dépendance » renvoient au fait que les agents utilisent leurs mémoires pour décider est également en accord avec la théorie de la décision de (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976).

Nous estimons donc que notre modélisation des changements mineurs ne requiert pas l'ajout de mécanismes spécifiques visant à mieux prendre en compte les incertitudes associées à ce type de changement.

### **Processus de changement majeur : phase transitoire**

Le processus de changement majeur est très coûteux en termes cognitif car il requiert l'évaluation de la satisfaction de la situation courante et de l'alternative. Ces évaluations sont incertaines, et leurs incertitudes ont différentes origines : interne à l'agent, ou externe, liée au contexte.

L'évaluation de l'alternative est plus coûteuse que celle de la situation courante. Elle nécessite d'acquérir informations et connaissances sur le comportement alternatif, a priori inconnu. L'agent va commencer à chercher des informations dessus. Ce processus de recherche d'information sur l'alternative induit des incertitudes importantes, spécifiques du fait de faire appel à autrui pour obtenir de l'information et/ou des connaissances.

#### *Incertitudes associées à l'évaluation de la satisfaction*

L'incertitude associée au comportement évalué a été ajoutée à la théorie de l'action raisonnée (Ajzen et Fishbein 1975) pour former la théorie du comportement planifié (Ajzen 1991). Cette incertitude prend le nom de contrôle comportement perçu (CCP).

Le CCP évalue le sentiment de maîtrise de l'agriculteur vis-à-vis du comportement. Il s'inspire du sentiment d'efficacité personnelle de (Bandura 1977) qui détermine les choix d'un individu. Le CCP renvoie à deux formes différentes d'incertitude : (1) l'incertitude inhérente au contexte ; (2) l'incertitude inhérente à l'agriculteur lui-même.

Si l'incertitude vient du contexte, comme les variations du prix, du marché, les changements climatiques, des propositions des coopératives... l'agent n'a pas de contrôle sur celle-ci. Lorsqu'elle est élevée, l'agent va donc opter pour des solutions consistantes à rechercher un contexte plus sûr, plus sécurisé. Nous pouvons ainsi penser que du fait des crises répétées des prix du lait conventionnel, les éleveurs laitiers

vont opter pour le lait « bio », dont le prix d'achat proposé par les coopératives est à la fois plus stable et plus élevé. Pour le moment, le modèle ne considère pas les événements du contexte, il sera important de les intégrer pour étudier ce type d'incertitude.

Si au contraire l'agent associe l'incertitude perçue à des attributs personnels (par exemple ses compétences, sa confiance en soi, sa capacité d'apprentissage, mais aussi des contraintes liées à son exploitation, etc.), il réagira différemment en fonction de ses croyances en sa capacité à faire évoluer ses attributs personnels (Ajzen 2011).

S'il pense ne rien pouvoir changer, il ne pourra opérer qu'un changement majeur prenant la forme d'une cessation d'activité. La cessation d'activité est intégrée dans notre modèle, notamment pour les agriculteurs ayant des exploitations peu productives. Ces agriculteurs sont souvent considérés socialement comme peu compétents. Ils ont par ailleurs du mal à améliorer leurs situations du fait des contraintes d'exploitation (par exemple le quota).

Si, au contraire, il pense pouvoir modifier son exploitation, apprendre, et tester le comportement alternatif, il s'attachera à évoluer dans ce sens et pourra prendre de nombreuses années avant d'adopter effectivement le changement majeur. Ce comportement est le comportement très souvent restitué par les interviews s'intéressant à la trajectoire des agriculteurs (Lamine et Bellon 2009; Moulin et al. 2008). Notre modèle montre aussi l'existence d'un type de trajectoire dans laquelle l'agriculteur ne se convertit pas à l'AB mais modifie petit à petit sa pratique pour être plus respectueux de l'environnement (ou plus extensif). Ce type de trajectoire est celui des agriculteurs « effectively organic » de (Sutherland 2011).

Il serait des plus pertinents dans les versions futures du modèle de prendre en compte l'origine du sentiment de contrôle perçu de façon à mieux déterminer quelles actions l'agent peut envisager, et en quoi ce sentiment contraint ses options d'évolution.

#### *Incertitudes liées au processus de recherche d'information sur l'alternative*

La phase d'évaluation du comportement alternatif peut être longue et les informations

recueillies sur sa valeur sont accompagnées de nombreuses informations explicites ou implicites sur la « véracité » de cette valeur (appelée incertitude dans ce qui suit). L'incertitude perçue peut dépendre (1) de la confiance accordée par les agriculteurs à leur(s) source(s) d'information, (2) de la concordance des observations avec d'autres informations et (3) de l'incertitude exprimée par autrui sur l'intérêt de l'alternative.

Une source d'information plus certaine et/ou une alternative véhiculant une incertitude plus faible implique une plus grande attention de l'individu en recherche d'un comportement alternatif (Öhlmér, Olson, et Brehmer 1998). Des critères tels que la confiance, la cohérence, la consistance, la similarité et l'incertitude exprimée guident le processus d'attention et d'évaluation. Ils sont donc particulièrement importants pour déterminer si un comportement alternatif est perçu ou non, voire retenu.

Dans notre modélisation nous considérons que le comportement alternatif est d'une part unique, d'autre part toujours « trouvable » et « perçu ». Il semblerait judicieux d'intégrer ces critères augmentant ou diminuant l'incertitude à notre modélisation du processus de changement majeur.

En conclusion, l'incertitude est très complexe à modéliser vu ses différentes formes. Une telle modélisation reste un objet de recherche des plus intéressants en termes de perspectives.

## Références

- Ackoff, Russell L. 1974. « Redesigning the future ». New York, 29.
- Ajzen, Icek. 1991. « The theory of planned behavior ». *Organizational behavior and human decision processes* 50 (2): 179-211.
- . 2011. *The theory of planned behaviour: reactions and reflections*. Taylor & Francis.
- Ajzen, Icek, et Martin Fishbein. 1975. *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Alavoine-Mornas, Françoise, et Sophie Madelrieux. 2014. « Passages à l'agriculture biologique. Une diversité de processus ». *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, no 339-340 (janvier): 65-79.
- Ambrosius, Floor HW, Gert Jan Hofstede, Bettina B. Bock, Eddie AM Bokkers, et Adrie JM Beulens. 2015. « Modelling farmer decision-making: the case of the Dutch pork sector ». *British Food Journal* 117 (10): 2582-2597.
- Armitage, Christopher J., et Mark Conner. 2001. « Efficacy of the theory of planned behaviour: A meta-analytic review ». *British journal of social psychology* 40 (4): 471-499.
- Axelrod, Robert. 1997. « The dissemination of culture: A model with local convergence and global polarization ». *Journal of conflict resolution* 41 (2): 203-226.
- Bandura, Albert. 1977. « Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change ». *Psychological Review* 84 (2): 191-215.
- Barbier, Cécile, Marianne Cerf, et Jean-Marie Lusson. 2015. « Cours de vie d'agriculteurs allant vers l'économie en intrants: les plaisirs associés aux changements de pratiques ». *Activités* 12 (12-2).
- Barthélemy, Denis, et Jacques David. 2001. *Production Rights in European Agriculture*. Elsevier.
- Beedell, J. D. C., et T. Rehman. 1999. « Explaining farmers' conservation behaviour: Why do farmers behave the way they do? » *Journal of Environmental Management* 57 (3): 165-176.
- Beedell, Jason, et Tahir Rehman. 2000. « Using social-psychology models to understand farmers' conservation behaviour ». *Journal of rural studies* 16 (1): 117-127.
- Bélières, Jean-François, Philippe Bonnal, Pierre-Marie Bosc, Bruno Losch, Jacques Marzin, et Jean-Michel Sourisseau. 2014. « Les agricultures familiales du monde: définitions, contributions et politiques publiques ».
- Bély, Clémentine, et Michaël Despeghel. 2017. « 1er semestre 2017: + 246 fermes bio: Qui sont les nouveaux agriculteurs bio bretons » 227: 14-17.
- Boisdon, Isabelle, AS OTT, Simon Fourdin, et Anne-Charlotte Dockès. 2013. « Typologie des trajectoires de conversion à l'agriculture biologique d'exploitations laitières de montagne ». *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*.
- Boldero, Jennifer. 1995. « The Prediction of Household Recycling of Newspapers: The Role of Attitudes, Intentions, and Situational Factors<sup>1</sup> ». *Journal of Applied Social Psychology* 25 (5): 440-462.
- Bos, Jules F. F. P., A. (Bert) L. Smit, et Jaap J. Schröder. 2013. « Is agricultural intensification in The Netherlands running up to its limits? » *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, On careful livestock farming*, 66 (Supplement C): 65-73.
- Bourdieu, Pierre. 1986. « The forms of capital *Handbook of theory and research for the sociology of education* (pp. 241-258) ». R.(1974). *The Power Broker: Robert Moses and the Fall of New York*.
- Brédart, David, et Pierre M. Stassart. 2017. « When farmers learn through dialog with their practices: A proposal for a theory of action for agricultural trajectories ». *Journal of Rural Studies* 53 (juillet): 1-13.
- Brown, Calum, Peter Alexander, Sascha Holzhauser, et Mark DA Rounsevell. 2017. « Behavioral models of climate change adaptation and mitigation in land-based sectors ». *Wiley Interdisciplinary*



- Reviews: *Climate Change* 8 (2).
- Bui, S., A. Cardona, C. Lamine, et M. Cerf. 2016. « Sustainability transitions: Insights on processes of niche-regime interaction and regime reconfiguration in agri-food systems ». *Journal of Rural Studies* 48 (décembre): 92-103.
- Burton, Michael, Dan Rigby, et Trevor Young. 1999. « Analysis of the determinants of adoption of organic horticultural techniques in the UK ». *Journal of Agricultural Economics* 50 (1): 47-63.
- . 2003. « Modelling the adoption of organic horticultural technology in the UK using duration analysis ». *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 47 (1): 29-54.
- Burton, Rob J. F., et Geoff A. Wilson. 2006. « Injecting social psychology theory into conceptualisations of agricultural agency: Towards a post-productivist farmer self-identity? » *Journal of Rural Studies* 22 (1): 95-115.
- Burton, Rob J.F. 2004. « Reconceptualising the 'Behavioural Approach' in Agricultural Studies: A Socio-Psychological Perspective ». *Journal of Rural Studies* 20 (3): 359-371.
- Buunk, Abraham P., et Frederick X. Gibbons. 2007. « Social comparison: The end of a theory and the emergence of a field ». *Organizational Behavior and Human Decision Processes, Special Issue on Social Comparison Processes*, 102 (1): 3-21.
- Byrne, Donn. 1997. « An overview (and underview) of research and theory within the attraction paradigm ». *Journal of Social and Personal Relationships* 14 (3): 417-431.
- Castellano, Claudio, Santo Fortunato, et Vittorio Loreto. 2009. « Statistical physics of social dynamics ». *Reviews of modern physics* 81 (2): 591.
- Centola, Damon. 2015. « The Social Origins of Networks and Diffusion ». *American Journal of Sociology* 120 (5): 1295-1338.
- Chambaut, Hélène, Erika Moussel, Jérôme Pavie, Jean Paul Coutard, Bertrand Galisson, Jean-Louis Fiorelli, et Joannie Leroyer. 2011. « Profils environnementaux des exploitations d'élevage bovins lait et viande en agriculture biologique et conventionnelle: enseignements du projet CedABio ». *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 53-56.
- Chantre, E., et A. Cardona. 2014. « Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services ». *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38 (5): 573-602.
- Chantre, Emilia. 2013. « L'apprentissage des agriculteurs en transition agroenvironnementale ». *Pour*, no 219: 141-150.
- Chantre, Emilia, Marianne Cerf, et Marianne Le Bail. 2015a. « Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms ». *International Journal of Agricultural Sustainability* 13 (1): 69-86.
- . 2015b. « Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms ». *International Journal of Agricultural Sustainability* 13 (1): 69-86.
- Coello, Carlos A. Coello, Gary B. Lamont, et David A. Van Veldhuizen. 2007. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Vol. 5. Springer.
- Compagnone, Claude, et Florence Hellec. 2015. « Farmers' Professional Dialogue Networks and Dynamics of Change: The Case of ICP and No-Tillage Adoption in Burgundy (France) ». *Rural Sociology* 80 (2): 248-273.
- Coquil, Xavier, Benoit Dedieu, et Pascal Béguin. 2010. « How do livestock and crop sciences represent evolutions of farming systems? A review ». 9th International Farming Systems Association.
- Coquil, Xavier, Benoît Dedieu, et Pascal Béguin. 2017. « Professional transitions towards sustainable farming systems: The development of farmers' professional worlds ». *Work* 57 (3): 325-337.
- Coquil, Xavier, J. M. Lussion, P. Béguin, et Benoît Dedieu. 2013. « Itinéraires vers des systèmes autonomes et économes en intrants: motivations, transition, apprentissages ». *Rencontres Recherches Ruminants* 20.

- Crano, William D., et Ralph E. Cooper. 1972. « A Preliminary Investigation of a Hyperbolic Model of Attitude Change. »
- Dam, Denise Van, Jean Nizet, et Michel Streith. 2012. « Les émotions comme lien entre l'action collective et l'activité professionnelle : le cas de l'agriculture biologique ». *Natures Sciences Sociétés* 20 (3): 318-329.
- Darnhofer, Ika, Stéphane Bellon, Benoît Dedieu, et Rebecka Milestad. 2010. « Adaptiveness to Enhance the Sustainability of Farming Systems. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 30 (3): 545-555.
- Darnhofer, Ika, Walter Schneeberger, et Bernhard Freyer. 2005. « Converting or Not Converting to Organic Farming in Austria: Farmer Types and Their Rationale ». *Agriculture and Human Values* 22 (1): 39-52.
- Darré, Jean-Pierre. 1985. *La parole et la technique: l'univers de pensée des éleveurs du Ternois*. Vol. 10. Editions L'Harmattan.
- Darré, Jean-Pierre, Roger Le Guen, et Bruno Lemery. 1989. « Changement technique et structure professionnelle locale en agriculture ». *Économie rurale* 192 (1): 115-222.
- De Buck, A. J., I. Van Rijn, N. G. Roling, et G. A. A. Wossink. 2001. « Farmers' reasons for changing or not changing to more sustainable practices: an exploratory study of arable farming in the Netherlands ». *The Journal of Agricultural Education and Extension* 7 (3): 153-166.
- Dedieu, Marie-Sophie, Alice Lorge, Olivier Louveau, et Vincent Marcus. 2017. « Les exploitations en agriculture biologique: quelles performances économiques? »
- Deffuant, Guillaume, Frédéric Amblard, Gérard Weisbuch, et Thierry Faure. 2002. « How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model ». *Journal of artificial societies and social simulation* 5 (4).
- Deffuant, Guillaume, Timoteo Carletti, et Sylvie Huet. 2012. « The Leviathan model: Absolute dominance, generalised distrust, small worlds and other patterns emerging from combining vanity with opinion propagation ». arXiv:1203.3065 [physics], mars.
- Deffuant, Guillaume, Sylvie Huet, et Frédéric Amblard. 2005. « An Individual - Based Model of Innovation Diffusion Mixing Social Value and Individual Benefit1 ». *American Journal of Sociology* 110 (4): 1041-1069.
- Deffuant, Guillaume, Sylvie Huet, J. P. Bousset, J. Henriot, Georges Amon, Gérard Weisbuch, et others. 2002. *Agent based simulation of organic farming conversion in Allier département*. Edward Elgar Publishers.
- Deffuant, Guillaume, Sylvie Huet, et Gérard Weisbuch. 2002. *Agent based simulation of organic farming conversion in Allier département*. Edward Elgar Publishers.
- Depeyrot, Jean-Noël. 2017. « Les transformations du paysage laitier français avant la sortie des quotas ».
- Dervillé, Marie, Gilles Allaire, Élise Maigné, et Éric Cahuzac. 2017. « Internal and Contextual Drivers of Dairy Restructuring: Evidence from French Mountainous Areas and Post-Quota Prospects ». *Agricultural Economics* 48 (1): 91-103.
- Deutsch, Morton, et Harold B. Gerard. 1955. « A study of normative and informational social influences upon individual judgment. » *The journal of abnormal and social psychology* 51 (3): 629.
- Dockès, Anne-Charlotte, Isabelle Boisdon, Catherine Experton, et S. Fourdin. 2013a. « Creation of innovative tools for the development of organic dairy production in mountain areas ». *Innovations Agronomiques* 32: 243-257.
- Dockès, Anne-Charlotte, Isabelle Boisdon, Catherine Experton, et Simon Fourdin. 2013b. « Mise au point de méthodes et outils innovants pour développer l'élevage laitier biologique en zones de piémont et montagne ». *Innovations Agronomiques*, 243-257.
- Dollé, Jean-Baptiste, Luc Delaby, Sylvain Plantureux, Sindy Moreau, Bernard Amiaud, Alicia Charpiot, Vincent Manneville, Aline Chanseaume, Hélène Chambaut, et André Le Gall. 2013. « Impact

- environnemental des systèmes bovins laitiers français ». *INRA Prod. Anim* 26 (2): 207–220.
- Dowd, Anne-Maree, Nadine Marshall, Aysha Fleming, Emma Jakku, Estelle Gaillard, et Mark Howden. 2014. « The role of networks in transforming Australian agriculture ». *Nature Climate Change* 4 (7): 558–563.
- Edwards-Jones, G., et O. Howells. 2001. « The origin and hazard of inputs to crop protection in organic farming systems: are they sustainable? » *Agricultural Systems* 67 (1): 31–47.
- Edwards-Jones, Gareth. 2006. « Modelling farmer decision-making: concepts, progress and challenges ». *Animal science* 82 (06): 783–790.
- Ennifar, Myriam, et Eric Allain. 2016. « Evolution des structures de production laitière en France ». *FranceAgriMer*.
- Fairweather, John R. 1999. « Understanding how farmers choose between organic and conventional production: Results from New Zealand and policy implications ». *Agriculture and human values* 16 (1): 51–63.
- Fairweather, John R., Lesley M. Hunt, Chris J. Rosin, et Hugh R. Campbell. 2009. « Are conventional farmers conventional? Analysis of the environmental orientations of conventional New Zealand farmers ». *Rural Sociology* 74 (3): 430–454.
- Feola, Giuseppe, et Claudia R. Binder. 2010. « Towards an Improved Understanding of Farmers' Behaviour: The Integrative Agent-Centred (IAC) Framework ». *Ecological Economics* 69 (12): 2323–2333.
- Festinger, Leon. 1954. « A theory of social comparison processes ». *Human relations* 7 (2): 117–140.
- Fielding, Kelly S., Rachel McDonald, et Winnifred R. Louis. 2008. « Theory of Planned Behaviour, Identity and Intentions to Engage in Environmental Activism ». *Journal of Environmental Psychology* 28 (4): 318–326.
- Fielding, Kelly S., Deborah J. Terry, Barbara M. Masser, et Michael A. Hogg. 2008. « Integrating Social Identity Theory and the Theory of Planned Behaviour to Explain Decisions to Engage in Sustainable Agricultural Practices ». *British Journal of Social Psychology* 47 (1): 23–48.
- Fishbein, Martin. 1979. « A theory of reasoned action: some applications and implications. »
- Garcia, F., F. Guerrin, R. Martin-Clouaire, et J. P. Rellier. 2005. « The human side of agricultural production management: the missing focus in simulation approaches ». In *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation* (ed. A Zerger and RM Argent), 203–209.
- Gardebroek, Cornelis. 2002. « Farmspecific factors affecting the choice between conventional and organic dairy farming ». *Zaragoza (Spain)* 28: 31.
- Gasson, Ruth. 1973. « Goals and Values of Farmers ». *Journal of Agricultural Economics* 24 (3): 521–542.
- Geniaux, Ghislain, Laure Latruffe, Jérôme Lepoutre, Naoufel Mzoughi, Claude Napoléone, Céline Nauges, Jasmin Sainte-Beuve, et Natacha Sautereau. 2010. « Les déterminants de la conversion à l'agriculture biologique: une revue de la littérature économique ».
- Giger, Jean-Christophe. 2008. « Examen critique du caractère prédictif, causal et falsifiable de deux théories de la relation attitude-comportement : la théorie de l'action raisonnée et la théorie du comportement planifié ». *L'Année psychologique* 108 (1): 107–131.
- Girdžiūtė, Laura. 2012. « Risks in Agriculture and Opportunities of their Integrated Evaluation ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences, World Conference on Business, Economics and Management (BEM-2012)*, May 4–6 2012, Antalya, Turkey, 62 (Supplement C): 783–790.
- Gladwin, C. H. 1989. *Ethnographic Decision Tree Modeling*. SAGE.
- Goldstone, Robert L., et Marco A. Janssen. 2005. « Computational Models of Collective Behavior ». *Trends in Cognitive Sciences* 9 (9): 424–430.
- Gouin, D. M., et others. 1988. « Peut-on se passer d'un marché des quotas? » *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 7 (2): 179–192.
- Granovetter, Mark, et Roland Soong. 1983. « Threshold models of diffusion and collective behavior ». *Journal of Mathematical sociology* 9 (3): 165–179.

- Grimm, Volker. 1999. « Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? » *Ecological Modelling* 115 (2): 129-148.
- Grimm, Volker, Uta Berger, Finn Bastiansen, Sigrunn Eliassen, Vincent Ginot, Jarl Giske, John Goss-Custard, et al. 2006. « ODD protocol : A standard protocol for describing individual-based and agent-based models ». *Ecological Modelling* 198 (1-2): 115-126.
- Groeneveld, Anouschka, Jack Peerlings, Martha Bakker, et Wim Heijman. 2016. « The effect of milk quota abolishment on farm intensity: Shifts and stability ». *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, Social science perspectives on the bio-economy*, 77 (Supplement C): 25-37.
- Guimond, Serge. 2006. *Social comparison and social psychology: Understanding cognition, intergroup relations, and culture*. Cambridge University Press.
- Hamal, K.b., et Jock R. Anderson. 1982. « A Note on Decreasing Absolute Risk Aversion Among Farmers in Nepal ». *Australian Journal of Agricultural Economics* 26 (3): 220-225.
- Hansson, Helena, Richard Ferguson, et Christer Olofsson. 2012. « Psychological Constructs Underlying Farmers' Decisions to Diversify or Specialise Their Businesses – An Application of Theory of Planned Behaviour ». *Journal of Agricultural Economics* 63 (2): 465-482.
- Hedström, Peter, et Petri Ylikoski. 2010. « Causal mechanisms in the social sciences ». *Annual review of sociology* 36.
- Hill, Helene, et Fidelma Lynchehaun. 2002. « Organic Milk: Attitudes and Consumption Patterns ». *British Food Journal* 104 (7): 526-542.
- Huet, S., et G. Deffuant. 2015. « The Leviathan model without gossips and vanity: the richness of influence based on perceived hierarchy ». In *Advances in Social Simulation 2015*, 149-162. Springer.
- Huet, S., C. Rigolot, Q. Xu, Y. De Cacqueray-Valmenier, et I. Boisdon. 2018. « Toward Modelling of Transformational Change Processes in Farm Decision-Making ». *Agricultural Sciences* 09 (03): 340-350.
- Huet, SYLVIE, et GUILLAUME Deffuant. 2015. « The Leviathan model without gossips and vanity: the richness of influence based on perceived hierarchy ». In *Social Simulation Conference 2015*, 13p.
- Huet, Sylvie, Cyrille Rigolot, Qing Xu, Yannick De Cacqueray-Valmenier, et Isabelle Boisdon. 2018. « Toward modelling of transformational change processes in farm decision-making ». *Agricultural Sciences*.
- IFOAM, F. 2017. « The World of Organic Agriculture: Statistics & Emerging Trends 2017 ».
- Jager, Wander. 2000. *Modelling consumer behaviour*. Universal Press The Netherlands.
- Jager, Wander, M. A. Janssen, H. J. M. De Vries, J. De Greef, et C. A. J. Vlek. 2000. « Behaviour in commons dilemmas: Homo economicus and Homo psychologicus in an ecological-economic model ». *Ecological economics* 35 (3): 357-379.
- Jager, Wander, et Marco Janssen. 2012. « An updated conceptual framework for integrated modeling of human decision making: The Consumat II ». In paper for workshop complexity in the Real World@ ECCS, 1-18.
- Janssen, Sander, et Martin K. van Ittersum. 2007. « Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models ». *Agricultural Systems, Special Section: sustainable resource management and policy options for rice ecosystems*, 94 (3): 622-636.
- Joule, Robert-Vincent, et Jean-Lon Beauvois. 1989. « Une théorie psychosociale: la théorie de l'engagement. Perspectives commerciales ». *Recherche et Applications en Marketing (French Edition)* 4 (1): 79-90.
- Kates, Robert W., William R. Travis, et Thomas J. Wilbanks. 2012. « Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Kaufmann, Peter, Sigrid Stagl, et Daniel W. Franks. 2009. « Simulating the Diffusion of Organic Farming Practices in Two New EU Member States ». *Ecological Economics* 68 (10): 2580-2593.

- Kerselaers, Eva, Lieve De Cock, Ludwig Lauwers, et Guido Van Huylenbroeck. 2007. « Modelling Farm-Level Economic Potential for Conversion to Organic Farming ». *Agricultural Systems* 94 (3): 671-682.
- Kirchmann, Holger, et Gudni Thorvaldsson. 2000. « Challenging targets for future agriculture ». *European Journal of Agronomy* 12 (3): 145-161.
- Klein, Gary. 1997. « The recognition-primed decision (RPD) model: Looking back, looking forward ». *Naturalistic decision making*, 285-292.
- Lamarche, Hugues. 1992. *L'agriculture familiale: comparaison internationale. Une réalité polymorphe*. Paris: L'Harmattan.
- Lamine, Claire, et Stéphane Bellon. 2009. « Conversion to Organic Farming: A Multidimensional Research Object at the Crossroads of Agricultural and Social Sciences. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1): 97-112.
- Lamine, Claire, Jean Marc Meynard, Nathalie Perrot, et Stéphane Bellon. 2009. « Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques: les cas de l'Agriculture Biologique et de la Protection Intégrée ». *Innovations agronomiques* 4: 483-493.
- Latruffe, Laure, Céline Nauges, et Yann Desjeux. 2013. « Le rôle des facteurs économiques dans la décision de conversion à l'agriculture biologique ». *Innovations Agronomiques* 32: 259-269.
- Lerbourg, Jérôme. 2015. « La transmission des exploitations agricoles ».
- Lewin, Kurt. 1951. « Field theory in social science ».
- Louhichi, Kamel, Véronique Alary, et Patrice Grimaud. 2004. « A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Réunion Island ». *Animal Research* 53 (5): 363-382.
- Lynne, Gary D., C. Franklin Casey, Alan Hodges, et Mohammed Rahmani. 1995. « Conservation technology adoption decisions and the theory of planned behavior ». *Journal of Economic Psychology* 16 (4): 581-598.
- Madeline, Loïc, Jérôme Pavie, Erika Moussel, et Catherine Experton. 2013. « CEDABIO: Contributions environnementales et durabilité socio-économique des élevages en agriculture biologique ». Institut de l'Élevage.
- Mark, Noah P. 2003. « Culture and competition: Homophily and distancing explanations for cultural niches ». *American sociological review*, 319-345.
- Martin-Clouaire, Roger. 2017. « Modelling Operational Decision-Making in Agriculture ». *Agricultural Sciences* 8 (07): 527-544.
- Mason, Winter A., Frederica R. Conrey, et Eliot R. Smith. 2007. « Situating Social Influence Processes: Dynamic, Multidirectional Flows of Influence Within Social Networks ». *Personality and Social Psychology Review* 11 (3): 279-300.
- Matz, David C., et Wendy Wood. 2005. « Cognitive Dissonance in Groups: The Consequences of Disagreement ». *Journal of Personality and Social Psychology* 88 (1): 22-37.
- McGregor, M. J., M. F. Rola-Rubzen, et R. Murray-Prior. 2001. « Micro and macro-level approaches to modelling decision making ». *Agricultural Systems* 69 (1): 63-83.
- Michel-Guillou, E. 2010. « Agriculteur, un métier en mutation: analyse psychosociale d'une représentation professionnelle ». *Bulletin de psychologie*, 15-27, 63 (1): 505.
- Michelsen, Johannes. 2001. « Organic farming in a regulatory perspective. The Danish case ». *Sociologia ruralis* 41 (1): 62-84.
- Mintzberg, Henry, Duru Raisinghani, et Andre Theoret. 1976. « The Structure of "Unstructured" Decision Processes ». *Administrative Science Quarterly* 21 (2): 246.
- Moser, S. C., et J. A. Ekstrom. 2010. « A Framework to Diagnose Barriers to Climate Change Adaptation ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (51): 22026-22031.
- Moulin, Charles-Henri, Stéphane Ingrand, Jacques Lasseur, Sophie Madelrieux, Martine Napoleone, Jean

- Pluvinage, et Vincent Thenard. 2008. « Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations: propositions méthodologiques ». *L'élevage en Mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores'*. (Eds B Dedieu, E Chia, B Leclerc, CH Moulin, M Tichit) pp, 23–36.
- Mussche, Guy. 1974. « Les relations entre stratégies et structures dans l'entreprise ». *Revue économique*, 30–48.
- Mzoughi, Naoufel. 2011. « Farmers adoption of integrated crop protection and organic farming: Do moral and social concerns matter? » *Ecological Economics* 70 (8): 1536-1545.
- Neumeister, D., Simon Fourdin, et Anne-Charlotte Dockès. 2011. « Etude des freins et motivations des éleveurs laitiers au passage en agriculture biologique dans les zones de piémont et de montagne ». *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*.
- Noble, Ian R., Saleemul Huq, Yuri A. Anokhin, J. Carmin, Dieudonne Goudou, Felino P. Lansigan, Balgis Osman-Elasha, et Alicia Villamizar. 2014. « Adaptation needs and options ». *Climate change*, 833-868.
- O'Brien, Karen, et Gail Hochachka. 2010. « Integral Adaptation to Climate Change. » *Journal of Integral Theory & Practice* 5 (1).
- Öhlmér, Bo, Kent Olson, et Berndt Brehmer. 1998. « Understanding farmers' decision making processes and improving managerial assistance ». *Agricultural economics* 18 (3): 273-290.
- Olabisi, Laura Schmitt, Ryan Qi Wang, et Arika Ligmann-Zielinska. 2015. « Why Don't More Farmers Go Organic? Using A Stakeholder-Informed Exploratory Agent-Based Model to Represent the Dynamics of Farming Practices in the Philippines ». *Land* 4 (4): 979–1002.
- Padel, Susanne. 2001. « Conversion to organic farming: a typical example of the diffusion of an innovation? » *Sociologia ruralis* 41 (1): 40-61.
- Pavie, Anne-Charlotte Dockès, et J. Echevarria. 2002. *Etude des freins à la conversion à l'agriculture biologique des exploitations laitières bovines*. Vol. 19.
- Pavie, J., H. Chambaut, E. Moussel, J. Leroyer, et V. Simonin. 2012. « Evaluations et comparaisons des performances environnementales, économiques et sociales des systèmes bovins biologiques et conventionnels dans le cadre du projet CedABio ». *Renc. Rech. Ruminants* 19: 37–40.
- Pavie, Jérôme, Anne-Charlotte Dockès, et Laurence Echevarria. 2002. *Etude des freins à la conversion à l'agriculture biologique des exploitations laitières bovines*. Paris Cedex 12: Institut de l'Élevage.
- Pelling, Mark, Karen O'Brien, et David Matyas. 2015. « Adaptation and Transformation ». *Climatic Change* 133 (1): 113-127.
- Perrot, Christophe, et Didier Cébron. 2013. « Les exploitations laitières bovines en France métropolitaine - Des territoires laitiers contrastés ». *Agreste Primeur* 308: 7-10.
- Petty, Richard E. 2013. « Two routes to persuasion: State of the art ». *International perspectives on psychological science* 2: 229-247.
- Petty, Richard E., et John T. Cacioppo. 1986. « The elaboration likelihood model of persuasion ». In *Communication and persuasion*, 1–24. Springer.
- Pimentel, David, Paul Hepperly, James Hanson, David Douds, et Rita Seidel. 2005. « Environmental, Energetic, and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems ». *BioScience* 55 (7): 573.
- Pool, Gregory J., Wendy Wood, et Kira Leck. 1998. « The self-esteem motive in social influence: agreement with valued majorities and disagreement with derogated minorities. » *Journal of personality and social psychology* 75 (4): 967.
- Pornpitakpan, Chanthika. 2004. « The persuasiveness of source credibility: A critical review of five decades' evidence ». *Journal of applied social psychology* 34 (2): 243–281.
- RAJADE, Charlotte, Delphine BONTHOUX, Marion PERRAS, et Morgane BRANGER. 2015. « La politique des quotas laitiers et avenir des exploitations françaises ».

- Rasmussen, Jens. 1976. « Outlines of a hybrid model of the process plant operator ». In *Monitoring behavior and supervisory control*, 371–383. Springer.
- Renaud, Jacques, et Fayed F. Boctor. 2002. « A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem ». *European Journal of Operational Research* 140 (3): 618–628.
- Rickards, L., et S. M. Howden. 2012. « Transformational Adaptation: Agriculture and Climate Change ». *Crop and Pasture Science* 63 (3): 240.
- Rigby, Dan, et Daniel Cáceres. 2001. « Organic farming and the sustainability of agricultural systems ». *Agricultural systems* 68 (1): 21–40.
- Rigby, Dan, Trevor Young, et Michael Burton. 2001. « The Development of and Prospects for Organic Farming in the UK ». *Food Policy* 26 (décembre): 599–613.
- Rigolot, Cyrille. 2018. « Sustainability transformations as shifts in worldviews: a dynamic view of complementarity issues ». *Ecology and Society* 23 (2): 1–4.
- Robert, Marion, Alban Thomas, et Jacques-Eric Bergez. 2016. « Processes of Adaptation in Farm Decision-Making Models. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 36 (4): 64.
- Rogers, Everett. 1983. « Diffusion of innovations ». New York.
- . 1995. « Diffusion of innovations ». New York, 12.
- . 2003. *M., Diffusion of Innovations*. Free Press, New York.
- Sainte-Beuve, Jasmin, Douadia Bougherara, et Laure Latruffe. 2011. « Performance économique des exploitations biologiques et conventionnelles: Levier économique à la conversion ». 10p. in *Les transversalités de l'agriculture biologique* Strasbourg.
- Saltelli, A., éd. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley.
- Schmidt, Günter, et Wilbert E. Wilhelm. 2000. « Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: a review and discussion of modelling issues ». *International Journal of Production Research* 38 (7): 1501–1523.
- Schneeberger, Walter, Ika Darnhofer, et Michael Eder. 2002. « Barriers to the adoption of organic farming by cash-crop producers in Austria ». *American Journal of Alternative Agriculture* 17 (01): 24–31.
- Schneider, Sergio. 2016. « Family farming in Latin America and the Caribbean: looking for new paths of rural development and food security ». Working Paper, International Policy Centre for Inclusive Growth.
- Schultz, P. Wesley. 2001. « The structure of environmental concern: Concern for self, other people, and the biosphere ». *Journal of environmental psychology* 21 (4): 327–339.
- Schwartz, Shalom H. 1992. « Universals in the content and structure of values: Theoretical advances and empirical tests in 20 countries ». *Advances in experimental social psychology* 25: 1–65.
- Schwenk, Charles R. 1988. « The cognitive perspective on strategic decision making ». *Journal of management studies* 25 (1): 41–55.
- Simon, Herbert A. 1955. « A Behavioral Model of Rational Choice ». *The Quarterly Journal of Economics* 69 (1): 99.
- Sobol, Ilya M. 1993. « Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models ». *Mathematical Modelling and Computational Experiments* 1 (4): 407–414.
- Stock, Paul V. 2007. « 'Good Farmers' as Reflexive Producers: An Examination of Family Organic Farmers in the US Midwest ». *Sociologia Ruralis* 47 (2): 83–102.
- Sutherland, Lee-Ann. 2011. « "Effectively Organic": Environmental Gains on Conventional Farms through the Market? ». *Land Use Policy* 28 (4): 815–24.
- . 2013. « Can organic farmers be 'good farmers'? Adding the 'taste of necessity' to the conventionalization debate ». *Agriculture and human values* 30 (3): 429–441.
- Sutherland, Lee-Ann, Rob J.F. Burton, Julie Ingram, Kirsty Blackstock, Bill Slee, et Nick Gotts. 2012. « Triggering Change: Towards a Conceptualisation of Major Change Processes in Farm Decision-Making ». *Journal of Environmental Management* 104: 142–51.

- Sutherland, Lee-Ann, et Ika Darnhofer. 2012. « Of organic farmers and 'good farmers': Changing habitus in rural England ». *Journal of Rural Studies* 28 (3): 232-40.
- Sutherland, Lee-Ann, Doreen Gabriel, Laura Hathaway-Jenkins, Unai Pascual, Ulrich Schmutz, Dan Rigby, Richard Godwin, et al. 2012. « The 'Neighbourhood Effect': A multidisciplinary assessment of the case for farmer co-ordination in agri-environmental programmes ». *Land Use Policy* 29 (3): 502-12.
- Takács, Károly, Andreas Flache, et Michael Mäs. 2014. « Is there negative social influence? Disentangling effects of dissimilarity and disliking on opinion shifts ».
- Thierry, Caroline. 2003. « Gestion de chaînes logistiques: Modèles et mise en oeuvre pour l'aide à la décision à moyen terme ». Accreditation to supervise research. University of Toulouse II.
- Tormala, Zakary L., et Derek D. Rucker. 2007. « Attitude certainty: A review of past findings and emerging perspectives ». *Social and Personality Psychology Compass* 1 (1): 469-492.
- Tost, Leigh Plunkett, Francesca Gino, et Richard P. Larrick. 2012. « Power, competitiveness, and advice taking: Why the powerful don't listen ». *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 117 (1): 53-65.
- Tovey, Hilary. 1997. « Food, Environmentalism and Rural Sociology: On the Organic Farming Movement in Ireland ». *Sociologia Ruralis* 37 (1): 21-37.
- Trewavas, Anthony. 2001. « Urban myths of organic farming ». *Nature* 410 (6827): 409.
- Tversky, Amos, et Daniel Kahneman. 1974. « Judgment under uncertainty: Heuristics and biases ». *science* 185 (4157): 1124-1131.
- . 1985. « The framing of decisions and the psychology of choice ». In *Environmental Impact Assessment, Technology Assessment, and Risk Analysis*, 107-129. Springer.
- Uematsu, Hiroki, et Ashok K. Mishra. 2012. « Organic farmers or conventional farmers: Where's the money? » *Ecological Economics* 78 (juin): 55-62.
- Valente, Thomas W. 1995. *Network models of the diffusion of innovations*.
- . 1996. « Social network thresholds in the diffusion of innovations ». *Social networks* 18 (1): 69-89.
- Veldhoven, Gery M. van. 1988. « Dynamic aspects of economic behavior: Some determinants ». In *Handbook of economic psychology*, 52-73. Springer.
- Vidal, Carlos J., et Marc Goetschalckx. 1997. « Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models ». *European Journal of Operational Research* 98 (1): 1-18.
- Wärneryd, Karl-Erik. 1988. « Social influence on economic behavior ». In *Handbook of economic psychology*, 206-248. Springer.
- Willock, Joyce, Ian J. Deary, Murray M. McGregor, Alister Sutherland, Gareth Edwards-Jones, Oliver Morgan, Barry Dent, Robert Grieve, Gavin Gibson, et Elizabeth Austin. 1999. « Farmers' attitudes, objectives, behaviors, and personality traits: The Edinburgh study of decision making on farms ». *Journal of Vocational Behavior* 54 (1): 5-36.
- Wilson, Alan G. 2006. « Ecological and Urban Systems Models: Some Explorations of Similarities in the Context of Complexity Theory ». *Environment and Planning A* 38 (4): 633-646.
- Wood, Joanne V., et AMANDA L. Forest. 2011. « Seeking pleasure and avoiding pain in interpersonal relationships ». *Handbook of self-enhancement and self-protection*, 258-278.
- Xu, Q., S. Huet, E. Perret, I. Boisdon, et G. Deffuant. 2018. « Population characteristics and the decision to convert to organic farming ».
- Xu, Q., S. Huet, E. Perret, et G. Deffuant. 2018. « Which of Farms' Characteristics or Social Dynamics Better Explain the Conversion to Organic Farming ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*.
- Xu, Q., S. Huet, C. Poix, I. Boisdon, et G. Deffuant. 2018. « Why Do Farmers Not Convert to Organic Farming? Modeling Conversion to Organic Farming as a Major Change ». *Natural Resource Modeling* 09 (03): 340-350.



Zhang, X-Y, Mn Trame, Lj Lesko, et S Schmidt. 2015. « Sobol Sensitivity Analysis: A Tool to Guide the Development and Evaluation of Systems Pharmacology Models: Sensitivity Analysis of Systems Pharmacology Model ». CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacology 4 (2): 69-79.

## **Annexe A. Quelques éléments de la littérature classique sur les processus de décision**

L'examen de la littérature permet d'identifier différents éléments centraux classiques de l'approche décisionnelle, qui dépendent de la science qui l'étudie. Nous examinons dans ce qui suit l'apport des différentes disciplines à l'analyse des décisions de changement des agriculteurs. La première sous-section présente des approches classiques du changement en agriculture. La sous-section suivante complète ce travail en étudiant une littérature plus récente prenant en compte des éléments essentiels du processus de décision pour l'adaptation en environnement changeant.

### **A1. Approches technico-économiques de la décision des agriculteurs**

Dans cette partie, nous nous intéressons d'abord à la décision elle-même qualifiée par une typologie statique. Cette typologie donne trois niveaux de décision : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. Nous abordons ensuite les freins et motivations au changement.

#### **A11. Trois niveaux de décision**

(Vidal et Goetschalckx 1997) a proposé un classement des décisions en trois catégories : stratégique, tactique et opérationnelle.

- Les décisions stratégiques concernent les orientations générales de l'organisation. Elles permettent la réalisation des missions de cette organisation et l'accomplissement de ses valeurs. Elles ont une implication sur le long terme et engagent l'avenir de l'organisation (Thierry 2003).
- Les décisions tactiques comprennent un ensemble de décisions destinées à réaliser la stratégie à moyen terme et à obtenir la meilleure exploitation des moyens mis en œuvre (Thierry 2003). Elles ont une implication sur le moyen terme.
- Les décisions opérationnelles comprennent des décisions relevant du court terme. Elles sont souvent prises par l'individu dans le cadre du fonctionnement quotidien de l'organisation (Mussche 1974; Renaud et Boctor 2002).

Ce classement des décisions est la typologie la plus classique. Il concerne un horizon temporel et l'importance des moyens liés à l'objet de la décision. Il ne traite toutefois pas le processus de décision lui-même (Ackoff 1974; Schmidt et Wilhelm 2000).

## **A12. Freins et motivations au changement**

Les agronomes se concentrent majoritairement sur l'exploitation et ses caractéristiques techniques et économiques (Gareth Edwards-Jones 2006; McGregor, Rola-Rubzen, et Murray-Prior 2001) pour étudier la décision en agriculture. Ils présentent généralement les motivations et les freins au changement en termes de facteurs positifs ou négatifs (Pavie, Dockès, et Echevarria 2002; Sainte-Beuve, Bougherara, et Latruffe 2011; Geniaux et al. 2010; Latruffe, Nauges, et Desjeux 2013). Ce type d'approche, bien qu'informatrice des déterminants du changement au niveau de l'exploitation, ne dit pas grand-chose sur la dynamique de l'agriculteur en tant qu'individu. Elle s'intéresse par ailleurs plus souvent aux décisions opérationnelles ou tactiques (Schmidt et Wilhelm 2000), qui n'impliquent en général pas de changement identitaire de l'agriculteur lié à une nouvelle façon d'envisager ce qu'est une bonne pratique pour sa profession.

Beaucoup de chercheurs soutiennent que le changement en agriculture doit dépasser le cadre technico-économique de l'exploitation, et que l'étude de l'agriculteur lui-même est extrêmement importante pour la compréhension de ses décisions. (Lewin 1951) soutient en effet qu'un comportement est une fonction de la personne dans son environnement. (Gasson 1973; Mzoughi 2011; Schultz 2001; Dam, Nizet, et Streith 2012) insistent également tout particulièrement sur l'importance de l'individu pour la compréhension du changement en agriculture. Mettant en avant non seulement la personne et son environnement, mais aussi l'aspect dynamique de ce lien, (Lamine et Bellon 2009; Moulin et al. 2008) étudient précisément différentes trajectoires de la conversion à l'AB pour démontrer l'importance de l'étude des trajectoires pour comprendre le changement en agriculture (Boisdon et al. 2013; Emilia Chantre, Cerf, et Le Bail 2015; Lamine et Bellon 2009; Alavoine-Mornas et Madelrieux 2014; Barbier, Cerf, et Lusson 2015).

## **A2. Littératures classiques sur l'individu et son processus de décision : focus sur les aspects socio-psychologiques**

Trois communautés scientifiques principales ont produits des travaux de référence sur la question du changement de comportement des individus en s'intéressant tout particulièrement aux aspects socio-psychologiques. Elles s'intéressent à l'individu ou au groupe d'individus et à la façon dont ils prennent des décisions. Ces communautés sont : (1) Les mathématiciens, ainsi que les économistes qui se sont depuis longtemps intéressés au processus de décision, et plus récemment en situations inconnues ; (2) les anthropologues intéressés à l'adoption de nouvelles pratiques avec un processus de décision vu comme un processus de diminution d'incertitude ; (3) les psychologues sociaux, et plus particulièrement la théorie de l'action raisonnée puis la théorie du comportement planifié (Ajzen et Fishbein 1975; Ajzen 1991).

### **A21. Processus de décision en mathématiques, économie et sciences de gestion**

Un des auteurs les plus influents en la matière est Herbert Simon (Simon 1955). Simon a critiqué l'hypothèse d'une rationalité complète impliquant une parfaite connaissance du problème ainsi qu'une capacité de calcul illimitée. Il a introduit la notion de rationalité limitée, qui garde l'idée d'un individu rationnel mais avec une connaissance partielle et des capacités de calcul limitées. Dans ces conditions, le décideur ne recherche pas une décision optimale mais plutôt une décision satisfaisante : il recherche les alternatives disponibles jusqu'à en trouver une pour laquelle un seuil d'acceptabilité est atteint (Simon l'a qualifié de solution satisfaisante et suffisante).

Pour aller plus loin (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976), en s'appuyant sur des recherches empiriques, montrent comment les organisations gèrent les décisions non structurées stratégiques. « Non structuré » fait référence aux processus de décision qui n'ont pas été rencontrés sous la même forme et pour lesquels aucun ensemble prédéterminé et explicite de réponses ordonnées n'existe dans l'organisation. « Stratégique » implique une grande importance en termes de mesures prises, de ressources engagées ou d'expériences. En lien avec le caractère inconnu de la situation et/ou du problème rencontré, l'auteur insiste sur le fait que c'est un processus et non

une décision ponctuelle. Il n'y pas de réponses préexistantes, ce qui incite à collaborer avec d'autres pour élaborer des solutions. Ce processus peut s'arrêter à tout moment devant l'échec de tentatives ou engendrer un changement si une voie permettant d'apprivoiser l'inconnu se dégage.

Plus précisément, pour ces auteurs, le processus de prise de décision n'est pas linéaire et montre trois phases principales qui aident à comprendre comment les gens font face à la complexité du processus :

- La phase d'identification - deux routines peuvent se produire pendant cette phase : la reconnaissance de la décision et le diagnostic. Alors que les problèmes ou les opportunités sont identifiés dans la première, la seconde clarifie et définit les problèmes. Ces deux routines sont soumises à des résistances et à des biais qui peuvent arrêter le processus si l'individu est suffisamment satisfait par la situation actuelle.
- La phase de développement : qui inclut une recherche d'une solution existante et / ou des routines de conception pour créer une solution pertinente ; le coût de la recherche ou de la construction est souvent suffisamment élevé pour expliquer que les individus ne considèrent qu'une seule solution.
- La phase de sélection: l'étude montre que des approches rationnelles et analytiques sont rarement utilisées pour évaluer la solution qui est souvent déjà ratifiée lors de la conception et parfois en partie dans la routine de diagnostic.

Les auteurs ont également identifié trois ensembles de routines de soutien : le contrôle de décision ; la communication de décision ; et les routines politiques. Le premier est un processus de méta décision concernant le processus de décision lui-même. Le second fournit les informations d'entrée et de sortie nécessaires puisque les activités de communication dominent chaque phase de la prise de décision non structurée. L'activité politique se manifeste généralement dans une routine de négociation parmi ceux qui contrôlent les choix.

Cette approche est particulièrement dédiée au processus de décision dans une organisation. Cette approche peut toutefois être mobilisée pour la décision en agriculture car une partie importante des exploitations agricoles a aujourd'hui le statut

juridique d'une entreprise et appartient à plusieurs personnes (Lamarche 1992; Bélières et al. 2014; Schneider 2016). Cette approche semble par ailleurs aisément adaptable à la décision individuelle.

Une caractéristique originale de ce travail présenté dans (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976), est que le processus est initié par une situation pour laquelle aucune réponse appropriée déjà formée n'est connue.

## **A22. Processus de décision vu par les anthropologues**

C'est un second cadre qui s'intéresse à l'individu et à son processus de changement. Il est principalement axé sur le processus d'innovation et d'influence sociale qui favorisent la diffusion d'informations sur cette innovation, sa valeur et sa pertinence.

Les anthropologues et les sociologues se sont intéressés à l'agriculteur et ses interactions sociales (Rogers 1983; Valente 1996; Darré, Le Guen, et Lemery 1989) dans le cadre de la prise de décision, et ont proposé diverses théories pour expliquer le changement. Des changements profonds (ou drastiques) impliquent aussi que l'agriculteur examine à la fois les ressources, les normes et les références qu'il utilisera et les éléments qu'il va gérer avant de modifier ses pratiques.

Dans sa théorie de la diffusion de l'innovation, (Rogers Everett 1995) décrit le processus d'adoption d'une nouvelle pratique comme un processus de recherche de diminution de l'incertitude. Cette diminution se fait d'une part par l'acte de connaître les propriétés de l'innovation et de s'assurer de la valeur sociale de l'innovation auprès de ses pairs, et d'autre part l'innovation adoptée, par sa pratique et l'exposition à des sources d'information et d'influence qui le confirment dans ses choix. L'auteur identifie cinq étapes à ce processus dont il confirme, comme l'avait souligné (Mintzberg, Raisinghani, et Theoret 1976), qu'elles ne sont pas linéaires :

- Connaissance : c'est une période où l'individu acquiert une représentation cognitive de l'innovation et forme une attitude à son égard.
- Persuasion : c'est une phase émotive au cours de laquelle les individus comptent sur leur réseau pour évaluer la valeur sociale de l'innovation.
- Décision : c'est le moment de l'acceptation ou du rejet. Le rejet peut également se produire pendant les autres étapes et peut être passif si l'individu n'a pas beaucoup réfléchi à l'innovation, ou actif s'il l'a testée.
- Implémentation : c'est une phase où l'incertitude demeure. Cette phase peut être longue et nécessite de l'aide pour concevoir son propre usage de l'innovation.
- Confirmation : c'est une période où l'individu continue d'utiliser l'innovation, en évaluant son matériel et ses avantages sociaux. Pendant cette période, l'individu évite les sources d'information remettant son choix en cause et préfère celles qui le renforcent.

Le processus de décision en matière d'innovation prend fin lorsque le comportement n'est plus nouveau pour l'individu (« l'innovation perd sa qualité distinctive de nouveauté ») (Rogers Everett 1995).

Une approche de réseau social modélisant l'aspect local de l'influence sociale sur l'adoption de l'innovation a été développée par (T. W. Valente 1995, 1996). Cela a été inspiré par les études anthropologiques sur la diffusion de l'innovation dans les réseaux sociaux, ainsi que par les travaux de Granovetter qui soulignent la sensibilité de la décision d'adoption d'un comportement d'un individu, au nombre d'individus ayant déjà adopté (Granovetter et Soong 1983). Cette approche propose un modèle de décision : l'individu adopte le nouveau comportement si le nombre de ses voisins ayant déjà adopté est supérieur à un seuil.

### **A23. Processus de décision pour les psychologues cognitifs et sociaux**

Le troisième cadre, fondé sur diverses études menées par des psychologues sociaux, met l'accent sur l'évaluation personnelle et sur l'évaluation sociale du comportement potentiellement adoptable, que fait un agriculteur.

Le travail le plus récent dans ce cadre est la théorie du comportement planifié (TCP)

(Ajzen 1991) basée sur la théorie de l'action raisonnée (TRA) (Ajzen et Fishbein 1975). Cet outil permet de calculer l'intention d'adopter un comportement comme une fonction de l'attitude (évaluation personnelle) et de la norme subjective (évaluation sociale) pour la TRA et la TCP, auxquelles s'ajoute le contrôle comportemental perçu des individus pour la seule TCP.

L'attitude se définit comme une évaluation favorable ou défavorable de l'individu par rapport au fait d'adopter et de mettre en œuvre un comportement. Elle est une somme pondérée des croyances liées au comportement sur les résultats possibles du comportement pour différentes dimensions d'évaluation (économie, environnement, autonomie, qualité, etc.). La pondération reflète les valeurs personnelles et ce qui est important pour l'individu. Une croyance est basée sur une forme d'évaluation anticipée, une hypothèse que fait le sujet sur les conséquences probables du comportement visé s'il est effectivement mis en œuvre.

La norme subjective est liée aux croyances normatives. Elle est basée sur les croyances de ce que les autres pensent de l'adoption du comportement. Elle est pondérée par la sensibilité des individus à l'approbation sociale, c'est-à-dire le degré de motivation de l'individu à se soumettre aux autres. Elle est la désirabilité perçue de la nouvelle pratique pour les personnes les plus importantes pour le décideur et reflète la pression sociale qui encourage ou décourage le comportement.

Le contrôle comportemental perçu reflète la capacité perçue des individus à mettre en œuvre le comportement ou les pratiques de manière satisfaisante. Il est la perception du contrôle interne et externe que peut avoir le décideur par rapport au nouveau comportement. Ce concept a été ajouté à la théorie de l'action raisonnée pour définir la théorie du comportement planifié.

Un processus de décision basé sur la TRA ou la TCP a un coût cognitif important car il inclut de nombreux éléments sur lesquels le décideur doit faire le point et/ou recueillir des informations sur un objet inconnu.

En pratique, pour mettre en œuvre la TRA ou la TCP, les éléments de base de l'intention sont collectés dans le cadre d'une enquête. La TRA et la TCP, même statiques, ont déjà



été souvent utilisées comme base pour prédire les intentions comportementales des agriculteurs (J. D. C. Beedell et Rehman 1999; J. Beedell et Rehman 2000; Fielding, McDonald, et Louis 2008; Hansson, Ferguson, et Olofsson 2012; Kaufmann, Stagl, et Franks 2009).

Pour aller plus loin, une telle approche insiste sur les croyances et sur le côté irrationnel d'une évaluation menant à une décision. Ensuite, à la lumière des études de psychologie cognitive, certaines théories et connaissances méritent d'être citées. Le « Elaboration likelihood model » (modèle de probabilité d'élaboration) (Petty et Cacioppo 1986; Petty 2013) soutient que le niveau d'effort cognitif consacré à l'évaluation d'un objet ou d'une situation dépend de la motivation. Ensuite, le processus de persuasion peut être associé à un raisonnement rationnel, allant d'une information factuelle à une émotion ou à une première impression. Des travaux complémentaires (Tversky et Kahneman 1985, 1974) ont mis en évidence de nombreux biais humains dans le processus d'information conduisant à des décisions apparemment non rationnelles. Ces derniers travaux sont finalement conformes au concept de « rationalité limitée » de Simon.

**Annexe B. Article acceptée pour publication dans Lecture Notes in Computer Science par la Social Simulation Conference 2018 (actes)**

**Population characteristics and the decision to convert to organic farming**

Xu Q. [1], Huet S. [2], Perret E. [1], Boisdon I. [1], Deffuant G. [2]

<sup>1</sup> UCA, AgroParisTech, Inra, Irstea, VetAgro Sup, Territoires; <sup>2</sup> Lisc – Irstea

*9 avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière, France*

*qing.xu@irstea.fr*

**Abstract.** We revisit some ideas of why farmers do not convert to organic farming from our previous article with a dynamic individual based model. In this model, an agent's decision on transitioning to organic is based on the comparison between the satisfaction with its current situation and the potential satisfaction with an alternative farming strategy. A farmer agent's satisfaction is modeled with the Theory of Reasoned Action. It is computed by comparing the agent's outcomes over time and comparing its current outcome against those of other agents to whom it lends great credibility ("important others"). The first study is based on prototypical farm populations. In this paper, the predicted conversion rate is studied with some French "cantons" having different practice intensities. The model is initialized with dairy farmers' data in these "cantons" in 2000. The results show that the "cantons" characteristics have great impact on the virtual adoption rate. Intensive "cantons" convert less than extensive ones. Extensive farms having not very good environmental outcomes seem to convert the most.

**Keywords:** organic farming, decision making, major change, Theory of Reasoned Action, agent-based model, social influence, credibility.

## Introduction

The recent dairy crisis combined with increasing consumer demand for organic food have made conversion to organic farming socially and economically interesting for dairy farmers (Dedieu et al. 2017; Sainte-Beuve, Bougherara, et Latruffe 2011). However, many farmers still do not convert. Why?

Recently, the conversion to organic farming has been qualified as a major change (Sutherland, Burton, et al. 2012) or a transformational adaptation (Dowd et al. 2014; Rickards et Howden 2012), as well as a social movement (Sutherland, Burton, et al. 2012; Fairweather et al. 2009; Darnhofer, Schneeberger, et Freyer 2005; Rigby, Young, et Burton 2001; Jérôme Pavie, Dockès, et Echevarria 2002). Conversion often implies strong changes in a farmer agent's worldview and social network, and generally begins with a strong need for change (Barbier, Cerf, et Lusson 2015; Sutherland, Burton, et al. 2012). Such a change that engages a number of social processes involving the agent, its peers and its environment has been rarely studied (M. Burton, Rigby, et Young 2003).

Agent-based modeling (Goldstone et Janssen 2005) or individual-based modeling (Grimm 1999) appear to be relevant and well-gearred to help identifying the main drivers that can explain the observed dynamics. However, as pointed out in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018; S. Huet et al. 2018), none of current agent models is well fit to represent the decision process about a major change that is at stake in the conversion to organic farming. This is the reason why (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) has proposed a dynamic version of the Theory of Reasoned Action (TRA); and showed its potential to explain why farmers do not convert to organic farming in a prototypical farmer population. This paper aims at evaluating this model when running on more realistic farmer populations designed from the French Agricultural Census data (RGA) 2000. The purpose is mainly to study how the conversion rate evolves differently in various farmer populations. The main original features of the model are the following:

- Like (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009), we propose a dynamic model of TRA (Ajzen et Fishbein 1975) to compute an agent's satisfaction. In the model, a

decision on conversion is based on comparing the agent's satisfaction with its current strategy against its potential satisfaction with an alternative one. These satisfactions are computed with the attitude and the subjective norm related to the current or alternative strategy. Both attitude and subjective norm are dynamic and based on the difference in practice outcomes. Consistently with TRA (Ajzen et Fishbein 1975), our model integrates decomposed variables: attitude and subjective norm—instead of global variables as in (Kaufmann, Stagl, et Franks 2009). A farmer agent's evaluation is thus based on its concrete strategy and practice instead of an abstract general opinion. The evaluation relates to its own experiences and its peers' strategies and practices.

- An agent's attitude about its current strategy is modelled as the difference between its past outcomes with current strategy and its current outcome. This choice is grounded in (Mintzberg, Raisinghani, and Theoret 1976; Öhlmér, Olson, and Brehmer 1998) who argue that a farmer agent's earlier practices are very influential for its decision on a future practice. Regarding an alternative strategy which can be new to the agent, the attitude is the difference between its past outcomes with current strategy and the outcomes of other peers with a similar farm and adopting the alternative or the outcome of the alternative in the media.
- The subjective norm involves a comparison with peers, weighted by their credibility. This credibility is based on the difference between outcomes (i.e. total production).
- As (Darré 1985) showed that farmers co-construct their practices, an agent updates its practice by copying the performances of its credible peers having similar farm characteristics (number of dairy cows, utilized agricultural area...).
- Finally, an important feature of our model is tied to the decision process about a "major change". It is assumed that a major change is only considered in critical situations where an agent faces high costs (economic, cognitive, emotional, etc.). Otherwise, agents do not even consider changing their major options. In a stable period, if a farmer agent is satisfied enough with its current farming strategy, it does not envisage an alternative one. Only a certain level of frustration or critical event (succession, major change in the farm, etc.) will evoke a consideration of an alternative to a farmer's current strategy.

In (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018), the model is studied with prototypical farm populations and shows different reasons for the lack of conversion to organic farming. In this work, the model is explored further by an initialization with six French “cantons” (100 farmers in each “canton”) varying in their distributions of farm characteristics. The adoption rate is compared among these populations to clarify the effect of population features. In general, intensive “cantons” convert less than extensive ones. Particularly, extensive farms having not very good environmental outcomes seem to convert the most.

After presenting the model’s principles with partially ODD (Overview, Design concepts, Details) protocol (Grimm et al. 2006), we outline the model’s behavior and some explanations before going on to synthesis, and discuss our conclusions.

## Materials and Methods

### The model

#### Basic elements

*Farmer.*

The model studies the evolution of a population of  $N$  farmer agents. Each agent  $f$  is characterized by its farm; its farming strategy; its practice defined on several dimensions  $i$  which are evaluated through performances; the importance  $W_i$  given to each dimension of practice; the credibility ( $C(f, v)$ ) it lends to each other agent  $v$ ; its memory of applied strategies and practices during the last  $M$  periods; its satisfactions with current farming strategy ( $I_D$ ) and with an alternative one ( $I_A$ ); and its duration for staying with a strategy ( $DC$ ) and for being dissatisfied for a strategy after being stable ( $DD$ ).

**$DC$  and  $DD$**  capture the duration between two events related to the decision process.  $DD$  counts an agent’s dissatisfaction duration with its current strategy. In the model, an agent has to be dissatisfied long enough with its current strategy to change it.  $DC$  counts the duration since last strategy change. An agent cannot consider changing

strategy again even if the agent is dissatisfied with it during the confirmation period. This is consistent with the theory of innovation diffusion (Rogers 1983) in which an agent has a confirmation period just after adopting a new strategy. Both counters are necessary to simulate an agent's stability and consistency. The corresponding delayed action of both counters can only occur when the counter is above the parameter  $TD$ .

Except for  $W_i$  all these attributes of a farmer agent are dynamic during the simulation, and are described in detail below.

**Credibility.** Each agent  $f$  gives a credibility  $C(f, v)$  to another agent  $v$  by comparing their outcomes. Credibility is between 0 (not credible at all) and 1 (very credible).

**Satisfaction.** Each agent has a satisfaction with its current farming strategy ( $I_C$ ) that corresponds to an evaluation of strategy. It may also evaluate an alternative strategy in certain cases and have a satisfaction for it ( $I_A$ ). Satisfaction with a farming strategy lies between 0 (not satisfied at all) and 1 (very satisfied).

If an agent is satisfied with its current farming strategy, it does not consider an alternative. Otherwise, its satisfactions with its current farming strategy ( $I_C$ ) and with an alternative one ( $I_A$ ) are computed and compared. If  $I_A$  is higher enough than  $I_C$  the agent will change its farming strategy.  $I_C$  is thus computed at every iteration, whereas  $I_A$  is only computed when a stable agent is dissatisfied with its current farming strategy.

In accordance with TRA, the satisfaction  $I_S$  with a farming strategy  $S$  depends on two elements: attitude  $A_S$  and subjective norm  $SN_S$  toward  $S$ . In the original theory, the interaction between these two elements varies with different agents facing different situations. In order to keep the model simple, satisfaction is assumed as the average value of these two elements.

$$I_S = \frac{A_S + SN_S}{2} \quad (1)$$

Both attitude and subjective norm lie between -1 (very negative attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate) and 1 (very positive attitude/subjective norm concerning the farming strategy to evaluate). They are computed with

farms' outcomes, farmers' strategies, and credibility. See the section "Farmers' dynamics" for the computation details.

Considering the value range of attitude and subjective norm towards a farming strategy, the satisfaction should also lie between -1 and 1. However, to facilitate other calculations, the satisfaction is normalized between 0 and 1.

**Practice.** As stated above, the term "practice" in the model is not really an agent's actual practice, but the way the agent evaluates it, i.e. its performance. A practice is evaluated over two dimensions: the level of output production (i.e. the productivity impact, in our case milk production), and the level of environmental amenities production (i.e. the environmental impact), respectively called productivity performance ( $P_0$ ) and environmental performance ( $P_1$ ) in the paper. Both  $P_0$  and  $P_1$  lie between 0 (very bad on this practice dimension) and 1 (very bad on this practice dimension).

**Importance given to each dimension.** The importance given to productivity dimension is termed  $W_0$ , and the one given to environmental dimension is termed  $W_1$ .  $W_0$  and  $W_1$  lie between 0 (not important at all) and 1 (most important). They sum to 1.

$$W_0 + W_1 = 1 \quad (2)$$

Importance defines an agent's personal values. An agent uses its own lens to judge the information it receives and the other agents it meets. In this model, both  $W_0$  and  $W_1$  are kept constant if an agent does not change its farming strategy.

**Farming strategy.** It is defined by the importance that a farmer gives to each dimension of practice. Two farming strategies are considered: organic and conventional. The organic strategy means lending more importance to environmental dimension and less to productivity dimension, whereas the conventional strategy does the contrary. It is assumed that when a farmer agent changes its strategy, it changes accordingly the importance given to each dimension.

### *Farm.*

A farm has three attributes: its farming total production (productivity outcome)  $T_0$ , its environmental amenities outcome  $T_1$  and its reference  $R$ .  $R$  is the maximum possible productivity performance considering a farm's all characteristics and evolution. Interviews and experts' arguments show that conventional farms' references are grounded on the negotiations with dairy enterprises (often expressed by "quota" in Europe in the past). Organic farms have more constraints in terms of reference due to stricter regulations. So a conventional farm  $f$ 's reference is considered as its farmer  $f$ 's initial productivity performance  $P_0^f(t=0)$  and that for an organic farm is a function  $l$  of  $P_0^f(t=0)$ .

$$R^f = \begin{cases} P_0^f(t=0) & \text{if } f \text{ is a conventional farm/farmer} \\ l(P_0^f(t=0)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

The implementation of a farm may need more attributes for different use cases. The detailed computation of  $T_0$  and  $T_1$  are defined in the model's implementation (see 2.2).

### *Media.*

When an agent is dissatisfied with its current farming strategy and looks for an alternative, it first searches in the population for other agents having similar characteristics but applying an alternative strategy. If it cannot find one, it has access to the media for a stereotype alternative model which depends on the farm's current outcomes.

### **Dynamics.**

#### *Overview of a farmer's dynamic over years.*

One time-step (iteration)  $t \rightarrow t+1$  represents one year, i.e. farmers decide their farming strategies, their practices, and so on, once a year. During an iteration, farmers' update order is picked up at random by a uniform law.



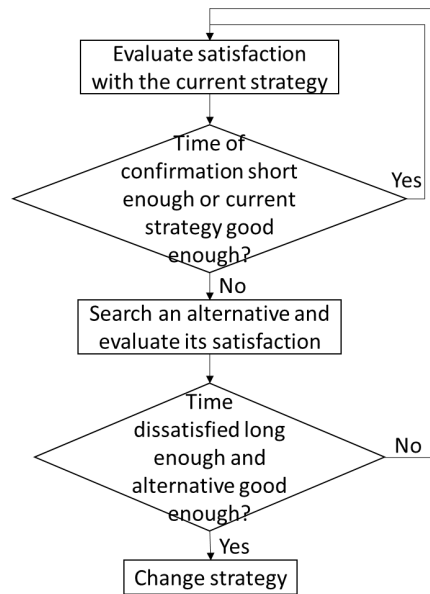


Fig. 1 —Overview of the farmer's update

```

For each iteration {
  Generate the order of the population
  For each agent  $f$  in the population {
    Compute  $I_C$ 
    If  $DC > TD$  and  $I_C < TA$ , compute  $I_A$ 
    If  $DD > TD$  and  $I_A > I_C + TO$ , change strategy and update  $W_0, W_1$ 
    For each agent  $v$  that is different from agent  $f$  in the population, compute  $C(f, v)$ 
    Compute  $P_0, P_1$ 
  }
}
  
```

Algorithm 1— Population updating loop.  $I_C$  is the satisfaction with a current strategy;  $I_A$  is the satisfaction with an alternative one.  $DC$  is an agent's confirmation duration;  $DD$  is an agent's dissatisfaction duration.  $TD$  is the minimum time of dissatisfaction before considering the alternative.  $TA$  is threshold of  $I_C$  to consider an alternative.  $TO$  is the threshold of  $I_A$  to change strategy.  $W_0$  is the importance given to productivity performance,  $W_1$  is the importance given to environmental performance.  $C(f, v)$  is the credibility that agent  $f$  gives to agent  $v$ .  $P_0$  is the productivity performance,  $P_1$  is the environmental performance.

As shown in Figure 1 and the pseudocode of algorithm 1, during each iteration, an

agent evaluates its satisfaction with its current farming strategy. If the agent is in a stable period and is satisfied with its current strategy, it does not consider a change. Otherwise, the agent looks for an alternative and evaluates it. If the agent has been dissatisfied for long enough and the alternative is good enough, it will change. Otherwise, the agent stays with its current farming strategy. It will then update its credibility given to other agents and its practice. See the detail in the following.

*Credibility update.*

Every two agents' relationship is characterized by the credibility one gives to another, and depends on an agent's personal view of its difference to another in outcome (i.e. total production). For agent  $f_i$  its difference to agent  $\nu$  is the sum of difference on each outcome dimension weighted by the importance given to that dimension.

$$D_v^f = \sum_{i=1}^2 (W_i^f (T_i^v - T_i^f)) \quad (4)$$

The credibility that agent  $f$  gives to agent  $\nu$  is calculated with  $f$ 's difference to  $\nu$ :

$$C_v^f = \frac{1}{1 + e^{-\alpha D_v^f}} \quad (5)$$

with  $\alpha$  the parameter to characterize the slope of the logistic function.

In Figure 2, agent  $f$ 's difference and credibility to  $\nu$  are respectively plotted on the x-axis and y-axis. When the difference is negative, it means that  $\nu$  has a worse outcome than  $f$ , thus  $f$  gives little credibility to  $\nu$ . When the difference is positive,  $\nu$  has a better outcome than  $f$ , thus  $f$  gives big credibility to  $\nu$ .

The lines with different colors represent  $\alpha$  variations to characterize the bias degree that an agent has for others with better outcomes. When  $\alpha$  is small, the bias is small. An agent tends to give the same credibility to others, whether or not they reach better outcomes. If  $\alpha$  is big, the bias is strong. Only others with better outcomes are credible.

In the model, every two agents are connected. The credibility depends on an agent's perceived difference in outcome to another and it is then used to update the agent's outcome which can change the perceived difference. Thus, these elements are dynamic.

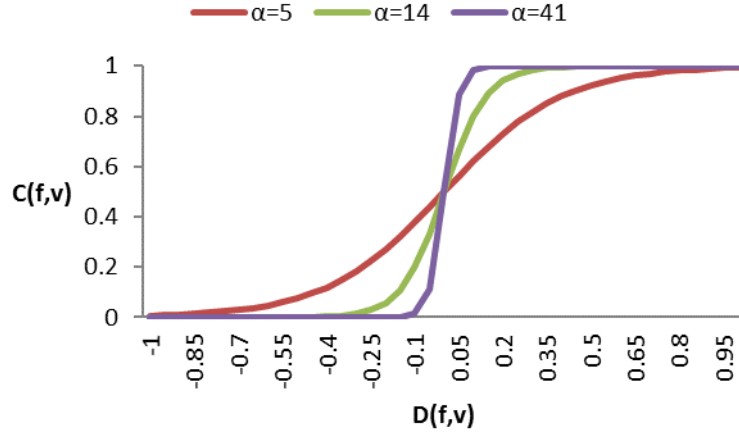


Fig. 2. —The credibility ( $y$ -axis) agent  $f$  gives to  $v$  depends on  $f$ 's difference ( $x$ -axis) to  $v$  for three values of parameter  $\alpha$  (different-colored lines)

#### *Farming strategy change.*

An agent changes its farming strategy according to its satisfaction evaluations with its current strategy ( $I_C$ ) and with the alternative one ( $I_A$ ). If an agent is in a stable state (its confirmation duration  $DC > \text{threshold } TD$ ) and it is still dissatisfied with its current strategy ( $I_C < \text{threshold } TA$ ), it will consider an alternative one. If the agent is dissatisfied long enough (its dissatisfaction duration since being stable  $DD > TD$ ) and its satisfaction evaluation of the alternative is better enough than that with its current one ( $I_A > I_C(1 + \text{threshold } TO)$ ), it will change strategy. As stated in equation (1), satisfaction  $I$  with a strategy is the average sum of the related attitude  $A$  and subjective norm  $SN$ .

In equation (1), attitude ( $A_S$ ) represents an agent's personal view of the difference between its experience and the (potential) outcome of evaluated strategy  $S$ . The agent  $f$ 's experience is its average outcome on the farm ( $\overline{T_{C,0}}, \overline{T_{C,1}}$ ) with its current farming strategy ( $S^f$ ) in memory ( $\mathcal{M}$ ). It is computed like this:

$$\overline{T_{C,i}} = \frac{\sum_{t \text{ and } S^t = S^f}^M T_i^t}{Nb(S^t = S^f)} \quad (6)$$

The evaluated outcome depends on the strategy to be evaluated. For agent  $f$ 's current farming strategy evaluation, the evaluated outcome is  $f$ 's current outcome ( $T_i^f$ ).

Agent  $f$ 's attitude toward the current farming strategy ( $A_C$ ) is like this:

$$A_C^f = \sum_{i=1}^2 (W_i^f (T_i^f - \overline{T_{C,l}^f})) \quad (7)$$

If an agent's outcome on its farm changes and this change is considered better than its experience,  $A_C$  will be positive and strengthen the agent's decision to keep its current strategy. Otherwise,  $A_C$  will be negative and may influence  $I_C$ . Then the agent may be dissatisfied and evaluate  $I_A$ .

For agent  $f$ 's evaluation of an alternative farming strategy, the evaluated outcome is the average outcome ( $\overline{T_{A,0}^f}, \overline{T_{A,1}^f}$ ) of other agents having similar characteristics as  $f$  but applying the alternative. The similarity is defined by a function  $Y$  over the farm's characteristics and is compared with a distance threshold ( $simi$ ).  $Y$  is designed in the model's implementation (see 2.2). The evaluated outcome is computed as follows:

$$\overline{T_{A,l}^f} = \frac{\sum_{Y_v^f < simi \text{ and } S^v \neq S^f} T_i^v}{Nb(Y_v^f < simi \text{ and } S^v \neq S^f)} \quad (8)$$

If there is no corresponding peer (no other agents similar to  $f$  and applying the alternative strategy), agent  $f$  will search the media for a stereotypical farm as the alternative.

$$\overline{T_{A,l}^f} = T_{model,i}^f \quad (9)$$

Therefore, agent  $f$ 's attitude toward an alternative is:

$$A_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 (W_i^f (\overline{T_{A,l}^f} - \overline{T_{C,l}^f})) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

Another component of satisfaction: the subjective norm, represents how an agent considers others' opinions on the evaluated farming strategy through outcomes, i.e. the strategy's implementation results. It is thus an agent's perceived difference between the outcome to be evaluated and the average of other agents' outcomes.

For agent  $f$ 's evaluation of current farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_C^f = \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( T_i^f - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f T_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) \quad (11)$$

An agent will be socially satisfied if it perceives that other agents, especially those to whom it lends great credibility ("important others"), consider it as a 'good farmer'. The agent may be so satisfied to have a good social image that it will never consider a major change. Otherwise, if the agent feels socially bad, it may try to become more similar to others in the group or to change of group. This can be done with a change of strategy.

For the evaluation of an alternative farming strategy, the subjective norm is:

$$SN_A^f = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_C^f > TA) \\ \sum_{i=1}^2 \left( W_i^f \left( \overline{T_{A,i}^f} - \frac{\sum_{v \neq f}^N (C_v^f T_i^v)}{\sum_{v \neq f}^N C_v^f} \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

If in other agents' opinions, especially those to whom agent  $f$  lends great credibility ("important others"), the alternative is not better, then it is judged not good enough to improve the situation. Agent  $f$  will tend to keep its current strategy. Otherwise, the agent's subjective norm strengthens its intention to change its strategy.

If an agent changes its strategy, it also changes the importance given to each dimension of practice. The parameter  $W$  is the conventional farmers' initial importance given to the productivity dimension.

$$\text{For conventional agents: } W_0 = W; W_1 = 1 - W \quad (13)$$

$$\text{For organic agents: } W_0 = 1 - W; W_1 = W \quad (14)$$

*Practice update.*

As farmers co-construct their practices (Darré 1985), at each time  $t$ , a farmer agent updates its practice by copying the performance of its credible peers with a similar farm.

$$\Delta P_i^f = \frac{\sum_{v \neq f}^N \text{and } Y_v^f < \text{simi} C_v^f (P_i^v - P_i^f)}{\sum_{v \neq f}^N \text{and } Y_v^f < \text{simi} C_v^f} \quad (15)$$

Both dimensions of practice are between 0 and 1. A farmer's productivity performance is also limited by the reference  $R$  on its farm.

$$P_0^{f,t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } (P_0^{f,t} + \Delta P_0^f < 0) \\ R^f & \text{if } ((P_0^{f,t} + \Delta P_0^f) > R^f) \\ P_0^{f,t} + \Delta P_0^f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

A special case: if an agent  $f$  looks for an alternative and cannot find a similar peer applying an alternative strategy, it will look for an alternative in the media. If after evaluation, agent  $f$  adopts the alternative in the media, it will also copy the practice.

### The design of use cases based on agricultural data

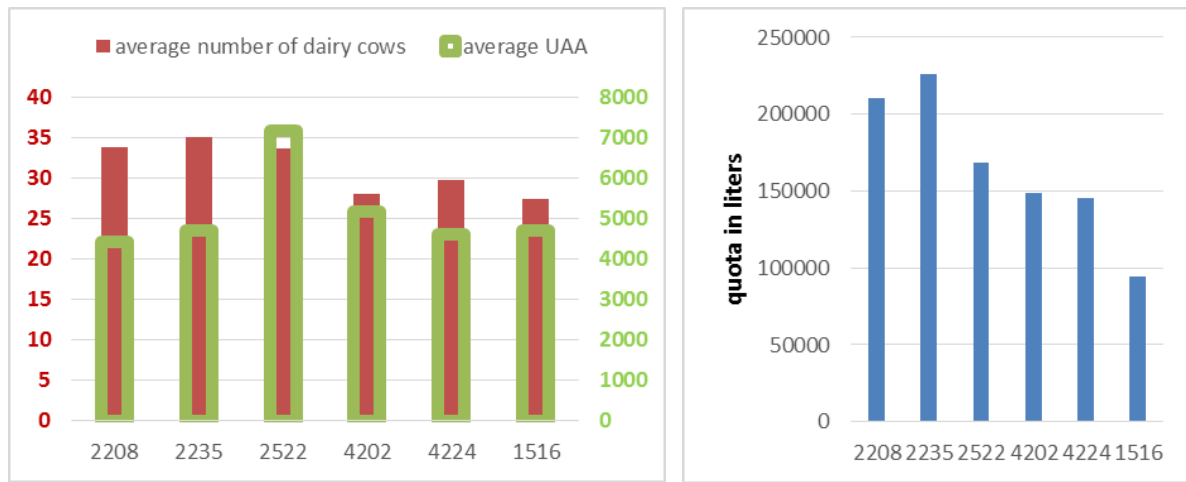


Fig. 3. Average number of dairy cows  $NC$ , average  $UAA$  (in are) and  $quota$  (in liters) for the six chosen French "cantons".

The model is implemented on data from Agricultural General French Census (RGA 2000) about six French "cantons" with strong variations in terms of practice intensity and homogeneity: 1516, Ruynes-en Margeride; 4202, Boën; 4224, Saint-Genest-Malifaux; 2208, Chèze; 2235, Plouagat; 2522, Quingey. The initialization of population distributions in each "canton" is deterministic. For sake of simplicity and according to expertise and literature (J. Pavie et al. 2012; Chambaut et al. 2011), a farmer's farm and practice are defined by three variables: the utilized agricultural area ( $UAA$ ), the number of dairy cows ( $NC$ ), and the quota ( $Q$ ) which is a synthetic indicator of the farm's maximum milk volume. Figure 3 shows the average value of these variables in each

“canton”.

The degree of “intensity” is measured as the average  $UAA$ /average  $NC$ . “Cantons” 2208 and 2235 are the biggest producers and most intensive, while 4202, 4224 and 1516 have the least milk production. Despite its average milk production, 2522 is the most extensive “canton”, also having the largest average  $UAA$ .

### Farmer.

A farmer agent is designed by its practice with productivity performance  $P_0$  and environmental performance  $P_1$  designed from data.  $P_0$  is directly deduced from the farm’s initial characteristics and corresponds to the normalized average milk volume produced by one cow in one year. For farmer  $f$ , at the initial time  $t=0$ ,  $P_0^f = Q^f / NC^f$ . At every time  $t$ ,  $P_1^f = T_1^f / SAU^f$ , the equation (15) is only used to update  $P_0^f$ .

The  $Y$  function telling how two farmers are judged similar is based on a similarity of their farms’ characteristics regarding  $UAA$  and  $NC$ . For agent  $f$ , agent  $v$  is a similar peer if  $\frac{|UAA^f - UAA^v|}{UAA^f} < simi$  and  $\frac{|NC^f - NC^v|}{NC^f} < simi$ . The threshold  $simi$  is a parameter and supposed as 0.1 in the model.

### Farm.

Each farm is initialized by the crossed distribution of discretized utilized agricultural areas ( $UAA$ ) and quotas ( $Q$ ) of its “canton” from the RGA 2000. They remain constant all along the simulation. The number of dairy cows ( $NC$ ) is computed from a law extracted from data (with a regression  $r^2 = 0.9563$ ):

$$NC = 0.2463 UAA + 0.0001106 Q \quad (17)$$

From databases regarding farmers’ production and various sources<sup>10</sup>, a law is built to

---

<sup>10</sup>[http://www.cantal.chambagri.fr/fileadmin/documents/Internet/Autres%20articles/pdf/2014/Bio/ABBL\\_2008-2012.pdf](http://www.cantal.chambagri.fr/fileadmin/documents/Internet/Autres%20articles/pdf/2014/Bio/ABBL_2008-2012.pdf)

<http://www.agrobio-bretagne.org/>

compute the potential maximum milk production of an organic farm starting with the conventional strategy, knowing its initial productivity performance  $P_0$  after the normalization and  $P_0'$  before the normalization. A farm  $f$ 's normalized reference  $R$  and reference  $R'$  before the normalization are computed as follows:

$$\text{For a conventional farm: } R = P_0(t = 0) \quad (18)$$

$$\text{For an organic farm: } R' = 0.6046 P_0(t = 0) + 1913 NC \quad (19)$$

The environmental amenities outcome  $T_I$  is computed at every time by an aggregated function of literature (J. Pavie et al. 2012; Chambaut et al. 2011). It considers mineral impacts and energy consumption related to the total milk production and the farm's agricultural surface:

$$\text{For a conventional farm: } T_I = (53 UAA + 2.918 T_0)/2 \quad (20)$$

$$\text{For an organic farm: } T_I = (-10 UAA + 2.588 T_0)/2 \quad (21)$$

Using French dairy farms' database in RGA 2000,  $R'$  is to be normalized between 0 (very low production) and 1 (very high production). 53  $UAA$ , 2.918  $T_0$ , -10  $UAA$  and 2.588  $T_0$  are normalized values between 0 and 1. The normalization is:

$$x = (x' - \min) / (\max - \min) \quad (22)$$

With:  $\min$  = minimum real value in the database;  $\max$  = maximum real value in the database;  $x$  is the normalized value of real value  $x'$ .

## Media.

We use laws extracted from data to design farmers' alternative models. When a conventional farmer  $f$  wants to evaluate the organic strategy at time  $t+1$ , it computes  $T_0'(t+1)$  as follows and its related  $T_I'(t+1)$  with the equation (20). Noting that  $T_0'$  is the farmer's real productivity outcome on the farm (before the normalization).

$$T_0'(t+1) = 0.6046 T_0'(t) + 1913 NC \quad (23)$$

When an organic farmer  $f$  wants to evaluate the conventional strategy at time  $t+1$ , it computes  $T_0'(t+1)$  as follows and its related  $T_I'(t+1)$  with the equation (21).

$$T_0'(t+1) = (T_0'(t) - 1913 NC) / 0.6046 \quad (24)$$



## Experimental design

(Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) has studied 625 parameter sets identifying all the qualitative behaviors of the model to diagnose reasons for the absence of conversion. This work aims to study conversion in six different French "cantons" using the same 625 parameter sets varying the main parameters:  $\alpha$  (slope of logistic function) from 5 to 41,  $TA$  (threshold to consider an alternative) from 0.41 to 0.49,  $TO$  (threshold to consider an alternative) from 0.01 to 0.09,  $W$  (importance given to the dimension representing farming strategy) from 0.6 to 1,  $TD$  (threshold for two counters of duration) is kept constant with the value 5. Agents' memory is also kept constant as 10 years. The distance for similarity,  $sim_i$ , values 0.1. The evolution of each "canton" with a population of 100 conventional farmers (no organic farmers at the initialization) is simulated for 30 years and replicate 100 times.

## Model behavior

### The adoption rate and "cantons"

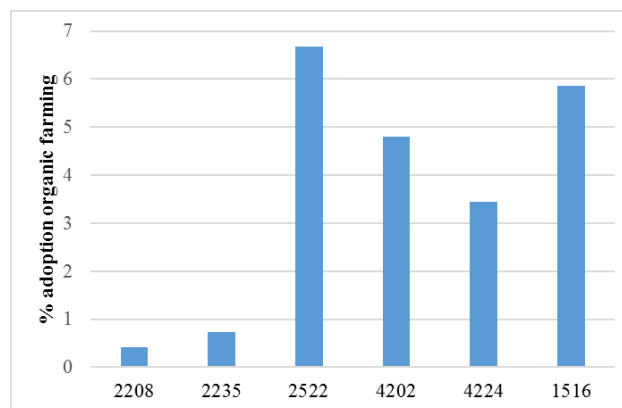


Fig. 4. - Average percentage of organic farming adoption according to "canton" over 625 sets of parameters and their related 100 replications

At the initialization, each "canton" has no organic farm. Figure 4 shows that farms in different "cantons" have different adoption percentages after 30 years. "Canton" 2522 convert the most, followed by 4202 and 1516, and then 4224. 2208 and 2235 convert the least. As these six "cantons" have different farm characteristics. The population

distribution is studied to learn more about the conversion rate.

**The characteristics of “cantons”**

As shown in “Materials and methods” section, each farm has a couple of outcomes (total production) on two dimensions: productivity outcome ( $T_0$ ) and environmental outcome ( $T_1$ ). These two values indicate directly a farm’s utilized agricultural area ( $UAA$ ) and quota ( $Q$ ) which are constant characteristics along the simulation. With another constant characteristic on the farm: number of cows ( $NC$ ), a farmer’s initial practice performance: productivity performance ( $P_0$ ) and environmental performance ( $P_1$ ) are also defined. In figure 5, for each canton, its average initial  $T_0$  and  $T_1$  are shown on the left; its average initial  $P_0$  and  $P_1$  are shown on the right. The black lines in each histogram show the standard deviation.

Consistently with figure 3, figure 4 and 5 show that “cantons” adopting the least: 2208 and 2235, are the most intensive and productive (having the smallest  $UAA/NC$  and the largest initial  $T_0$ ). They are followed by 4224, 4202 and 1516, which have the largest initial environmental outcome  $T_1$  and lower productivity outcome  $T_0$ . The “canton” with the most adoption: 2522, is the most extensive (figure 3), but having the worst initial environmental performance  $P_1$  (figure 5). Its outcomes:  $T_0$  and  $T_1$  are medium.

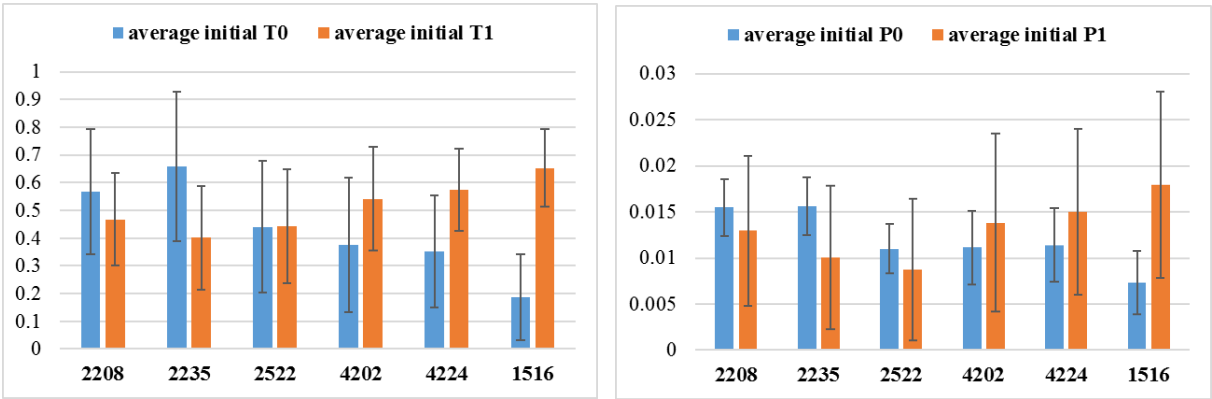


Fig. 5. – Average of initial  $T_0$  and  $T_1$  (left panel) and  $P_0$  and  $P_1$  (right panel) in each “canton”. Error bars indicates “more or less” one standard deviation.

The credibility a farmer gives to another depends on their relative outcomes ( $T_0$  and  $T_1$ ). The social evaluation of satisfactions depends also on their relative  $T_0$ ,  $T_1$  and on

the outcomes of its "similar" farmers (equation 11 and 12). Table 1 shows the initial farm distributions of each "canton" in terms of  $T_0$  and  $T_1$ .

Table 1. Initial farm distributions according to "cantons" and farm types in terms of  $T_0$  or  $T_1$

initial $T_0$ canton	2208	2235	2522	4202	4224	1516	initial $T_1$ canton	2208	2235	2522	4202	4224	1516
0.05	3	3	5	16	17	37	0.85	3	3	3	13	14	19
0.15	3	2	12	6	5	27	0.75	5	5	7	5	7	29
0.25	4	7	14	22	21	17	0.65	14	5	15	22	21	21
0.35	8	2	16	14	18	9	0.55	25	22	16	19	26	14
0.45	25	21	15	18	12	5	0.45	24	19	23	24	23	10
0.55	18	12	16	9	14	2	0.35	15	7	10	4	6	5
0.65	11	6	10	3	10	2	0.25	5	23	11	6	1	2
0.75	9	3	2	2	2	1	0.15	7	14	5	4	2	0
0.85	8	10	2	6	1	0	0.05	2	2	10	3	0	0
0.95	11	34	8	4	0	0							

"Cantons" with the most converted agents: 2522, has medium average  $T_0$  and  $T_1$  while its distribution is diverse. The other "cantons" have more concentrated distributions. "Cantons" 2208 and 2235 have few farms with low  $T_0$ . "Cantons" 4224, 4202 and 1516 have numerous farms with high  $T_1$  and very few farms with low ones.

### Adoption rate and farm types

The adoption rate varies with "cantons". In fact, it varies also with initial outcome types in terms of productivity outcome ( $T_0$ ) and environmental outcome ( $T_1$ ).

Table 2. Average percentage of organic farming adoption according to "canton" and farm types in terms of  $T_0$  or  $T_1$  over 625 sets of parameters and their related 100 replications

initial $T_0$ canton	2208	2235	2522	4202	4224	1516	initial $T_1$ canton	2208	2235	2522	4202	4224	1516
0.05	0.29	0.36	0.93	2.37	2.26	4.19	0.85	0.29	0.36	0.25	1.41	1.39	1.16
0.15	0.06	0.07	1.91	0.68	1.05	1.98	0.75	0.08	0.15	0.93	1.07	1.07	2.69
0.25	0.02	0.26	1.91	1.75	0.65	1.28	0.65	0.08	0.02	2.12	1.34	0.46	2.27
0.35	0.02	0.01	2.02	0.78	0.32	0.55	0.55	0.02	0.27	2.07	1.63	1.48	1.18
0.45	0.06	0.17	1.04	0.72	0.17	0.25	0.45	0.01	0.17	1.87	0.98	0.26	0.96
0.55	0.11	0.07	1.4	0.33	0.16	0.15	0.35	0.11	0.01	1	0.15	0.07	0.28
0.65	0.02	0.01	0.59	0.06	0.12	0.16	0.25	0	0.02	1.31	0.23	0.03	0.05
0.75	0	0	0.1	0.05	0	0.02	0.15	0.01	0.01	0.37	0.05	0	0
0.85	0	0.01	0.06	0.1	0.03	0	0.05	0	0.01	0.29	0	0	0
0.95	0.01	0.04	0.23	0.01	0	0							

Generally, the probability to convert is high for cases with numerous farms at the initialization. Farms with a low initial  $T_0$  or a high initial  $T_1$  (first lines in Table 2) convert more than others. However, for the highest initial  $T_1$ , the conversion rate is not always the largest (except in 2208 and 2235).

The distributions of adoption vary with "cantons". 2522 has a disperse distribution and its adoptions center on medium outcomes. 4202, also having a disperse distribution, its adoptions are rather in cases with high  $T_1$  and low  $T_0$ . 1516 and 4224 have a centered distribution and their adoptions are rather in cases with very low  $T_0$  and high  $T_1$ .

"Cantons" converting the least, exhibit distribution profiles with one higher density for medium  $T_0$  and another one for the highest  $T_0$ . They are rather homogeneous in  $T_1$ .

## **Discussion and conclusion**

(Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) and (Huet et al. 2018) argue that the organic farming adoption is strongly influenced by the imitation of "important others" practices and is very sensitive to the distance between farms. However, the model proposed and studied in (Xu, Huet, Poix, Boisdon, et al. 2018) considers only prototypical populations and points out the reasons for non-adoption of organic farming. In this paper, we focus on the impact of population characteristics on the adoption degree. In this work, the model is explored further by an initialization with six French "cantons" (about 100 dairy farmers) varying in their farm type distributions from the French RGA 2000.

At farm level, we have observed that farms with low total milk production and high total environmental production convert more than others. Such farms are said having extensive practices and being more susceptible to convert according to experts. Approximately one-third of global land under organic production is located in unfavorable areas where smallholder farmers, who often lack access to insurance or inexpensive credit, dominate agricultural production (IFOAM 2017). Keeping their extensive practices, or even increasing this degree of intensity, by adopting for example organic farming, can be beneficial to eliminate their reliance on expensive, fossil fuel-derived chemical inputs (Pimentel et al. 2005; Uematsu et Mishra 2012). This increasing autonomy is taken into account in our environmental outcome which considers the

decreasing of inputs and energy consumption.

At the regional level, intensive regions convert less than extensive ones, especially those with not very good environmental outcomes. Indeed, we notice that the most intensive "cantons" almost do not convert (those located in the Brittany region). They are more likely to be satisfied with their current situation and do not consider a major change. Despite of having the least productivity outcomes, "cantons" 1516, 4202 and 4224 do not have the most conversion because of their already good environmental outcome. The adoption of organic farming cannot bring them much environmental gain. On the contrary, the most extensive "canton", 2522 has the largest adoption rate. It is less productive than farms in the Brittany region (2238 and 2235), but more than other "cantons". Its environmental production is not as good as the other extensive "cantons" (1516, 4202 and 4224). Thus, most farms from this "canton" can poorly decrease their productivity outcome and increase much their environmental outcome with the conversion to organic farming. This result can sound strange but it has been pointed out by (Sutherland 2011) that most farmers having already chosen low-input strategy (i.e. strongly extensive) do not convert since they cannot improve more their environmental impact. The only reason they can convert is for economic purpose in case of strong crisis. We also show that more diverse regions, having high densities for different farm types, tend to adopt more but this point deserves more investigations. In fact, our model can also be applied to other contexts, for example, other forms of adoption in agriculture.

However, we cannot compare our adoption rates for the chosen French "cantons": firstly, because the data are not so easy to obtain; secondly very important dynamics are not present in the model (the incertitude, difficulty...) and make the comparison having no sense. Adding to the model external factors such as economic crisis, but also demographic evolution implying an increasing average farm sizes, are the next steps for research about this model.

## Reference

- Ajzen, Icek, and Martin Fishbein. 1975. *Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Barbier, Cécile, Marianne Cerf, and Jean-Marie Luson. 2015. "Cours de Vie d'agriculteurs Allant Vers l'économie En Intrants: Les Plaisirs Associés Aux Changements de Pratiques." *Activités* 12 (12–2).
- Burton, Michael, Dan Rigby, and Trevor Young. 2003. "Modelling the Adoption of Organic Horticultural Technology in the UK Using Duration Analysis." *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 47 (1): 29–54.
- Chambaut, Hélène, Erika Moussel, Jérôme Pavie, Jean Paul Coutard, Bertrand Galisson, Jean-Louis Fiorelli, and Joannie Leroyer. 2011. "Profils Environnementaux Des Exploitations d'élevage Bovins Lait et Viande En Agriculture Biologique et Conventiennelle: Enseignements Du Projet CedABio." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*, 53–56.
- Darnhofer, Ika, Walter Schneeberger, and Bernhard Freyer. 2005. "Converting or Not Converting to Organic Farming in Austria:Farmer Types and Their Rationale." *Agriculture and Human Values* 22 (1): 39–52.
- Darré, Jean-Pierre. 1985. *La Parole et La Technique: L'univers de Pensée Des Éleveurs Du Ternois*. Vol. 10. Editions L'Harmattan.
- Dedieu, Marie-Sophie, Alice Lorge, Olivier Louveau, and Vincent Marcus. 2017. "Les Exploitations En Agriculture Biologique: Quelles Performances Économiques?"
- Dowd, Anne-Maree, Nadine Marshall, Aysha Fleming, Emma Jakku, Estelle Gaillard, and Mark Howden. 2014. "The Role of Networks in Transforming Australian Agriculture." *Nature Climate Change* 4 (7): 558–63.
- Fairweather, John R., Lesley M. Hunt, Chris J. Rosin, and Hugh R. Campbell. 2009. "Are Conventional Farmers Conventional? Analysis of the Environmental Orientations of Conventional New Zealand Farmers." *Rural Sociology* 74 (3): 430–454.
- Goldstone, Robert L., and Marco A. Janssen. 2005. "Computational Models of Collective Behavior." *Trends in Cognitive Sciences* 9 (9): 424–30.
- Grimm, Volker. 1999. "Ten Years of Individual-Based Modelling in Ecology: What Have We Learned and What Could We Learn in the Future?" *Ecological Modelling* 115 (2): 129–48.
- Grimm, Volker, Uta Berger, Finn Bastiansen, Sigrunn Eliassen, Vincent Ginot, Jarl Giske, John Goss-Custard, et al. 2006. "ODD Protocol : A Standard Protocol for Describing Individual-Based and Agent-Based Models." *Ecological Modelling* 198 (1–2): 115–26.
- Huet, S., C. Rigolot, Q. Xu, Y. De Cacqueray-Valmenier, and I. Boisdon. 2018. "Toward Modelling of Transformational Change Processes in Farm Decision-Making." *Agricultural Sciences* 09 (03): 340–50.
- IFOAM, F. 2017. "The World of Organic Agriculture: Statistics & Emerging Trends 2017."
- Kaufmann, Peter, Sigrid Stagl, and Daniel W. Franks. 2009. "Simulating the Diffusion of Organic Farming Practices in Two New EU Member States." *Ecological Economics* 68 (10): 2580–93.
- Mintzberg, Henry, Duru Raisinghani, and Andre Theoret. 1976. "The Structure of 'Unstructured' Decision Processes." *Administrative Science Quarterly* 21 (2): 246.
- Öhlmér, Bo, Kent Olson, and Berndt Brehmer. 1998. "Understanding Farmers' Decision Making Processes and Improving Managerial Assistance." *Agricultural Economics* 18 (3): 273–90.
- Pavie, J., H. Chambaut, E. Moussel, J. Leroyer, and V. Simonin. 2012. "Évaluations et Comparaisons Des Performances Environnementales, Économiques et Sociales Des Systèmes Bovins Biologiques et Conventiennels Dans Le Cadre Du Projet CedABio." *Renc. Rech. Ruminants* 19: 37–40.
- Pavie, Jérôme, Anne-Charlotte Dockès, and Laurence Echevarria. 2002. *Etude Des Freins à La Conversion*

- à l'agriculture Biologique Des Exploitations Laitières Bovines. Paris Cedex 12: Institut de l'Élevage.
- Pimentel, David, Paul Hepperly, James Hanson, David Douds, and Rita Seidel. 2005. "Environmental, Energetic, and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems." *BioScience* 55 (7): 573.
- Rickards, L., and S. M. Howden. 2012. "Transformational Adaptation: Agriculture and Climate Change." *Crop and Pasture Science* 63 (3): 240.
- Rigby, Dan, Trevor Young, and Michael Burton. 2001. "The Development of and Prospects for Organic Farming in the UK." *Food Policy* 26 (December): 599–613.
- Rogers, Everett. 1983. *Diffusion of Innovations*. 3rd ed. New York : London: Free Press ; Collier Macmillan.
- Sainte-Beuve, Jasmin, Douadia Bougherara, and Laure Latruffe. 2011. "Performance Économique Des Exploitations Biologiques et Conventionnelles: Levier Économique à La Conversion." 10p. in *Les Transversalités de l'agriculture Biologique Strasbourg*.
- Sutherland, Lee-Ann. 2011. "'Effectively Organic': Environmental Gains on Conventional Farms through the Market?" *Land Use Policy* 28 (4): 815–24.
- Sutherland, Lee-Ann, Rob J.F. Burton, Julie Ingram, Kirsty Blackstock, Bill Slee, and Nick Gotts. 2012. "Triggering Change: Towards a Conceptualisation of Major Change Processes in Farm Decision-Making." *Journal of Environmental Management* 104: 142–51.
- Uematsu, Hiroki, and Ashok K. Mishra. 2012. "Organic Farmers or Conventional Farmers: Where's the Money?" *Ecological Economics* 78 (June): 55–62.
- Xu, Q., S. Huet, C. Poix, I. Boisdon, and G. Deffuant. 2018. "Why Do Farmers Not Convert to Organic Farming? Modelling Conversion to Organic Farming as a Major Change." *Natural Resource Modeling*.

## **Annexe C. Calcul des productions, des performances et du nombre de vaches**

L'étude de la littérature et l'analyse des données nous ont permis d'identifier des relations quantitatives utiles au calcul des variables du modèle pour les éleveurs laitiers français.

### **Relation entre la performance et le résultat total de chaque dimension de pratique**

Pour la dimension productive, la performance est la production moyenne d'une vache sur une exploitation. Le résultat total productif est la production totale sur l'exploitation.

$$P_0 = T_0/VL \quad (1)$$

$V_L$  est le nombre de vaches laitières sur l'exploitation.

Pour la dimension environnementale, la performance est la moyenne du résultat total environnemental sur la  $SAU$  (surface agricole utile). Le résultat total environnemental est l'impact environnemental de l'exploitation.

$$P_1 = T_1/SAU \quad (2)$$

### **Calcul du nombre de vaches sur une exploitation**

Le nombre de vaches d'une exploitation,  $V_L$ , peut être approximé par la surface agricole utile,  $SAU$ , et le quota,  $Q$  de cette exploitation (approximation réalisée sur la base des données du RGA 2000) :

$$V_L = 0.2463 SAU + 0.0001106 Q \quad (r^2 = 0.9563) \quad (3)$$

Le nombre de vaches que l'éleveur peut élever sur une exploitation est fortement lié à la surface et au quota de l'exploitation. Plus la surface de l'exploitation est grande et le quota est élevé, plus l'exploitation peut avoir de vaches.



## Calcul du résultat productif d'une exploitation conventionnelle et d'une exploitation biologique

Comme montré dans le modèle théorique, lors de la conversion à l'agriculture biologique, la performance productive peut être diminuée. Après avoir collecté des données sur la comparaison de la production des éleveurs français, nous avons établi une relation entre la performance de production en conventionnel ( $P_0^C$ ) et en AB ( $P_0^B$ ).

$$P_0^B = 0.6046 P_0^C + 1913 \text{ VL} \quad (4)$$

(sources des données : suivi d'élevages du Massif Central [I. Boisdon, Vet AgroSup], différences de résultats 5 ou 10 ou 14 ans après la conversion, et données issues de <http://www.tech-n-bio.com/>, FRAB, IDELE <http://www.cantal.chambagri.fr/fileadmin/documents/Internet/Autres%20articles/pdf/2014/Bio/ABBL2008-2012.pdf>, et (Madeline, Pavie, Moussel, et al. 2013)).

## Relation entre la production environnementale, volume de lait produit et nombre de vaches pour les deux stratégies

Les indicateurs d'impacts environnementaux sur des exploitations conventionnelles et biologiques ont été étudiés dans le cadre du projet CedABio à travers des démarches d'analyse de cycle de vie (Chambaut et al. 2011; J. Pavie et al. 2012; Madeline, Pavie, Moussel, et al. 2013). Ces études mettent en avant de nombreux impacts environnementaux et nous n'avons retenu pour notre modélisation que les impacts « minéraux » et « énergie consommée ». Ces deux impacts sont en effet approximables à partir des données disponibles dans nos populations virtuelles.

- ***Bilan des minéraux en conventionnel versus biologique***

(Madeline, Pavie, Moussel, et al. 2013) utilise la méthode du bilan pour déterminer les impacts différencié agriculture conventionnel versus biologique. La méthode du bilan des minéraux repose sur l'écart mesuré entre les entrées et les sorties d'éléments minéraux sur l'exploitation. Les flux d'entrée sont liés aux engrais, aliments, fourrages achetés, déjections importées ainsi qu'à la fixation symbiotique. Les bilans sont faits sur des minéraux comme N (azote), P (phosphore), K (potassium). D'une façon très générale, les bilans sont nettement inférieurs en AB qu'en conventionnel. Cela

s'explique par de faibles achats d'intrants (engrais et aliments). Parmi ces minéraux, l'impact du minéral N est le plus fort. Dans le modèle, nous n'avons donc intégré que l'impact de N en ce qui concerne l'impact des minéraux. Le niveau de productivité à l'hectare (kg N/ha SAU) influence fortement l'excès d'azote au bilan en conventionnel (53 SAU selon (Madeline et al. 2013), tableau 10). Ce n'est absolument pas le cas en AB (-10 SAU selon (Madeline et al. 2013), tableau 10).

- ***Consommations d'énergie en conventionnel versus biologique***

Au niveau de la consommation d'énergie exprimée en mégajoules par unité produite, les exploitations biologiques, bien que moins productives, affichent toujours de plus faibles niveaux que les exploitations conventionnelles. L'énergie consommée pour produire 1000 litres de lait est de 2588 MJ en AB (soit 2,588 pour 1 litre de lait produit), contre 2918 MJ en conventionnel (soit 2,918 pour 1 litre de lait produit).

- ***Calcul de la production environnementale dans le modèle***

L'impact des minéraux et l'impact de l'énergie consommée sont normalisés entre 0 et 1. Le résultat total environnemental est la moyenne de ces deux composants normalisés.

Pour une exploitation conventionnelle,

$$T_1^C = (53 \text{ SAU} + 2.918 T_0^C)/2 \quad (5)$$

Pour une exploitation en AB,

$$T_1^B = (-10 \text{ SAU} + 2.588 T_0^B)/2 \quad (6)$$