

Prospective sur l'évolution des systèmes agricoles sur les territoires bretons en lien avec la reconquête de la qualité de l'eau - Etude des impacts de ces évolutions sur les revenus, les emplois directs et induits

Rapport d'étude coordonnée par Alexandre Gohin

UMR SMART LERECO AgroCampus Ouest INRA

Avec les collaborations de François Bareille, Sylvain Cariou, Pierre Dupraz, Marc Nougier et Elodie Orban

Janvier 2020

Rapport final de l'étude cofinancée par le Creseb et l'Agence de l'eau Loire Bretagne. Les auteurs remercient les acteurs des territoires et les participants aux comités de pilotage pour toutes les remarques apportées à notre travail.

RESUME :

L'objectif général de cette étude est de quantifier économiquement différents scénarios prospectifs d'évolution des systèmes agricoles en lien avec la reconquête de la qualité de l'eau, sur les deux bassins versants du Couesnon et de la Haute Rance. Si la problématique de la qualité de l'eau n'est pas nouvelle, les impacts économiques n'ont pas été souvent quantifiés, tant en Bretagne que pour les deux territoires d'étude. Nous proposons de mesurer ces impacts économiques sur les exploitations agricoles et plus largement sur les filières agricoles avec le calcul des emplois directs (dans les exploitations), indirects (dans les entreprises amont et aval) et induits (dans les autres entreprises).

Une première partie fournit un état de l'art des modélisations économiques développées pour étudier cette complexe problématique. Les notions d'emplois directs, indirects et induits y sont explicitées.

La deuxième partie liste les données économiques disponibles sur les deux bassins d'étude. Cette disponibilité nous conduit à porter l'effort sur les prédominantes exploitations laitières.

La troisième partie décrit tout d'abord le modèle microéconomique développé qui explique les pratiques et motivations économiques de ces exploitations. Les résultats statistiques montrent que leurs achats d'intrants sont sensibles aux incitations économiques, avec par exemple plus d'achats d'aliments concentrés quand le prix du lait augmente. Au contraire leurs décisions d'assolement réagissent très peu. Est ensuite présenté le modèle macroéconomique qui capture les relations économiques entre les agriculteurs et les autres acteurs des territoires et permet de mesurer les conséquences de changement de pratiques sur les revenus, emplois directs et induits.

La quatrième partie fournit et analyse les résultats économiques des scénarios d'évolution des systèmes agricoles tels que définis par les acteurs des territoires. Tous les scénarios conduisent à des augmentations des revenus agricoles des exploitations laitières directement concernées. Quelles que soient les hypothèses de calcul, le scénario intensification de la production laitière conduit toujours au plus fort impact sur ces revenus. Par cet effet de création de richesse, tous les scénarios conduisent à des créations d'emploi, surtout induits dans les secteurs non agricoles et agroalimentaires. En revanche, les scénarios de changements de pratique agricole vers plus des systèmes moins 'intensifs' en intrants achetés conduisent à des pertes d'emploi dans les industries agroalimentaires, à l'amont et l'aval. De même, ces scénarios conduisent à une dégradation des bilans des minéraux dans les autres territoires bretons. Cette étude mesure donc des tensions entre des objectifs économiques et des objectifs environnementaux locaux (qualité de l'eau) et globaux (émissions de gaz à effet de serre).

Table des matières

Résumé :	2
Introduction : Contexte et objectifs	5
Première partie. La quantification des conséquences économiques de pratiques agricoles : présentation des méthodologies	8
1.1. La modélisation microéconomique à l'échelle des exploitations agricoles	10
1.1.a. Les principes de la programmation mathématique	11
1.1.b. Quelques résultats de modèles de programmation mathématiques	20
1.1.c. La validation statistique des modèles microéconomiques	22
1.1.d. Synthèse	27
1.2. La modélisation macroéconomique à l'échelle des territoires	28
1.2.a. Principes de la modélisation macroéconomique en équilibre partiel (EP)	29
1.2.b. Principes de la modélisation macroéconomique en équilibre général calculable (EGC) ...	30
1.2.c. Quelques résultats de modélisation macroéconomique au niveau des territoires	32
1.2.d. Synthèse	33
Deuxième partie. Les données	34
2.1. Présentation générale des zones d'étude	34
2.1.a. Le bassin versant du Couesnon	34
2.1.b. La Haute-Rance	35
2.2. Les bases de données mobilisables	37
2.2.a. Le recensement agricole	38
2.2.b. Le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)	47
2.2.c. L'enquête bassin versant	50
2.2.d. Enquête pratiques culturales	50
Troisième partie. Méthodologies	52
3.1. Modélisation économétrique des élevages laitiers	52
3.1.a. Les pratiques culturales	54
3.1.b. Les pratiques d'alimentation animale	62

3.1.c. La méthode statistique du maximum d'entropie généralisée.....	69
3.1.d. Modélisation micro-économétrique des exploitations laitières	73
3.1.e. Résultats de la modélisation microéconométrique des exploitations laitières	77
3.2. Modélisation macroéconomique en équilibre général calculable (EGC)	83
3.2.a. Les données	83
3.2.b. Caractéristiques générales du modèle EGC.....	86
Quatrième partie. Résultats des simulations de changement de pratiques.....	89
4.1. Impacts sur les revenus des exploitations laitières	90
4.2. Impacts sur les emplois indirects et induits.....	97
4.3. Discussion	99
Quelques références.....	101
Annexe : Description du modèle microéconomique FARMDYN.	103

INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS

Comme toutes les activités productives, les activités agricoles mobilisent différentes ressources (par exemple le sol, l'eau), facteurs de production (travail familial et/ou salarié, capital) et intrants (énergie, produits de la chimie) pour produire différents biens et services désirables (biens alimentaires, paysage) et indésirables (émissions de gaz à effet de serre, surplus d'azote). Depuis de nombreuses années, une préoccupation majeure des acteurs publics et privés, locaux et internationaux, est de promouvoir/mettre en œuvre des systèmes de production agricoles les plus vertueux sur les triples plans économiques, sociaux et environnementaux. De même qu'il n'existe aucune énergie miracle, il n'existe pas aujourd'hui pour tous les territoires une technologie agricole miracle qui ne générerait que des bénéfices marchands et non marchands, sans aucun coût pour les agriculteurs ou la société. Dès lors, un enjeu fort dans chaque territoire est de trouver la meilleure combinaison de technologies agricoles parmi celles aujourd'hui connues et aussi parmi celles pouvant être potentiellement envisagées à l'avenir. Cette étude s'inscrit dans cette problématique générale de la durabilité de l'agriculture. Elle porte sur les territoires du Couesnon et de la Haute Rance situés à l'Est de la Bretagne et se focalise sur la problématique de la qualité de l'eau.

L'eau est une ressource commune indispensable à la vie terrestre d'abord, mais aussi pour de nombreuses activités économiques (agriculture, construction, industries et services). L'action de la puissance publique est légitime pour une gestion optimale de la qualité et quantité de cette ressource commune. L'approvisionnement de l'eau étant essentiellement local en Bretagne comme en France, la gestion de sa qualité est en grande partie réalisée à l'échelle des bassins versants (BV). Cette gestion est réalisée par le biais de la co-construction des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) entre les divers acteurs locaux (élus, usagers, associations, représentants de l'Etat). Ces SAGE définissent les politiques relatives à la gestion de l'eau d'un ou plusieurs bassins versants. Ils sont ensuite approuvés et mis en place par l'Etat via la police de l'eau.

Les principales contraintes auxquelles font face les producteurs et utilisateurs d'eau dans ces deux territoires, et plus généralement en Bretagne, sont relatives à la pollution des aquifères et des cours d'eau. Ces pollutions peuvent provenir d'origines multiples (ménages, collectivités, entreprises). En Bretagne, les activités agricoles et tout spécialement les prédominantes activités d'élevage sont régulièrement accusées de contribuer fortement à cette pollution. La gestion des effluents d'élevage est en effet susceptible d'être à l'origine de fuites de minéraux vers les eaux souterraines et de surface. L'azote (N) a longtemps cristallisé l'essentiel des critiques. Le transfert de l'azote entre les différentes interfaces (air, surface, eau, sol) s'accompagne de transformations de l'azote qui, en fonction de sa forme (NOx), peut causer de réels problèmes sur la qualité de l'eau (acidification, eutrophisation, voire dystrophisation du milieu). Mais la pollution ne porte pas que sur l'azote et pour certains

territoires/bassins versants, les pollutions des aquifères et cours d'eau au phosphore et produits phytosanitaires peuvent même s'avérer potentiellement plus problématiques.

La Bretagne est évidemment concernée par les émissions d'azote vers l'eau puisqu'elle est la première région d'élevage française, produisant notamment plus de 60 % des porcs, 35 % des volailles et 20 % du lait français et ne détenant que 6% des surfaces agricoles françaises. En 2010, les concentrations moyennes en nitrates dans les eaux bretonnes aux niveaux des stations « bilan » étaient de 32,7 mg/L (avec même une moyenne annuelle de 69,4 mg/L pour l'une d'entre elles). En fait, 7% de ces stations ont eu une concentration moyenne en nitrates supérieures à 50mg/L et des dépassements temporaires au-delà de ce seuil existent pour nombre d'entre elles. Par ailleurs, le phénomène des algues vertes est largement médiatisé car apparaissant souvent à la période estivale.

La qualité des eaux bretonnes par rapport aux différents minéraux et produits phytosanitaires n'est cependant pas une fatalité. Au contraire, elle s'est améliorée depuis une vingtaine d'années, en partie grâce à des actions entreprises dans les stations urbaines d'épuration et les exploitations agricoles. Par exemple, la généralisation des techniques d'alimentation multi-phase dans les exploitations porcines a contribué à une réduction de l'ordre de 20% des quantités d'azote dans leurs effluents. Malgré ces progrès, les débats restent toujours vifs entre les différents acteurs de l'eau sur l'efficacité des mesures adoptées et financements attribués jusqu'à présent. Les débats portent aussi sur le futur et tout son lot d'incertitudes. Alors que la directive européenne cadre sur l'eau impose aux pouvoirs publics de nouvelles exigences avec un retour au bon état écologique pour près de 100% des aquifères et cours d'eau à l'horizon 2027 (contre près des deux tiers pour 2015), la suppression des quotas laitiers en 2015 peut potentiellement conduire à une augmentation des productions animales et donc, à système d'élevage inchangé, une augmentation des effluents d'élevage.

Dans ce contexte, l'objectif général de cette étude est de quantifier les impacts économiques de différents scénarios prospectifs d'évolution des systèmes agricoles en lien avec la reconquête de la qualité de l'eau. Si cette problématique n'est pas nouvelle, ces impacts n'ont pas été souvent quantifiés à notre connaissance, tant en Bretagne que pour les deux territoires d'étude, dans le passé ni récemment. La mesure de ces impacts économiques soulève en effet de multiples défis que cette étude cherche à résoudre partiellement en adoptant un cadre pluridisciplinaire et en impliquant les différents acteurs de l'eau (publics/privés). Nous proposons de mesurer ces impacts économiques sur les exploitations agricoles et plus largement sur les filières agricoles et plus généralement sur les économies des territoires volontaires. Une question récurrente dans ces débats est en effet de mesurer les conséquences en amont et en aval et non seulement sur les exploitations agricoles. Par ailleurs, nous proposons de calculer les impacts sur différentes variables économiques clés que sont les chiffres d'affaires, les valeurs ajoutées, les revenus des acteurs économiques. Nous incluons aussi

les impacts en termes d'emplois directs (dans les exploitations), indirects (dans les entreprises amont et aval) et induits (dans les autres entreprises).

Ce rapport est structuré de la manière suivante. Nous expliquons dans une première partie les méthodes traditionnellement développées pour quantifier les conséquences économiques de changements de pratiques agricoles. Nous présentons dans une deuxième partie les sources de données utilisées. Dans une troisième partie, nous détaillons les caractéristiques des modèles¹ économiques spécifiquement construits dans cette étude. La quatrième partie est consacrée à l'analyse des impacts économiques des scénarios prospectifs définis par les acteurs des territoires.

¹ Le terme « modèle » doit être compris comme un ensemble de relations mathématiques visant à capter la complexité de l'objet d'étude, et non comme une ferme « modèle » lorsque l'on parle de modèle économique agricole.

PREMIERE PARTIE. LA QUANTIFICATION DES CONSEQUENCES ECONOMIQUES DE PRATIQUES AGRICOLES : PRESENTATION DES METHODOLOGIES

L'activité agricole a toujours différé des autres activités économiques à plusieurs titres. Sur le plan environnemental, une caractéristique fondamentale de l'activité agricole (et forestière) est sa forte dépendance à la terre, qu'elle soit directe pour les productions végétales ou indirectes pour les productions animales dites « hors sol » (via l'alimentation des animaux ou la gestion des effluents). La terre est un facteur de production très particulier car immobile (à l'inverse les machines/bâtiments sont mobiles), vivant (présence de microfaunes/micro-organismes) et avec des propriétés (structure, texture) hétérogènes évoluant très lentement dans le temps (à l'inverse, les propriétés des machines/bâtiments agricoles et non agricoles évoluent très vite, comme l'illustre le développement d'agriculture de précision). Dès lors, les interactions entre les activités agricoles (et forestières) et « l'environnement » sont beaucoup plus complexes que pour les autres activités économiques. Par exemple, les émissions potentielles de gaz à effet de serre, de nutriments ou de produits phytosanitaires dans le sol, l'eau ou l'air dépendent des processus biologiques complexes, avec une forte variabilité spatiale et temporelle.

Sur le plan économique, le secteur agricole est caractérisé par l'existence d'entreprises nombreuses et surtout très diverses. Elles sont souvent de taille modeste relativement aux entreprises dans les autres secteurs d'activité. Que cela soit en Bretagne, en France ou en Europe, les exploitations sont jusqu'à récemment majoritairement familiales avec un recours limité à plusieurs salariés. Au-delà de leur taille mesurée en nombres d'actif ou en hectares, les exploitations agricoles sont aussi très différentes les unes des autres dans leur choix productif (monoproduction versus multi-production, productions végétales versus animales), de commercialisation (vente circuits courts versus longs), de techniques de production (par exemple, labour versus non labour en production végétale, recherche d'autonomie fourragère versus achat de concentrés en production animale), de systèmes de production (agriculture « conventionnelle » versus biologique). Même si le nombre d'exploitations agricoles ne cessent de décroître dans de nombreuses régions, elles sont toujours très diverses (par exemple, en termes d'acteurs détenant les capitaux mobilisés dans les exploitations agricoles).

Du fait de ces particularités économiques et environnementales, le développement d'approches spécifiques est essentiel pour quantifier de manière pertinente différents enjeux agri-environnementaux. Le développement de ces approches constitue depuis toujours un objectif majeur en économie de la production agricole. De nombreux travaux de modélisation quantitative ont ainsi été initiés pour évaluer l'efficacité de politiques publiques visant à améliorer les performances économiques et environnementales des exploitations agricoles.

Avec les progrès informatiques permettant la résolution de systèmes d'équations mathématiques de plus en plus complexes, les modèles aujourd'hui opérationnels sont nettement plus riches que les premiers construits dans les années 1960. Ils peuvent intégrer des considérations dynamiques (plusieurs années versus une seule), stochastiques (prise en compte ou non de la volatilité des prix et/ou des rendements), spatiales (prise en compte ou non des interactions spatiales entre les exploitations agricoles via le foncier ou les échanges d'effluents) ou de filières (focus sur les exploitations agricoles versus les entreprises amont/aval). Il reste néanmoins que ces modèles reposent toujours sur des hypothèses visant à simplifier la complexité des phénomènes et que la validité des modèles est toujours limitée par la disponibilité des données nécessaires pour les alimenter. Cette limite est particulièrement forte pour les modèles économiques qui, idéalement, nécessitent les résultats économiques de tous les agents économiques potentiellement impactés par les scénarios prospectifs étudiés. Par exemple, dans l'analyse de changements de pratiques agricoles sur un territoire donné, il convient idéalement de disposer des résultats économiques sur plusieurs années des exploitations agricoles du territoire concerné afin de comprendre leurs évolutions et ainsi identifier leurs possibles réactions à des incitations économiques ou réglementaires pour changer de pratiques. Il convient aussi d'obtenir ces mêmes informations pour toutes les entreprises en amont et en aval de ces territoires et également des territoires proches avant qu'ils réalisent des transactions économiques.

Pour de logiques raisons de secret statistique, ces données ne sont généralement pas disponibles, d'autant plus si les territoires étudiés sont de petite taille et comprennent peu d'acteurs. Pour pallier à cet inconvénient, la procédure usuelle consiste à développer des modélisations à différentes échelles, en essayant de les articuler au mieux. Plus précisément, il est usuel de distinguer les modèles « microéconomiques » définis au niveau des entreprises individuelles avec des données d'exploitations types et les modèles « macroéconomiques » définis au niveau de territoires. Dans cette étude, nous développons des modèles microéconomiques appliqués aux exploitations agricoles des territoires concernés ainsi qu'un modèle macroéconomique à l'échelle de la Bretagne, bénéficiant d'une étude précédente rassemblant les données macroéconomiques sur ce territoire (Gohin et al., 2015). Aussi nous divisons cette partie en deux sous parties, une première consacrée aux modèles microéconomiques, la seconde aux modèles macroéconomiques.

Au préalable, nous précisons que les modèles économiques développés ne pourront pas renseigner les impacts sur la qualité de l'eau. Il faudrait pour ce faire mobiliser des modèles hydrologiques applicables aux territoires concernés. La modélisation explicite de la qualité de l'eau étant écartée, nous proposons de nous concentrer à la place sur les bilans des minéraux et l'usage des produits phytosanitaires par les exploitations agricoles. Nous reconnaissons que des différences dans les

transferts de nutriment de la surface vers les eaux existent (notamment en fonction de la distance des exploitations aux cours d'eau). Par conséquent, les calculs de ces bilans ne permettront pas de calculer les niveaux de pollution effective mais plutôt les niveaux de pollution potentielle.

1.1. La modélisation microéconomique à l'échelle des exploitations agricoles

Les premiers modèles économiques représentant assez finement le fonctionnement des exploitations agricoles sont apparus au milieu des années 1960, grâce au développement parallèle de méthodes numériques permettant la résolution de systèmes d'équations linéaires (méthode du simplexe de Dantzig). Ces premiers modèles étaient des modèles de programmation mathématique linéaires, qui ont été ensuite enrichis par la prise en compte de non linéarités dans les processus de production (comme la loi des rendements décroissants en agriculture stipulant par exemple que les dernières unités d'engrais ont un effet sur les rendements des cultures moindres que les premières unités). De nombreux modèles de programmation mathématique (linéaires et non linéaires) ont été développés pour étudier des problématiques de politique agricole et environnementale. Des revues de littérature sont disponibles dans Hazell et Norton (1986), Flichman et Jacquet (2003), Janssen et van Ittersum (2007), Buysse et al. (2007), Britz et al. (2012), Carpentier et al. (2015).

Au niveau de la Bretagne et des deux territoires d'étude, mentionnons le modèle de programmation linéaire développé dès le milieu des années 1960 par le professeur R. Hovelaque de l'école d'agronomie de Rennes. Ce modèle dénommé Grandjouan était appliqué aux exploitations animales du bassin rennais pour simuler les conduites animales optimales en fonction de variations de prix des produits et des intrants. A notre connaissance, il n'y a pas aujourd'hui un modèle publiquement disponible de programmation mathématique représentant finement le fonctionnement d'exploitation agricole sur les deux territoires d'étude, ni en Bretagne d'ailleurs.² En revanche, de tels modèles existent pour des exploitations dans d'autres régions françaises comme le modèle linéaire Opt'Inra focalisant sur les exploitations bovines du Limousin (une nouvelle version dénommée Orfée est en cours de développement). Le modèle dénommé Aropaj (Jayet et al., 2015) est aussi un modèle de programmation linéaire plutôt centré sur les exploitations européennes de grandes cultures et dont la première version date de 1992 pour étudier la réforme McSharry de la PAC. Depuis 2011, le centre de recherches de la Commission européenne basé à Séville déploie des efforts considérables pour

² Le Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales (CEREOPA) basé à Paris Grignon dispose d'un tel modèle (dénommé PerfAgro) et qui est appliqué à quelques exploitations bretonnes, dont la ferme expérimentale du Crecom située dans les Côtes d'Armor. La documentation de ce modèle n'est cependant pas disponible. Nous n'excluons pas que des modèles ont pu être temporairement développés mais, toujours selon notre connaissance, ils ne sont plus opérationnels aujourd'hui.

développer un modèle de programmation linéaire (dénommé IFM CAP) comprenant les exploitations végétales et animales (Louhichi et al., 2015).

Le développement de modèles de programmation mathématique représentant le fonctionnement des exploitations agricoles est un champ de recherches actuellement très actif, pour partie motivé par la problématique du changement climatique et le rôle potentiel de l'agriculture. Ce champ de recherches est aussi actif car il est toujours possible d'améliorer la qualité des modèles économiques et d'apporter des réponses toujours plus précises aux enjeux agri-environnementaux. Parmi l'ensemble des modèles de programmation mathématique actuellement disponibles, le modèle dénommé FARMDYN développé à l'université de Bonn est très riche, incluant de nombreuses activités et décisions effectuées par les agriculteurs. Aussi, pour illustrer les apports potentiels de ce type de modèle et l'état de la recherche sur cette méthodologie, nous le décrivons en annexe.

Cette sous-section est organisée de la manière suivante. Nous présentons tout d'abord les principes de la programmation mathématique en s'appuyant sur un exemple volontairement simple d'une exploitation végétale. Nous poursuivons par présenter quelques résultats saillants obtenus par ces types de modèles dans l'étude de problématiques agri-environnementales. Nous terminons par discuter du problème de validité statistique qui s'applique à tout type de modèles (biotechniques/économiques) et donc aussi à ces modèles de programmation mathématique. Cela nous conduira à présenter alors les modèles dits micro-économétriques.

1.1.a. Les principes de la programmation mathématique

Comme indiqué précédemment, le développement de modèles de programmation mathématique a été possible grâce aux progrès mathématiques et informatiques permettant la résolution de systèmes d'équations, d'abord linéaires puis non linéaires. Nous présentons d'abord les modèles linéaires, puis enchainons sur les modèles non linéaires.

i/ Les modèles de programmation linéaire appliqués aux exploitations agricoles

Hypothèses et principes de fonctionnement

Ces modèles visent à représenter le fonctionnement technique et économique d'exploitations agricoles à travers un ensemble d'équations mathématiques. Ils reposent sur l'hypothèse fondamentale en économie que les agriculteurs sont des agents économiques rationnels. Cette hypothèse de rationalité suppose que les décisions des agriculteurs (par exemple, choix du type et niveaux de production, conduites des cultures et des animaux) résultent d'un comportement d'optimisation d'objectifs sous différentes contraintes. Ces objectifs peuvent évidemment varier selon les agriculteurs. Cela peut être la maximisation du profit de la période courante versus des profits moyens sur plusieurs années ou encore la minimisation de dépenses variables auprès de fournisseurs.

L'objectif peut aussi être multidimensionnel avec une pondération de critères financiers (profit / richesse accumulée en capital et foncier) et non financiers (temps et confort au travail/niveau de biodiversité sur la ferme/relation avec son voisinage). Les contraintes sont également multiples et différent selon les exploitations. Il peut s'agir de contraintes techniques (parcellaire/qualité de terre ne permettant pas certaines productions), de marché (absence de débouchés ou indisponibilité de services) ou réglementaires (contraintes sur les dates d'épandage des effluents, sur l'usage d'intrants de la chimie).

Un enjeu majeur pour comprendre le fonctionnement des exploitations agricoles et mesurer d'éventuelles évolutions de pratiques agricoles à la suite de changements de contexte (économiques comme les prix de marché/réglementaires comme les capacités de stockage des effluents) est d'identifier ces objectifs et ces contraintes. Ceci suppose une connaissance précise des exploitations sur longue période et peut conduire à procéder à des enquêtes, par exemple pour préciser les perceptions des agriculteurs sur le futur. Lorsque les données rassemblées sont incomplètes, alors des hypothèses sont posées. Les plus simples consistent ainsi à développer des modèles « statiques » (sur une année) et stipuler que les agriculteurs cherchent à maximiser le profit de la période. Ces hypothèses sont par exemple adoptées par les modèles IFM-CAP, Aropaj et Opt'Inra mentionnés ci-dessus. Du côté des contraintes subies par les agriculteurs, des hypothèses sont aussi nécessaires pour pallier le manque d'information. Une contrainte toujours introduite dans les modèles est la contrainte de terre car les données nécessaires sont disponibles. Cette hypothèse stipule que la somme des surfaces cultivées est inférieure à la surface totale de l'exploitation. Enfin les nombreuses variables de décision prises par les agriculteurs au cours d'une année ne sont pas toutes intégrées dans les modèles. Dans les modèles les plus simples, elles se limitent aux surfaces dédiées aux différentes cultures de vente ou fourragère.

Mathématiquement, les modèles de programmation linéaire peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{array}{l} \text{Max } \pi = CS \\ \text{sc. } AS \leq B \end{array}$$

Avec π la fonction objectif qui peut donc être le profit de la période, S le vecteur des variables à optimiser (par exemple les allocations de surface), C le vecteur des paramètres de la fonction objectif (par exemple les profits par hectare de chaque culture), A et B un ensemble de paramètres relatifs aux contraintes (par exemple sur la disponibilité de la terre ou des autres facteurs de production travail/capital).

Pour bien fixer les idées, considérons l'exemple simple d'une exploitation végétale pouvant réaliser potentiellement 3 cultures : une céréale (indiquée c), une graine oléagineuse (indiquée o) et une culture protéagineuse (indiquée p). Le profit par hectare de chaque culture est égal au prix de la culture (noté

p) multiplié par le rendement (noté y), auquel nous ajoutons des éventuelles aides couplées (notées a) dans le cas des protéagineux notamment et nous retranchons les coûts variables de production (notés c). Ces coûts comprennent les dépenses en engrais, produits phytosanitaires, semences et énergies/lubrifiants. Ils dépendent naturellement des prix (nets des éventuelles taxes/subventions comme pour le fioul) de ces intrants et des volumes nécessaires pour obtenir les rendements des cultures. La surface totale de l'exploitation, notée $\bar{S}$, contraint les choix de l'exploitant. Supposons aussi qu'une réglementation « diversification des cultures » contraint les pourcentages maximaux et minimaux de chaque culture dans l'assolement (notés respectivement α_{up} et α_{lo}). Le modèle mathématique associé à cette exploitation s'écrit :

$$\max \pi = S_c \cdot (p_c \cdot y_c + a_c - c_c) + S_o \cdot (p_o \cdot y_o + a_o - c_o) + S_p \cdot (p_p \cdot y_p + a_p - c_p)$$

Sous les contraintes de disponibilité de foncier et de diversification :

$$S_c + S_o + S_p \leq \bar{S}$$

$$\alpha_{lo_c} \cdot \bar{S} \leq S_c \leq \alpha_{up_c} \cdot \bar{S}$$

$$\alpha_{lo_o} \cdot \bar{S} \leq S_o \leq \alpha_{up_o} \cdot \bar{S}$$

$$\alpha_{lo_p} \cdot \bar{S} \leq S_p \leq \alpha_{up_p} \cdot \bar{S}$$

La résolution mathématique de ce programme dans un logiciel (type Excel) donne les surfaces optimales de chaque culture. Elles vont naturellement dépendre des profits relatifs à l'hectare, des contraintes réglementaires et la surface totale. Ainsi il est possible de simuler avec un tel modèle les conséquences sur les surfaces de changement de prix des produits ou des intrants (taxes sur les produits phytosanitaires impactant les coûts variables de production par culture) ou de mesures publiques voulant favoriser, par exemple, les protéagineux (aide spécifique à cette culture, contrainte sur son pourcentage minimale).

De tels modèles de programmation linéaire sont classiquement utilisés par les firmes de l'alimentation animale, possiblement chez les fabricants d'aliments à la ferme (éventuellement via le conseil de firmes services). Au lieu de maximiser un profit, l'objectif est souvent de minimiser le coût de production d'un aliment composé à partir de différentes matières premières (céréales, tourteaux) tout en respectant des contraintes (protéines/ énergie / digestibilité).

Propriétés

Les modèles de programmation linéaire présentent quelques propriétés intéressantes. Tout d'abord, ils sont transparents car les éléments qui les constituent sont aisément interprétables. En fait ces

modèles représentent un couplage entre des hypothèses sur le comportement économique des agents modélisés et des modèles biotechniques (de croissance de plante, de ration animale). C'est une des raisons pour lesquels ils se prêtent bien aux collaborations pluridisciplinaires ou aux missions d'expertise.

Par ailleurs, ils sont adaptables dans le sens où les mesures précises de différentes politiques de régulation environnementale peuvent y être introduites. De plus, il est possible de considérer des pratiques innovantes. Dans l'exemple précédent, il convient de décomposer les surfaces de chaque culture en des surfaces de cette culture par itinéraire technique considéré. Très concrètement, il est possible de distinguer des cultures de céréales selon plusieurs techniques culturales, avec ou sans labour par exemple. Ces deux techniques ont des caractéristiques différentes sur les usages d'énergie et des produits phytosanitaires (soit les coefficients techniques exprimant les quantités d'intrants nécessaires pour obtenir les rendements des cultures). A l'optimum, un seul itinéraire technique peut être choisi pour chaque culture.

Enfin, l'efficacité des algorithmes actuels d'optimisation des problèmes de programmation linéaire et la puissance de calcul des ordinateurs disponibles permettent de résoudre un très grand nombre de problèmes en des temps très réduits. Il est alors possible de définir de tels modèles pour plusieurs types d'exploitations et simuler les conséquences de diverses politiques sur une diversité d'exploitations. Le travail sur des échantillons d'exploitations-type ou des ensembles de régions permet de rendre compte de l'hétérogénéité des exploitations et de leurs conditions de production, et constitue une des raisons du « succès » de ces modèles pour le travail pluridisciplinaire ou pour les travaux d'expertise auprès des décideurs publics.

Limites

Ces modèles souffrent aussi de certaines limites que la recherche en économie de la production agricole essaye de toujours dépasser. En premier lieu, il y a évidemment le choix des critères de la fonction objective optimisée. Maximiser le profit présent ou minimiser les dépenses ne vont pas forcément conduire aux mêmes décisions optimales.

De plus, sous l'hypothèse d'une appréciation correcte du comportement des agriculteurs et de leurs contraintes, les résultats de ce type de modèle dépendent crucialement de ses paramètres d'entrée (les paramètres A, B et C dans le modèle générique). Par exemple, si les contraintes de diversification sont ignorées, alors la solution fournie par ce modèle consistera à allouer toutes les surfaces à la culture dont le profit par hectare est le plus élevé. Or, même sans contrainte réglementaire, il n'est pas évident que les exploitations allouent toute leur surface à une culture unique. Plusieurs motifs de diversification peuvent expliquer la présence de plusieurs cultures, comme la volonté de gérer les pics

de travail ou la disponibilité des machines. Les modèles susmentionnés intègrent souvent dans un tel cadre statique des contraintes « de rotation » suggérées par les agronomes. Par exemple les agronomes recommandent de ne pas produire de colza sur une parcelle pendant deux ans après une culture de colza, en raison de problèmes phytosanitaires qui ont tendance à réduire significativement les rendements obtenus. Cette recommandation « agronomique » peut être introduite sous la forme d'une contrainte « agronomique » de type $S_o \leq \bar{S}/3$. Le risque est alors que les résultats obtenus par la modélisation dépendent fortement d'hypothèses non validées pour les exploitations considérées.

Même en présence de contraintes agronomiques conduisant à une diversification des cultures proches des surfaces cultivées, les résultats de ces modèles peuvent être « brutaux », c'est à dire très sensibles à une petite variation des paramètres. Par exemple, une augmentation marginale du prix des céréales pourrait conduire à ne cultiver que des céréales, la contrainte agronomique sur les oléagineux étant alors respectée.

La pratique courante dans les modèles de programmation linéaire pour contourner ces limites consiste à déterminer les valeurs de ces paramètres de telle sorte à ce que le modèle reproduise une situation de référence (et à produire des résultats de simulations « cohérents »). C'est-à-dire que les surfaces optimales calculées par le modèle doivent être égales aux surfaces effectivement observées par l'année considérée. Par exemple, les coûts de production par culture peuvent être ajustés afin que les résultats du modèle reproduisent l'assolement observé. Ce processus de calibrage des valeurs des paramètres peut être fastidieux, même pour des échantillons d'exploitations-type ou des ensembles de régions de taille modeste, et suppose des choix parfois délicats qui peuvent in fine paraître arbitraires. Ils peuvent fortement dépendre des années observées. Idéalement il conviendrait de déterminer la valeur de ces paramètres à partir de l'observation des agriculteurs sur plusieurs années. Cependant, les solutions des problèmes de programmation linéaire n'ont pas de formes analytiques simples et sont discontinues dans leurs principaux paramètres. Par conséquent, l'estimation statistique des paramètres de ces modèles de programmation linéaire n'est pas aisée avec les méthodes économétriques traditionnelles. C'est d'ailleurs ce qui explique en grande partie pourquoi les paramètres de ces modèles sont calibrés et non estimés statistiquement.

Ces limites ont été assez rapidement identifiées par les scientifiques avec différentes stratégies pour les dépasser. Une première stratégie consiste à essayer d'incorporer un maximum de variables de décision et de contraintes afférentes (par exemple, le modèle Opt'INRA). Au-delà des allocations de surfaces explicitées dans l'exemple ci-dessus, ont ainsi pu être intégrée la dimension travail à l'année ou même pour chaque mois de l'année, la dimension capital (machine et bâtiment), les biens

autoconsommés (fourrages, effluents organiques). Plus le nombre de contraintes prises en compte est grand, moins les variations dans les résultats sont extrêmes. Par exemple, la prise en compte de la disponibilité de la main d'œuvre peut favoriser la diversification des cultures. Cette première stratégie est intéressante car elle garde les propriétés initiales des modèles de programmation linéaire. En revanche, elle suppose la connaissance d'un plus grand nombre de paramètres qui peuvent être plus difficiles à observer à partir des statistiques usuelles sur les exploitations agricoles. Ainsi les documents comptables ne fournissent pas forcément l'information sur les temps passés par les agriculteurs sur chaque culture (pas de comptabilité analytique détaillant le travail, ou encore le capital). Une deuxième stratégie consiste à introduire des relations non linéaires dans le modèle et choisir les paramètres de ces relations non linéaires de sorte à bien reproduire les situations observées. Cette stratégie a donc conduit aux développements de modèles de programmation non linéaires que nous expliquons à présent.

ii/ Les modèles de programmation non linéaire appliqués aux exploitations agricoles

Les modèles de programmation non linéaires peuvent être divisés en deux grands types : les modèles visant à rendre compte de l'attitude face au risque de revenu des agriculteurs via un critère moyenne-variance (Hazell et Norton 1986) d'une part, et les modèles de programmation mathématique positive (Howitt 1995). Ces derniers se répartissent eux-mêmes en deux sous-groupes. Un premier groupe intègre des relations non linéaires dans les fonctions de production. Un deuxième groupe introduit une composante non linéaire dans la fonction objective, censé résumer toutes les contraintes que le modélisateur n'arrive pas à expliciter. Ce dernier groupe de modèle est, de loin, le plus utilisé actuellement (comme dans le modèle IFM-CAP). Nous expliquons successivement ces trois approches non linéaires, toujours sur l'exemple précédent d'une exploitation végétale produisant trois cultures.

Prise en compte du risque

Il est largement accepté l'idée que les activités agricoles font face à plusieurs risques, les plus couramment mentionnés étant les risques prix et les risques quantités. Concentrons-nous ici sur les risques prix. Ces risques signifient que les producteurs ne savent pas exactement le prix des cultures qu'ils produisent au moment où ils décident d'allouer leurs surfaces. Au contraire, les agriculteurs peuvent considérer qu'ils varient dans une fourchette. Plus cette fourchette est large, plus les conséquences peuvent être dramatiques. Par exemple, si le prix du blé s'établit à 120, 150 ou 180€/tonne, les impacts sur le profit de l'exploitation sont complètement différents. Il est relativement admis que les agriculteurs préfèrent en général un prix certain (dans le cas ci-dessus de 150€/tonne) à un prix incertain mais dont la moyenne est la même. Certes, si le prix en fin de campagne s'établit à

180€/tonne, son profit sera augmenté mais s'il devait s'établir à 120€/tonne, alors il pourrait subir des pertes, ne pas honorer ses dépenses, voir être en faillite.

Dans l'exemple ci-dessus, supposons que le prix d'une des trois cultures n'est pas connu avec certitude (par exemple la céréale), qu'il n'est pas possible d'établir un contrat avec un acteur privé ou la coopérative et que les prix des deux autres cultures le sont. C'est évidemment théorique mais sert à illustrer la modélisation dans ce cas. Cette incertitude sur le prix de la céréale à l'issue de la campagne peut modifier les choix de l'agriculteur dans ses choix d'assolement. Ainsi il peut préférer cultiver un peu moins de céréales et par suite un peu plus des deux autres cultures.

Cette attitude vis-à-vis du risque est prise en compte dans la modélisation non linéaire en supposant que la variable optimisée au début de la période n'est plus simplement le profit à l'issue de la campagne mais ce profit corrigé de la prise de risque. Est alors introduit la notion de prime de risque qui représente ce qu'un agriculteur est prêt à renoncer pour ne pas subir les conséquences du risque. Cette prime de risque est généralement d'autant plus élevée que le risque sous jacent est élevé. Ainsi, plus les prix peuvent varier, plus la prime de risque est élevée. Dans notre exemple, il n'y a pas de contrats d'assurance ; l'agriculteur peut seulement décider de moins cultiver de céréales.

Mathématiquement, l'attitude potentielle des agriculteurs vis-à-vis du risque a été introduite par l'addition de la prime de risque dans la fonction objective. Dans l'exemple précédent, cela donne :

$$Z = S_c \cdot (E(p_c) \cdot y_c + a_c - c_c) + S_o \cdot (p_o \cdot y_o + a_o - c_o) + S_p \cdot (p_p \cdot y_p + a_p - c_p) - \rho \cdot S_c^2 \cdot y_c^2 \cdot V(p_c)$$

Où ρ est le paramètre résumant l'attitude vis-à-vis du risque de l'exploitant, $E(p)$ l'espérance du prix et $V(p)$ la variance du prix. Le dernier terme de la fonction objective est la prime de risque calculée comme le paramètre d'aversion au risque et la variance du profit. Cette variance du profit (soit le carré des écarts du profit à sa moyenne espérée) dépend de la variance du prix de la céréale et du carré de la surface consacrée aux céréales. Nous obtenons ainsi un modèle de programmation non linéaire, juste par l'introduction de l'attitude vis-à-vis du risque. La résolution d'un tel modèle conduit à des résultats « lisses », c'est-à-dire où il n'y a plus de saut brusque dans les résultats. Evidemment les résultats obtenus par un tel modèle vont dépendre du paramètre d'aversion au risque.

Nous soulignons juste ici que de nombreuses recherches sont conduites depuis une dizaine d'années pour identifier ce paramètre chez différentes catégories d'agriculteur. L'identification de ce paramètre est en effet cruciale pour évaluer l'efficacité de politiques publiques visant à gérer les conséquences des risques agricoles (les instruments de la PAC, dont les aides directes, aides aux fonds mutuels, assurances). Ce paramètre peut évidemment varier selon les individus, les éleveurs laitiers acceptant vraisemblablement moins de risque que les éleveurs porcins.

Dans le cadre de cette étude, la prise en compte du risque peut aussi être cruciale pour évaluer l'opportunité de changements de pratiques agricoles vers des systèmes plus risqués. Par exemple, il est souvent affirmé dans les exploitations laitières que l'alimentation animale à base de maïs/soja est une pratique « sûre », relativement à une alimentation à base d'herbe, dont les rendements sont plus aléatoires. L'analyse d'un éventuel passage du premier mode d'alimentation au second devra donc idéalement prendre en compte cette attitude qui peut constituer un réel frein, que le développement d'assurances « fourrages » pourrait en partie prendre en charge.

Prise en compte de non linéarités biophysiques

Il est aussi largement accepté l'idée que, même au sein d'exploitations agricoles avec peu de surfaces, la terre est de qualité hétérogène (plus ou moins humide, pentue, ...). Par conséquent, les agriculteurs affectent logiquement leurs surfaces aux cultures selon leur potentialité. Certes les potentiels peuvent évoluer avec le temps mais, justement, cela peut prendre du temps.

Cette idée a été prise en compte dans les modèles de programmation mathématique en supposant que les rendements ne sont pas fixes mais dépendent de manière décroissante des surfaces allouées. Mathématiquement, il est par exemple supposé que les rendements moyens en céréales diminuent avec les hectares cultivés en céréales :

$$y_c = \alpha_c - \beta_c \cdot S_c$$

Où α_c, β_c sont deux paramètres additionnels dont la valeur reste à déterminer. Cette spécification linéaire des rendements (et donc non linéaire des profits par rapport aux surfaces car les surfaces apparaissent au carré dans la fonction objective) repose sur deux types d'arguments plus ou moins liés, l'hétérogénéité de la qualité de la terre et les effets des successions culturales. Beaucoup utilisée au milieu des années 1990 (à la suite de la publication d'Howitt, 1995), elle l'est beaucoup moins aujourd'hui car le calibrage de ces paramètres est assez délicat. Les travaux des agronomes ne permettent pas réellement de renseigner ces valeurs, ces travaux étant majoritairement effectués à l'échelle des parcelles. Elle est aussi moins utilisée car son intuition n'est pas du tout évidente pour les cultures secondaires. En effet, imaginons une exploitation cultivant une céréale (par exemple du blé noir) sur des terres pauvres. Une forte augmentation du prix de cette céréale peut rendre un peu plus intéressante sa culture sur des terres moyennant pauvre, sur lesquels les rendements obtenus pourraient être meilleurs. Au final, les rendements moyens de cette céréale augmentent, malgré l'augmentation des surfaces consacrées.

Prise en compte de coûts inobservés

Sur leurs exploitations, les agriculteurs gèrent tout un ensemble de contraintes qu'il est souvent difficile d'observer, au moins pour le modélisateur (voir ci-dessus). Ces contraintes impactent bien évidemment les choix des agriculteurs et il est donc important de les intégrer, au moins implicitement, dans l'analyse. Ceci a conduit à l'ajout dans la fonction objective d'un nouveau terme non linéaire que l'on peut appeler le cout de gestion des assolements dans une exploitation végétale. Il est régulièrement supposé que ces coûts sont croissants avec les surfaces cultivés dans chaque culture.

Mathématiquement, cela se traduit par la nouvelle fonction objective :

$$Z = S_c \cdot (p_c \cdot y_c + a_c - c_c) + S_o \cdot (p_o \cdot y_o + a_o - c_o) + S_p \cdot (p_p \cdot y_p + a_p - c_p) - \gamma_c S_c^2 - \gamma_o S_o^2 - \gamma_p S_p^2$$

Où γ sont des nouveaux paramètres dont il faut déterminer les valeurs. Ce nouveau terme non linéaire peut être interprété comme une fonction de coût de gestion implicite de l'assolement. Ce terme représente, de manière approximative, les effets de coûts omis de la mise en œuvre des cultures ou de contraintes omises sur les choix d'assolement. L'hypothèse de non linéarités repose essentiellement sur l'idée selon laquelle les surfaces des différentes cultures sont « concurrentes » entre elles pour l'utilisation d'intrants fixes dont les contraintes ne sont pas explicites à cause du manque de données (par exemple sur la disponibilité du travail à certaines périodes clés du cycle de production que peuvent être les périodes de semis/récolte).

iii/ Synthèse

Les modèles de programmation mathématiques, linéaires ou non linéaires, partagent les mêmes avantages en termes de transparence : les processus biotechniques mis en œuvre par les agriculteurs sont explicitement représentés. Ils sont par ailleurs adaptables, en ce sens qu'ils permettent assez aisément d'analyser les impacts de nouveaux instruments politiques ou de l'adoption de pratiques innovantes. De plus ils ont la capacité à rendre compte de l'hétérogénéité des exploitations. Enfin les plus simples d'entre eux sont faciles à résoudre et donc il est possible de considérer de très nombreux scénarios.

Leur inconvénient majeur vient du fait que les résultats sont fortement dépendants du calibrage d'un nombre important de paramètres assez difficiles à observer (par exemple sur les temps de travail nécessaire aux cultures qui dépendent évidemment du parcellaire, de la puissance des machines, de la météo, ...). Ce problème de calibrage est d'ailleurs ce qui conduit les pionniers de ces approches à chercher des procédures d'estimation statistique, et non de calibration, de ces termes. Ces efforts de validation sont présentés dans la partie 1.1.c.

1.1.b. Quelques résultats de modèles de programmation mathématiques

De nombreux modèles de programmation mathématique appliqués aux exploitations agricoles ont été développés pour étudier des problématiques agroenvironnementales. Les premières applications portaient majoritairement sur les pollutions liées à l'azote, puis ont été étudiées les problématiques liées aux autres nutriments et aux produits phytosanitaires. Ces dernières années, de nombreux efforts ont porté sur les émissions nettes de gaz à effet de serre des différentes activités agricoles, de culture ou d'élevage.

Comme indiqué précédemment, nous n'avons pas connaissance de récents modèles de programmation mathématique appliqués aux territoires de la présente étude. Par contre certains sont appliqués au niveau de la Bretagne et des autres régions françaises ou dans d'autres pays, ayant considéré différentes pratiques agricoles ou combinaisons de pratiques. Ainsi, pour les activités de cultures, ils peuvent intégrer différentes techniques de labour, différentes dates de semis, l'introduction de cultures intermédiaires pièges à nitrates pour les activités de culture. Pour les activités animales, sont potentiellement considérés différents modes d'alimentation (mono vs bi vs multi phase pour les porcs), de pratiques sanitaires (avec la problématique sous-jacente des antibiotiques).

Nous nous contentons ici de résumer deux études françaises récentes, la première centrée sur l'azote et la seconde sur les produits phytosanitaires.

i/ La gestion des pollutions liées à l'azote

Bourgeois et al. (2014) ont étudié différentes mesures environnementales visant à limiter les pollutions liées à l'azote. Plus précisément, ces auteurs ont simultanément considéré les émissions de nitrates (NO_3), de protoxyde d'azote (N_2O) et d'ammoniac (NH_3) par les exploitations agricoles françaises. Deux mesures environnementales sont examinées : une taxe sur les utilisations d'azote (minéral et sans doute pas sur l'organique qui passerait par une taxe à l'animal) dont le taux varie de 0% à 100% du prix de l'azote, une subvention à la diversification des surfaces vers la culture de miscanthus, dont le montant varie de 0 à 250€/ha.

Ils ont simulé les effets de ces mesures environnementales sur les décisions productives des exploitations agricoles, à partir du modèle bioéconomique Aropaj. Il s'agit d'un modèle de programmation linéaire dont certains paramètres (comme ceux pour l'alimentation animale) sont d'abord fixés à dire d'experts, d'autres (comme les applications de produits phytosanitaires) sont d'abord fixés à partir d'estimation économétrique sur les comptabilités des exploitations. Enfin les derniers paramètres (sur les applications d'engrais) sont d'abord fixés à partir des résultats de simulation de modèle de croissance des plantes (le modèle STICS). Soulignons ici que ces derniers paramètres sont dépendants des rapports de prix entre les produits et l'azote. Ainsi, si le prix du blé

par exemple augmente, l'agriculteur est incité à épandre plus d'engrais sur son blé pour obtenir un meilleur rendement. Les paramètres de rendements et d'utilisation d'engrais par culture varient donc avec les prix.

Avec ces valeurs initiales de ces paramètres, les auteurs ont résolu leur modèle sur chaque ferme représentée (157 au total en France). Les résultats obtenus sont différents des valeurs réellement observées sur chaque ferme (par exemple sur les allocations de surface, les cheptels animaux). Les valeurs de paramètres sont alors statistiquement ajustées de manière à ce que les résultats du modèle s'approchent plus de ces valeurs observées.

A partir de ces nouvelles valeurs de paramètres, les auteurs résolvent leurs modèles pour différents niveaux de taxe sur les engrais et différents niveaux de subventions à la culture de miscanthus. Ils obtiennent les décisions optimales des agriculteurs en termes d'allocation de surfaces, d'application d'engrais sur ces surfaces et d'évolution des cheptels. Ils en déduisent les émissions de nitrate, protoxyde d'azote et d'ammoniac au niveau des fermes, qui vont évoluer en fonction des surfaces cultivées notamment.

Les auteurs trouvent que la taxe seule sur les utilisations d'engrais n'est pas très efficace pour réduire les pollutions par les nitrates alors qu'elles pénalisent « fortement » les revenus agricoles. L'introduction d'une subvention à la culture de miscanthus améliore à la fois le bilan sur les émissions de nitrate et les revenus agricoles. Ils trouvent à l'inverse que la réduction des émissions de protoxyde d'azote et d'ammoniac est essentiellement obtenue par la taxe ; la culture de miscanthus n'est pas intéressante pour ces pollutions. Enfin, les auteurs reportent des effets différenciés sur les régions. Par exemple, pour le bassin Loire Bretagne, la taxe a un fort impact sur les revenus agricoles et faible impact sur la réduction de la pollution par les nitrates. Cela est vraisemblablement due à la forte présence relative des activités animales dans les régions de l'Ouest et la relative faible présence de cultures (céréales/oléagineuses) ne fixant pas bien l'azote.

ii/ La gestion des pollutions liées aux produits phytosanitaires

Dans le contexte du plan français « Ecophyto » visant à réduire de 50% les usages de produits phytosanitaires, Jacquet et al. (2011) ont développé une analyse économique quantifiant les impacts sur les surfaces cultivées, les pratiques agricoles, les productions, marges agricoles et bien sur les applications de produits phytosanitaires de différentes mesures. Pour cela, ils ont développé des programmes mathématiques pour 8 grandes régions françaises. Dans chacune d'elles, les agriculteurs peuvent choisir entre 5 pratiques agricoles pour chacune des 15 cultures considérées : « intensive », « raisonnée », « bas niveaux de pesticides », « intégrée » et « biologique ». Ces différentes pratiques sont caractérisées par des niveaux spécifiques (par culture et région) de rendements, usages de

produits phytosanitaires mais aussi semences, engrais et produits énergétiques. Par conséquent, ces pratiques génèrent différentes marges agricoles à l'hectare. Les valeurs des paramètres biotechniques pour chaque triplet culture-pratique-région ont été déterminés par un collectif d'experts associant différentes disciplines.

Avec les prix de 2006, année « moyenne », les auteurs ont d'abord cherché les pratiques optimales pour toutes les cultures qui maximisent les marges agricoles dans chaque région. Cette première résolution du modèle conduit à des surfaces par pratiques agricoles fortement différentes de celles observées. Ainsi les surfaces biologiques apparaissent nulles alors qu'elles étaient non nulles en 2006. De l'autre côté, les pratiques intensives ne représentent que 6% des surfaces à l'issue de la simulation, contre 30% selon les observations. Les marges agricoles simulées sont supérieures aux observées et les applications simulées de produits phytosanitaires inférieures aux valeurs observées. Plutôt que de modifier les paramètres biotechniques comme Bourgeois et al l'ont fait (voir ci-dessus), Jacquet et al ont contraint certaines surfaces dans leur modèle et les prix des cultures. La nouvelle simulation conduit à des résultats plus proches de la réalité, pour les marges et les applications d'intrants variables.

Ils ont ensuite introduit dans leur modèle une contrainte réglementaire de réduction (variant de 10 à 50%) des usages de produits phytosanitaires. Cette contrainte conduit à une modification des pratiques mises en œuvre sur les différentes cultures. Sans surprise, les pratiques intensives et raisonnées diminuent alors que les pratiques intégrées et biologiques augmentent. La production agricole française recule et les marges agricoles aussi. Les auteurs ont aussi considéré l'implémentation d'une taxe sur les ventes de produits phytosanitaires. Ils obtiennent par exemple que pour obtenir une baisse de 30% des usages de ces produits, la taxe doit être égale à 100% (soit le prix du produit phytosanitaire). Les marges agricoles diminuent évidemment fortement, sauf si les recettes de la taxe sont reversées de manière forfaitaire aux agriculteurs. Les auteurs simulent enfin un scénario où une aide de 140€/ha serait versée pour l'agriculture biologique. Dans ce cas, la taxe nécessaire pour réduire les usages de produits phytosanitaires est moins importante car plus d'agriculteurs ont déjà réduit leurs usages par conversion à l'agriculture biologique. Par exemple, la baisse de 30% des usages est à présent atteinte avec une taxe de « seulement » 30% (contre 100% précédemment).

1.1.c. La validation statistique des modèles microéconomiques

Comme nous l'avons déjà évoqué ci-dessus, les paramètres utilisés dans les modèles de programmation mathématique sont souvent déterminés à « dire d'experts » et n'ont donc souvent que peu de pertinence statistique. En effet, leur représentation analytique complexe rend ces modèles quasiment inutilisables pour les méthodes d'inférence statistique. Les « dires d'expert » peuvent être

utilisés lorsque les pratiques que l'on cherche à simuler n'ont encore jamais été mises en œuvre par les agriculteurs. Mais ce n'est pas toujours le cas.

Par ailleurs, au-delà de la caractérisation des pratiques, ces modèles supposent un comportement des agriculteurs sans le tester. Ainsi il est souvent fait l'hypothèse que les agriculteurs cherchent à maximiser leur profit. Celui-ci dépend évidemment des prix des produits et des intrants mobilisés. Lorsque ceux-ci varient, il est supposé que les agriculteurs vont « aussitôt » réagir pour s'adapter au mieux au nouveau contexte économique. Ces modèles fournissent donc une mesure de la réponse des agriculteurs aux incitations économiques. Par exemple, ils aboutissent très souvent à ce que les volumes produits d'un bien augmentent lorsque son prix augmente, toutes choses égales par ailleurs. Cette réponse est souvent exprimée en termes d'élasticité prix : cette notion mesure dans quelle pourcentage les volumes produits changent lorsque le prix du bien augmente de 1%.

Lorsque les données comptables d'une exploitation sur plusieurs campagnes sont disponibles, il peut être possible d'estimer par méthode statistique ce type d'élasticité prix (voir ci-dessous). Cette estimation statistique des décisions des agriculteurs peut se révéler différente de celle obtenue par résolution du modèle de programmation mathématique. Cette différence peut provenir d'une mauvaise caractérisation des pratiques et/ou d'une mauvaise hypothèse de comportement. Par exemple, certains agriculteurs pourraient, à la suite d'une augmentation du prix d'un bien, vouloir d'abord améliorer leurs conditions de travail et/ou dégager du temps hors de leurs exploitations et/ou réduire les risques de leurs exploitations. Si ces motivations ne sont pas considérées dans le modèle de programmation mathématique, alors il ne peut pas reproduire les vraies décisions des agriculteurs. Il convient alors dans ce cas de les introduire, ce qui augmente le nombre de paramètres du modèle. Les modèles devraient alors contenir à la fois des paramètres biotechniques et des paramètres dits de préférence des agriculteurs (comme celui mentionné plus haut sur l'aversion au risque).

Les modèles micro-économétriques ont justement été développés à partir des années 1970 pour identifier statistiquement ces différents paramètres. Nous présentons ci-dessous d'abord les principes généraux, puis discutons des avantages et limites.

i/ Principes des modèles micro-économétriques

L'objectif premier de ces travaux micro-économétriques est de déterminer statistiquement les paramètres biotechniques représentant les pratiques agricoles et les paramètres de préférences captant les objectifs des agriculteurs.

Les premiers travaux statistiques ont cherché à estimer directement des fonctions de production : c'est l'approche dite primale. En notant Q les niveaux de production, S les surfaces, I les intrants variables, L le travail et K le capital, ces travaux cherchent à déterminer la relation mathématique entre les

niveaux de production et les niveaux de ces facteurs. Cette relation mathématique est estimée sur des observations d'individus (indice i ci-dessous) idéalement sur plusieurs années (indice t ci-dessous) :

$$Q_{it} = f(S_{it}, I_{it}, L_{it}, K_{it}) + \varepsilon_{it}$$

Où le dernier terme à droite représente les erreurs statistiques, qui peuvent venir de problèmes de mesures des variables (par exemple comment mesurer la quantité du travail familial) ou de variables omises (par exemple sur la qualité de la terre, l'effet du climat, la structure de l'exploitation).

Dans les travaux dits paramétriques, il est nécessaire de poser la forme de la fonction de production f dans l'équation ci-dessus. Cela a généré une large littérature sur les formes fonctionnelles flexibles qui cherchent à ne pas contraindre les relations de substitution entre les facteurs, ni les relations d'échelle ou de gamme si plusieurs produits sont distingués (lait et viandes par exemple pour une exploitation d'élevage).

Une difficulté importante rencontrée par ces premiers travaux économétriques vient du fait que l'agriculteur choisit souvent les niveaux de certains facteurs, comme ses intrants variables, son capital ou encore l'emploi éventuel de salariés. La surface totale de l'exploitation est très vraisemblablement contrainte à court terme mais elle l'est moins à long terme (possibilité d'acheter/louer des terres supplémentaires). Le choix opéré par l'agriculteur pour ses différents facteurs peut dépendre de variables que le modélisateur n'observe pas et sont donc implicitement regroupées dans le terme d'erreur. Par exemple, un agriculteur sachant la qualité de ses parcelles pourra choisir de les fertiliser différemment ou même d'y pratiquer que certaines activités (pas de céréales sur des terres très pentues par exemple, ce qui influence ensuite ses applications d'engrais ou produits phytosanitaires). En d'autres termes, l'agriculteur possède une meilleure connaissance de son exploitation que le modélisateur ayant accès à certaines bases de données.

Cette différence d'information entre l'agriculteur et le modélisateur cherchant à le comprendre à partir d'informations partielles conduit à un problème statistique dit d'endogénéité consécutive à une hétérogénéité inobservée. Les niveaux des facteurs de production ne sont pas indépendants des variables inobservées par le modélisateur. Par suite, les paramètres estimés statistiquement par le modélisateur sont biaisés, c'est-à-dire ne fournissent pas la vraie valeur des paramètres.

Face à cette difficulté, une première solution consiste à combler cette différence d'information, soit directement avec la mobilisation de nouvelles bases de données, soit indirectement par des variables dites instrumentales. L'idée ici est de trouver des variables qui sont « proches » (corrélées statistiquement) de la variable explicative endogène (dans l'exemple cité ci-dessus, les applications de fertilisants) et « éloignées » (non corrélées statistiquement) avec les variables omises et implicitement dans le terme d'erreur. Il s'avère qu'il est généralement assez difficile de trouver de bons (au sens

statistique) instruments. Par exemple, les valeurs décalées des variables explicatives (soit dans notre exemple les applications de fertilisants les années précédentes) sont souvent utilisées mais restent bien souvent assez « proches » des variables inobservées par le modélisateur (et connues par l'agriculteur).

La deuxième solution qui a généré une très large littérature à partir des années 1980 est l'approche dite duale. Elle consiste à supposer un comportement rationnel des agriculteurs. Celui-ci peut être la simple maximisation du profit ou plus complexe de sa richesse, d'une variable captant un arbitrage entre l'effort et le profit, ou encore la minimisation des risques financiers ou de ses charges. L'atteinte des objectifs que se fixe l'agriculture est évidemment contraint par les prix des produits et des intrants qu'il vend et achète mais aussi par ses pratiques agricoles. Sous l'hypothèse simple de maximisation du profit, cette approche stipule que l'agriculture résout implicitement un programme du type :

$$\max P_{it}Q_{it} - W_{it}I_{it} - WL_{it}LS_{it}$$

$$st Q_{it} = f(S_{it}, I_{it}, LS_{it}, LF_{it}, K_{it})$$

Où LS représente le travail salarié, W les prix des facteurs. Dans le programme illustratif ci-dessus, il est supposé un horizon de court terme où l'agriculteur maximise sa marge (ventes – achats d'intrants – rémunération salariés éventuels) considérant la surface de son exploitation, son niveau de capital et la disponibilité de la main d'œuvre familial.

La résolution de ce programme d'optimisation conduit à un niveau optimal de production et d'utilisations d'intrants variables, qui dépend des prix et des intrants fixes :

$$Q_{it} = Q(P_{it}, W_{it}, WL_{it}, S_{it}, LF_{it}, K_{it})$$

$$I_{it} = I(P_{it}, W_{it}, WL_{it}, S_{it}, LF_{it}, K_{it})$$

$$LS_{it} = LS(P_{it}, W_{it}, WL_{it}, S_{it}, LF_{it}, K_{it})$$

Ce sont des relations théoriques auxquelles sont rajoutées des termes d'erreurs captant toujours les possibles erreurs de mesure ou variables inobservées. L'approche duale consiste alors à estimer statistiquement les paramètres des fonctions ci-dessus en s'appuyant sur les observations de productions, d'utilisations de facteurs. Point très important, ces fonctions comprennent les prix des produits et facteurs qui sont généralement considérés comme subis par les agriculteurs (hypothèse plus acceptable dans les circuits longs que courts, encore que cela dépend du degré de concurrence pour ces derniers). Il n'y a plus en revanche les variables déterminées par l'agriculteur avec ses propres informations. Par conséquent, il n'y a plus le problème précédent d'endogénéité des variables explicatives.

La mise en œuvre de cette approche suppose à nouveau de déterminer les formes des fonctions. Il faut remarquer qu'il y a une cohérence théorique entre les formes des fonctions. C'est-à-dire les paramètres entrant dans l'équation d'offre de produit se retrouvent aussi dans les équations de demande d'intrants.

ii/ Discussion

L'approche micro-économétrique dite duale est intéressante car elle identifie statistiquement les paramètres spécifiés. Par suite, les modèles duaux peuvent être mobilisés pour simuler des scénarios d'évolution du contexte économique et fournir des domaines de validité statistique des résultats. Ils peuvent aussi servir pour apprécier ex post l'efficacité d'une politique déjà mise en œuvre. Par ailleurs, les données nécessaires pour les mettre en œuvre sont plutôt disponibles en agriculture, notamment les prix (cela est nettement moins vrai dans les autres secteurs d'activité).

Cependant les premières applications de cette approche souffrent aussi d'une première limite importante. Les paramètres estimés statistiquement dans les fonctions d'offre de produits et demande d'intrants varient n'ont pas d'interprétation biotechnique directe. En d'autres termes, les paramètres estimés dépendent de manière non explicite des paramètres biotechniques et des paramètres de préférences. Par exemple, les premières applications ont pu statistiquement estimer les élasticités des productions aux prix des produits mais sans savoir exactement les pratiques agricoles conduites par les agriculteurs. En effet il est possible d'estimer la seule fonction d'offre et pas les fonctions de demande d'intrants. Cela a été longtemps une pratique courante, essentiellement à cause de problèmes d'accès à certaines données. Tout particulièrement, dans les applications majoritaires portant sur les exploitations de grandes cultures, les données comptables ne fournissent pas les applications d'engrais ou produits phytosanitaires par culture. Nous savons juste les achats totaux de l'exploitation. Dès lors il devient difficile d'estimer les paramètres gouvernant les applications de ces intrants sur les différentes cultures. Ces données fournissent en revanche les surfaces allouées à chaque culture. Aussi de nombreux modèles micro-économétriques duaux ont été développés pour étudier les décisions d'allocation des surfaces et de productions par les agriculteurs. Les rendements observés sur chaque culture sont aussi expliqués mais sans pouvoir identifier exactement les pratiques agricoles. Très précisément, il est possible à partir de ces modèles de savoir statistiquement si les agriculteurs choisissent d'augmenter leur rendement à la suite d'une augmentation du prix du produit mais sans savoir exactement comment ils l'ont fait (par choix de meilleurs semences, de conduites différentes des cultures, ...).

Pour pallier cette première limite, une première solution, usuelle, a consisté à rechercher des données supplémentaires. Par exemple, dans le cas des exploitations de grandes cultures, sont recherchées de comptabilités analytiques indiquant pour chaque culture la pratique effectivement réalisée. Une

deuxième solution, plus récente, consiste à développer des approches plus complexes où les fonctions estimées comportent explicitement des paramètres biotechniques et d'autres paramètres synthétiques (combinant paramètres biotechniques et de préférences). S'inscrivent ici les travaux conduits par T. Heckeley de l'université de Bonn et d'A. Carpentier de l'INRA. Ces nouveaux modèles reposent donc potentiellement sur un plus grand nombre de paramètres et donc nécessitent plus d'informations pour bien les identifier statistiquement. Nous nous appuyerons sur les principes de ces travaux plus récents pour définir notre modèle micro-économétrique dans la troisième partie du rapport.

Une deuxième limite aux premières applications de l'approche micro-économétrique duale vient du désir de parcimonie dans les paramètres. Pour limiter le nombre de paramètres à estimer, il est souvent fait l'hypothèse d'existence d'une pratique agricole générale qui englobe les différentes pratiques agricoles. Sont alors estimés uniquement les paramètres de cette pratique générale. Or les paramètres peuvent être assez différents entre les pratiques agricoles. Là encore, la première solution envisageable pour résoudre cette limite est de trouver des données supplémentaires sur des exploitations que l'on sait adopter des pratiques différentes. Par exemple les exploitations en agriculture biologique n'ont pas les mêmes possibilités techniques que les exploitations en agriculture dite conventionnelle. Les premières pourraient devenir suffisamment nombreuses dans les bases de données publiques pour que des estimations soient statistiquement envisageables. Il deviendrait alors possible de tester statistiquement les comportements des agriculteurs biologiques par rapport aux autres (par exemple sur leur attitude au risque, leur sensibilité environnementale, ...). Une deuxième solution, statistique, consiste à introduire des effets spécifiques, c'est-à-dire que certains paramètres des fonctions d'offre de produits et demande d'intrants sont propres à chaque exploitation. Evidemment, si l'on suppose que chaque paramètre est propre à chaque exploitation et chaque année, il n'est plus possible de l'estimer statistiquement. Les travaux récents (notamment conduit par A. Carpentier) développent des méthodes d'estimation de plus en plus complexes pour autoriser un grand nombre de paramètres spécifiques à chaque exploitation.

1.1.d. Synthèse

Les modèles micro-économétriques ont longtemps été opposés aux modèles de programmation mathématiques, les avantages des uns constituant les inconvénients des autres. Les premiers sont plus robustes statistiquement et les seconds plus explicites sur les pratiques agricoles. Les travaux menés depuis le début des années 2000 tendent à rapprocher ces deux littératures et exploiter leurs avantages respectifs. Ce rapprochement s'appuie sur la mobilisation de méthodes statistiques de plus en plus sophistiquées et de bases de données plus riches. Ces travaux récents portent majoritairement

sur les exploitations de grandes cultures. Le modèle micro-économétrique que nous développerons dans la troisième partie s'inscrit dans cette littérature avec une application aux exploitations d'élevage.

1.2. La modélisation macroéconomique à l'échelle des territoires

Les modèles présentés ci-dessus considèrent un unique agent économique, qui peut être une exploitation végétale ou animale ou mixte. Ces modèles peuvent aussi être développés pour d'autres acteurs économiques individuels (entreprise de l'alimentation animale par exemple). Ces modèles supposent que les prix des biens et services sont donnés ou subis par l'agent. Cette hypothèse de prix dits exogènes est acceptable si l'agent n'a pas un poids considérable sur le marché des biens et services, i.e. que ses décisions n'ont pas d'influence significative sur les prix. Par contre, cette hypothèse de prix exogènes est moins acceptable lorsqu'un scénario d'évolution de pratiques agricoles affecte plusieurs agents économiques simultanément, telle que les quantités globales changent fortement et les prix aussi. De même l'hypothèse de prix exogènes est moins acceptable sur certains marchés de facteurs, tout spécialement le foncier. Le nombre d'acheteurs/vendeurs potentiels pour des surfaces agricoles est souvent limité, impliquant que le prix des terres peut dépendre de décisions de peu d'acteurs économiques.

Lorsque les prix des biens et services, des facteurs de production ne peuvent être plus raisonnablement considérés comme exogènes, alors il faut développer des modèles dit macroéconomiques ou de marché. Ces modèles sont potentiellement très nombreux. Mais, là encore, il y a peu de travaux ayant développé ce type de modèles dans le cas de la Bretagne (aucun à notre existence sur les deux territoires d'étude). Dans la littérature, il est usuel de distinguer ces modèles entre les modèles dits d'équilibre partiel (EP) et les modèles d'équilibre général calculable (EGC). Les premiers considèrent un nombre limité de marchés de produits et/ou un facteur sur un territoire donné (par exemple, le marché français du blé). Les seconds appréhendent par définition l'ensemble des marchés de produits (qu'ils soient agricoles et non agricoles) et facteurs sur un territoire donné (une région, un pays, un groupe de pays, le monde).

Cette sous-section débute par présenter les principes des modèles macroéconomiques en EP. Elle poursuit avec la modélisation en EGC qui englobe les modèles EP et qui sera utilisée dans la suite du rapport pour mesurer les emplois induits notamment. Nous reportons enfin les résultats de deux études traitant de problématiques agricoles bretonnes et utilisant des modèles macroéconomiques.

Dans cette sous-section, nous ne détaillons pas l'enjeu de la détermination des paramètres spécifiés dans ces modèles. Il est de même nature que celui évoqué ci-dessus sur la validation statistique des modèles microéconomiques. D'ailleurs, la robustesse statistique de ces modèles macroéconomiques s'appuie souvent sur les travaux micro-économétriques.

1.2.a. Principes de la modélisation macroéconomique en équilibre partiel (EP)

Les modèles macroéconomiques en EP considèrent les différentes composantes d'un certain nombre de marchés. Un modèle implicitement utilisé dans de nombreux débats agricoles en France est le modèle Aglink Cosimo développé par l'OCDE et la FAO. Il est mobilisé par la Commission Européenne pour établir les projections annuelles sur les marchés agricoles européens. Ce modèle fournit donc des projections sur 10 ans en termes de prix des produits agricoles tout spécialement, qui peuvent guider les acteurs économiques dans leur choix de court et moyen terme (par exemple, définition des plans de financement entre des agriculteurs et des banques pour des investissements).

Dans ce type de modèles, les différentes variables d'un marché sont explicitées. Considérons l'exemple des marchés des céréales. Les offres des agriculteurs sont représentées par des équations similaires à celles développées dans les modèles micro-économétriques et vues ci-dessus. Très souvent, les données ne sont pas disponibles pour tous les agriculteurs d'un territoire, les équations sont alors appliquées à une échelle agrégée sous l'hypothèse de l'existence d'un producteur représentatif (ou comportement moyen des exploitations au sein d'une zone).

Ces modèles macroéconomiques détaillent également les demandes des agents pour les produits concernés. Toujours dans le cas des céréales, cela comprend la demande de céréales par les firmes de l'alimentation animale et par les firmes de l'alimentation humaine (meunerie par exemple). Selon les objectifs poursuivis par les études, ces modèles en EP peuvent aussi déterminer les volumes de stocks spéculatifs ou encore les usages industriels des céréales (pour la production d'énergie, comme les biocarburants ou la méthanisation). Enfin les échanges avec les zones tiers (importations et exportations) sont aussi représentés.

Pour toutes ces variables, des fonctions sont spécifiés pour expliquer leurs évolutions, notamment leurs dépendances aux prix (mesurées par les élasticités prix). Des règles de fonctionnement des marchés sont alors supposées. Typiquement l'offre globale est supposée égale à la demande globale, le prix de marché est la variable qui va assurer cet équilibre et les acteurs du marché réagissent aux mêmes variations de prix.

Mathématiquement, un modèle en EP simplifié peut s'écrire de la façon suivante :

$$\sum_i Q_{it}(P_t, W_{it}, WL_{it}, S_{it}, LF_{it}, K_{it}) = \sum_j D_{jt}(P_t, ZD_t)$$

Le membre de gauche de cette égalité mesure l'offre agrégée des différents producteurs (voir sous-section précédente pour l'offre de l'agriculteur i). Le membre de droite mesure la demande agrégée des différents utilisateurs (indiqués par j dans cette équation pour faire la distinction avec les producteurs). Comme la fonction d'offre, la fonction de demande peut s'obtenir de modèle microéconomique et dépend du prix du produit et diverses autres variables exogènes (par exemple,

taille de la population, revenu des ménages). Dans cette équation, nous avons supposé pour simplifier les notations que tous les agents font face au même prix du produit. Le prix est une variable endogène (qui varie) pour assurer l'égalité.

Dans la pratique, les fonctions spécifiées dans ce type de modèle contiennent plusieurs paramètres dont les valeurs sont généralement choisies pour reproduire une situation observée (par exemple la situation du marché du blé lors d'une campagne donnée) et des réponses aux prix des acteurs (les élasticités prix). Lorsque les niveaux de ces paramètres sont déterminés, alors ces modèles peuvent être utilisés pour faire des projections, i.e. déterminer les niveaux possibles des prix et de productions sur les 10 prochaines années et examiner la sensibilité de ces projections à différents chocs (par exemple, différents contextes d'évolution des revenus des ménages). Ces modèles servent aussi et même beaucoup à simuler les conséquences potentielles de scénarios politiques (par exemple, quelles conséquences sur l'agriculture française du Brexit).

Sur le plan informatique, la résolution de ce type de modèle dépend surtout de leur taille et complexité. Des modèles de petite taille (i.e. avec un nombre limité de marchés et de composantes sur chaque marché) et de complexité limitée (par exemple avec des fonctions linéaires d'offre et demande) peuvent être résolus avec des logiciels tableurs gratuits. Par contre, les modèles de grande taille (nombreux marchés/composantes) et complexe (fonctions discontinues par exemple) sont majoritairement résolus par des logiciels scientifiques, à l'aide de solveurs spécifiques. Ces dernières années, de nouveaux logiciels scientifiques gratuits ont été développés, permettant alors de partager plus facilement les modèles.

1.2.b. Principes de la modélisation macroéconomique en équilibre général calculable (EGC)

Même si leur nom peut a priori être intimidant, les modèles macroéconomiques d'équilibre général calculable (EGC) constituent dans leurs principes un prolongement modeste des précédents modèles en EP. En effet, ils se distinguent essentiellement sous deux dimensions. D'une part, tous les marchés de biens, services et facteurs présents sur un territoire sont représentés. D'autre part, les budgets de tous les acteurs économiques du territoire sont équilibrés.

Expliquons un peu plus en détail cette deuxième distinction. Les acteurs économiques d'un territoire sont nombreux et usuellement distingués en trois : les entreprises, les ménages et les secteurs institutionnels (par exemple l'Etat, les régions). Qu'entendons-nous par budgets équilibrés ? Dans le cas des entreprises agricoles, cela signifie que les profits (ou pertes) annuels générés par les exploitations agricoles, nets des investissements, sont perçus (supportés) par les ménages agricoles propriétaires de ces exploitations. Selon leur statut, les profits (pertes) générés par les entreprises

agroalimentaires, nets des investissements, sont distribués aux actionnaires sous formes de dividendes et/ou épargnés.

Pour les ménages, un budget équilibré signifie que leurs recettes (issues de salaires, rentes, pensions, ...) sont complètement utilisées pour financer les dépenses de consommation et leur épargne (et éventuellement investissement). De même les secteurs institutionnels (par exemple régions) ont des budgets équilibrés (éventuellement par des déficits financés par des acteurs étrangers).

Cette prise en compte du budget de tous les acteurs économiques d'un territoire est nécessaire pour calculer les emplois dits induits suite à un scénario. Rappelons que l'objectif dans cette étude est de mesurer les impacts sur les revenus, les emplois directs et induits de changements de pratique agricoles favorables à la qualité de l'eau. Or que sont précisément les emplois directs et induits ? Les emplois directs désignent les emplois directement liés à la production de produits ou de services du secteur d'intérêt, dans notre cas les exploitations agricoles des deux territoires. Ces emplois directs dans l'agriculture sont liés aux emplois dans les entreprises situées en amont et en aval de ces exploitations agricoles, par la vente/achats de biens et services. Ces emplois amont et aval sont qualifiés d'indirects. Enfin, les emplois induits résultent des valeurs ajoutées créées dans les filières (agricoles dans notre cas), qui sont distribuées aux secteurs institutionnels, tout spécialement aux ménages. Ces revenus des ménages sont utilisés en partie pour acheter différents biens et services (par exemple, logement, loisirs) et donc favorisent l'emploi dans ces différents secteurs d'activités. Les emplois induits sont donc les emplois générés dans les différentes activités du territoire et qui résultent des revenus générés par la filière étudiée.

Le calcul des emplois induits nécessite donc de tenir compte du budget (ressources emplois) des différents agents économiques d'un territoire et donc d'une modélisation macroéconomique en EGC. Dans la pratique, pour calculer ces emplois directs, indirects et induits, il faut comparer une situation observée avec la filière étudiée et une situation (dite contrefactuelle ou simulée ou théorique) sans cette filière. Ce type d'exercice est rarement fait. A l'inverse, il est souvent analysé les variations d'emploi direct, indirect et induit suite à un choc sur la filière étudiée et différentes règles de fonctionnement des marchés (comme pour les modèles en EP). Par exemple, dans Gohin et al. (2015), le choc économique simulé était la diminution de la demande mondiale en porcs et en lait consécutive à la mise en place de l'embargo russe sur les produits agricoles européens (ainsi que les produits de Norvège, d'Australie, du Canada et des États-Unis). L'hypothèse keynésienne adoptée est que la baisse de la demande entraîne une baisse de la production qui se répercute à la fois sur les consommations intermédiaires mais aussi sur les dépenses des ménages (dont agricoles).

Si dans les principes les modèles EGC sont donc proches des modèles EP, leur mise en œuvre et résolution est plus lourde. La collecte des données est nettement plus conséquente (regrouper tous les budgets et tous les marchés). Par ailleurs, de nombreuses équations sont non linéaires et leur résolution nécessite des algorithmes spécifiques. Ils commencent à être introduits dans les logiciels récents gratuits.

1.2.c. Quelques résultats de modélisation macroéconomique au niveau des territoires

Nous résumons les résultats de deux études récentes appliquées à des problématiques agricoles bretonnes. La première s'appuie sur un modèle macroéconomique en EP, la seconde un modèle en EGC.

Letort et al. (2017) ont développé un modèle d'équilibre partiel centré sur le foncier en Bretagne. Plusieurs types de fermes (laitières, porcines, mixtes) ont des demandes de foncier qui dépendent du prix de la terre et des contraintes environnementales (épandage d'azote organique). Les paramètres de ce modèle sont calés sur l'année 2010, à partir des informations du réseau d'information comptable agricole (RICA, voir partie suivante). Les auteurs ont exploré 4 scénarios : hausse du coût de traitement de l'azote, diminution généralisée des normes d'épandage, diminution ciblée sur certaines zones de ces mêmes normes d'épandage et enfin introduction d'aides directes aux surfaces en prairies. Les trois premiers scénarios conduisent à une diminution du prix d'équilibre de la terre car le nombre d'exploitations agricoles diminue faute de rentabilité suffisante. S'ensuit une diminution conséquente de la production porcine (jusqu'à 20% dans le premier scénario) et au contraire des impacts légèrement positifs pour les exploitations herbivores. Le quatrième scénario conduit au contraire à une augmentation du prix de la terre car les exploitations reçoivent globalement plus de subventions, donc sont plus profitables et se concurrencent plus fortement sur le foncier. Là encore, la production porcine diminue et la production d'herbivores augmente.

Gohin et Rault (2013) ont simulé avec un modèle d'équilibre général dynamique les conséquences d'un éventuel épisode de fièvre aphteuse en Bretagne de taille équivalente à l'épisode britannique de 2001, soit un abattage de 10% du cheptel bovin et porcin, accompagnée d'une perte temporaire des marchés d'exportation. Ces auteurs s'appuient sur des données bretonnes rassemblées pour l'année 2003 et calculent les impacts sur plusieurs années afin de prendre en compte les contraintes biologiques sur les productions animales et le caractère temporaire du choc. Lorsque l'existence d'un chômage involontaire est prise en compte, ils calculent alors les pertes d'emploi liés à ce choc sur l'ensemble de l'économie bretonne. Ces pertes sont évidemment massives juste après l'épisode car de nombreux animaux (circulants et reproducteurs) sont abattus et ne sont plus productifs. Les pertes d'emploi peuvent dépasser les 10% dans certaines branches (abattoirs notamment) et au niveau de la Bretagne toute entière, ces pertes atteignent 0,7% la première année (soit une augmentation du chômage

involontaire de 0,7%, passant de 8% à 8,7%). Les années suivantes, la fièvre aphteuse étant éradiquée et les exportations à nouveau possibles, les niveaux de production augmentent progressivement mais ne retrouvent pas la situation avant l'épisode de fièvre aphteuse. Au nouvel équilibre stationnaire, les auteurs concluent notamment à une baisse de la production et de l'emploi dans la filière bovine et au niveau breton, une augmentation du chômage de 0,2% (passage de 8% à 8,2%).

1.2.d. Synthèse

Les modèles macroéconomiques se divisent entre les modèles en équilibre partiel et les modèles en équilibre général calculable. Les premiers sont plus faciles à mettre en œuvre et les seconds permettent d'explorer plus d'effets. Le modèle macroéconomique que nous développerons dans la troisième partie retient l'approche d'équilibre général calculable, permettant de calculer les emplois induits d'un changement de pratiques agricoles.

DEUXIEME PARTIE. LES DONNEES

L'objectif initial de l'étude est d'analyser les conséquences de changements de pratiques agricoles dans deux bassins versants: le Couesnon et la Haute-Rance. Nous avons donc cherché les bases de données techniques et économiques sur ces deux bassins versants qui pourraient alimenter les modèles économiques à développer. Nous présentons ci-dessous de manière générale ces bassins versants, puis décrivons les propriétés des bases de données disponibles.

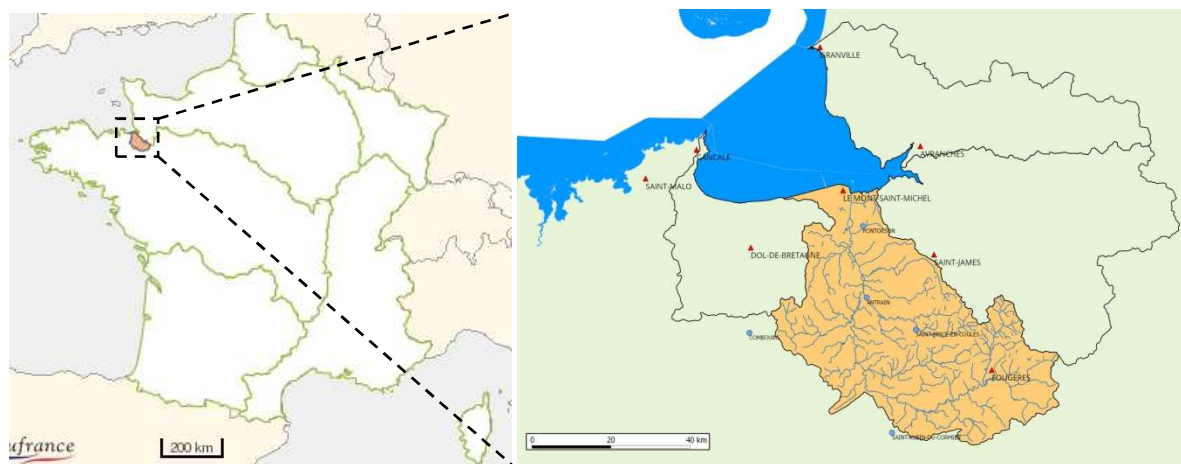
2.1. Présentation générale des zones d'étude

2.1.a. Le bassin versant du Couesnon

Le bassin versant du Couesnon s'étend sur une superficie de 1130 km², recouvrant 55 communes d'Ille et Vilaine et 15 communes de la Manche. Le Couesnon se jette en baie du Mont-Saint-Michel, lieu très touristique. Situé au Nord de l'Ille-et-Vilaine, le bassin versant est géré par le SAGE Couesnon depuis l'arrêté préfectoral du 21 juin 2004. Le bassin versant du Couesnon se divise en quatre sous bassins versants : le Haut Couesnon, le Moyen Couesnon, la Loisanse Minette et enfin la Basse Vallée du Couesnon.

Le bassin versant du Couesnon bénéficie d'un climat de type océanique avec une température moyenne de 11°C et une forte pluviométrie. Conjugué à la faible perméabilité de ses sols, ce dernier point a contribué à la formation d'un réseau hydrographique très dense. En tout, 6 cours d'eau importants traversent le territoire : le Nançon, la Minette, la Loisanse, le Tronçon, la Guerge, la Tamoute et le Rau du Chênélais. Cependant, comme la région est peu soumise à des incidents climatiques importants, les débits des cours d'eau sont donc très largement tributaires de la pluviométrie directe.

Le territoire du SAGE Couesnon (a. en France ; b. autour de la baie du Mont-Saint-Michel)



Dans le cadre de l'élaboration du SAGE, les acteurs ont souligné de nombreuses problématiques liées aux pollutions d'origine agricole, notamment concernant les concentrations en nitrates, en phosphore et en pesticides. Les niveaux de pollution sont tels qu'ils questionnent quant au respect des normes européennes. Les acteurs locaux cherchent à mobiliser les agriculteurs afin qu'ils améliorent leurs pratiques agricoles. Le changement de pratiques doit permettre d'atteindre les objectifs fixés par le SAGE, i.e. :

La restauration de la qualité de l'eau, des cours d'eau et des milieux aquatiques ;

La préservation de la baie du Mont-Saint-Michel ;

La sécurisation de l'alimentation en eau potable ;

La préservation de la libre circulation des poissons et notamment des saumons ;

L'organisation des acteurs afin d'atteindre les autres objectifs.

2.1.b. La Haute-Rance

La Haute-Rance est le deuxième bassin versant de l'étude. Situé à quelques dizaines de kilomètres de Rennes, il fournit près de 40 % de l'eau de la métropole rennaise. La problématique liée à la réduction des pollutions d'origine agricole est donc cruciale sur ce territoire.

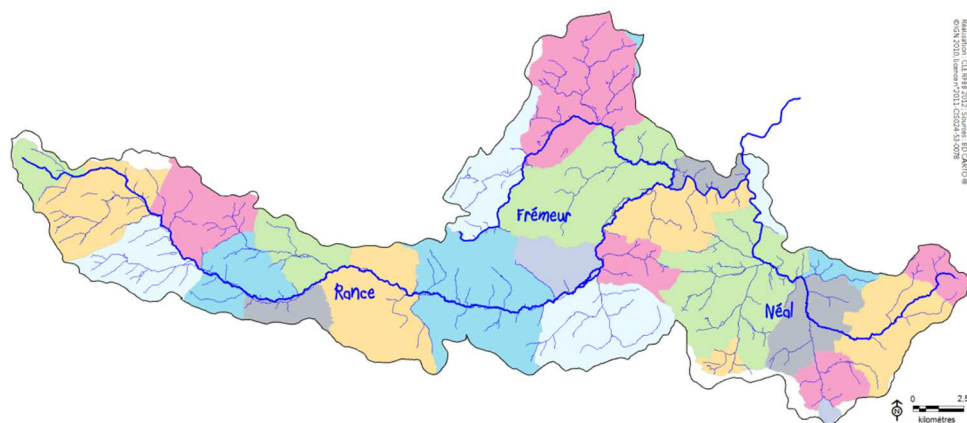
D'une superficie de 374 km², le BV est géré par le SAGE « Rance Frémur baie de Beaussais » qui a été approuvé par la préfecture en novembre 1998 (Figure 1). Ce SAGE travaille sur les bassins versants de la Rance, du Frémur et des petits côtiers entre la Pointe du Grouin (Cancale) et la Pointe du Chevet (Saint-Jacut de la Mer) pour un territoire total de 1330 km².

Le territoire du SAGE Rance Frémur baie de Beaussais



En particulier, le BV de la Haute-Rance est situé au Sud-Ouest du SAGE. Il recouvre, au moins partiellement, 26 communes des Côtes d'Armor et d'Ille-et-Vilaine et est traversé par trois cours d'eau : la Rance, le Frémeur et le Néel.

Les cours d'eau présents sur le bassin versant de la Haute-Rance



La fourniture d'eau pour la métropole rennaise est réalisée grâce au barrage de Rophémel, situé sur la commune de Guenroc. Alors que sa construction au début des années 1930 visait seulement la production d'électricité, le développement de la région au sortir de la guerre a conduit les décideurs publics à élargir son utilisation et en ont fait une retenue pour la fourniture d'eau potable. Depuis 1963, le barrage permet de stocker un volume d'eau de 5 millions de m³ et produit chaque année entre 8 à 10 millions de m³ d'eau potable. Il est toujours utilisé pour la production d'électricité, notamment en heures pleines.

Le rôle essentiel de ce bassin dans le quotidien des Rennais a évidemment un effet sur la gestion des terres et de l'agriculture de ce territoire. Les niveaux de qualité d'eau requis nécessitent que les pratiques des activités économiques du territoire soient raisonnées. Suite aux premières actions lancées en 2001 qui visaient avant tout la lutte contre les émissions de nitrates et de pesticides, le SAGE actuel a pour objectif de respecter les points issus de la Directive Cadre sur l'Eau et notamment un bon état généralisé des milieux aquatiques du territoire.

Ainsi, les collectivités locales du bassin versant s'occupent de restaurer les lits des cours d'eau et de leurs berges. Elles ont par exemple investi pour recréer du bocage sur le territoire afin de réduire l'érosion des terres et le ruissellement des eaux. Elles ont aussi inventorié les zones humides du bassin en vue de leur préservation. Elles agissent aussi à l'échelle des ménages en travaillant sur la mise en conformité des assainissements individuels et sur l'amélioration de leur assainissement collectif.

Les agriculteurs sont bien sûr concernés par ces actions. Les collectivités les incitent à changer de pratiques et organisent la transition. Ainsi, la Haute-Rance est le premier bassin versant breton contractualisé en mesures agro-environnementales (MAE). Plus de 35% des agriculteurs du bassin versant ont notamment signé une MAE concernant la baisse de leur utilisation de pesticides. Depuis le lancement des actions, l'utilisation de pesticides par les agriculteurs de la zone a baissé de 70 %. Aujourd'hui, les préoccupations concernent toujours les émissions de pesticides mais de plus en plus les risques d'eutrophisation de la retenue de Rophémel.

Dans le cadre de la construction du SAGE, les acteurs locaux ont cherché à créer un projet de territoire permettant d'avoir une gestion intégrée des eaux et d'organiser les activités économiques autour de la production d'eau potable. Dans le cadre du projet agricole issu de ce projet de territoire, quatre objectifs ont été élaborés pour l'agriculture :

Tendre vers une plus grande autonomie du territoire ;

Augmenter la valeur ajoutée et l'emploi ;

Maximiser le fonctionnement des écosystèmes et optimiser le fonctionnement des exploitations ;

Anticiper et échanger autour des questions de gestion intégrée de l'eau.

2.2. Les bases de données mobilisables

Nous développons dans la troisième partie deux modèles : un modèle micro-économétrique expliquant les décisions des exploitations agricoles et leurs réactions potentielles à des changements (de prix, subventions, réglementations) d'une part, un modèle macroéconomique d'équilibre général pour notamment simuler les emplois induits d'autre part. Ce deuxième modèle sera dans une large part alimenté par un précédent travail (Gohin et al., 2015), nous le complétons essentiellement au niveau de la représentation des exploitations agricoles. Aussi nous portons l'accent dans cette sous-section sur les données rassemblées sur ces exploitations.

Pour mettre en œuvre un modèle micro-économétrique adapté aux exploitations des deux bassins versants et simulant les conséquences de changements de pratiques agricoles, plusieurs types d'informations doivent être rassemblées. Idéalement une description précise des caractéristiques des exploitations (par exemple structure du parcellaire, nombre de bâtiments, proximité avec les entreprises amont aval, statut des propriétaires des exploitations, contrats de commercialisation) et leurs comptabilités analytiques disponibles sur plusieurs années nous permettraient d'identifier statistiquement l'importance des facteurs économiques (rôle des prix, subventions, contraintes environnementales, ...) dans les évolutions passées. Cependant, ces informations ne sont bien souvent pas collectées et lorsqu'elles le sont, restent souvent confidentielles pour un usage privé. Elles sont rarement mises à disposition des travaux de recherche comme dans ce présent travail.

Aussi nous avons travaillé avec des bases de données publiquement construites (et très majoritairement publiquement accessibles). Bien que non idéal, cet usage de données publiques procure deux avantages principaux: la neutralité des données utilisées pour l'étude d'une part (elles n'ont pas été construites spécifiquement pour l'étude et donc sont non biaisées par rapport à ces objectifs), la possibilité de répliquer le travail à l'avenir et/ou pour d'autres territoires d'autre part.

2.2.a. Le recensement agricole

i/ Présentation

Le recensement agricole est l'une des plus importantes opérations statistiques du ministère de l'agriculture. Cette enquête permet d'obtenir une photographie précise et actualisée de l'agriculture à un moment donné. Jusqu'à présent, 5 recensements ont eu lieu (en 1970, 1979, 1988, 2000 et 2010). Les données récoltées sont fournies de l'échelle nationale jusqu'à la commune. Elles sont aussi disponibles aux échelles régionales, départementales et cantonales. Contrairement aux autres enquêtes du Ministère, celle-ci s'intéresse à toutes les exploitations, mêmes les plus petites. En effet, pour être recensé, il suffit de remplir 3 conditions :

avoir une activité agricole ;

avoir une gestion courante indépendante ;

atteindre ou dépasser un certain seuil en superficie, en production ou en nombre d'animaux.

Pour le recensement de 2010, 514 694 exploitations agricoles ont été recensées dans toute la France. Le recensement agricole fournit, entre autres, des informations sur les cultures, les cheptels, les surfaces utilisées mais aussi sur le mode de gestion et les emplois présents dans les exploitations agricoles ou encore, des informations sur la diversification et la commercialisation des produits. Les variables renseignées peuvent être continues ou discrètes. Seules les données financières des exploitations ne sont pas collectées. Les limites de ce travail résident principalement sur la forme de l'enquête, puisque qu'il s'agit des données déclaratives données de mémoire par les exploitants, et l'absence de données comptables ou financières.

Etant donné la date de réalisation du dernier recensement agricole, la situation initiale du Couesnon et de la Haute-Rance est celle de l'année 2010. Cette date correspond aux données mobilisés dans Gohin et al. (2015) pour la partie macroéconomique.

Le recensement agricole fournit des données publiques dont l'accès est possible grâce à l'outil DISAR³ du Ministère de l'Agriculture dès lors que l'on reste à l'échelle de la commune. Par ailleurs nous sommes contraints par les règles du secret statistique.

li/ Recensement agricole et secret statistique

L'exploitation des données communales nous permet de connaître, entres autres, le nombre d'exploitations, la quantité de travail et de terre totale par commune et par OTEX (Orientation Technico-Economique des Exploitations). Cependant, les règles du secret statistique qui s'appliquent en France nous empêche d'avoir une vision exhaustive de l'agriculture du bassin versant. En effet, dès lors qu'une information ne concerne pas au moins trois agriculteurs, celle-ci ne peut être diffusée. Dans notre cas, cela signifie que les informations sont indisponibles pour les communes dont les exploitations d'une OTEX sont strictement inférieures à 3 et non-nulles. En d'autres termes, les communes concernées par le secret statistique au niveau d'une OTEX sont celles qui ont seulement 1 ou 2 exploitations dans l'OTEX. Le secret statistique peut aussi s'appliquer si un individu pèse plus de 85% de la valeur agrégée à la commune.

Le secret statistique peut limiter la précision de nos mesures. En effet, dans la mesure où il n'est pas possible d'obtenir les informations de manière agrégée pour l'ensemble des deux bassins versants, nous sommes obligés de sélectionner les exploitations par commune et par OTEX. Dans le cas du Couesnon, le secret statistique concerne ainsi entre 11 % et 43 % des communes en fonction des OTEX. Nous avons essayé de dépasser ce problème du secret statistique de la manière suivante.

Lorsque qu'une donnée est concernée par le secret statistique, nous savons qu'elle est égale à 1 ou à 2, il est possible d'estimer le poids de ces communes dans l'agriculture locale moyennant certaines hypothèses. En réalisant l'hypothèse que les exploitations concernées par le secret statistique sont similaires à celles non-concernées, nous pouvons pondérer les résultats obtenus pour les données disponibles. En effet, la valeur minimale prise par la variable d'intérêt sur le bassin versant est comprise entre une fois et deux fois le nombre de communes concernées par le secret statistique multiplié par la valeur moyenne des communes non-concernées, multiplication à laquelle nous ajoutons de toute façon la valeur totale de la variable d'intérêt pour les communes non-concernées par le secret statistique. En termes mathématiques, cela nous donne:

$$V_{\text{tot}} \in [V_{\text{nc}} * \left(1 + \frac{N_c}{(E_{\text{tot}} + N_c)}\right) ; V_{\text{nc}} * \left(1 + \frac{2 \cdot N_c}{(E_{\text{tot}} + 2 \cdot N_c)}\right)]$$

Avec :

³ <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>

V_{tot} la somme de la valeur de la variable d'intérêt pour l'ensemble du bassin versant ;

V_{nc} la somme de la valeur de la variable d'intérêt pour les exploitations présentes dans les communes non-concernées par le secret statistique ;

N_c le nombre de commune concernée par le secret statistique ;

E_{tot} le nombre d'exploitations présentes dans les communes non-concernées par le secret statistique.

Nous pouvons aussi écrire que :

$$V_{tot} = V_{nc} * \left(1 + \frac{\frac{3}{2} \cdot N_c}{(E_{tot} + \frac{3}{2} \cdot N_c)} \pm \frac{\frac{1}{2} \cdot N_c}{(E_{tot} + \frac{1}{2} \cdot N_c)} \right)$$

En supposant une distribution équilibrée des situations où la valeur du secret statistique est 1 ou 2, nous obtenons :

$$V_{tot} = V_{nc} * \left(1 + \frac{\frac{3}{2} \cdot N_c}{(E_{tot} + \frac{3}{2} \cdot N_c)} \right)$$

Cette équation est donc valable sous l'hypothèse que les exploitations concernées par le secret statistique sont structurellement comme les autres. De plus, nous avons supposé que les problèmes de secret statistique liés au 85 % pouvaient ne pas être pris en compte. En effet, à la vue des extractions pour les deux bassins versants, il était rare de trouver une ligne pour laquelle le nombre d'exploitation dans la commune était supérieur à 3 et dont la valeur d'une des variables (e.g. SAU, UTH, chiffre d'affaires) était « floutée ». Par ailleurs, ces situations ne concernent que les communes où il y a peu d'agriculteurs d'une OTEX.

Ainsi, à partir des données du Recensement Agricole et de l'équation ci-dessus, nous pouvons reformer les situations initiales des deux bassins versants.

lii/ La situation initiale du Couesnon

Comme nous l'avons vu plus haut, entre 11 et 43 % des communes du bassin versant sont concernées par le secret statistique. Ces rapports sont élevés et reflètent la difficulté d'estimation de la situation initiale, en particulier pour certaines OTEX. Nous n'avons par exemple aucune donnée à propos des performances des huit exploitations en cultures fruitières et autres cultures permanentes de la zone. Nous ne pouvons donc pas simuler les modifications de pratiques de ces exploitations, bien que les activités fruitières soient particulièrement consommatrices de produits phytosanitaires.

En faisant abstraction des communes avec zéro exploitation d'une OTEX, nous pouvons vraiment apprécier la diversité des situations en fonction des OTEX. En effet, les rapports entre les communes concernées par le secret statistique sur celles non concernées sont élevés dans la majorité des cas. Il est

par exemple de 4,14 pour les exploitations à orientation bovins mixtes. Cela signifie qu'il y a 4 fois plus de communes concernées par le secret statistique que de communes pour lesquelles il y a au moins 3 agriculteurs. A l'inverse, ce rapport reste faible pour les exploitations à orientation laitière (0,19), et dans une moindre mesure pour les exploitations orientées vers l'élevage hors sol (0,54). Ce rapport reste tout de même inférieur à 1 pour les exploitations en grandes cultures (0,90) et celles en polyculture et polyculture-élevage (0,74).

Communes du Couesnon concernées par le secret statistique par OTEX (Recensement Agricole 2010)

	Communes concernées secret statistique	Communes sans agriculteurs	Communes avec > 3 agriculteurs
Grandes cultures (Otex 15, 16)	29	9	32
Maraîchage et horticulture (Otex 21, 22)	10	56	4
Cultures fruitières et autres permanentes (Otex 36, 37, 38)	8	62	0
Bovins lait (Otex 45)	11	2	57
Bovins viande (Otex 46)	30	17	23
Bovins mixte (Otex 47)	29	34	7
Ovins, caprins et autres herbivores (Otex 48)	26	21	23
Elevages hors sol (Otex 51, 52, 53, 74)	21	10	39
Polyculture, polyélevage, autres (Otex 61, 73, 83, 84, 90)	26	9	35

Si ces rapports sont relativement élevés, il faut les comparer avec le nombre d'exploitations présentes dans le cas où les communes ne sont pas concernées par le secret statistique. En effet, il y a souvent plusieurs dizaines d'agriculteurs par commune. Le nombre d'éleveurs laitiers dans les communes non-concernées par le secret statistique est particulièrement élevé en comparaison du nombre de communes concernées par le secret statistique. D'ailleurs le bassin versant est principalement à orientation laitière puisque 60% de la SAU, 53% des emplois et 47% du chiffre d'affaires (CA) non concernés par le secret statistique sont détenus par les exploitations laitières. Les élevages hors-sol sont aussi particulièrement bien représentés dans cet échantillon.

Nombre d'exploitations, SAU, UTH et productions brutes par OTEX pour les communes du Couesnon non concernées par le secret statistique (Recensement Agricole 2010)

	Nombre	SAU (Ha)	UTH	Productions brutes (en milliers d'euros)
Grandes cultures (Otex 15, 16)	188	6016	214	8769
Maraîchage et horticulture (Otex 21, 22)	13	30	43	896
Cultures fruitières et autres permanentes (Otex 36, 37, 38)	0	0	0	0
Bovins lait (Otex 45)	655	42625	1176	89627
Bovins viande (Otex 46)	110	2237	66	2308
Bovins mixte (Otex 47)	26	1399	36	3254
Ovins, caprins et autres herbivores (Otex 48)	96	638	42	589
Elevages hors sol (Otex 51, 52, 53, 74)	244	10825	398	65506
Polyculture, polyélevage, autres (Otex 61, 73, 83, 84, 90)	161	7545	228	18800

Afin de pouvoir réaliser davantage de comparaison et d'intégrer les exploitations non prises en compte à cause du secret statistique, nous procédons à une transformation des données du tableau ci-dessus à partir de l'équation expliquant V_{tot} , i.e. à partir de l'hypothèse où la valeur du secret statistique est en moyenne de 1,5 dans l'échantillon et que les exploitations concernées par le secret statistique ont la même structure que celles non-concernées par le secret statistique.

Le tableau ci-dessous donne les résultats de ces estimations. Sans surprise, les activités liées à l'élevage sont majoritaires au sein du bassin versant. En effet, près de 85 % des exploitations du territoire ont une activité principale liée à l'élevage. Elles représentent 91 % de la SAU, 86 % des emplois et 94 % du chiffre d'affaires total. Comme nous l'avons souligné plus haut, ce sont surtout des exploitations laitières (estimées au nombre de 672), des élevages hors-sol (276), des exploitations en polyculture-élevage (200) et des élevages tournés vers la production de viande bovine (155). Il y a tout de même un nombre important d'exploitations spécialisées en grandes cultures (estimées au nombre de 232). Les exploitations en maraîchage, en horticulture, en cultures fruitières ou permanentes sont marginales sur le bassin versant. Il à noter que les exploitations en ovins, caprins et autres herbivores

sont globalement surreprésentées sur ce bassin versant par rapport au reste de la Bretagne. Cela peut s'expliquer par la présence de prés salés à proximité du site du Mont-Saint-Michel.

Une première analyse de la répartition des emplois indique que, outre les exploitations maraîchères, ce sont les exploitations laitières qui nécessitent le plus de main d'œuvre (1,79 UTH en moyenne). Ce sont les élevages hors sol qui dégagent le plus de chiffres d'affaires de leurs activités avec une moyenne de 268 k€ par exploitation. En comparaison les exploitations laitières ne dégagent qu'un produit brut de 137 k€ par exploitation.

Estimation des nombres d'exploitation, SAU, UTH et productions brutes par OTEX pour le Couesnon (Recensement Agricole 2010)

	Nombre	SAU (Ha)	UTH	Productions brutes (k€)
Grandes cultures (Otex 15, 16)	232	7408	264	10798
Maraîchage et horticulture (Otex 21, 22)	28	65	93	1930
Cultures fruitières et autres permanentes (Otex 36, 37, 38)	12	0	0	0
Bovins lait (Otex 45)	672	43699	1206	91885
Bovins viande (Otex 46)	155	3152	93	3252
Bovins mixte (Otex 47)	70	3740	96	8698
Ovins, caprins et autres herbivores (Otex 48)	111	738	49	681
Elevages hors sol (Otex 51, 52, 53, 74)	276	12222	449	73963
Polyculture, polyélevage, autres (Otex 61, 73, 83, 84, 90)	200	9373	283	23354

A partir des hypothèses ci-dessus, nous pouvons par exemple apprécier les pratiques culturales des exploitations du bassin versants. Sur les 1756 exploitations présentes, la majorité a des pratiques respectueuses de l'environnement. Ainsi, 84% exploitations de la zone n'appliquent pas à toutes leurs parcelles des engrais minéraux. Ces parcelles représentent 16% de la SAU du bassin versant. Nous remarquons que 1810⁴ exploitations n'ont pas recours systématiquement aux herbicides, soit plus de 40% de la SAU totale. Les pratiques de labour sont aussi diversifiées même si le labour conventionnel reste très largement la technique la plus utilisée.

⁴ Ce total est supérieur au nombre d'exploitations estimées dans le tableau 4. Cela est dû aux approximations liées au secret statistique.

Estimation des pratiques culturales des exploitations du Couesnon (Recensement Agricole 2010)

	Exploitations en ayant ou pratiquant	Superficie agricole utilisée concernée
Couvert végétal pour piège à nitrates et engrais verts	1123	18828
Cultures dérobées en hiver	442	4421
Résidus du précédent cultural en hiver	339	3971
Même culture annuelle pendant les 3 dernières campagnes	595	5661
Labour conventionnel	1376	42010
Travail du sol de conservation (sans retournement ou réduit)	277	6383
Aucun travail du sol (semis direct)	128	2498
SAU n'ayant reçu aucun engrais minéral	1482	12602
SAU n'ayant reçu aucun herbicide	1810	32783
Haies entretenues	1544	
Haies mises en place	153	
Alignement d'arbres entretenus	1149	
Alignement d'arbres mis en place	136	

Iv/ La situation initiale de la Haute-Rance

Le secret statistique est encore plus problématique dans le cas de la Haute-Rance. En effet, il n'y a aucune commune dont les valeurs sont disponibles pour les OTEX 21, 22, 36, 37 et 38. De même, il n'y a qu'une commune pour laquelle les données ne sont pas floutées dans le cas des élevages bovins mixtes et viandes. Les données ne sont finalement satisfaisantes que pour les élevages laitiers et les élevages hors-sol. Elles le sont aussi, dans une moindre mesure, pour les exploitations en polyculture-élevage et en grandes cultures. Au regard des valeurs des variables prises par les communes non concernées par le secret statistique, on observe que le bassin versant est bien plus spécialisé que celui du Couesnon. Cela peut s'expliquer par le plus petit périmètre du bassin qui entraîne moins de diversité.

Communes de la Haute-Rance concernées par le secret statistique par OTEX (Recensement Agricole 2010)

	Communes concernées secret statistique	Communes sans agriculteur	Communes avec > 3 agriculteurs OTEX
Grandes cultures (Otex 15, 16)	9	3	14
Maraîchage et horticulture (Otex 21, 22)	6	20	0
Cultures fruitières et autres cultures permanentes (Otex 36, 37, 38)	2	24	0
Bovins lait (Otex 45)	4	0	22
Bovins viande (Otex 46)	13	7	6
Bovins mixte (Otex 47)	17	8	1
Ovins, caprins et autres herbivores (Otex 48)	11	14	1
Elevages hors sol (Otex 51, 52, 53, 74)	3	1	22
Polyculture, polyélevage, autres (Otex 61, 73, 83, 84, 90)	6	3	17

Nombre d'exploitation, SAU, UTH et productions brutes par OTEX pour les communes de la Haute-Rance non concernées par le secret statistique (Recensement Agricole 2010)

	Nombre	SAU (Ha)	UTH	Production brute (k€)
Grandes cultures (Otex 15, 16)	94	2288	48	1717
Maraîchage et horticulture (Otex 21, 22)	0	0	0	0
Cultures fruitières et autres cultures permanentes (Otex 36, 37, 38)	0	0	0	0
Bovins lait (Otex 45)	192	12707	353	27622
Bovins viande (Otex 46)	21	297	22	1551
Bovins mixte (Otex 47)	3	106	4	351
Ovins, caprins et autres herbivores (Otex 48)	4	61	3	78
Elevages hors sol (Otex 51, 52, 53, 74)	199	10923	406	76740
Polyculture, polyélevage, autres (Otex 61, 73, 83, 84, 90)	94	5749	169	15750
Ensemble	712	37252	1151	138368

Afin de pouvoir procéder à des comparaisons entre OTEX et entre les deux bassins versants, nous réalisons une nouvelle estimation de l'ensemble du bassin versant. Comme pour le cas des exploitations à dominantes fruitières dans le Couesnon, nous ne pouvons pas estimer les caractéristiques des exploitations en maraîchage et en cultures fruitières. Compte tenu de la répartition du secret statistique pour les OTEX 46 et 47, nous préférons ne pas réaliser d'estimation pour ces exploitations. En effet, le nombre de communes concernées par le secret statistique étant très supérieur à celui des communes avec plus de trois agriculteurs de l'OTEX, l'hypothèse de

structures similaires des agriculteurs est très contestable. Les caractéristiques des agriculteurs des exploitations concernées par le secret statistique seraient trop fortement indexées aux caractéristiques des agriculteurs d'une unique commune. Dans la mesure où ces exploitations ne représentent qu'une très faible part des exploitations du bassin versant, les ignorer n'induit pas de grandes différences dans les résultats finaux.

Le tableau ci-dessous donne les résultats des estimations du nombre d'agriculteurs, de la SAU, des UTH et des chiffres d'affaires pour chaque OTEX de la Haute-Rance. Comme pour le Couesnon, ce sont surtout des exploitations en lait et en élevage hors-sol qui sont représentées. Cependant, le point important est que les exploitations hors sol sont plus nombreuses que celles spécialisées en lait⁵, même si c'est de peu. En effet, il y a 3 fois plus d'exploitations laitières que d'exploitations hors sol dans le Couesnon. Le tissu agricole de la Haute-Rance n'est donc pas autant spécialisé que dans le Couesnon, même si il y a des écarts de représentativité bien plus importants entre ces deux types d'exploitations et les exploitations à autre orientation. Cela est particulièrement visible quand on s'intéresse aux productions. En effet, 25 % et 61 % des ventes du territoire sont dues respectivement aux exploitations laitières et aux élevages hors sol. 75 % des UTH travaillant sur ce bassin versant sont employés dans ces deux types d'exploitations.

Estimation du nombre d'exploitations, SAU, UTH et productions brutes par OTEX pour la Haute-Rance (Recensement Agricole 2010)

	Nombre	SAU (Ha)	UTH	Production brute (k€)
Grandes cultures (Otex 15, 16)	108	3080	65	2311
Maraîchage et horticulture (Otex 21, 22)	9			
Cultures fruitières et autres cultures permanentes (Otex 36, 37, 38)	3			
Bovins lait (Otex 45)	198	14662	407	31872
Bovins viande (Otex 46)	41	446	33	2327
Bovins mixte (Otex 47)	29			
Ovins, caprins et autres herbivores (Otex 48)	21			
Elevages hors sol (Otex 51, 52, 53, 74)	204	12183	453	85595
Polyculture, polyélevage, autres (Otex 61, 73, 83, 84, 90)	103	7076	208	19385

⁵ C'est vrai même en tenant compte des marges d'erreur liées au secret statistique. Elles s'élèvent à 2 agriculteurs pour les exploitations laitières et à 1,5 agriculteur pour les élevages hors-sol. Même si l'on a surestimé le nombre d'élevages hors-sol et surestimé ceux laitiers, l'écart entre les nombres d'exploitation est au minimum de 2 (200 exploitations laitières et 202 exploitations hors-sol).

Le recensement agricole fournit des informations intéressantes décrivant les caractéristiques structurelles et quelques pratiques agricoles sur les territoires d'étude. Par contre, cette base de données n'informe nullement sur les résultats économiques des exploitations. Décrivons à présent le Réseau d'Information Comptable Agricole.

2.2.b. Le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)

Le RICA fait partie d'une enquête réalisée dans tous les États membres de l'Union européenne selon des règles et des principes communs. Le RICA est disponible tous les ans depuis 1968 et donne accès aux données comptables des exploitations françaises. Les données récupérées compilent résultats économiques et informations physiques de l'exploitation, et ce pour plusieurs centaines de variables. L'utilisation de cette base de données permet notamment d'analyser les revenus dégagés par les exploitations et de simuler l'impact de politiques agricoles.

Contrairement au recensement agricole, l'enquête n'est pas menée sur l'ensemble des exploitations agricoles françaises. En effet, étant donné la quantité d'informations recueillies, seules quelques centaines d'exploitations sont interrogées par région. Le recrutement est réalisé par les services régionaux de l'information statistique économique (SRISE) auprès de certains centres de gestion et avec le consentement de l'exploitant. Les exploitations sont éligibles dès lors que leur Production Brute Standard (PBS) est supérieure à 25 000€. Ainsi, près de 7500 exploitations sont enquêtées chaque année en France. Elles sont choisies de telle sorte à ce qu'elle représente bien la diversité des exploitations d'une région. En effet, il est possible à l'aide d'un coefficient d'extrapolation de retrouver la contribution réelle de chaque OTEX à l'économie de la région. Nous avons d'ailleurs utilisé cette base de données pour la désagrégation des branches d'élevage dans la Matrice de Comptabilité Sociale bretonne. Le niveau d'informations disponibles nous fournit la structure des dépenses et des emplois ainsi que la rémunération des facteurs de production (i.e. terre, travail et capital) de ces élevages moyennant un nombre limité d'hypothèses.

Dans un souci d'anonymisation, certaines données personnelles concernant l'exploitant ou son exploitation ne sont pas publiquement accessibles (nom, prénom, âge, sexe, adresse, etc.). Le reste des données sont accessibles soit sur le site du DISAR, soit via le CASD. Dans le premier cas, les données sont disponibles publiquement à partir des fichiers micro-données pour lesquels certaines variables sont « brouillées » et sont présentées par tranches (main d'œuvre, superficies, effectifs animaux, etc.). De plus, certaines informations apparaissant dans les fichiers micro-données sont relativement agrégées par rapport aux informations recueillies par le questionnaire envoyé aux centres de gestion. Dans le second cas, l'ensemble des données sont accessibles mais il faut pour cela demander auprès du SSP du ministère de l'agriculture l'accès payant aux données non brouillées du RICA. Dans le cadre d'une précédente étude, nous avons accès aux informations du RICA via le CASD (Gohin et al., 2015a).

Cet accès a été enrichi grâce à l'obtention des codes « communes » nous permettant de connaître la commune du siège d'exploitation.

L'accès au RICA suppose évidemment le respect des règles du secret statistique. Les données ne peuvent être exportées que si elles respectent les critères suivants :

Aucune case des tableaux de données issus de l'agrégation de données individuelles ne doit porter sur moins de 10 individus ;

Aucune case ne doit contenir des données où une exploitation représente plus de 85% de la valeur ;

Identification directe ou indirecte impossible à l'aide de variables voisines.

Ainsi, contrairement au recensement agricole, les informations récoltées au cours de l'enquête permettent d'avoir une bonne photographie des situations financières des exploitations agricoles d'une région. Si un certain nombre de doublons existe avec le recensement agricole, cette enquête apporte de précieux renseignements sur les données économiques, notamment concernant les valeurs ajoutées et les revenus. Nous proposons donc de l'utiliser pour connaître la situation financière initiale des exploitations de la zone d'étude. Comme pour la mobilisation du recensement agricole, l'utilisation de ces données dans la construction de la Matrice de Comptabilité Sociale rajoute par ailleurs de la cohérence entre les deux étapes de notre travail.

La question essentielle dans le cas de la mobilisation de cette base de données est relative à la bonne représentation des exploitations du bassin versant. En effet, si 33 exploitations présentes sur le bassin versant du Couesnon ont bien été enquêtées en 2010, aucune précaution n'est prise quant à la bonne représentativité des exploitations du bassin versant. Comme nous l'avons dit, ces exploitations sont sélectionnées afin d'assurer une bonne représentation de la région. En aucun cas la représentativité n'est assurée à une échelle plus petite. Il n'y a aucune assurance que les exploitations enquêtées sur ces territoires se comportent comme le reste des exploitations.

En outre, le nombre d'exploitations enquêtées dans les bassins versants est bien faible en comparaison de celles recensées. Dans le cas du Couesnon, 33 exploitations du bassin versant ont été enquêtées alors qu'il y a environ 1500 exploitations recensées en 2010 (soit 2,2 % des exploitations de la zone). Par ailleurs, la répartition des exploitations entre les OTEX n'est pas forcément similaire à celle constatée dans le recensement agricole. Par exemple, les exploitations spécialisées en grandes cultures sont peu nombreuses dans le RICA (1 seule en 2010 sur 33 enquêtées) alors qu'elles approchent les 230 selon le recensement (sur les 1750 environ). Il n'est pas statistiquement raisonnable de baser notre étude des changements de pratiques de 230 exploitations en grandes cultures sur le comportement d'un unique agriculteur.

Répartition par OTEX des exploitations du Couesnon enquêtées dans le RICA (RICA 2010)

OTEX	1600	2800	4500	4600	4700	5100	5200	5374	6184
Effectifs	1	2	11	1	1	5	2	6	4

Enfin et surtout, l'exploitation de ce faible nombre d'exploitations enquêtées pour certaines OTEX se heurte aux règles du secret statistique. Ces règles sont respectées pour les exploitations laitières spécialisées pour chaque année dans le cas du Couesnon, pour plusieurs années dans le cas de la Haute Rance. Nous reportons ci-dessous quelques moyennes (par exploitation) d'informations contenus dans le RICA sur la période 2005-2012. Il apparaît que les exploitations laitières de la Haute Rance sont plus grandes, en termes de surface et cheptels, que celle du Couesnon. Les données du Couesnon seront exploitées dans la suite de ce rapport.

Résultats comptables et caractéristiques moyennes des exploitations laitières (RICA)

	Couesnon	Haute Rance
<u>Activité végétale</u>		
Surface (ha)		
blé tendre	8.1	18.4
Mais fourrage	16.5	24.9
Prairies temporaires	16	27.1
Prairies permanentes	8.1	2.0
SAU	52.8	81.0
Rendement blé (qx/ha)	72.7	71.3
Charges		
D'engrais (€)	4791	8993
D'engrais à l'hectare (€/ha)	90	111
De prod. phyto. (€)	2818	6235
De prod phyto (€/ha)	53	77
<u>Activités animales</u>		
Nombre Vaches laitières	39.3	48.7
Nombre UGB	70.3	92.4
Production lait (l)	249700	362762
Rendement laitier (l/vl)	6354	7449
Recette laitière (€)	80289	116958
Prix du lait (€/t)	321	322
Recette ventes animaux	25606	34321
<u>Indicateurs revenu</u>		
Excédent Brut d'exploitation	52652	81378
Subventions	21927	34561
Revenu d'exploitation	29929	43003
Revenu/UTA non salarié	16526	22281

2.2.c. L'enquête bassin versant

La DRAAF de Bretagne a réalisé en 2011 une enquête dite Bassin Versant au niveau de la Bretagne. Cette enquête nous permet notamment de connaître les entrées d'azote organique pour chaque bassin versant et les échanges qu'il y a avec les autres bassins versants. C'est un point essentiel. En effet, si des bassins versants sont plus spécialisés en élevage hors-sol, cela ne signifie pas forcément que les quantités d'azote appliquées sont plus importantes. Les éleveurs peuvent aussi choisir d'exporter une partie des déjections organiques vers d'autres exploitations.

Même si l'enquête Bassins Versants ne renseigne pas sur les échanges de minéraux au sein du bassin versant, elle permet d'avoir une bonne image des entrées ou sorties nettes de minéraux. L'enquête permet aussi d'avoir un ordre d'idée des bilans azotés des exploitations en fonction des systèmes de production choisis. Elle montre notamment que les exploitations en agriculture biologique et celles qui ont souscrit des mesures agro-environnementales sont moins excédentaires en azote que celles en agriculture conventionnelle. Ces niveaux relatifs de bilans azotés peuvent nous aider à distinguer différents systèmes.

2.2.d. Enquête pratiques culturales

Le dispositif des enquêtes « Pratiques culturales » a pour objectif de collecter des données sur la conduite de l'itinéraire technique (pratiques techniques, phytosanitaires, fertilisation) tous les 5 ans. Entre deux enquêtes détaillées, une enquête intermédiaire est conduite sur les traitements phytosanitaires. La dernière enquête réalisée lors du démarrage de l'étude concerne la fin de récolte 2010 à la récolte 2011.

Les cultures interrogées en 2011 étaient le blé tendre, le blé dur, l'orge, le triticale, le maïs (grain et fourrage), le colza, le tournesol, le pois protéagineux, la betterave industrielle, la pomme de terre, les prairies temporaires, les prairies permanentes intensives et la canne à sucre (Réunion, Guadeloupe). Pour chacune de ces cultures, nous connaissons :

Rendements et objectifs de rendement ;

Teneur moyenne en protéines ;

Parts des surfaces implantées avec une culture intermédiaire ;

Mode de destruction des cultures (mécanique, chimique, autre) ;

Origine des semences, doses de semis, modes de tri et traitement des semences ;

Modes d'implantation des cultures (labour, non labour, semis direct) ;

Désherbage mécanique ;

Fertilisation minérale (azote, phosphore, potasse) et organique, nombre moyen de traitements phytosanitaires et part des surfaces traitées par des pesticides (herbicides, fongicides, insecticides, molluscicide, régulateur de croissance) ;

part des surfaces irriguées et quantités d'eau apportées ;

Modes d'exploitation des prairies.

La limite de cette base de données est qu'il est impossible de distinguer une zone plus fine que celle des régions. Il s'agit cependant d'une première étape qui permet d'avoir davantage de détails sur les pratiques agricoles.

TROISIEME PARTIE. METHODOLOGIES

Cette troisième partie est consacrée à la présentation des deux modèles développés pour cette étude. Le premier modèle est un modèle micro-économétrique appliqué aux exploitations laitières qui quantifie l'influence des incitations économiques sur leurs décisions productives. Le second modèle est un modèle macro-économique d'équilibre général calculable qui va simuler les conséquences de scénarios sur les revenus, emplois directs et induits. Certains paramètres utilisés dans ce deuxième modèle proviennent des résultats du premier modèle. Cette troisième partie est divisée en deux sections, chacune consacrée à l'un des modèles.

3.1. Modélisation économétrique des élevages laitiers

Les deux bassins versants du Couesnon et de la Haute Rance sont caractérisés par une forte proportion d'exploitations laitières spécialisées. Aussi nous avons débuté notre travail en étudiant le comportement de ces exploitations.

N'ayant pu obtenir leurs comptabilités analytiques sur longue période, nous avons utilisé dans cette section les micro-données publiques du RICA. Ces données n'indiquent pas le lieu précis du siège des exploitations, seulement la région d'appartenance. Nous avons bien conscience que les conditions pédoclimatiques peuvent être différentes pour les nombreuses exploitations laitières situées dans les différents territoires bretons. Nous n'obtenons donc qu'une estimation des comportements moyens des exploitations laitières situées en Bretagne. Nous exploitons quand même l'information sur la région d'appartenance en distinguant dans la modélisation économétrique les exploitations situées en Bretagne de celles situées en Basse Normandie. Nous obtenons donc aussi une autre estimation des comportements moyens des exploitations laitières situées en Basse Normandie. La comparaison des résultats sur la Bretagne et la Basse Normandie permet dans une certaine mesure d'apprécier la pertinence des résultats issus de notre modélisation économétrique.

Les secteurs laitiers français, donc bretons et normands, ont évolué sous le régime des quotas laitiers à partir de 1984. Les décisions des exploitations laitières ont donc été contraintes par les niveaux possibles de production laitière. En 2003, une réforme de la PAC à mi-parcours est adoptée. Cette réforme prévoit une sortie progressive de ce régime des quotas laitiers, avec une augmentation des niveaux des quotas à partir de 2006 et des baisses de prix d'intervention sur le beurre et la poudre de lait écrémé dès 2004. La fin des quotas est aussi définitivement actée pour 2015. Dans notre étude, nous considérons que la mise en œuvre effective des décisions de réforme de l'OCM lait dès 2004 constitue un changement structurel, les producteurs laitiers avec leurs laiteries considérant que la fin du régime des quotas laitiers est désormais inéluctable. Nous retenons donc les données depuis 2004 et jusqu'aux dernières disponibles à la date de rédaction de ce rapport, soit 2017.

Les micro-données du RICA fournissent des informations utiles sur les exploitations laitières mais insuffisantes. En particulier, nous ne disposons pas des comptabilités analytiques qui nous auraient renseignées sur les intrants variables utilisés dans chaque activité. En particulier, pour les activités végétales (blé, maïs fourrage, prairies), nous ne savons pas les applications d'engrais minéraux et organiques, ni celles de produits phytosanitaires pour chacune d'elles. Nous savons encore moins si ces applications dépendent ou non d'incitations économiques. Par exemple, les exploitations laitières appliquent-elles plus d'engrais minéral et de fongicides lorsque le prix du blé est plus élevé, toutes choses égales par ailleurs ? Pour les activités animales (production laitière, de bovins, veaux, autres animaux), nous ne savons pas non plus leurs modes d'alimentation en aliments concentrés achetés, en céréales et/ou en fourrage. De la même manière, nous savons encore moins à partir de seules observations RICA si, par exemple, la consommation du tourteau de soja par les vaches laitières augmente lorsque le prix du lait augmente.

En d'autres termes, les données du RICA nous renseignent surtout sur les résultats économiques obtenus par les exploitations laitières et une description globale des décisions de production, pas sur les choix précis des itinéraires de production. Dans ce travail, nous avons développé une approche économétrique originale pour comprendre de nombreuses décisions productives des exploitations laitières. Elle consiste à combiner ces données du RICA avec les enseignements de modèles biotechniques de croissance des plantes et d'alimentation des vaches laitières et les données bioéconomiques fournis par les organismes professionnels (instituts techniques notamment) pour des cas types d'exploitations (les données individuelles des exploitations suivies par ces instituts ne sont pas publiquement disponibles). Cette combinaison de trois sources d'information (RICA, résultats modèles biotechniques et cas types) est réalisée à partir d'une méthode statistique originale basée sur la maximisation de l'entropie.

A notre connaissance, deux solutions principales ont été implémentées jusqu'à présent pour contourner le problème de manque de données utiles à la compréhension des décisions des exploitations agricoles. Une première, intuitive, consiste à pratiquer des enquêtes supplémentaires. Dans la pratique, cette solution peut être limitée par le nombre de répondants (éventuellement biaisés, seuls ceux ayant un intérêt à l'étude y répondent) et surtout par sa profondeur temporelle (difficile de redemander à une exploitation toutes ces décisions sur plusieurs années). Une seconde consiste à simuler le fonctionnement théorique des exploitations. Cela renvoie au problème de validation statistique des résultats issus de ces modèles, comme discutés dans la première partie. Dans quelle mesure les paramètres utilisés dans ces modèles théoriques correspondent à la réalité des fermes d'un territoire sur longue période ? Au contraire, notre approche combine les enseignements issus de ce modèle sans leur donner un poids exclusif. Nous souhaitons au contraire que les paramètres

estimés par notre modèle et représentant le comportement des élevages laitiers sont compatibles avec leurs vraies décisions/résultats observés dans leur RICA et sont également statistiquement compatibles avec les relations biotechniques.

Cette section est structurée alors de la manière suivante. Nous décrivons d’abord notre travail réalisé sur les modèles biotechniques, puis la méthode statistique originale. Nous présentons ensuite les spécifications (équations) du modèle économétrique. Enfin les résultats pour les exploitations bretonnes et normandes sont analysés.

3.1.a. Les pratiques culturales.

Les exploitations laitières utilisent-elles peu ou significativement des engrais minéraux et des produits phytosanitaires sur leurs surfaces fourragères ? Ces utilisations dépendent-elles des prix ou uniquement des conditions météorologiques ?

Nous avons recherché ce type d’informations dans les publications des instituts techniques, pour les cas types. Nous reportons ci-dessous une copie de 4 exploitations, 2 bretonnes pour l’année 2014 et 2 normandes pour l’année 2012. Il apparaît que les pratiques de fertilisation sont très différentes entre exploitations et cultures. Par exemple, pour le maïs fourrage, la fertilisation varie entre aucun engrais minéral (que de l’engrais organique) à 78 unités d’azote et 46 unités de phosphore à l’hectare. Les données de pratiques culturales fournies par le ministère de l’agriculture montrent une même diversité. Toujours pour le maïs fourrage, 68% des parcelles enquêtées ont été fertilisées avec de l’azote minéral et 57% des parcelles enquêtées ont aussi reçues de l’azote organique. Nous observons aussi une forte diversité pour les prairies permanentes et temporaires. Les données normandes fournissent aussi les coûts des différents engrais pour chaque culture, de même que les coûts en produits phytosanitaires et semences. Il est ici plus curieux de constater que les coûts de ces derniers sont identiques aux deux exploitations reportées. Est-ce une information réellement observée ou imputée ?

Pratiques culturales de deux types d'exploitations laitières bretonnes (source Idele)

Fertilisation

Cultures	Surfaces fertilisées	Fumier	Lisier de porcs importé	Engrais minéral		
				u N/ha	u P ₂ O ₅ /ha	u K ₂ O/ha
Maïs*	18 ha	25 t/ha	20 m ³ /ha	0	-	-
Blé	18 ha	-	-	130	-	-
Prairies	22 ha	-	20 m ³ /ha sur 7 ha	50	-	-

*Les surfaces de maïs suivant une prairie ne sont pas fertilisées.

L'importation de lisier de porc permet de diminuer fortement l'achat d'engrais minéral.

Fertilisation

Cultures	Surfaces fertilisées	Fumier	Lisier de bovin très dilué	Engrais minéral		
				u N/ha	u P ₂ O ₅ /ha	u K ₂ O/ha
Maïs*	11,5 ha	30 t/ha	-	30	30	-
RGI dérobé	5 ha	-	-	40	-	-
Blé	16 ha	-	-	130	-	-
Prairies	35,5 ha	-	50 m ³ /ha sur 10 ha	80	-	-

*Les surfaces de maïs suivant une prairie ne sont pas fertilisées soit 3 ha par an environ.

Pratiques culturales de deux types d'exploitations laitières normandes (source chambre d'agriculture)

Exploitation 1

Fertilisation

	Surfaces (ha)	Fumier (t /ha)	Lisier (m³/ha)	Minérale			Déjections stockées
				N	P	K	
Prairies permanentes	35,0	10 t / 13 ha	15 m³ / 19 ha	50	20	40	Fumier 321 t
Maïs (11 tMS/ha)	5,5	35	-	18	46	-	
Blé (75 q/ha)	5,5	-	-	120	-	-	Lisier 278 t

Coûts des surfaces (€/ha)

	Surfaces (ha)	Engrais	Semences	Traitements	Récolte	Autres travaux	Total*
Prairies permanentes	35,0	102	21	-	0	37	160
Maïs (11 tMS/ha)	5,5	68	166	80	227	50	591
Blé (75 q/ha)	5,5	132	65	140	144	-	481

Exploitation 2

Fertilisation

	Surfaces ha	Fumier t/ha	Lisier m³/ha	Minérale			Déjections stockées
				N	P	K	
Prairies temporaires	16,0	-	13	100	40	60	Fumier 423 t
Prairies permanentes	7,0	-	13	60	20	40	
Maïs (12 tMS/ha)	21,5	20	-	78	46	-	Lisier 293 t
Blé (75 q/ha)	13,3	-	-	130	40	60	

Coûts des surfaces (€/ha)

	Surfaces ha	Engrais	Semences	Traitements	Récolte	Autres travaux	Total*
Prairies temporaires	16,0	191	22	3	64	38	319
Prairies permanentes	7,0	113	0	8	0	38	158
Maïs (12 tMS/ha)	21,5	134	166	80	209	56	645
Blé (75 q/ha)	13,3	224	65	140	144	38	610

Enquête pratiques culturales bretonnes (source ministère de l'agriculture)

	Blé tendre	Mais fourrage	Prairies temporaires
Dose azote minéral (kg/ha)	115	n.d.	n.d.
% parcelles ayant reçues de l'azote minéral	97	68	76
% parcelles ayant aussi reçues de l'azote organique	20	57	29

Dans notre approche statistique originale, nous considérons que ces informations nous indiquent le domaine des possibles mais pas la valeur précise pour chaque exploitation. Nous considérons aussi les informations issues des modèles de croissance des cultures. Ces modèles sont nombreux et nous avons choisi d'utiliser le logiciel gratuit IFSM (signifiant Integrated Farm System Model) dans lequel les conditions pédoclimatiques de la commune de Saint Marc sur Couesnon, située dans le bassin versant du Couesnon sont insérées.

Concrètement, ce logiciel considère en variables d'entrée le contexte pédologique, l'historique météorologique, les surfaces attribuées aux différentes cultures, les interventions réalisées (choix des engrais et produits, choix du calendrier, nombre de passages, les cultures, main d'œuvre impliquée...) et les prix de commercialisation des produits récoltés. A partir de ces variables d'entrée, le logiciel IFSM réalise une simulation, sur la période définie par les données météorologiques. Les résultats de cette simulation comprennent les rendements de l'ensemble des cultures, les charges associées, les recettes issues des ventes de récoltes, les bilans des minéraux.

Cet ensemble de fonctionnalités nous a permis de définir des fonctions de production pour 4 types de cultures, pertinentes sur nos zones d'étude : blé tendre, maïs grain, maïs fourrage, et prairie. Le logiciel IFSM permet de générer un nombre suffisant de données pour modéliser la réponse théorique en rendement de chaque culture à l'apport d'engrais minéral et/ou organique. Nous avons procédé de la manière suivante, avec ici l'exemple du blé tendre :

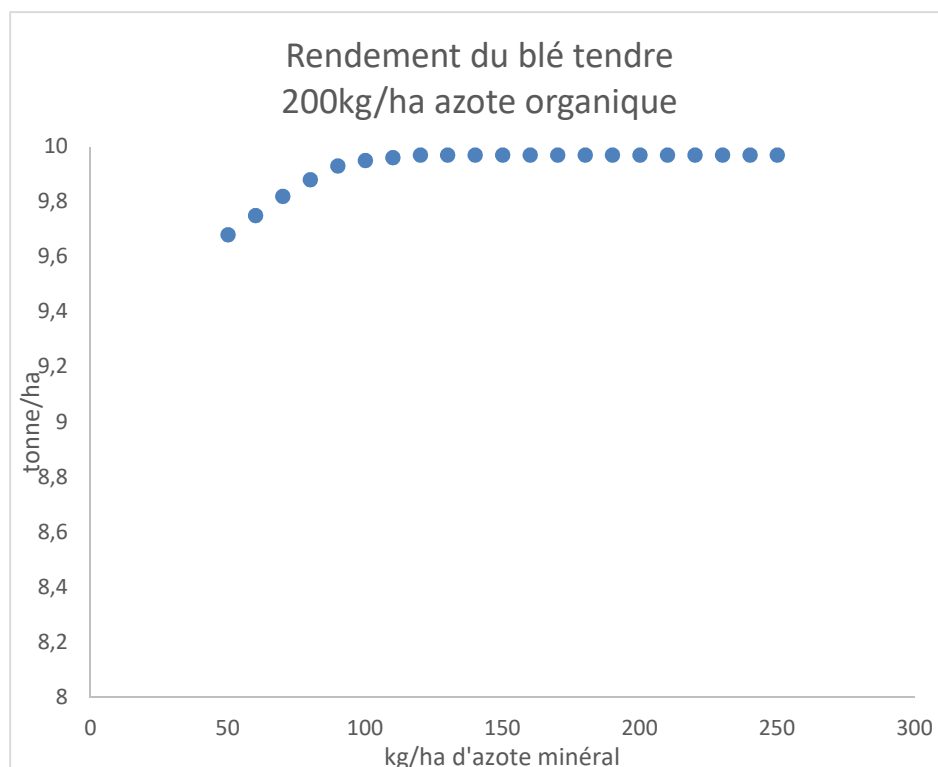
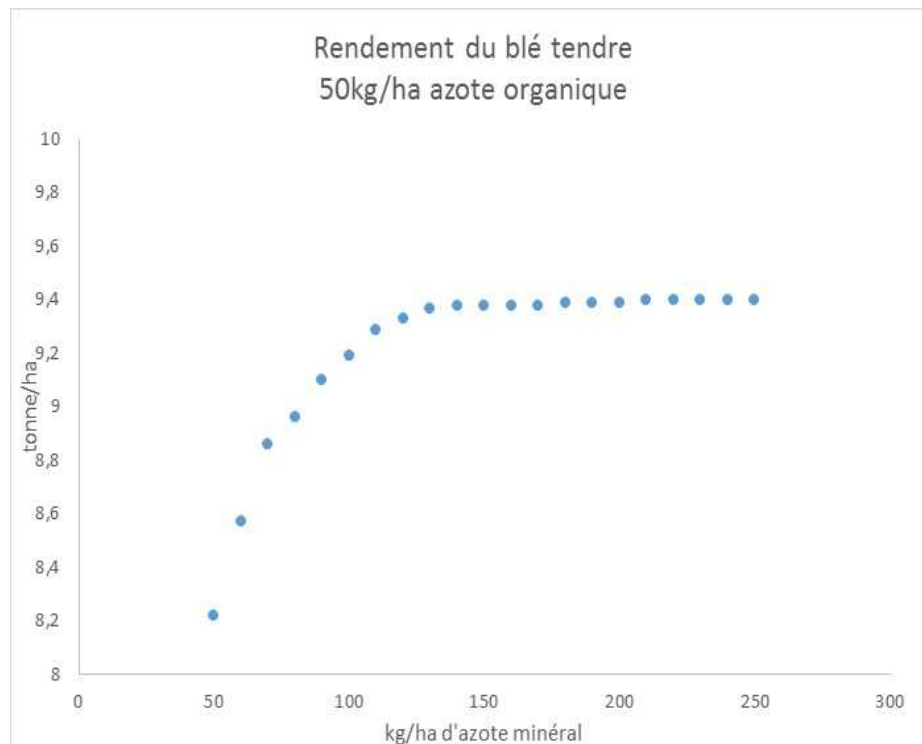
i/ Le fichier météo correspond aux mesures de la station météorologique de Saint-Marc-le-Blanc, dans le département d'Ille et Vilaine, prises sur une décennie. Le fichier météo est crucial dans le fonctionnement de ce logiciel car il définit à la fois la durée de simulation, et annuellement la possibilité ou non de réaliser certaines interventions (besoin de plusieurs jours de beau temps consécutifs par exemple). C'est en outre un facteur de variation des résultats techniques important, comme dans la réalité. La différence notoire avec la réalité réside dans ce que le logiciel optimise les interventions en fonction d'une météo parfaitement connue, là où l'exploitation ne connaît la météo des jours suivants qu'avec une part d'incertitude.

ii/ Pour conduire ses interventions, le logiciel tout comme l'agriculteur fait appel à des machines. La taille et l'efficacité de ces machines sont aussi pris en compte dans le logiciel IFSM pour juger de la faisabilité des travaux, et du résultat final. En particulier, la taille des machines a un impact sur le temps de travail de l'exploitant. IFSM propose une batterie de machines aux standards très américains (comme le logiciel lui-même). Nous avons adapté le fichier de machinisme à une agriculture européenne.

lii/ Les données techniques sont elles aussi adaptées au contexte breton. Nous avons eu accès à des travaux antérieurs menés avec IFSM en Bretagne, qui faisaient appel à une « ferme moyenne » pour traduire les résultats techniques bretons dans le logiciel.

iv/ Après sélection de la culture, nous définissons les doses d'engrais souhaitées. Les autres valeurs sont soit des valeurs par défaut, soit des valeurs moyennes obtenues dans des références régionales.

Cet ensemble d'opérations a été reproduit pour toutes les doses d'azote entre 50 et 250 kgN/ha, de chaque type d'engrais. Il nous est possible de faire une régression qui permette de déterminer la fonction de production du blé selon les doses d'azote minéral et organique apportées. Les graphiques ci-dessous illustrent les rendements potentiels de blé tendre en fonction des apports coûteux d'azote minéral. Le premier suppose que l'apport initial en azote organique est de 50kg/ha et le deuxième 200 kg. Fort logiquement, ces graphiques montrent que les rendements dépendent positivement des doses d'engrais mais que cette dépendance s'estompe lorsque les applications sont élevées. Par exemple, lorsqu'un apport initial de 50kg d'azote organique est supposé, le rendement du blé n'augmente plus avec les apports consécutifs d'azote minéral lorsque ces apports dépassent les 150 kg/ha. Ces graphiques illustrent également qu'il n'y a pas une parfaite substitution entre les deux sources d'azote (minéral/organique).



A partir de ces données théoriques simulées, nous avons estimé la relation statistique entre les rendements du blé et les applications d'engrais organique et minéral. Nous supposons que cette relation a une forme quadratique. L'estimation par la méthode statistique standard que sont les

moindres carrés ordinaires (il n'y a pas ici de problèmes d'endogénéité des choix de production) nous fournit les résultats suivants :

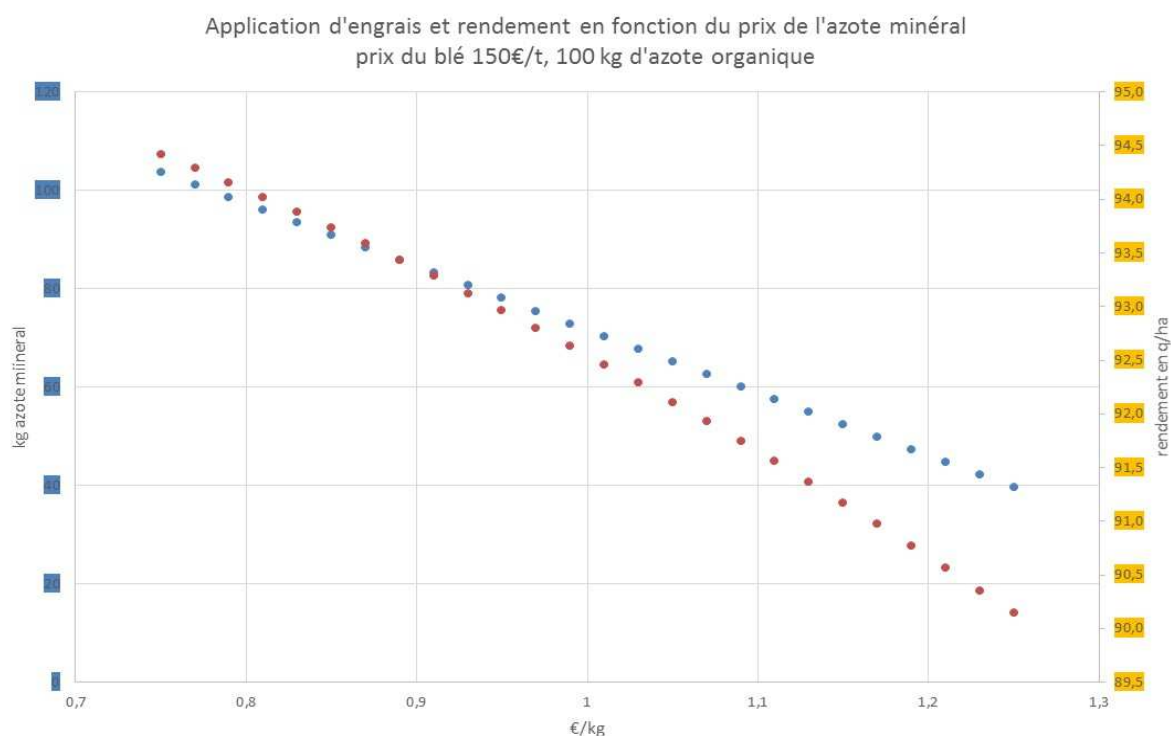
$$\text{Rendement blé } y = 7,75 + 12.M - 26.M.M + 10.O - 12.O.O - 15,8.M.O$$

$$(0.04) \quad (0.35) \quad (1.06) \quad (0.35) \quad (0,95) \quad (1.07)$$

Où M désigne les utilisations d'azote minéral (en t/ha), et O d'azote organique (t/ha). Les chiffres en parenthèses sont les écart-types associés. Il apparaît que les paramètres estimés sont statistiquement significatifs, que la productivité marginale des engrais est décroissante (les termes au carré sont négatifs). Cela signifie que l'efficacité des doses d'engrais diminue lorsque les doses augmentent, cette efficacité pouvant même devenant négatif pour de très fortes doses.

Cette relation technique ne nous permet pas encore de retrouver les applications d'engrais réellement réalisées par les exploitations laitières bretonnes et normandes sur chaque surface, ni leurs sensibilités à des variations de prix. Les applications réelles peuvent en particulier dépendre des prix des engrais et des cultures. Supposons à présent que les exploitations laitières décident de « ne pas perdre de l'argent » lors de ces applications. En d'autres termes, elles comparent les bénéfices aux coûts liés à ces applications. Les coûts comprennent le coût d'achat des engrais azotés minéraux (ils comprennent aussi les temps passés aux épandages). Les bénéfices sont constitués des gains de rendements, valorisables par le prix de marché du blé. Ces bénéfices sont donc limités par la relation technique ci-dessus liant les gains de rendement aux applications supplémentaires d'azote minéral. Supposons même à présent que les exploitations laitières souhaitent maximiser la différence entre ces bénéfices et coûts lorsqu'elles décident les niveaux d'azote minéral. Mathématiquement :

Max $P.Y - W.M$ sous la contrainte technique ci-dessus, avec P est le prix du blé, W le prix de l'azote minéral, y et m ont déjà été défini ci-dessus. La résolution de ce programme non linéaire (car la relation technique est non linéaire) nous donne les quantités optimales d'azote minéral et le rendement obtenu en fonction des prix (voir première partie). Le graphique ci-dessous illustre ces quantités et rendement pour différents niveaux du prix de l'azote minéral.



Comme attendu, plus le prix de l'azote minéral est élevé, plus les applications sont faibles et les rendements potentiels également. Ce graphique est obtenu sous l'hypothèse d'un prix du blé de 150€/tonne et d'un apport initial d'azote organique de 100 kg/ha. Par exemple, il apparaît économiquement optimal (selon toutes les hypothèses précédentes) d'appliquer 100 unités d'azote minéral lorsque son prix est de 0,8€/kg et 70 unités si son prix atteint 1€/kg.

De nouveau, nous avons fait varier considérablement les prix du blé, de l'azote minéral et les niveaux d'apport initial d'azote organique. Nous avons calculé les variations induites des applications optimales d'azote minéral, puis traduites sous forme d'élasticités. Nous obtenons que l'élasticité des applications d'azote minéral à leur prix varie entre -0,05 et -0,2 et que les applications varient entre 40 et 110 unités par hectare. Ce sont ce type d'informations « théoriques » que nous mobilisons pour retrouver les décisions effectives des exploitations laitières bretonnes et normandes.

Nous avons effectué le même type d'exercices pour les cultures de maïs grain, fourrage et les prairies. Dans le cas du maïs fourrage et des prairies, une première difficulté consiste à trouver un prix adéquat de ces cultures. Nous avons retenu le prix du maïs grain pour le maïs fourrage, un prix moitié moindre pour l'herbe. Dans le cas des prairies, une deuxième difficulté est de tenir compte de leur part en légumineuses. Nous avons fait varier cette part entre 0 et 20%. Par ailleurs, toujours pour les prairies, nous avons supposé 3 coupes. Les résultats obtenus pour ces cultures diffèrent significativement de

ceux pour le blé. En particulier, les applications d'azote minéral sur le maïs fourrage et les prairies peuvent rapidement devenir nulles, par exemple si son prix est élevé ou la part de légumineuses importantes. Il s'ensuit que l'élasticité des applications d'azote minéral sur ces cultures est beaucoup plus forte (en valeur absolue) que sur le blé (proche de -1 pour le maïs fourrage). En d'autres termes, il est plus facile de se passer d'azote minéral sur ces cultures que sur le blé, ce qui n'étonnera pas les professionnels du secteur. Notre contribution à ce stade consiste à la quantifier économiquement.

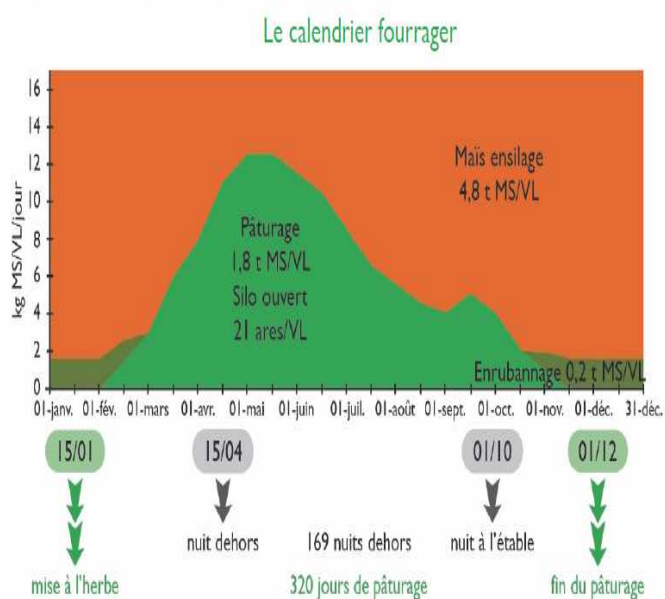
3.1.b. Les pratiques d'alimentation animale.

Les exploitations laitières utilisent elles peu ou significativement des aliments achetés pour nourrir les vaches laitières et/ou les veaux et/ou les génisses et/ou les taurillons ? A qui sont d'abord distribués les différents fourrages (récoltés et pâturés) ? Ces décisions dépendent elles des prix ? Une augmentation du prix des tourteaux de soja influence telle plus l'alimentation des vaches ou des autres herbivores, via la concurrence sur les protéines apportées par les fourrages ?

Nous avons recherché ce type d'informations dans les publications des organismes professionnels (instituts techniques, contrôle laitier). Là encore, ces publications indiquent une très grande diversité de pratiques. Nous reportons ci-dessous les pratiques d'alimentation de vaches laitières pour deux types d'exploitation laitières bretonnes, deux normandes. Nous reportons une synthèse de la diversité au sein des exploitations suivies par le contrôle laitier (Bcel Ouest).

Pratiques d'alimentation dans l'exploitation bretonne 1

L'alimentation des vaches laitières

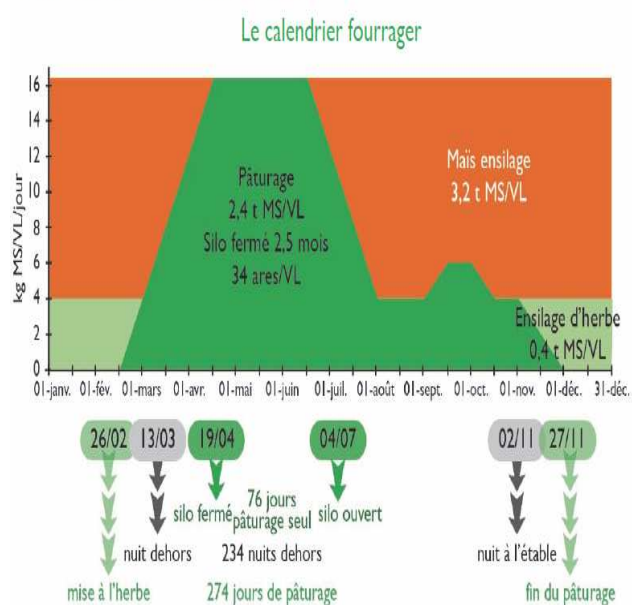


Consommation annuelle de concentrés

1 175 kg/VL
128 g/l lait
Urée 25 kg/an
Minéraux 50 kg/VL/an
Concentré de production 100 kg/VL/an
Correcteur 70 % soja/30 % colza 1 000 kg/VL/an

Exploitation bretonne 2

L'alimentation des vaches laitières



Consommation annuelle de concentrés

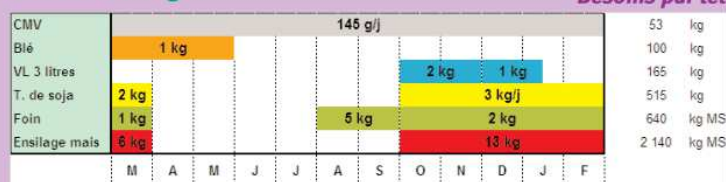
935 kg/VL
121 g/l lait
Minéraux 75 kg/VL/an
Blé 440 kg/VL/an
Correcteur 70 % soja/30 % colza 420 kg/VL/an

Pratiques d'alimentation dans l'exploitation normande 1

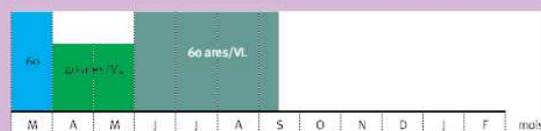
Les vaches laitières

Les concentrés et fourrages

Besoins par tête



Le pâturage



Coûts par animal (en €)

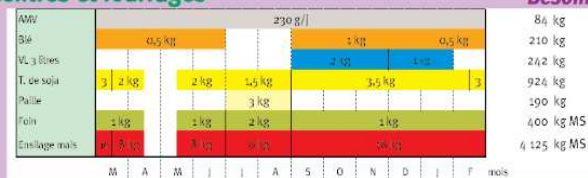
	Effectifs	Lait	Concentrés	S.F.P.*	Coût alimentaire	Frais d'élevage et vétérinaires**	Total
Vache laitière	27	-	393	235	628	315	943
Génisse élevée	10	105	178	193	469	156	625
Boeufs	9	104	164	182	450	94	543

Exploitation normande 2

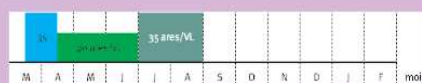
Les vaches laitières

Les concentrés et fourrages

Besoins par tête



Le pâturage



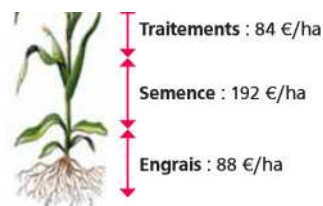
Coûts par animal (en €)

	Effectifs	Lait	Concentrés	SFP*	Coût alimentaire	Frais d'élevage et vétérinaires**	Total
Vache laitière	76	-	593	337	930	312	1 242
Génisse élevée	31	101	193	163	456	116	572

Synthèse des pratiques d'alimentation en Bretagne (BCEL Ouest)

Indice EBE lait	Rendement (tMS/ha)		Coût (€/tMS)		Charges opérationnelles (€/ha)	
	Maïs	Herbe	Maïs	Herbe	Maïs	Herbe
EBE lait ++	12,8	6,0	46	22	344	174
EBE lait =	12,5	5,8	52	25	392	189
EBE lait --	12,0	5,4	55	34	393	219

Indice EBE lait	Coût des fourrages VL (€/1 000 l)	Pâturage (t MS/UGB)	Stocks (t MS/UGB)	Rendement herbe (t MS/ha)	Rendement maïs (t MS/ha)	Chargement
EBE lait ++	30	1,7	3,9	6,0	12,8	1,53
EBE lait =	36	1,4	4,2	5,8	12,5	1,58
EBE lait --	46	1,5	3,9	5,4	12,0	1,40



Indice EBE lait	Coût des concentrés VL (€/1000l)	Moyenne d'étable (Kg brut/vache)	Concentrés par vache (en Kg)	Concentrés par Kg de lait	Prix correcteur azoté (en €/t)	Prix concentrés de prod. (en €/t)
EBE lait ++	53	8 411	1 139	134	387	230
EBE lait =	63	8 522	1 285	150	393	249
EBE lait --	65	7 635	1 093	141	390	256

A titre d'exemple, il apparaît une forte diversité dans l'alimentation des vaches laitières, par exemple en apport de maïs ensilage (entre 2 et 4 tMS/vache laitière). De nouveau, dans notre approche statistique originale, nous considérons que ces informations nous indiquent le domaine des possibles mais pas la valeur précise pour chaque exploitation. Nous considérons aussi les informations issues des modèles d'alimentation des vaches laitières. Ici nous avons mobilisé les équations théoriques du logiciel INRAtion. Ce logiciel détermine la productivité attendue d'une vache en fonction des aliments mis à sa disposition, ainsi que de données physiologiques comme le potentiel laitier ou le mois de lactation. L'utilisateur définit un objectif de production laitière, et INRAtion compose la ration pour s'en rapprocher le plus possible.

Cependant, le logiciel seul ne fait qu'approcher au maximum l'objectif qu'on lui donne, et n'indique en résultat que le pourcentage de succès, jamais la productivité laitière qui en découle. Pour cette raison, nous avons modélisé les équations de rationnement des animaux à partir de la littérature. Avec les tables INRA 2010 d'« Alimentation des bovins, ovins, caprins – Besoin des animaux – Valeurs des aliments »⁶, nous avons ainsi évalué les besoins alimentaires du cheptel bovin en fonction du mois de

⁶ Agabriel, J. (2010). *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux-Valeurs des aliments: Tables Inra 2010. Édition remaniée*. Quae éditions.

lactation, défini les valeurs nutritionnelles des intrants sélectionnés, et enfin proposé une méthode d'optimisation de la ration en fonction du prix des aliments et du prix du lait. Dans son principe, la démarche est similaire à celle expliquée ci-dessus pour la culture de blé.

Plus précisément, l'alimentation des vaches laitières doit couvrir plusieurs types de besoins :

Besoin en énergie, exprimé en Unités Fourragères (UF)

Besoin en protéines, exprimé en Protéines Digestibles au niveau de l'Intestin (PDI)

Besoin en minéraux, exprimé en grammes de calcium ou phosphore absorbables

Capacité d'ingestion de l'animal, exprimée en Unités d'Encombrement (UE)

Or ces caractéristiques et besoins sont variables, à la fois entre animaux et au cours du temps. L'espèce et la race étudiée, et le moment auquel on s'intéresse sont cruciaux pour déterminer une ration adaptée. Dans le cas de la vache laitière, la temporalité dont dépendent les besoins est liée au temps de la lactation, à savoir le temps écoulé depuis le dernier vêlage de l'animal. Enfin la physiologie de l'animal est prise en compte via le poids vif. Comment les besoins varient-ils en fonction de ces caractéristiques ?

Les besoins en énergie (exprimé en UFL, ou Unité Fourragère Laitière) et protéique (exprimé en PDI, ou Protéine Digestible de l'intestin) se découpent en quatre besoins, qui évoluent avec les caractéristiques de l'animal.

Le besoin d'entretien dépend des caractéristiques physiques de l'animal et de son activité :

$$UFL_{ent} = 0.041 \times PV^{0.75} \times I_{act}$$

$$PDI_{ent} = 3.25 \times PV^{0.75}$$

avec PV le poids vif en kg, et I_{act} l'indice d'activité de l'animal. Par défaut, nous avons appliqué un indice d'activité de 1, correspondant à une stabulation entravée.

Le besoin de croissance concerne les animaux jeunes, son besoin diminue avec l'âge de l'animal :

$$UFL_c = 3.25 - 0.08 \times \text{âge}$$

$$PDI_c = 422 - (10.4 \times \text{âge})$$

où l'âge est exprimé en mois. Dans notre cas nous avons étudié un animal entre son 26^{ème} et son 37^{ème} mois, donc dans sa troisième année.

Le besoin de production laitière dépend directement de la productivité de l'animal, et de la qualité attendue de son lait en termes de taux protéique et butyreux. En pratique, du fait d'évolutions proches des deux taux on ne regarde que le taux butyreux (TB) pour calculer le besoin énergétique, avec une

valeur moyenne de 0.44 UFL / L de lait à 4% de matière grasse. Le calcul du besoin protéique s'explique quant à lui par le rendement de conversion estimé à 64% entre l'aliment ingéré et le lait produit. On a donc, en fonction du potentiel laitier (PL) de l'animal :

$$UFL_{PL} = 0.44 \times PL \times 0.4 + (0.015 \times TB)$$

$$PDI_{PL} = (PL \times TP) / 0.64$$

Par défaut nous avons ainsi défini des valeurs constantes pour le TB de 40 g/kg et pour le TP de 32 g/kg.

Enfin le besoin de gestation dépend du poids du veau attendu à la naissance (PV_{veau}) et du nombre de semaines de gestation (SemG). Ce besoin est surtout important dans les 3 derniers mois de gestation :

$$UFL_G = 0.00072 \times PV_{veau} \times e^{0.116 \times SemG}$$

$$PDI_G = 0.07 \times PV_{veau} \times e^{0.111 \times SemG}$$

où on prend PV_{veau} = 45 kg.

Nous créons donc de cette manière les variables des besoins énergétiques et protéiques :

$$BesUFL = UFL_{ent} + UFL_C + UFL_{PL} + UFL_G$$

$$BesPDI = PDI_{ent} + PDI_C + PDI_{PL} + PDI_G$$

Nous n'avons pas pris en considération dans ce modèle théorique les besoins en minéraux. Par contre, nous avons tenu de la capacité d'ingestion (exprimée en UEL, Unités d'Encombrement Laitières) qui traduit à la fois l'aptitude et la motivation d'un animal à ingérer des aliments. Cette variable croît avec le potentiel de la vache. La capacité d'ingestion dépend de plusieurs indices calculés, qui sont l'indice de lactation (IL), l'indice de gestation (IG) et l'indice de maturité (IM). Ces trois indices font évoluer la capacité d'encombrement en fonction respectivement du temps de la lactation, du temps dans la gestation, et de l'âge de l'animal. Le calcul des trois indices nous fournit la capacité d'ingestion (CI), qui prend aussi en compte une note d'état corporel de l'animal (NEC) :

$$CI = [13.9 + (0.015 \times (PV - 600)) + (0.15 \times PL_{pot}) + (1.5 \times (3 - NEC))] \times IL \times IG \times IM$$

Les équations décrites dans cette partie sont donc toutes celles qui nous ont servi à évaluer les besoins de l'animal, besoins que la ration vise à satisfaire. Nombre de ces besoins dépendent en particulier du potentiel laitier de l'animal.

La deuxième étape consiste à définir de quels aliments nous disposons pour composer la ration. Notre souci principal étant de représenter, au moins dans un premier temps, une ration standard, nous avons

décidé de la composer à partir de 4 aliments « classiques » : l'ensilage de maïs, l'herbe, le tourteau de soja 48 et le blé.

Pour ajuster la ration aux besoins décrits précédemment, nous devons disposer des compositions protéiques et énergétiques de chaque aliment. Or ces compositions dépendent d'un nombre important de facteurs lorsqu'ils sont, comme l'herbe et l'ensilage de maïs, non standardisés. La valeur énergétique de ces aliments évolue selon le stade de leur récolte, selon les conditions pédoclimatiques de croissance, ou encore selon les conditions de stockage. C'est pourquoi nous adoptons ici pour ces valeurs (PDIE, PDIN, UEL, UFL) des valeurs moyennes, que nous pouvons faire varier. Les références initiales sont tirées des « Tables de l'alimentation des bovins, ovins et caprins » produites par l'INRA.

Une fois définis les besoins de l'animal, les aliments à disposition, il faut que nous puissions demander à un modèle de proposer des rations adaptées à chaque stade de lactation, et à chaque potentiel laitier. En générant ce jeu de données, nous pouvons exprimer après régression le rendement laitier théorique en fonction du prix des aliments. La modélisation traduit un choix rationnel de l'exploitant. Nous attribuons à ce dernier de maximiser la marge alimentaire (vente de lait moins coût des aliments, y compris fourrages).

Mathématiquement, cela consiste à maximiser la fonction suivante :

$$\pi = \sum_{i,j,k} [p(i) * (y(i,j,k) - c(i,j,k))]$$

avec i les produits (lait, fourrages, aliments concentrés, blé), j le mois de lactation et k décrit le potentiel laitier annuel de l'animal sous 4 contraintes techniques :

1/ la ration doit fournir une quantité d'énergie (UFL) égale ou supérieure au besoin de l'animal, ce qui renvoie à l'équation

2/ la ration doit fournir un apport protéique suffisant en PDIE

3/ la ration doit fournir un apport protéique suffisant en PDIN

4/ La ration n'excède pas la capacité d'ingestion de l'animal

Nous imposons une dernière contrainte, à savoir que le niveau de production laitière mensuel ne peut pas être supérieur au potentiel laitier de la vache.

Les résultats de ce modèle théorique d'alimentation des vaches laitières dépendent naturellement des nombreux paramètres d'entrée, notamment des prix des aliments. A titre d'exemple, pour une vache laitière en deuxième lactation, d'un poids vif de 600 kg, d'un potentiel laitier de 7500 l, un prix du tourteau de soja de 350€/T, du blé de 250€/t, du maïs fourrage de 60€/tMS et d'herbe de 20€/tMS,

alors la consommation annuelle économiquement optimale serait de 3 tMS de maïs fourrage, 2 tMS d'herbe, 0,6T de tourteau de soja et 0,2 t de blé. Le cout alimentaire de production du lait à la tonne s'établit à 66€, dont 37€ en concentrés et 29€ en fourrages.

Nous avons résolu le programme théorique précédent 100 fois en faisant varier les prix des aliments et leur composition. Nous en avons déduit 100 combinaisons de consommations économiquement optimales de matières premières en fonction de ces prix. Puis nous avons estimé une fonction quadratique sur ces données (encore une fois comme dans le cas de la culture de blé, voir sous-section précédente). Cette estimation prend en compte les valeurs nulles parfois observées (le blé n'est pas toujours consommé).

Nous reportons ci-dessous les résultats de ce travail sous forme d'élasticités (valant pour une vache laitière d'un potentiel laitier de 7500 l).

Elasticités prix des demandes d'aliments pour les vaches laitières

Quantité / Prix	Blé	Tourteau soja	Mais fourrage	Herbe	Lait
Blé	-2,4	1,4	1,5	-0,4	0
Tourteau soja	0,7	-0,7	-0,4	0,1	0,2
Mais fourrage	1,3	-0,7	-0,8	0,2	0
Herbe	-0,8	0,5	0,5	-0,2	-0,1

Nous trouvons que l'utilisation du blé est très sensible à son prix (élasticité prix propre de -2,4), les éleveurs pouvant même facilement se passer de blé. Cela est alors remplacé par plus de maïs fourrage, aliment aussi énergétique. Nous trouvons aussi que le maïs fourrage et le tourteau de soja sont des compléments, cela ne doit pas non plus étonner les professionnels du secteur. En effet, que le prix de l'un augmente, les deux consommations diminuent. Une hausse du prix du tourteau de soja favorise la consommation d'herbe, apportant de la protéine. Enfin, une hausse du prix du lait favorise la consommation de tourteau de soja et de manière plus surprenante, diminue la consommation d'herbe.

3.1.c. La méthode statistique du maximum d'entropie généralisée

Les informations rassemblées/produites ci-dessus sur les pratiques cultures et d'alimentation des vaches laitières sont des informations théoriques utiles pour comprendre le fonctionnement potentiel d'exploitations laitières mais rien n'assure que le fonctionnement réel colle toujours à ces calculs théoriques. Par contre, il est raisonnable de supposer que le fonctionnement réel moyen ne s'écarte pas dramatiquement de ces calculs théoriques.

La méthode statistique du maximum d'entropie généralisée est une méthode qui permet de trouver la combinaison de paramètres qui respectent au mieux l'information statistique contenue dans les

données réelles (les micro-données du RICA dans notre cas) et des informations a priori (ou théoriques). C'est une méthode proche dans l'esprit des approches bayésiennes. Encore relativement peu appliquée en économie (mais cela progresse énormément ces dernières années), elle est souvent mobilisée dans d'autres disciplines (par exemple, dans le milieu médical pour interpréter les scanners, qui fournissent des informations imparfaites/incomplètes sur l'état du patient).

Nous décrivons à présent rapidement son principe de fonctionnement. L'objectif principal de cette méthode consiste à estimer des paramètres, généralement des paramètres de comportement, à partir de données et d'informations a priori sur les valeurs possibles de ces paramètres.

Plusieurs cas peuvent être distingués, selon que la relation entre les données et les paramètres inclut ou non un terme d'erreur, selon que le nombre de paramètres à estimer est supérieur ou inférieur au nombre de données disponibles pour l'estimation. Il peut également être fait une distinction en fonction de la nature des informations a priori. Dans le cas avec terme d'erreur et plus de données que de paramètres, la méthode du maximum d'entropie peut être comparée aux méthodes traditionnelles d'estimation économétrique (moindres carrés, maximum de vraisemblance, méthode des moments, méthode bayésienne, ...). De nombreux travaux s'attachent à analyser les propriétés statistiques des estimateurs "entropie" et à les comparer aux propriétés des estimateurs traditionnels (cf., par exemple, Mittlehammer et Cardell, 1997). Dans le cas où le nombre de paramètres est supérieur au nombre de données, les paramètres permettant de reproduire les données ne sont pas uniques. Ils sont sous-identifiés et le problème est dit indéterminé (ill-posed problem). La méthode du maximum d'entropie repose sur la définition d'un critère (l'entropie) qui va permettre de choisir des paramètres "optimaux" parmi l'ensemble des paramètres possibles. Notons à ce stade que la méthode d'entropie n'est pas la seule réponse possible pour résoudre les problèmes indéterminés. Theil et Goldberger (1961) ont proposé une adaptation de la méthode des moindres carrés ordinaires capable de composer avec ce problème. Cette adaptation a donné naissance à la procédure d'estimation mixte (Mixed estimation). Preckel (1998) a mis en oeuvre cette dernière ainsi que la méthode du maximum d'entropie sur un même problème et trouve que les deux méthodes conduisent à des résultats similaires en termes de valeurs de paramètres. Les propriétés statistiques des estimateurs ne sont cependant pas discutées dans ce papier. Il est donc difficile aujourd'hui de conclure sur l'efficacité comparée de ces deux méthodes.

Pour simplifier la présentation du principe de la méthode du maximum d'entropie, nous nous plaçons dans le cas où i) le nombre de paramètres est supérieur au nombre de données, ii) aucun terme d'erreur n'est introduit et iii) la relation entre les variables et les paramètres est linéaire. Ceci peut s'écrire de la manière suivante :

$$Y = X\beta$$

où Y est un vecteur (N,1) de variables observées, X est une matrice (N,K) de variables observées et β le vecteur (K,1) de paramètres à estimer. On a de plus $K > N$.

Chaque paramètre $\beta_k, k = 1, \dots, K$, s'écrit comme le produit d'un vecteur de dimension J_k composé de valeurs de support $Z_k = (z_{k1}, \dots, z_{kJ_k})$ et d'un vecteur, de même dimension, de probabilités $p'_k = (p_{k1}, \dots, p_{kJ_k})$. Ces probabilités vérifient les conditions suivantes :

$$0 \leq p_{kj} \leq 1, \forall j = 1, \dots, J_k \text{ et } \sum_{j=1}^{J_k} p_{kj} = 1$$

Les valeurs de support sont des informations a priori connues du modélisateur. Ces valeurs déterminent en particulier l'intervalle des valeurs possibles du paramètre correspondant. Le problème initial du choix du vecteur de paramètres β parmi l'ensemble des vecteurs de paramètres respectant l'équation précédente devient celui qui consiste à déterminer le vecteur de probabilités p de dimension $(\sum_{k=1}^K J_k, 1)$ qui respectent ces équations et la suivante :

$$\beta = Zp$$

La méthode du maximum d'entropie détermine de manière unique ce vecteur de probabilités. Il est solution du programme suivant :

$$\max_p H(p) \equiv -p \cdot \ln p$$

sous les contraintes précédentes.

La fonction $H(p)$ définie par Shannon en 1948 mesure l'entropie du vecteur de probabilités p . Le vecteur optimal est appelé la distribution du maximum d'entropie. La concavité de cette fonction assure l'existence et l'unicité d'un maximum au programme. Par ailleurs, cette fonction est maximale lorsque les probabilités sont uniformes. Cette fonction d'entropie trouve ses fondements dans la théorie de l'information ; elle mesure indirectement le nombre de possibilités qu'une certaine distribution de probabilités puisse être obtenue.

Pour éclairer ce point, considérons une expérience répétée N fois avec K résultats possibles. Notons N_k le nombre de fois que le résultat k est obtenu et p_k la probabilité d'apparition de cet événement :

$$p_k = \frac{N_k}{N} \text{ et } \sum_{k=1}^K N_k = N$$

Le nombre de permutations permettant de réaliser un vecteur donné $(N_1, \dots, N_K)$ est donné par le coefficient multinomial W :

$$W = \frac{N!}{\prod_{k=1}^K N_k!} = \frac{N!}{\prod_{k=1}^K N p_k!}$$

En utilisant l'approximation de Stirling, il est possible de montrer que :

$$H(p) \approx N^{-1} \cdot \ln W$$

Par conséquent, la fonction d'entropie est une mesure du nombre de permutations possibles permettant d'obtenir un résultat donné. Par suite, la distribution du maximum d'entropie peut être interprétée comme la distribution qui peut être générée le maximum de fois, si l'expérience pouvait être répétée, et qui respecte les conditions de moment. De cette façon, la méthode du maximum d'entropie maximise l'incertitude sur ce que le modélisateur ne connaît pas tout en prenant en compte les informations disponibles. La fonction d'entropie est maximale lorsque l'incertitude est totale, i.e. lorsque les probabilités sont uniformes.

La méthode du maximum d'entropie permet de déterminer en premier lieu une distribution de probabilités, puis les paramètres initiaux en multipliant cette distribution aux valeurs de support. Il apparaît clairement que les résultats de cette méthode vont dépendre du choix de ces valeurs de support. Le choix de ces dernières peut être considéré comme une vertu ou au contraire une limite de cette méthode. Si le modélisateur a une connaissance précise de l'intervalle dans lequel les paramètres peuvent varier, cette méthode permet d'introduire aisément cette information a priori au travers de ces valeurs de support. En revanche, si peu ou pas d'informations sur les valeurs plausibles des paramètres sont disponibles, le choix des valeurs de support se révèle être délicat. Ce problème regroupe en fait trois sous-problèmes : la détermination de l'intervalle des valeurs de support, le nombre de valeurs de support au sein de cet intervalle et enfin la répartition (symétrique ou asymétrique) de ces valeurs de support dans cet intervalle. Ces problèmes sont évoqués dans Preckel (1998), Mittlehammer et Cardell (1997), Lence et Miller (1998), Léon et al. (1999) et Heckeley et Britz (1999). De manière générale, il est montré empiriquement que le nombre de valeurs de support influe peu sur les résultats de la méthode du maximum d'entropie. En revanche, les choix de la largeur de l'intervalle et de la répartition dans cet intervalle des valeurs de support peuvent être déterminants. Une réponse partielle à ces problèmes consiste à mener une analyse de sensibilité des paramètres aux

valeurs de support. Le choix entre différents jeux de valeurs de support est effectué à partir du critère d'entropie normalisée $S(p)$:

$$S(p) = \frac{H(p)}{\ln K} = \frac{H(p)}{-\ln(1/K)}$$

La statistique de l'entropie normalisée est égale à l'entropie de la distribution considérée divisée par l'entropie de la distribution uniforme. Cette statistique est comprise entre zéro et l'unité. Si cette statistique est nulle, alors :

$$\forall k, \exists j_k \text{ tq } p_{j_k} = 1 \text{ et } p_{j \neq j_k} = 0.$$

Dans ce cas, il n'existe aucune incertitude sur les valeurs des paramètres. Si cette statistique est égale à 1, alors la distribution du maximum d'entropie est une distribution uniforme qui maximise l'incertitude. Un jeu donné de valeurs de support est considéré supérieur à un autre jeu si son "entropie normalisée" est supérieure. Notons finalement l'existence de la mesure de l'indice d'information qui est donnée par $1 - S(p)$.

Dans notre travail, nous disposons de micro-données du RICA mesurant les résultats financiers des exploitations laitières. Plusieurs choix précis de production effectuées par les exploitations peuvent conduire à ces résultats. Aussi nous utilisons de l'information supplémentaire sur les pratiques cultures et d'alimentation des animaux pour quantifier les comportements des exploitations, grâce à cette méthode d'entropie généralisée.

3.1.d. Modélisation micro-économétrique des exploitations laitières

Les dirigeants des exploitations laitières prennent régulièrement de nombreuses décisions productives et financières. Nous nous intéressons aux décisions qui ont des impacts indirects sur la qualité des eaux et qui sont mesurables à partir des informations du RICA. Le tableau ci-dessous liste les variables de décision que nous cherchons à expliquer et les variables potentiellement explicatives. Ce tableau inclut aussi les variables qui sont construites/dérivées de la modélisation économétrique.

Liste des variables du modèle économétrique

Variables observées expliquées (ou endogènes)
Surface en blé tendre Rendement en blé tendre Production de blé tendre Surface en maïs fourrage Surface en prairies temporaires Consommation d'engrais Consommation de produits phytosanitaires Nombre de vaches laitières Rendement laitier Production de lait Nombre d'autres animaux (en UGB) Production d'animaux Consommation d'aliments achetés Intraconsommation de céréales
Variables observées explicatives (ou exogènes)
Prix du blé Prix du lait Prix des animaux Prix des engrais Prix des produits phytosanitaires Prix des aliments concentrés Surface de l'exploitation Surfaces en prairies permanentes Quotas laitiers Nombre total d'ugb
Variables non observées générées (et endogènes)
Consommation d'engrais pour la culture de blé tendre Consommation de produits phytosanitaires pour la culture de blé tendre Consommation d'engrais pour la culture de maïs fourrage Consommation de produits phytosanitaires pour la culture de maïs fourrage Consommation d'engrais sur prairies temporaires Consommation de produits phytosanitaires sur prairies temporaires Consommation d'engrais sur prairies permanentes Consommation de produits phytosanitaires sur prairies permanentes Production de maïs fourrage Production de fourrage sur prairies temporaires Production de fourrage sur prairies permanentes Consommation par les vaches laitières de maïs fourrage Consommation par les autres animaux de maïs fourrage Consommation par les vaches laitières d'aliments concentrés Consommation par les autres animaux d'aliments concentrés Consommation par les vaches laitières de céréales Consommation par les autres animaux de céréales Consommation par les vaches laitières de fourrages issus des prairies Consommation par les autres animaux de fourrages issues des prairies Rente de quotas laitiers Prix d'opportunité de la terre Prix d'opportunité de maïs fourrage Prix d'opportunité de fourrages issus de prairies

Débutons par les décisions culturales. Nous supposons que tous les ans, les exploitations décident de l'allocation de leur surface totale entre la culture de blé, de maïs fourrage et prairies temporaires, des applications d'engrais et de produits phytosanitaires sur ces surfaces (et les prairies permanentes).

Le lien entre les rendements pour chaque culture et les applications de ces deux intrants est donnée par une forme quadratique que l'on écrit sous la forme :

$$y_{c,i,t} = \alpha_c - 0.5 \cdot (b_c - x_{c,i,t})' \cdot \Omega_c^{-1} \cdot (b_c - x_{c,i,t})$$

Où c désigne la culture, i l'exploitation et t l'année. Le paramètre α_c est une constante, le paramètre b_c est un vecteur de deux paramètres (pour l'engrais et les produits phytosanitaires) et la matrice Ω_c (de dimension 2×2) mesure la sensibilité du rendement aux variations d'apports d'intrants. $x_{c,i,t}$ désigne les applications d'intrants à l'hectare.

Si les exploitations maximisent les marges à l'hectare, alors les applications optimales d'intrants par hectare sont données par :

$$x_{c,i,t} = b_c - 1/p_{c,i,t} \cdot \Omega_c \cdot w_{i,t}$$

Où $p_{c,i,t}$ désigne le prix de la culture à l'année t et $w_{i,t}$ les prix des intrants (indépendants de la culture).

Le rendement obtenu est alors donné par :

$$y_{c,i,t} = \alpha_c - \frac{0.5}{p_{c,i,t}^2} \cdot w_{i,t}' \cdot \Omega_c \cdot w_{i,t}$$

Et la marge par hectare :

$$\pi_{c,i,t} = p_{c,i,t} \cdot \alpha_c - w_{i,t} \cdot b_c + \frac{0.5}{p_{c,i,t}} \cdot w_{i,t}' \cdot \Omega_c \cdot w_{i,t}$$

Les allocations de surfaces réalisées annuellement par les exploitations laitières répondent à plusieurs contraintes et objectifs. Nous les capturons en supposant l'existence d'une fonction logistique de coûts de gestion des assolements (en termes de temps de travail, gestion du matériel par exemple). Les surfaces cultivées (notées $s_{c,i,t}$) sont alors solution du programme :

$$\max \sum_c \pi_{c,i,t} \cdot s_{c,i,t} - w \cdot \left(\sum_c a_c \cdot s_{c,i,t} + \frac{1}{\beta} \cdot \sum_c s_{c,i,t} \cdot \ln(s_{c,i,t}) \right)$$

Sous la contrainte que la somme des surfaces cultivées est égale à la SAU (diminuée des surfaces en prairies permanentes considérées comme exogène).

Le terme entre parenthèse est la fonction de cout logistique des assolements et dépend des paramètres a_c et β . Ce dernier mesure si les exploitations modifient leurs assolements en fonction des marges espérées à l'hectare des différentes cultures. En d'autres termes, il mesure si les exploitations retournent plus de prairies et cultivent plus de blé lorsque, toutes choses égales par ailleurs, le prix du blé augmente. Le terme entre parenthèses est pré-multiplié par les prix des services utilisés en agriculture.

Les surfaces économiquement optimales sont déterminées par :

$$s_{c,i,t} = (SAU_{i,t} - s_{prairies\ permanentes,i,t}) \cdot \frac{\exp\left(\beta \cdot \left(\frac{\pi_{c,i,t}}{w} - a_c\right)\right)}{\sum_{c'} \exp\left(\beta \cdot \left(\frac{\pi_{c',i,t}}{w} - a_{c'}\right)\right)}$$

Si nous disposons des prix, rendements et applications d'intrants pour toutes les cultures, alors nous pourrions estimer les paramètres apparaissant dans les équations ci-dessus pour déterminer si les exploitations agricoles modifient leurs comportements d'allocation de surface, d'utilisation d'engrais et produits phytosanitaires en fonction d'incitations économiques.

Tel n'est pas le cas, tout spécialement pour les cultures fourragères. Pour résoudre cette difficulté, nous supposons que les productions de fourrages sont égales aux consommations de fourrages par les animaux. Cette hypothèse n'est évidemment pas vérifiée chaque année à cause de variations de stocks mais plus vraisemblable sur plusieurs années, nous l'adoptons donc car nous estimons notre modèle sur plusieurs années.

Examinons à présent les décisions animales. Nous développons un raisonnement similaire, à savoir qu'il existe un lien entre la production de lait (d'animaux) et les quantités d'aliments (au nombre de 4, à savoir les aliments achetés, le blé tendre, le maïs fourrage et les fourrages issues des prairies). Ce lien est à nouveau donné par une forme quadratique :

$$y_{a,i,t} = \alpha_a - 0.5 \cdot (b_a - x_{a,i,t})' \cdot \Omega_a^{-1} \cdot (b_a - x_{a,i,t})$$

Où a désigne à présent le type d'animaux (vache laitière, aux ugb) $x_{c,i,t}$ désigne les applications d'intrants par animal.

Les applications optimales d'intrants par animal sont données par :

$$x_{a,i,t} = b_a - 1/p_{a,i,t} \cdot \Omega_a \cdot w_{i,t}$$

Où $p_{c,i,t}$ désigne le prix de la culture à l'année t et $w_{i,t}$ les prix des intrants qui comprennent à présent les fourrages.

Le rendement obtenu pour chaque animal est alors donné par :

$$y_{a,i,t} = \alpha_a - \frac{0.5}{p_{a,i,t}^2} \cdot w_{i,t}' \cdot \Omega_a \cdot w_{i,t}$$

Et la marge par animal :

$$\pi_{a,i,t} = p_{a,i,t} \cdot \alpha_a - w_{i,t} \cdot b_a + \frac{0.5}{p_{a,i,t}} \cdot w_{i,t}' \cdot \Omega_a \cdot w_{i,t}$$

Le nombre d'animaux détenus par les exploitations laitières répondent à plusieurs contraintes et objectifs. Nous les capturons également en supposant l'existence d'une fonction logistique de coûts des animaux. Par rapport au programme précédent pour les surfaces, nous tenons aussi compte de l'existence des quotas laitiers. Les nombres d'animaux (notées $s_{a,i,t}$) sont alors solution du programme:

$$\max \sum_a \pi_{a,i,t} \cdot s_{a,i,t} - w \cdot \left(\sum_a a_a \cdot s_{a,i,t} + \frac{1}{\gamma} \cdot \sum_a s_{a,i,t} \cdot \ln(s_{a,i,t}) \right)$$

Sous la contrainte :

$$y_{vl,i,t} \cdot s_{vl,i,t} \leq quota_{i,t}$$

Et que la somme totale d'animaux ne dépasse pas les capacités des bâtiments d'élevage. Nous n'observons pas cette variable et supposons qu'elle est donnée par le nombre d'ugb.

Les nombres optimaux sont déterminées par :

$$s_{a,i,t} = UGB_{i,t} \cdot \frac{\exp\left(\gamma \cdot \left(\frac{\pi_{a,i,t}}{w} - \lambda_{a,i,t} - a_a\right)\right)}{\sum_{a'} \exp\left(\gamma \cdot \left(\frac{\pi_{a',i,t}}{w} - \lambda_{a',i,t} - a_{a'}\right)\right)}$$

Dans cette équation, $\lambda_{a,i,t}$ traduit la force de la contrainte associée au quota laitier.

Encore une fois, si nous disposions des prix des intrants et applications d'intrants pour tous les animaux cultures, alors nous pourrions estimer les paramètres apparaissent dans les équations ci-dessus pour déterminer si les exploitations agricoles modifient leurs comportements de nombre d'animaux et de modes d'alimentation en fonction d'incitations économiques.

Ce n'est pas encore le cas et pour résoudre cette difficulté, nous supposons que les prix d'opportunité des fourrages, spécifiés à la fois dans la partie offre des cultures et demande des animaux, permettent d'équilibrer les productions aux consommations. Nous reconnaissons que nous ignorons les problèmes des pertes, par exemple lors de stockage au silo. Notre approche permet juste de rendre compatible les besoins et les apports. Surtout elle identifie l'influence des variables économiques dans ces décisions des exploitations laitières. Les prix d'opportunité des fourrages permettent d'assurer les égalités suivantes (cas du maïs fourrage ; pour les prairies nous tenons compte de l'existence de prairies temporaires et permanentes) :

$$\sum_a x_{a,i,t} \cdot s_{a,i,t} = y_{c,i,t} \cdot s_{c,i,t}$$

3.1.e. Résultats de la modélisation microéconométrique des exploitations laitières

Nous avons estimé par la méthode du maximum d'entropie généralisée les 55 paramètres spécifiés dans les équations ci-dessus (nous avons 23 paramètres expliquant les décisions culturelles, 32 les décisions d'élevage). Les procédures d'inférence (par la méthode robuste du ratio d'entropie, ou par les calculs de matrice de variance covariance) indiquent que de nombreux paramètres, notamment ceux gouvernant les réactions prix, sont significativement différent de zéro (les paramètres Ω_c , Ω_a , β et γ).

Ces paramètres n'ayant pas d'interprétations directes, nous reportons tout d'abord les valeurs calculées sur l'année 2010 de quelques variables générées au cours de l'estimation et qui renseignent sur les processus de production.

Estimation des processus de production en 2010 des exploitations laitières

	Bretagne	Basse Normandie
Activités végétales		
Dépenses d'engrais minéraux sur		
Blé tendre	181	281
Maïs fourrage	65	60
Prairies temporaires	43	58
Prairies permanentes	14	57
Dépenses de produits phyto sur		
Blé tendre	46	103
Maïs fourrage	98	78
Prairies temporaires	73	61
Prairies permanentes	21	35
Activité laitière		
Dépenses par tonne de lait de :		
Maïs fourrage	54	51
Autres fourrages	24	18
Aliments concentrés	39	65
Céréales	14	36
Cout de production du lait (€/t)	276	300
Rentabilité de la terre	646	679

Tout d'abord, au niveau des activités végétales, il apparait dans les deux régions que les dépenses d'engrais minéraux ramenées à l'hectare sont les plus fortes sur les surfaces en blé, suivent par les surfaces en maïs fourrage, les prairies temporaires et enfin les prairies permanentes. Ceci signifie implicitement que les engrais organiques sont plutôt épandus sur les surfaces fourragères. Plus discutables sont les résultats sur les dépenses en produits phytosanitaires, au moins en Bretagne. En effet, les dépenses sur les surfaces en blé sont moindres de celles sur les surfaces en maïs fourrage. Une explication potentielle pourrait être que certains produits phytosanitaires sont utilisés majoritairement en inter-cultures et donc l'affectation à une culture plutôt qu'une autre est délicate. Ceci pourrait aussi expliquer la relative importance des dépenses de produits phytosanitaires sur les prairies temporaires (éventuellement implantées après une culture de blé tendre). Une autre explication potentielle est que le traitement fongicide/insecticide sur le blé tendre en Bretagne est moins important qu'en Basse Normandie, lié possiblement à une moindre présence de blé tendre meunier (plus de blé fourrager). Dans les deux régions, les prairies permanentes font l'objet de peu de traitements phytosanitaires.

Au niveau de l'activité laitière, nous reportons les dépenses d'alimentation rapportées au 1000 l de lait produit. Nous trouvons des coûts alimentaires dépassant les 100€ la tonne de lait. Ce montant dépasse les informations des instituts techniques, essentiellement du fait de la valorisation des fourrages. Dans notre approche, ces fourrages sont valorisés à leur prix d'opportunité et non à leurs charges variables comme cela est souvent fait. Ceci signifie que les valeurs implicites du temps de travail, des capitaux

mobilisés pour produire et distribués ces fourrages sont pris en compte. Nous calculons aussi les coûts de production de la tonne de lait, et par différence avec le prix du lait, les rentes de quotas. Ces coûts approchent les 275€/tonne en Bretagne, les 300€/tonne en Basse Normandie.

Enfin, nous n'avons pas fait de distinction dans notre approche entre les terres louées, dont les loyers sont encadrés par le statut du fermage, et les terres en propriété. Nous pouvons tout de même calculé la rentabilité (mesurée par l'excédent brut d'exploitation), d'un hectare supplémentaire dans chaque exploitation. Cette rentabilité avoisine les 650€/ha, bien supérieur aux loyers usuellement pratiqués.

En plus de ces précédents résultats, notre approche permet la mesure des réactions aux variations d'incitations économiques des exploitations laitières. Nous calculons à présent leurs décisions optimales à différents chocs. Le premier choc considère une augmentation de 10% du prix du lait. Les résultats indiquent les décisions potentielles des exploitations laitières bretonnes et normandes en 2010 si le prix du lait avait été 10% supérieur aux prix effectivement reçus. Un tel choc n'aurait pas entraîné de fortes modifications sur les activités végétales. A l'inverse la production de lait aurait augmenté d'à peine 5%, permise par une augmentation des achats d'aliments concentrés et de céréales et par une diminution des productions d'animaux (moins de taurillons par exemple). Cette augmentation de la production de lait reste contrainte par les quotas de production, certaines exploitations produisant un volume inférieur à leur quota. D'autres au contraire sont prêtes à dépasser leur quota, espérant ne pas être pénalisés en fin de campagne (par exemple, grâce aux volumes de quotas libérés au niveau de leurs laiteries).

Impact d'une augmentation du prix du lait de 10% à quotas inchangés (en%)

	Bretagne	Basse Normandie
Activités végétales		
Production de blé tendre	-0.56	0.33
Surface de blé tendre	-0.56	0.33
Surface de maïs fourrage	0.70	-0.46
Surface de prairies temporaires	-0.10	0.74
Consommation d'engrais minéraux	0.70	-0.12
Consommation de produits phytosanitaires	1.60	-0.14
Activités animales		
Production de lait	4.72	4.68
Production d'animaux	-4.87	-4.60
Nombre de vaches laitières	3.08	3.93
Nombre autres ugb	-4.88	-4.45
Consommation d'aliments concentrés	7.02	5.88
Consommation de céréales	9.51	8.38
Excédent brut d'exploitation (€/ha)	202	163

Le deuxième choc considère la suppression des quotas laitiers, en plus de l'augmentation de 10% du prix du lait. Les impacts sur les activités végétales sont à présent perceptibles, tout spécialement en

Bretagne. Ce choc conduit à une augmentation notable des surfaces en maïs fourrage, essentiellement au détriment des surfaces en blé, pas des prairies. Les consommations d'engrais minéraux et de produits phytosanitaires augmentent aussi significativement. La production de lait augmente à l'issue de ce choc de près de 15%, ce qui est consistant avec les déclarations des professionnels du secteur (sondage des laiteries en amont de la sortie officielle des quotas en 2015). Cette augmentation de la production est majoritairement obtenue par une augmentation du troupeau laitier, un peu par une augmentation de la productivité des vaches laitières. De nouveau, l'augmentation de la production de lait entraîne une augmentation conséquente des consommations d'aliments concentrés, car les productions fourragères augmentent globalement peu. Les revenus dégagés par les exploitations laitières augmentent fortement (près de 200€/ha de SAU), car les prix des productions augmentent, pas les prix des inputs.

Impact d'une augmentation du prix du lait de 10% et suppression des quotas (en%)

	Bretagne	Basse Normandie
Activités végétales		
Production de blé tendre	-1.93	0.76
Surface de blé tendre	-1.93	0.76
Surface de maïs fourrage	2.38	-1.11
Surface de prairies temporaires	-0.33	2.03
Consommation d'engrais minéraux	2.18	-0.20
Consommation de produits phytosanitaires	5.12	0.06
Activités animales		
Production de lait	14.68	12.99
Production d'animaux	-15.60	-13.01
Nombre de vaches laitières	10.03	11.06
Nombre autres ugb	-15.88	-12.53
Consommation d'aliments concentrés	21.59	16.09
Consommation de céréales	29.06	22.93
Excédent brut d'exploitation (€/ha)	268	203

Voyons à présent les conséquences d'une augmentation du prix des inputs. Les 3 tableaux suivants reportent les décisions des exploitations laitières si les prix des engrais minéraux, puis des produits phytosanitaires et enfin des aliments concentrés avait été supérieur de 10% par rapport au niveau effectivement observé en 2010. Une augmentation du prix des engrais minéraux a des impacts très limités sur les activités animales, juste une petite augmentation des achats d'aliments concentrés car les disponibilités en fourrage diminuent un peu. En effet, bien que les surfaces fourragères augmentent au détriment des surfaces en blé tendre, les rendements des surfaces fourragères diminuent un peu. Ceci s'explique par une moindre consommation d'engrais minéraux sur toutes les surfaces. A l'inverse, les consommations de produits phytosanitaires ne diminuent pas, les exploitations laitières préférant vraisemblablement « assurer » leurs productions fourragères.

Impact d'une augmentation du prix des engrais minéraux de 10% (en %)

	Bretagne	Basse Normandie
Activités végétales		
Production de blé tendre	-0.62	-0.69
Surface de blé tendre	-0.56	-0.66
Surface de maïs fourrage	0.17	0.55
Surface de prairies temporaires	0.25	0.39
Consommation d'engrais minéraux	-4.44	-2.35
Consommation de produits phytosanitaires	0.41	0.11
Activités animales		
Production de lait	-0.04	0
Production d'animaux	0.04	0
Nombre de vaches laitières	-0.01	0
Nombre autres ugb	0.02	0
Consommation d'aliments concentrés	0.51	0.26
Consommation de céréales	0.49	0.24
Excédent brut d'exploitation (€/ha)	-9	-11

Les effets d'une augmentation du prix des produits phytosanitaires sont similaires aux effets précédents : faible sur les activités animales, assez modeste sur les surfaces. Nous obtenons une baisse plus significative des consommations directes de produits phytosanitaires (de l'ordre de 7%, contre environ 4% pour les engrais dans le choc précédent). Ceci est « compensé » par une plus grande consommation d'aliments concentrés non produits par ces exploitations (et donc éventuellement importés de zone de production n'ayant pas les mêmes obligations environnementales). Comme le précédent choc, cette augmentation du prix de l'input diminue la rentabilité des exploitations laitières (de l'ordre de 7€/ha).

Impact d'une augmentation du prix des produits phytosanitaires de 10% (en %)

	Bretagne	Basse Normandie
Activités végétales		
Production de blé tendre	-0.45	-0.80
Surface de blé tendre	-0.30	-0.48
Surface de maïs fourrage	0.08	0.39
Surface de prairies temporaires	0.14	0.30
Consommation d'engrais minéraux	0.20	-0.08
Consommation de produits phytosanitaires	-6.81	-7.55
Activités animales		
Production de lait	-0.08	0
Production d'animaux	0.07	0.06
Nombre de vaches laitières	-0.02	-0.02
Nombre autres ugb	0.04	0.03
Consommation d'aliments concentrés	0.80	0.80
Consommation de céréales	0.80	0.70
Excédent brut d'exploitation (€/ha)	-7	-6

Une augmentation du prix des aliments concentrés impacte à la fois les activités végétales et animales. Nous obtenons des réductions non marginales des productions et surfaces de blé tendre. Dans les deux régions, les surfaces et productions de maïs fourrage augmentent alors que les surfaces en prairies (et les productions associées) restent stables. La production fourragère globale augmente donc mais pas de là à compenser la baisse des consommations d'aliments concentrés (entre 8 et 9%). En fait, nous obtenons de réductions non négligeables des productions laitières, majoritairement par une réduction des rendements laitiers (le nombre de vaches diminue peu, notamment en Bretagne). La production d'animaux (taurillons/génisses de boucherie notamment) augmente légèrement, ces activités végétales dépendant moins que l'activité laitière des aliments concentrés achetés. Les consommations d'engrais minéraux et surtout de produits phytosanitaires augmentent, de sorte à « assurer » la production fourragère. La rentabilité des exploitations laitières est significativement impactée (baisse de l'excédent brut d'exploitation par hectare de plus de 30€/ha).

Impact d'une augmentation du prix des aliments concentrés de 10% (en %)

	Bretagne	Basse Normandie
Activités végétales		
Production de blé tendre	-1.25	-1.84
Surface de blé tendre	-1.25	-1.84
Surface de maïs fourrage	1.38	1.85
Surface de prairies temporaires	-0.10	-0.61
Consommation d'engrais minéraux	1.68	0.70
Consommation de produits phytosanitaires	3.74	4.58
Activités animales		
Production de lait	-1.61	-1.70
Production d'animaux	0.39	1.58
Nombre de vaches laitières	-0.29	-0.97
Nombre autres ugb	0.46	1.10
Consommation d'aliments concentrés	-8.01	-9.32
Consommation de céréales	-2.40	9.34
Excédent brut d'exploitation (€/ha)	-34	-36

3.2. Modélisation macroéconomique en équilibre général calculable (EGC)

Le modèle spécifié et estimé précédemment est focalisé sur les exploitations laitières et leurs décisions productives. Pour mesurer les effets en termes d'emplois indirects et induits de scénarios de changement de pratiques, nous devons à présent considérer les autres agents économiques du territoire.

Alors qu'il est déjà difficile de rassembler les données économiques sur les prédominantes exploitations laitières sur les deux territoires d'étude, c'est statistiquement impossible pour de nombreux autres acteurs économiques. En revanche, cela est possible au niveau régional comme cela est déjà fait par Gohin et al. (2015) pour la Bretagne. Nous nous appuyons donc sur ce précédent travail et considérons donc que les exploitations laitières des territoires font des échanges marchands avec d'autres acteurs bretons. C'est évidemment imparfait car il est possible que, par exemple, du lait soit vendu à des laiteries situées en Normandie ou Pays de la Loire.

Nous discutons d'abord des données, puis des spécifications du modèle.

3.2.a. Les données

Les données nécessaires pour mettre en œuvre un modèle EGC mobilisé sont rassemblées dans un tableau de Matrice de Comptabilité Sociale (MCS). Il organise de manière cohérente les comptes de résultats de tous les acteurs du territoire concerné, dans notre cas la Bretagne. Gohin et al. (2015) ont expliqué dans le détail sa construction pour l'année 2010. Nous rappelons ici juste ses caractéristiques principales. Le travail a initialement porté sur le niveau français pour lequel les statistiques sont plus facilement accessibles.

Pour construire la MCS de base au niveau français, sont utilisés les tableaux de la comptabilité nationale, le tableau entrées sorties et tableau économique d'ensemble, dans la version qui comprend 17 activités. A ce stade, il y a un seul secteur agrégé pour les activités de l'agriculture, la sylviculture et la pêche. Sont ensuite différenciés l'activité agricole des activités de sylviculture et de pêche, de même que les produits agricoles. Cette distinction est effectuée à partir des équilibres ressources emplois, des bilans d'approvisionnement, des comptes économiques de l'agriculture et des données de prix ou de cotations. Différents secteurs et produits agroalimentaires ainsi que leurs consommations énergétiques sont par ailleurs isolées en utilisant les bases du dispositif Elaboration des Statistiques Annuelles des Entreprises, les données statistiques de France AgriMer, les enquêtes triennales sur l'alimentation animale et l'Enquête Annuelle de Consommation d'Energie dans l'Industrie.

Une fois la MCS française obtenue, une déclinaison régionale est construite moyennant de nombreuses hypothèses (majoritairement des règles de proportionnalité) sur la partie non agricole. Pour la partie des exploitations agricoles, la matrice distingue 8 types d'exploitations : laitière spécialisée, bovine spécialisée, bovine mixte, porcine, avicole, granivore mixte, polyculture élevage et autres.

Nous avons apporté plusieurs modifications à la MCS bretonne disponible dans Gohin et al. Premièrement, nous avons corrigé des valeurs agricoles car les comptes économiques de l'agriculture régionaux ont depuis changé. Initialement ces comptes, élaborés par les services statistiques du ministère de l'agriculture, s'appuyaient sur le recensement agricole de 2000. Ils utilisent à présent le recensement agricole de 2010, ce qui conduit à quelques corrections.

Deuxièmement, nous avons distingué les produits engrais minéraux et phytosanitaires. Initialement ces produits sont agrégés avec les autres produits industriels (nomenclature C5 dans la nomenclature des Activités Françaises). Nous utilisons les consommations de ces produits tels que reportés dans le compte économique agricole breton pour déterminer la demande. L'offre (domestique et importée), les marges et taxes sont supposées proportionnelles à celles du secteur C5.

Troisièmement, nous avons distingué les viandes bovine, porcine et avicole au sein de l'agrégat des viandes. Pour ce faire, nous avons d'abord effectué cette distinction au niveau français à partir de différentes statistiques nationales fournies par France Agri Mer et l'INSEE notamment. Nous appliquons ensuite les ratios français aux données bretonnes (par exemple que les parts des dépenses dans les différentes viandes sont identiques pour les ménages bretons et français).

Quatrièmement, nous avons distingué au sein de l'agrégat des autres biens agricoles les fourrages issus des surfaces en maïs et des autres surfaces fourragères. Nous avons encore utilisé par défaut les données du compte économique de l'agriculture (très exactement les valeurs à l'hectare produites par ces surfaces).

Cinquièmement, nous avons distingué les exploitations laitières spécialisées du bassin versant du Couesnon. Cela a été rendu possible en combinant les données présentées dans la partie 2 et les résultats de l'étude conduite Foray (2019) portant sur le Couesnon. Cet auteur a en effet pu obtenir des données de centres comptables pour mesurer l'importance des exploitations laitières de ce territoire. Pour rappel, les données publiques du recensement agricole et du RICA ne permettent pas à eux seuls de mesurer économiquement ces exploitations laitières (nous n'avons qu'une dizaine de comptabilité d'exploitations laitières par an contre près de 650 selon le recensement agricole). Au contraire, l'étude de Foray s'appuie sur 322 exploitations laitières et donc s'approche plus de la réalité. Très concrètement, cette étude ne reporte pas les données comptables mais plusieurs indicateurs techniques. Nous avons extrapolé les résultats comptables des exploitations laitières du Couesnon reportés pour l'année 2010 tels à reproduire les statistiques globales de cette étude (très exactement la SAU, les résultats changent marginalement si l'extrapolation se fait sur la surface en maïs fourrage, le nombre d'UGB ou la production laitière).

Les données comptables introduites dans la MCS et le modèle EGC pour les exploitations laitières spécialisées du Couesnon sont reportées dans le tableau ci-dessous. Nous n'avons malheureusement pas été capable de faire le même travail pour les autres exploitations du territoire, ni pour les exploitations du bassin versant de la Haute Rance.

Compte de résultat des exploitations laitières spécialisées du Couesnon (millions €)

Recettes		Dépenses	
Blé tendre	9.3	Electricité	1.6
Mais grain	3.8	Eau	0.7
Oléagineux	0	Produits pétroliers	3.5
Gros bovins	14.4	Equipements électriques	5.0
Veaux	3.0	Autres biens industriels	4.4
Porc	0	Constructions	1.0
Lait	63.8	Commerce	0.5
Autres	3.1	Transport	0.2
Maïs fourrage	8.5	Hebergement et restauration	0.1
Autres fourrages	9.1	Information	0.5
		Finance et assurance	5.6
Subventions	19.1	Services spécialisés	5.9
		Administration publique	0.3
		Engrais	3.4
		Produits phytosanitaires	2.1
		Produits vétérinaires	2.1
		Aliments concentrés	12.0
		Blé	1.8
		Mais grain	1.6
		Maïs fourrage	8.5
		Autres fourrages	9.1
		Taxes	0.6
		Travail salarié	0
		Rémunération du capital	19.9
		Rémunération de la terre	7.6
		Rémunération de l'exploitant	21.8
Total	134.1	Total	134.1

3.2.b. Caractéristiques générales du modèle EGC

Les données de la MCS sont ensuite mobilisées dans un modèle EGC qui représente les comportements des entreprises en termes d'offre de produits, de demande d'intrants et d'utilisation de facteurs (capital, travail ou terre pour le secteur de l'agriculture) et le comportement des ménages en termes de consommation finale des produits et d'investissement dans les entreprises. Ces comportements dépendent des prix, des contraintes techniques et budgétaires, mais aussi de contraintes réglementaires et de taxes ou subventions qui peuvent être modélisées.

Nous supposons ici que la concurrence est pure et parfaite, avec des producteurs qui maximisent leurs profits sous contrainte d'une fonction de production et des consommateurs qui maximisent leur utilité sous contrainte budgétaire.

Le comportement des producteurs

Pour le secteur agricole, chaque type d'exploitation maximise son profit sous contrainte technique. Les variables de décision sont les intrants spécifiques à chaque extrant et les surfaces allouées aux différentes cultures. Le programme de maximisation dépend des prix des intrants et des extrants, du niveau des facteurs fixes et des possibilités technologiques. Nous modélisons les rendements par une fonction quadratique spécifique à chaque culture, qui dépend des quantités d'intrants utilisés avec des rendements constants à la surface. Cette fonction quadratique est déjà spécifiée dans le modèle micro-économétrique. La fonction de profit est définie comme étant la somme des marges brutes par hectare pour chaque culture, multipliées par les surfaces allouées à ces cultures, moins une fonction de coût qui dépend de l'allocation des surfaces endogènes. Cette fonction de coût assure la convexité de la fonction de profit.

Le recours à des fonctions de coûts et à des élasticités nous permet d'explicitier les possibilités de substitution entre différents aliments entrant dans la composition des rations destinées aux animaux par exemple selon les différentiels de prix.

Traditionnellement les technologies des secteurs multi-produits sont spécifiées avec des fonctions CET (Powell et Gruen, 1968). Elle a par la suite été utilisé pour modéliser les arbitrages d'utilisation des terres, et fait l'objet d'une critique majeure sur la non additionnalité des quantités (Zhao et al., 2019). Gohin (2019) propose une approche quadratique, s'inspirant de Carpentier et Letort (2014). Cependant il est gourmande en paramètres et une manière de réduire le nombre de paramètres est de considérer des fonctions logistique. C'est ce que nous faisons ici, comme dans le modèle micro-économétrique.

Le comportement des consommateurs

Nous supposons que les ménages bretons font tout une série d'arbitrage selon une fonction d'utilité Cobb Douglas. Cette spécification est théoriquement restrictive mais quantitativement peu restrictive dans les scénarios considérés dans la quatrième partie. En effet, les scénarios portent d'abord sur le côté offre et les revenus et prix bougent peu.

Echanges

Les échanges se font avec une région agrégée « Reste du Monde », où ne sont pas distingués les autres régions françaises, ni les différents pays avec lesquels la France fait des échanges. Les agents économiques du « Reste du Monde » sont pris en compte dans le modèle EGC à travers des fonctions de demande d'exportation et d'importation.

Paramétrage

Nous calibrons les paramètres des fonctions de production et d'utilité à partir des données de la MCS et des élasticités prix/dépenses. A l'offre agricole, les paramètres sont déterminés tels que les élasticités prix propres des productions animales et végétales sont proches de 1, les élasticités

surfaces/nombre d'animaux proches de 0.5. Il s'agit donc d'une vision de moyen terme, alors que dans les résultats micro-économétriques, les résultats sont plus pertinents à court terme (année). A moyen terme, nous supposons que le travail est parfaitement mobile entre secteurs d'activité et que l'offre totale de travail n'est pas fixe (les salaires horaires le sont). Par contre, la quantité totale de terre disponible pour les activités agricoles est fixe, de même que les niveaux de capital dans chaque secteur. Le bouclage macro-économique est consistant avec cette dernière hypothèse : le niveau total d'investissement est fixe, si bien qu'il est égal à la dépréciation du capital. Ce sont les niveaux d'épargne des ménages bretons qui s'ajustent pour équilibrer les budgets (privés et publiques). Aux échanges, nous supposons que la Bretagne est un petit pays sur les marchés mondiaux des produits agricoles et agroalimentaires (l'élasticité de la demande d'export est égale à -20).

QUATRIEME PARTIE. RESULTATS DES SIMULATIONS DE CHANGEMENT DE PRATIQUES

Durant le projet, plusieurs types de scénarios d'évolution des pratiques agricoles ont été discutés avec les acteurs du territoire. En particulier, les collègues sociologues ont conduit des réunions visant à faire émerger les problèmes et types de solution envisageables pour chaque territoire. De notre côté, nous avons notamment mené des simulations exploratoires pour expliquer la démarche économique, le type de résultats pouvant être obtenus selon les données d'entrée.

Tous les scénarios envisagés par les acteurs des territoires ou testés provisoirement à des fins pédagogiques n'ont pas été retenus dans ce rapport pour deux raisons. Soit, ils n'étaient pas possibles de les mettre en œuvre. Par exemple, un scénario de développement de l'agriculture biologique (initialement discuté par les acteurs du bassin versant de la Haute Rance) ne peut pas être réellement étudié sans disposer d'informations techniques et surtout économiques sur cette filière (amont/aval). Soit leurs pertinences étaient discutables (par exemple, des scénarios illustratifs de modification conséquente des aides directes de la PAC ou de taxation de l'usage de produits phytosanitaires).

Nous reportons ci-dessous les résultats de scénarios examinés par Foray (2019) dans son évaluation des effets environnementaux de changements de pratiques sur le bassin versant du Couesnon. Le tableau ci-dessous reproduit les hypothèses de ces scénarios. La première ligne de ce tableau reporte la situation initiale, qui est aussi celle que nous avons introduite dans le modèle macroéconomique. Le premier scénario, dit optimisé, considère que les exploitations laitières spécialisées du Couesnon peuvent réduire les achats d'aliments concentrés (de 13,3%) et d'engrais minéraux (de 17%) sans aucun impact sur les niveaux de production. Ce type de scénario peut s'interpréter de deux manières non exclusives l'une de l'autre: soit les exploitations gaspillent des ressources, soit les exploitations peuvent bénéficier de progrès technique (par exemple, de nouveaux engrais minéraux sont mieux assimilés par les plantes, nécessitant un moindre usage pour obtenir les mêmes rendements).

Le deuxième scénario, dit herbe palier 1, vient en complément du premier scénario. Les réductions de ces achats d'intrants sont à présent plus prononcées, les dépenses en produits phytosanitaires diminuent également. Par ailleurs, les surfaces fourragères évoluent avec moins de maïs fourrage et plus de prairies. Ces différentes modifications se traduisent par un recul de la production laitière. Le troisième scénario, dit herbe palier 2, accentue le scénario précédent, avec par exemple un recul de 41% des achats d'aliments concentrés. Enfin, le dernier scénario, dit intensification, considère des changements inverses de pratiques agricoles : augmentation des surfaces en maïs fourrage, baisse des prairies, augmentation des achats d'aliments concentrés et de produits phytosanitaires, diminution plus modérée des achats d'engrais minéraux et enfin augmentation de la production de lait.

Nous examinons d’abord les effets de ces scénarios sur les revenus des exploitations laitières, puis simulons les effets en termes d’emploi indirects et induits. Cette partie termine par une discussion normative sur les scénarios.

Hypothèses des scénarios de changement de pratiques sur le Couesnon

Scénario/ pratiques	Surface Mais	Surface Herbe	Conso concentrés	Conso engrais minéraux	Conso produits phyt	Production lait
Base	13646 ha	17263 ha	1473kg/vl	62 kgN/ha	1,93 (IFT)	255,7 kT
Optimisé	0	0	-13,3%	-17%	0	0
Herbe Palier 1	-12,5%	+16,0%	-30,2%	-23,4%	-9%	-2,8%
Herbe Palier 2	-21,7%	+27,3%	-41,0%	-27,9%	-15,2%	-5,5%
Intensification	+6,8%	-7,4%	+2,8%	-16,4%	+2%	+5,6%

4.1. Impacts sur les revenus des exploitations laitières

Les scénarios définis dans Foray (2019) imposent des changements de pratiques aux exploitations laitières spécialisées. Contrairement à ce qui se fait traditionnellement en sciences économiques, ce ne sont pas des incitations économiques, telles que des variations de prix et de subventions/taxes/normes, qui justifient ces changements. Par ailleurs, il est implicitement supposé que ces changements se font à structure constante, par exemple en termes de travail, capital, d’utilisation des autres intrants. Cela revient à économie à supposer des élasticités nulles ou de faire un raisonnement statique ou comptable.

Nous avons donc imposé les variations décrites ci-dessus aux données comptables des exploitations laitières spécialisées du Couesnon sous l’hypothèse que tous les prix sont inchangés. Nous avons présenté ces données dans la troisième partie pour l’année 2010. Pour accroître la robustesse de l’analyse, nous avons calculé les mêmes variations de recettes, dépenses et revenus en utilisant la moyenne des années 2005-2012.

Nous reportons ci-dessous les impacts sur les revenus de deux manières : pour l’ensemble des exploitations laitières spécialisées du territoire d’une part, pour l’exploitation moyenne d’autre part. Cette dernière présentation, par exploitation, est plus traditionnelle mais souffre d’une limite. Elle fait comme si toutes les exploitations en moyenne s’ajustaient de la même manière. Or rien n’assure que toutes les exploitations vont évoluer exactement selon les pourcentages du tableau ci-dessus. Il serait idéal de savoir exactement quel type d’exploitations changent ses pratiques et leurs données économiques. Mais, encore une fois, toutes ces informations ne sont pas disponibles. Cela n’empêche pas que les résultats agrégés sont corrects et que les résultats par exploitation sont aussi corrects en

moyenne. Dans la réalité, certaines exploitations pourraient bénéficier plus ou moins que cette moyenne.

Les tableaux ci-dessous sont obtenus en appliquant les pourcentages de variations des consommations d'intrants et de production de lait du tableau ci-dessous aux données comptables. Ils ne tiennent pas compte des variations de surfaces, qui ne donnent pas en tant que telles des variations de dépenses.

Impacts sur les revenus globaux des exploitations laitières du Couesnon (en milliers €, données 2010)

Scenario	Dépenses concentrés	Dépenses engrais min.	Dépenses produits phyt	Recettes lait	Revenu
Base	9652	3197	2144	63893	21817
Optimisé	-1284	-544	0	0	1828
Herbe Palier 1	-2915	-748	-193	-1789	2067
Herbe Palier 2	-3957	-892	-326	-3514	1661
Intensification	270	-524	43	3578	3789

Impacts sur les revenus globaux des exploitations laitières du Couesnon (en milliers €, données 2005-2012)

Scenario	Dépenses concentrés	Dépenses engrais min.	Dépenses produits phyt	Recettes lait	Revenu
Base	8856	4116	2421	68982	25714
Optimisé	-1178	-700	0	0	1878
Herbe Palier 1	-2675	-963	-218	-1931	1925
Herbe Palier 2	-3631	-1148	-368	-3794	1353
Intensification	248	-675	48	3863	4242

Les premières lignes de ces tableaux donnent la situation initiale (respectivement pour 2010 et la moyenne 2005-2012). Le premier scénario, dit optimisé, conduit à des diminutions des dépenses conséquentes d'aliments concentrés et d'engrais minéraux. Au total, les revenus des exploitations augmentent globalement d'un peu plus de 1,8 million d'euros. Le second scénario, dit herbe palier 1, conduit à une augmentation légèrement supérieure des revenus (près de 2,0 millions d'euros). La baisse des recettes laitières est en effet moindre que la baisse des dépenses d'intrants, comprenant

les produits phytosanitaires. Le troisième scénario, dit herbe 2, conduit toujours à une amélioration des revenus agricoles. Par contre, elle est inférieure à celle obtenue avec le scénario optimisé (environ 1,5 million d'euros). Ceci s'explique par la forte baisse des recettes laitières. Enfin, le dernier scénario, dit d'intensification, améliore les revenus agricoles d'environ 4 millions d'euros. L'augmentation de la recette laitière est bien supérieure à l'augmentation des charges d'aliments concentrés et de produits phytosanitaires.

En termes de revenus agricoles, c'est donc le dernier scénario qui paraît le plus intéressant. Soulignons ici que nous n'avons par ailleurs pas pris en compte une baisse du prix du lait, dans les scénarios herbe, alors que la composition du lait est légèrement dégradée. De même, nous n'avons pas pris en compte, car non renseignée, les variations de production/intra-consommation de céréales. La prise en compte de ces deux facteurs accentuerait l'avantage en termes de revenus agricoles du scénario intensification.

Les tableaux ci-dessous reportent exactement les mêmes résultats, exprimés cette fois par exploitation. Les variations de revenus varient entre 1575€ (scénario herbe 2) à 4937€ (scénario intensification) par exploitation.

Impacts sur les revenus moyens des exploitations laitières du Couesnon (en milliers €, données 2010)

Scénario	Dépenses concentrés	Dépenses engrais min.	Dépenses produits phyt	Recettes lait	Revenu
Base	11064	3665	2458	73239	25009
Optimisé	-1472	-624	0	0	2095
Herbe Palier 1	-3341	-857	-221	-2051	2369
Herbe Palier 2	-4536	-1022	-374	-4028	1904
Intensification	309	-601	49	4101	4343

Impacts sur les revenus moyens des exploitations laitières du Couesnon (en milliers €, données 2005-2012)

Scenario	Dépenses concentrés	Dépenses engrais min.	Dépenses produits phyt	Recettes lait	Revenu
Base	10308	4791	2818	80289	29929
Optimisé	-1371	-815	0	0	2186
Herbe Palier 1	-3113	-1121	-254	-2248	2241
Herbe Palier 2	-4226	-1336	-428	-4416	1575
Intensification	289	-786	56	4496	4937

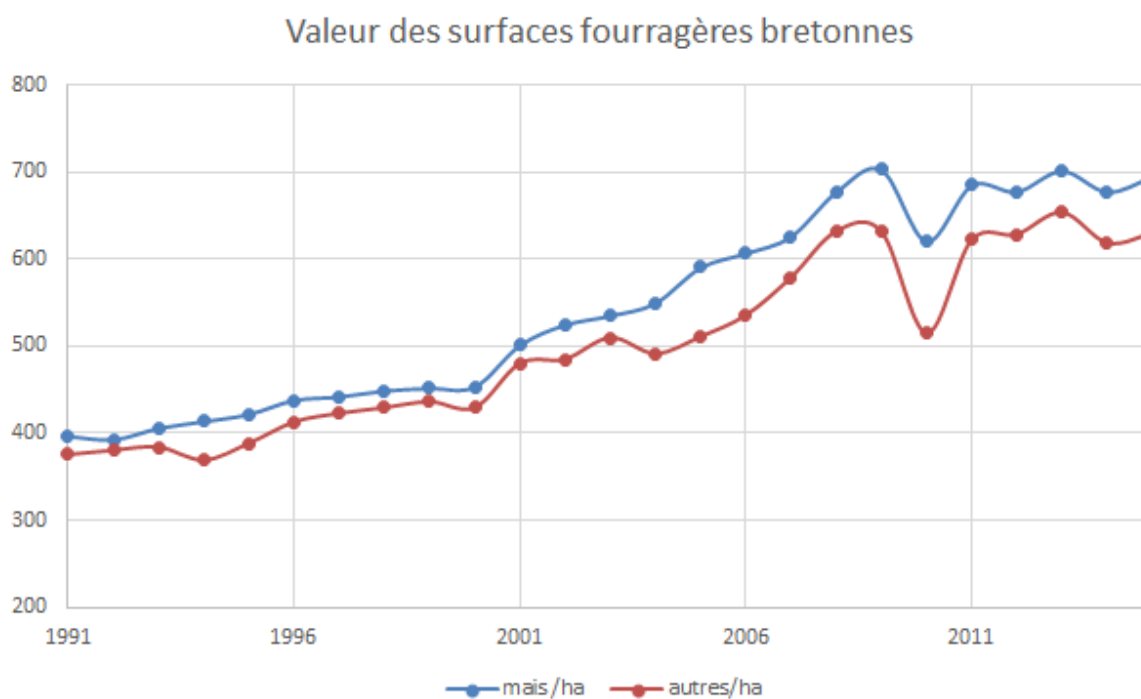
Les résultats présentés jusqu'à présent ne s'appuient nullement sur les variations de surfaces fourragères. Nous avons juste considéré les achats /ventes de produits sans s'intéresser aux fonctionnements internes des exploitations laitières.

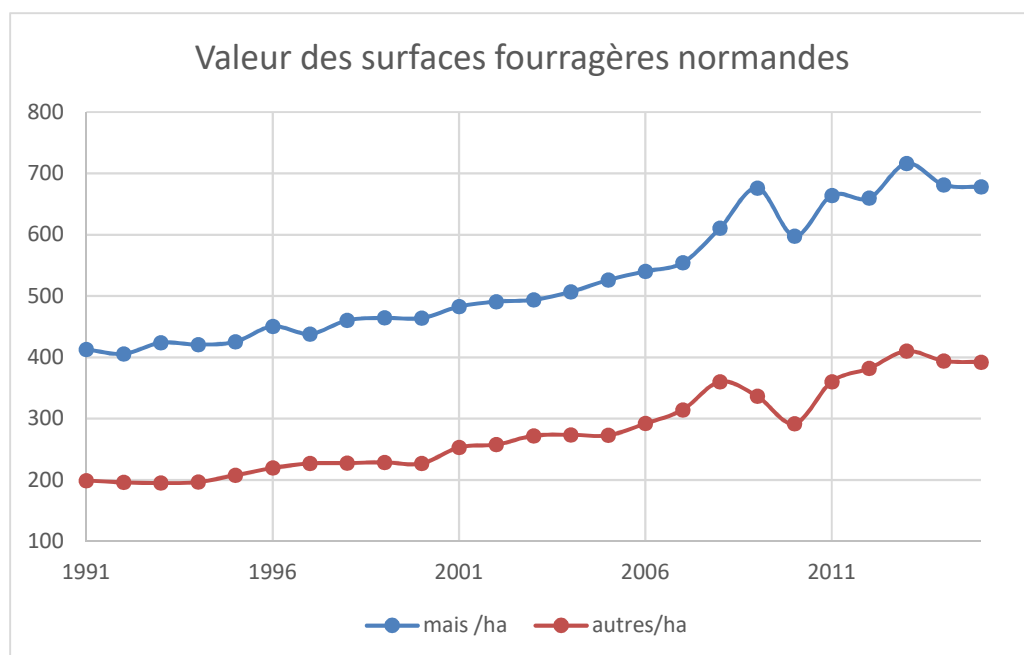
Nous conduisons une nouvelle analyse des variations de revenus en se concentrant à présent sur la partie activité laitière et alimentation (comme dans la partie 3). Nous voulons rendre compte que l'évolution des surfaces fourragères est susceptible de conduire à des évolutions de dépenses et donc de revenus. Pour cela, nous excluons à présent de l'analyse les évolutions de consommations d'engrais minéraux et de produits phytosanitaires et focalisons sur les variations de surfaces fourragères, les consommations d'aliments concentrés et les variations de production. Pour ce faire, nous devons déterminer les valeurs des surfaces fourragères (maïs fourrage et prairies). Nous avons déjà vu dans la partie 3 que les sources professionnelles indiquent de grandes disparités dans la valorisation des fourrages et du coût de concentrés par tonne de lait produite. Nous reportons dans le tableau ci-dessous les coûts aux 1000 litres de lait en fourrages et en concentrés pour les 11 cas types définis par l'institut de l'élevage en Bretagne (chiffres de 2014). Les 8 premiers concernent des élevages dits conventionnels, les 3 derniers sont en agriculture biologique.

Diversité des coûts alimentaires pour la production de lait en Bretagne (€/1000 l de lait)

cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fourrages	25	31	26	28	32	22	20	30	24	33	11
Concentré	44	43	37	39	39	50	50	32	61	29	44
Total	69	74	63	67	71	72	70	61	86	62	55

Ces 11 cas illustrent bien à nouveau la grande diversité des coûts, fourragers et en concentrés (les moyennes étant respectivement de 25 et 42€). Quelle valorisation des surfaces fourragères faut-il retenir ? Les comptes économiques de l'agriculture établis annuellement par les services statistiques du ministère de l'agriculture fournissent une estimation de ces valorisations. Les graphiques ci-dessous reportent ces estimations pour la Bretagne et la Basse Normandie





Dans les deux régions, les valeurs (nominales) augmentent au cours du temps. En Bretagne, les valeurs sont assez proches, pouvant refléter l'importance de cultures fourragères telles que les betteraves. En Basse Normandie, l'écart est nettement plus conséquent, avec peut être plus d'herbe pâturée.

Dans la partie 3, nous avons estimé les paramètres du fonctionnement des exploitations laitières à partir des données comptables du RICA. De ces paramètres, nous pouvons dériver les valeurs des surfaces fourragères. Nous les reportons ci-dessous.

Estimation économétrique de la valeur des surfaces fourragères (période 2005-2017)

	Mais fourrage	Prairies
Bretagne	1052	529
Normandie	1020	380

Ce sont des valeurs « rendus à l'animal » des fourrages produits sur ces surfaces. Dans les deux régions, la valeur des surfaces en maïs fourrages sont consistantes avec les valeurs sur pied du maïs grain et maïs fourrage (tels que reportés annuellement par les instituts techniques). Ceci est logique car les coûts de production/récolte de ces deux types de maïs sont proches. Par contre, nous obtenons des valorisations plus faibles pour les prairies, tout spécialement en Basse Normandie, mais qui restent compatibles avec les données des Comptes Economiques de l'Agriculture.

A partir de toutes ces informations, nous avons calculé de nouveaux impacts sur les revenus suite aux changements de pratiques, incluant les variations de surfaces fourragères. Nous avons fait ces calculs au niveau du territoire et rapporté ci-dessous les résultats pour l'exploitation laitière moyenne. Dans le tableau ci-dessous, nous avons fait l'hypothèse que les coûts de concentrés s'élèvent à 50€/1000 l (donc légèrement plus que la moyenne des cas types), que le prix du lait est de 325€/t. Pour les valeurs des surfaces, nous allons les faire varier significativement. Supposons tout d'abord des valeurs de 600€/ha pour le maïs fourrage, de 300€/ha pour les prairies (soit un rapport de 1 à 2).

Impacts sur les revenus moyens des exploitations (avec prise en compte des évolutions de surfaces)

Scénario	Valeur maïs	Valeur prairies	Concentrés	Produit lait	Evolution revenu
Base	13646ha*600€ /655 = 12500€	17263ha*300€ /655 = 7906€	50€*255.7kT /655=19519€	255.7kT*325 /655=126874	
Optimisé	0		-2537		2537
Herbe Palier 1	-1625	1265	-5856	-3806	2409
Herbe Palier 2	-2750	2135	-8003	-6978	1640
Intensification	875	-553	644	7105	6139

Sans surprise, le premier scénario (optimisation) génère un gain de revenu car les dépenses en concentrés diminuent. Le second, herbe palier 1, conduit aussi à une augmentation de revenu, mais moindre que le premier selon les hypothèses retenues. Les dépenses sur les surfaces en maïs fourrage diminuent, partiellement compensées par une augmentation des dépenses sur les prairies. Les achats d'aliments concentrés diminuent de près de 6000€ par exploitation. Mais les recettes laitières diminuent de près de 4000€. Au total, le gain approche les 2400€ par exploitation. Le troisième scénario, herbe palier 2, suit la même logique et est fortement pénalisé par la réduction du produit lait. Nous obtenons toujours des améliorations significatives de revenu avec le scénario intensification. Nous avons ensuite fait varier les valeurs initiales des surfaces fourragères. Pour les prairies, nous les diminuons à 150€/ha. Cela change tous les chiffres de la colonne correspondante (division par deux). En termes de revenu, les augmentations sont plus fortes pour les deux scénarios herbe (respectivement 3042 et 2707€ par exploitation) et plus faible dans le scénario intensification (5863). Il reste quand même celui qui génère le plus de revenus agricoles additionnels.

4.2. Impacts sur les emplois indirects et induits

Les scénarios définis dans Foray (2019) supposent implicitement que le travail, salarié et non salarié, dans les exploitations laitières spécialisées du Couesnon ne change pas. Les effets sur les emplois directs sont donc nuls. Par contre, ces scénarios conduisent à des variations de revenu de ces exploitations, qui vont être en partie dépensées sur le territoire et donc générer des emplois induits. Ces scénarios conduisent aussi à des variations de production de lait et d'utilisation des intrants, qui vont avoir des impacts sur les entreprises amont et aval.

Ces effets emplois sont calculés avec le modèle macroéconomique d'équilibre général calculable décrit dans la troisième partie. Pour être cohérent avec les scénarios définis, nous supposons des élasticités nulles pour ces exploitations laitières spécialisées du Couesnon dans ce modèle macroéconomique. En d'autres termes, elles ne répondent pas aux (faibles) variations de prix qui sont obtenus.

La simulation de différents scénarios dans le modèle macroéconomique conduit en effet à de très faibles effets prix. C'est attendu car d'une part, les exploitations du territoire produisent à peine 5% du lait breton et d'autre part, les variations de volume sont limitées (5,6% maximum). Soit des variations maximales de la production bretonne de lait de 0,3%. Il n'empêche que les faibles variations des prix (lait, aliments concentrés, engrais) peuvent conduire à de très légers ajustements dans les exploitations des autres territoires.

Le tableau ci-dessous reporte les résultats sur les emplois en Bretagne, dans les exploitations agricoles (autres que les exploitations laitières spécialisées du Couesnon), agroalimentaires et les autres secteurs (autres industries et services, marchands et non marchands).

La première ligne indique toujours le nombre d'emplois dans la situation initiale. En Bretagne, il y a initialement un peu plus d'un million d'emplois (mesurés en Equivalent Temps Plein, ETP) et l'emploi dans les secteurs agricoles et agroalimentaires représente près de 11% des emplois bretons.

Le premier scénario, dit optimisé, conduit à une création d'emploi de 18 emplois (toujours en ETP). Dans notre modèle macroéconomique, ce scénario comprend deux composantes : un effet revenu lié à l'augmentation du revenu des fermes laitières spécialisées du Couesnon et un effet « input » lié à la réduction des achats d'aliments concentrés et d'engrais minéraux par ces exploitations. Pour bien comprendre les résultats générés par ce modèle macroéconomique, nous avons d'abord simulé le seul effet revenu (cela correspond aux chiffres entre parenthèses dans la seconde ligne). Très concrètement, pour simuler cet effet revenu sur les emplois, nous avons supposé que le reste de la France injecte près de 2 millions d'euros sur le territoire breton, sans augmentation des impôts et taxes en Bretagne. Les ménages bretons deviennent donc plus riches et dépensent ce nouvel argent dans différents biens et services. Sans surprise, cet argent supplémentaire est d'abord dépensé dans les services et autres produits non alimentaires, plus marginalement dans les biens alimentaires. Ceci

stimule la production dans ces secteurs et donc l'emploi. Cet effet est le plus fort dans le secteur des services, qui requiert relativement plus de main d'œuvre que l'industrie et l'agriculture (qui requièrent relativement beaucoup d'intrants et de capital). Cet unique effet revenu conduit à des effets quasi nuls dans l'agriculture et l'agroalimentaire, près de 27 emplois dans les services.

Le scénario dit optimisé comprend en plus de ce pur effet revenu des exploitations laitières une diminution de leurs achats d'intrants. Ceci pénalise évidemment la demande des activités correspondantes, tout spécialement l'industrie bretonne de l'alimentation animale. Au total, l'emploi dans l'industrie agroalimentaire diminue (de 3,8 ETP). Nous obtenons aussi une légère augmentation de l'emploi dans les autres exploitations agricoles (1,6). Ceci s'interprète de la manière suivante. La baisse de la demande d'aliments concentrés par les exploitations laitières spécialisées du Couesnon conduit à une baisse, très marginale (0,01%), du prix de ces aliments. Ceci est supporté par une moindre rentabilité du capital investi dans ce secteur d'activité. Cette baisse marginale du prix des aliments stimule très légèrement la production dans les autres exploitations agricoles, d'où l'effet positif sur l'emploi. L'emploi induit dans les autres secteurs d'activité atteint à présent 20,3 ETP, soit moins que sous l'unique effet revenu. Ceci s'explique par les moindres richesses créées dans l'industrie agroalimentaire (essentiellement dans l'alimentation animale) et donc cela atténue l'effet revenu initial. Au total, le scénario dit optimisé conduit à une création de 18,1 emplois.

Impacts sur les emplois bretons et le bilan apparent des minéraux des scénarios

Scénario	Agriculture	Agroalimentaire	Autres secteurs	Total	Bilan apparent (T)
Base	53158	69726	1002137	1125021	81859
Optimisé (Effet revenu)	1,6 (0)	-3,8 (0,4)	20,3 (26,9)	18,1 (27,3)	239 (-1,8)
Herbe Palier 1 (Effet production)	7,8 (5,0)	-23,7 (-14,1)	-3,2 (-46,9)	-19,2 (-56)	589,1 (34,9)
Herbe Palier 2	12,0	-36,9	-19,1	-44	816
Intensification	-9,7	29,8	70,6	90,7	-71,5

Le deuxième scénario, dit herbe palier 1, comprend trois composantes : les effets revenu et input comme précédemment et un effet « production ». En effet, ce scénario s'accompagne d'une baisse de la production laitière qui va impacter l'activité de l'industrie laitière. Cet unique effet production est reporté entre parenthèses dans la ligne dédiée à ce scénario. Nous obtenons que la seule baisse de la production laitière par les exploitations laitières spécialisées du Couesnon (de 7,2 KT) conduit à une baisse de l'emploi breton de 56 ETP. Cela se répartit en une baisse dans l'industrie agroalimentaire (-14,1 ETP, essentiellement dans l'industrie laitière) et d'une baisse de 46,9 ETP dans les secteurs des services et autres industries. Ceci résulte encore une fois essentiellement du fait que les richesses

créées dans la filière laitière diminuent. A l'inverse, nous obtenons une augmentation de 5 emplois dans les autres exploitations agricoles, dont la production de lait augmente marginalement. L'interprétation est la suivante. Face à la baisse de la collecte de lait, les laiteries réorganisent leurs systèmes de production/collecte et sont prêtes à payer plus cher (très légèrement, de 0,05%) le prix du lait aux autres exploitations pour faire tourner leurs usines. L'hypothèse implicite dans ce résultat est que la situation initiale est une situation d'équilibre où le taux d'utilisation des usines est considéré optimale par les laiteries.

En plus de ce pur effet production, le deuxième scénario inclut des effets revenus et inputs. L'addition de ces autres effets ne modifient pas le signe des effets sur les emplois. Ainsi nous obtenons toujours une diminution de l'emploi dans les autres secteurs (-3,2). Au total, ce scénario conduit à des pertes d'emploi de 19,2 ETP.

Le troisième scénario, dit herbe palier 2, renforce l'effet production susmentionné (par exemple, le prix du lait en Bretagne augmente à présent de 0,1% (soit 0,3€/tonne). Aussi nous obtenons des réductions d'emplois indirects et induits encore plus fortes. Soulignons ici que les industries agroalimentaires de la seconde transformation (plats préparés) subissent aussi des pertes d'emploi (évalués à 8 ETP) consécutive à une moindre disponibilité de matières à transformer. Certes ces industries peuvent importer ces matières d'autres régions mais cela leur coûte plus cher qu'initialement (toujours selon l'hypothèse implicite que la situation initiale est une situation d'équilibre). La perte d'emploi total atteint les 44 ETP.

A l'inverse, le dernier scénario, dit intensification, stimule les emplois indirects dans les industries agroalimentaires et induits. C'est l'effet production supplémentaire de lait (de 14,3kT) qui domine dans ce scénario. A titre d'exemple, la création d'emplois dans les laiteries atteint 13 ETP. L'effet revenu est également plus fort, ce qui se traduit par une création d'emploi dans les services et autres industries de 70 emplois. Par contre, l'emploi dans les autres exploitations agricoles diminue de près de 10 ETP. Le surplus d'offre de lait conduit à une baisse du prix du lait de 0,1%. Au total, la création d'emplois dépasse les 90 emplois.

4.3. Discussion

Les calculs précédents répondent à l'objectif initial de l'étude de mesurer les conséquences sur les revenus, les emplois directs, indirects et induits de scénarios de changements de pratiques agricoles. D'une manière générale, tous les scénarios conduisent à des augmentations de revenu des exploitations laitières. Par cet effet richesse, il contribue tous à l'augmentation des emplois induits. Par contre, certains scénarios de changements de pratique peuvent conduire à des pertes d'emplois indirectes, sans surprise essentiellement dans les industries agroalimentaires.

Ces conséquences sur les revenus et emplois ne peuvent pas à elles seules déterminer le « meilleur » scénario. Il faut au minimum pondérer ces conséquences avec les divers impacts environnementaux générés par ces scénarios et rapportés dans Foray (2019) : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (avec/sans herbicides), émissions de gaz à effet de serre, stockage de carbone, bilan apparent de l'azote et devenir potentiel des excédents (vers l'air, l'eau et le sol).

La pondération de ces différents impacts environnementaux et des impacts économiques constitue une extension potentielle de ces travaux. En première approche, la pondération pourrait s'appuyer sur une valorisation monétaire des biens et services non marchands (par exemple, prix de la tonne de carbone), ce qui pourrait soulever de nombreuses nouvelles questions. En particulier, faut-il prendre en compte des éventuels déplacements d'effets environnementaux dans d'autres territoires bretons? Nos calculs macroéconomiques montrent en effet que les bilans des minéraux dans le reste de la Bretagne sont modifiés à l'issue des scénarios : aggravation dans les trois premiers scénarios et diminution dans le dernier. Ceci s'explique par les évolutions de productions agricoles expliquées précédemment. Des travaux supplémentaires pourraient donc révéler de nouveaux arbitrages entre les conséquences économiques et environnementales et entre plusieurs territoires. L'évaluation de nouveaux scénarios d'évolution des pratiques, agricoles et/ou alimentaires, constitue également une poursuite possible de ces travaux, mobilisant les méthodes développées dans ce rapport.

QUELQUES REFERENCES

- Bourgeois, C., & Jayet, P. A. (2015). Regulation of relationships between heterogeneous farmers and an aquifer accounting for lag effects. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*.
- Britz, W., Lengers, B., Kuhn, T., & Schäfer, D. (2014). A highly detailed template model for dynamic optimization of farms.
- DRAAF Bretagne (2013). Pratiques de fertilisation dans les bassins versants en 2011. Juin 2013. Rennes.
- Flichman, G., & Jacquet, F. (2003). Le couplage des modèles agronomiques et économiques: intérêt pour l'analyse des politiques. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, 67, 51-69.
- Foray S. (2019). Evaluation socio-économique aux changements de pratiques en agriculture dans le bassin versant du Couesnon. *Evaluation environnementale des scénarios agricoles définis sur le territoire*. 32 p.
- Godard, C., Roger-Estrade, J., Jayet, P. A., Brisson, N., & Le Bas, C. (2008). Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems*, 97(1), 68-82.
- Gohin A., Carpentier A., Koutchade P., Bareille F. (2015). Amélioration de la représentation de l'offre agricole dans les modèles macroéconomiques. *Rapport Ademe*, 122p + annexes.
- Gohin A., Bareille F., Cariou S., Chouteau R., Dupraz P., Duflot B., Rubin B. (2015). Les emplois liés aux filières de l'élevage en Bretagne. *Etats des lieux quantitatif et qualitatif*. *Rapport MEDDE, CGDD, n°143*, 132 p + annexes
- Gohin A., Rault A. (2013). Assessing the economic costs of a foot and mouth disease outbreak on Brittany: A dynamic general equilibrium analysis. *Food Policy*, 39, pp. 97-107
- Golan A., Judge G., Miller D. (1996). *Maximum entropy econometrics. Robust estimation with limited data*. New-York: John Wiley & Sons
- Hazell P.B.R., Norton R.D. (1986). *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. New York, Macmillan.
- Hovelaque, R. (1977). *Grandjouan, simulateur et jeu d'entreprise agricole*. Sciences Agronomiques. Rennes.
- Howitt, R. E. (1995). Positive mathematical programming. *American journal of agricultural economics*, 329-342.
- Jacquet, F., Butault, J. P., & Guichard, L. (2011). An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops. *Ecological economics*, 70(9), 1638-1648.

Léon Y., Peeters L., Quinqu M., Surry Y. (1999). The use of maximum entropy to estimate input-output coefficients from regional farm accounting data. *Journal of Agricultural Economics*. 50(3), 425-39.

Letort E., Dupraz P., Piet L. (2017). The impact of environmental regulations on the farmland market and farm structures : An agent-based model applied to the Brittany region of France. Working paper SMART LERECO 17-01

Mittlehammer R.C., Cardell N.S. (1997). The Data-Constrained GME Estimator of the GLM: Asymptotic Theory and Inference. Mimeo, Washington State University.

Peyraud, J.-L., P. Cellier, C. Donnars, O. Réchauchère (coord.), F. Aarts, F. Béline, C. Bockstaller, M. Bourblanc, P. Cellier, L. Delaby, J.Y. Dourmad, P. Dupraz, P. Durand, P. Faverdin, J.L. Fiorelli, C. Gaigné, P. Kuikman, A. Langlais, P. Le Goffe, P. Lescoat, T. Morvan, C. Nicourt, V. Parnaudeau, J.L. Peyraud, P. Rochette, F. Vertes, P. Veyssset , 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, INRA (France), 68 p.

Preckel P.V. (1998). Least Squares and Entropy as Penalty Functions. Working paper, Department of Agricultural Economics. Purdue University.

Shannon C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*. 27, 379-423.

Theil H., Goldberger A.S. (1961). On Pure and Mixed Statistical Estimation in Economics. *International Economic Review*. 2(1), pp. 65-78.

Veyssset P., Lherm M., Bébin D. (2009). Opt'INRA : outil d'aide à la décision par programmation linéaire. Actions de modélisation PHASE. 20 février 2009

ANNEXE : DESCRIPTION DU MODELE MICROECONOMIQUE FARMDYN.

Au début du projet, nous avons établi un état de l'art de la modélisation économique des exploitations agricoles. Sur les exploitations d'élevage, le modèle dénommé FARMDYN développé à l'université de Bonn est actuellement le plus complet. Nous avons passé du temps pour comprendre son fonctionnement et considérons utile de le présenter. Il illustre les potentiels de cette méthode mais aussi les nombreuses données nécessaires pour le mettre en œuvre.

Le modèle FARMDYN est, comme son nom le suggère, un modèle dynamique représentant le fonctionnement biotechnique et économique d'exploitations agricoles. Il est dynamique car il considère plusieurs années et même distingue les mois pour toutes les années. Il permet alors une représentation détaillée, par exemple sur l'alimentation des herbivores qui peut être différente l'été de l'hiver. L'exploitation modélisée peut avoir plusieurs ateliers de production (élevages bovins et porcins, cultures et unité de méthanisation), chacun étant caractérisé par un ensemble d'équations et de coefficients techniques. Pour chaque atelier modélisé, il est possible de distinguer différentes techniques de production (par exemple techniques de labour simplifié, agriculture biologique, etc.). Les ateliers sont liés les uns aux autres à la fois par des contraintes techniques (sur la disponibilité du travail par exemple) mais aussi par la fonction objective de l'agriculteur. La maximisation de cette fonction objective sur l'ensemble de la période simulée permet de faire un arbitrage entre les différentes techniques et ateliers.

L'un des points originaux de ce récent modèle est son aspect dynamique. La dynamique dans le modèle vient en partie des fonctions biologiques associées à la gestion des ateliers (par exemple le renouvellement du cheptel bovin, les rotations culturales) mais aussi au regard de l'évolution du capital. Celui-ci se déprécie au cours de temps et les investissements permettent de maintenir, voire augmenter, ce stock de capital nécessaires aux activités productives. Dans FARMDYN, l'agriculteur peut choisir d'investir entre une trentaine de machines et plus de 50 bâtiments d'élevage différents. Chacun de ces bâtiments et machines sont reliés à des contraintes physiques. Il existe aussi une version statique du modèle où la simulation n'est conduite que pour année.

L'actuelle version du modèle FARMDYN est issu de quatre travaux précédents ayant souvent comme objectif l'analyse des impacts carbone de l'agriculture :

Le premier est le modèle DAIRYDYN développé par Lengers and Britz (2012) afin de simuler le fonctionnement des exploitations laitières allemandes. De nombreux points sont développés

concernant notamment l'alimentation des animaux, les besoins en main d'œuvre et en capital mais aussi la dynamique du cheptel qui prend en compte l'amélioration génétique du troupeau.

Le second est une extension du premier modèle réalisé par Garbert (2013, 2015) où est introduit un module de gestion d'un atelier porcin. Il distingue deux types d'activités : le naissage et l'engraissement. Cet atelier est nettement moins détaillé que le précédent, notamment au niveau de l'alimentation des animaux.

Le troisième travail a été développé par Remble, Britz et Keeney (2013) pour prendre en compte les cultures. Ainsi, pour une douzaine de cultures et de prairies, différentes techniques sont détaillées en fonction de l'intensité de la production et du type de labour. Les questions d'investissements liées à la mécanisation sont aussi développées. Les rendements sont basés sur des fonctions de réponse dépendant de l'azote. Le travail nécessaire pour cet atelier est différencié en fonction du climat et du sol. Ce travail a aussi permis de modéliser la demande de travail, et notamment la gestion des pics de travail (notamment lors des périodes de récoltes).

Le dernier module ajouté est celui de Schäfer (voir Britz et al., 2014) qui développe un atelier de production relatif à la méthanisation.

Actuellement ce modèle est utilisé dans différents projets, notamment pour étudier la problématique du changement structurel en agriculture et les implications sur les émissions nettes de nutriments. Il est aussi utilisé et développé pour étudier différentes stratégies de réduction d'utilisation des produits phytosanitaires.

Nous développons ci-dessous un aperçu condensé du fonctionnement de FARMDYN. Nous explicitons à la fois la logique de la modélisation mais aussi les coefficients techniques nécessaires au fonctionnement du modèle. Ce modèle a été développé en partie en partenariat avec les acteurs économiques allemands, qui ont pu fournir certains des paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle.

i/ Contexte économique

Ce modèle est centré sur une exploitation agricole qui est supposée subir/obtenir les prix de marché (vente sur circuit long). En d'autres termes, les prix des productions et des intrants (intrants variables et travail salarié) sont exogènes dans le modèle. Il est évidemment possible de faire varier les différents prix au cours des simulations. Par défaut, il est supposé que les prix sur les marchés évoluent au rythme de l'inflation (1% pour toutes les années) et que l'agriculteur connaît cette évolution dès la première période. Ceci correspond à un cas évidemment extrême d'absence de volatilité des prix et permet

d'obtenir des résultats « initiaux ». Il est possible de résoudre ce modèle dans des situations plus réalistes où l'agriculteur considère que les prix peuvent varier dans le futur. Il est supposé dans ce cas que l'agriculteur reste toujours neutre au risque (pas d'introduction de prime de risque, voir précédemment) mais qu'il pondère par les probabilités d'occurrence les différentes configurations de prix. Pour mettre en œuvre cette approche, il faut alors demander aux agriculteurs leurs anticipations des prix des différents produits pour les différentes périodes considérées, les niveaux de prix possibles et leurs probabilités d'occurrence.

Rajoutons dans ce contexte économique que le modèle prend aussi en compte les paiements directs de la Politique Agricole Commune (PAC). Cela comprend les aides couplées aux activités et aussi les aides découplées du premier pilier. Selon les technologies, il est possible d'intégrer les aides du second pilier de la PAC ou encore des aides nationales (pour la construction d'unité de méthanisation par exemple).

ii/ Hypothèse comportementale

Il est supposé que l'agriculteur effectue ses choix productifs, d'investissements, financiers de telle sorte à maximiser sa richesse finale espérée. Cette richesse est calculée comme la somme de l'épargne liquide accumulée lors de la dernière année de simulation et de la valeur potentielle de vente de la ferme lors de cette même dernière année.

L'agriculteur définit la première année un plan de production pour son exploitation qui intègre les conséquences de ses choix de l'année sur les profits futurs. Par exemple, il peut investir dans un équipement laitier (telle que salle de traite/robot de traite) en considérant qu'il produira du lait pendant plusieurs années (par exemple au minimum la durée d'amortissement comptable de l'investissement). Il est toujours possible que l'agriculteur révise ses choix initiaux les années futures lorsque le contexte économique change de manière non anticipé. Par exemple, lié à la suppression des quotas laitiers, il a pu décider juste avant 2015 de développer fortement son atelier laitier (par exemple achat d'un/plusieurs robots de traite). Si les prix du lait devaient être durablement plus faibles qu'anticipé en 2015 à partir de 2016, alors il pourra réviser son plan de production (par exemple produire moins de lait et faire plus de céréales pour la vente).

L'hypothèse selon laquelle un agriculteur cherche à maximiser sa richesse finale est évidemment une hypothèse qui n'est pas forcément valide pour tous les agriculteurs. Certains pourraient par exemple préférer maximiser les prélèvements privés pour leur ménage et éventuellement moins investir dans leur outil productif. Le modèle FARMDYN peut très certainement être testé en changeant cette fonction objective et introduire cette autre fonction objective. En fait, le modèle FARMDYN peut être

résolu selon trois horizons d'analyse : un horizon de long terme où le nombre d'années considérées peut être grand (pouvant dépasser 30 ans), un horizon de court terme où il est supposé que la simulation ne porte que sur un an (la fonction objective ne comprend pas alors la valeur de vente de la ferme). Un troisième mode de résolution est une analyse dite d'état stationnaire dans lequel on impose que l'exploitation reste dans un régime de croisière. Cet état stationnaire impose de remplacer les processus dynamiques. Par exemple, il est supposé que les investissements sont juste égaux aux dépréciations usuelles du capital, il n'y a pas accumulation de capital.

Le modèle FARMDYN intègre de nombreuses contraintes auxquelles font face les agriculteurs. Nous les présentons ci-dessus par ateliers de production, même s'il est important de comprendre qu'ils sont tous liés les uns aux autres. En effet, les productions d'un atelier peuvent servir d'intrants dans un second, par exemple les effluents d'élevage épandus sur les cultures ou les céréales produits pour l'alimentation des porcs. Ainsi, l'évolution des pratiques sur l'un des ateliers peut modifier la gestion des autres ateliers. Par exemple, si l'agriculteur décide de réduire son cheptel, les quantités d'azote organique excrétées disponibles sont plus basses, ce qui modifie directement la gestion de l'atelier fertilisation mais aussi plus indirectement, l'ensemble des autres ateliers modélisés.

iii/ La dynamique des troupeaux bovins et porcins

Les bovins

Le modèle distingue plusieurs groupes d'animaux : les vaches laitières, les veaux males et femelles, les génisses élevées mais aussi les génisses et les vaches achetées à l'extérieur de la ferme, les veaux et les génisses vendus ou encore les vaches abattues (avant qu'elles aient atteint leur nombre de lactation maximale). Par la suite, quand nous nous référerons au cheptel de l'une de ces catégories, nous parlerons de « sous-cheptel ».

La dynamique du cheptel est caractérisée par deux points essentiels : les transferts d'un sous-cheptel à un autre (un veau femelle devient une génisse) et la transmission du potentiel génétique. Les évolutions des effectifs laitiers sont relativement simples : une vache donne naissance à un veau (mâle ou femelle) qui sera vendu ou élevé (en taurillon/boeuf ou génisse). Dans le cas femelle, la génisse pourra être vendu/abattue ou inséminée/saillie pour une production ultérieure de lait. Les veaux femelles peuvent être vendus comme les mâles, notamment si les conditions économiques ne sont pas favorables ou si les capacités de production sont saturées (main d'œuvre insuffisante ou bâtiments d'élevage trop petits).

Une vache laitière est caractérisée entre autre par un coefficient de natalité qui définit le nombre de mise bas qu'elle réalisera au cours de sa vie. Une fois qu'une vache a réalisé ce nombre maximal de

lactation et qu'elle est tarie, elle est réformée. Comme pour les veaux, le modèle donne la possibilité à l'agriculteur de vendre une ou plusieurs vaches avant qu'elles n'aient atteint leur nombre de lactation maximal.

Les variations d'effectifs des sous-cheptels dépendent donc des autres sous-cheptels. Le nombre de vaches présentes sur l'exploitation dépend donc du nombre de génisses présents sur l'exploitation les années passées. Ainsi, même si le prix du lait s'accroît et devient « intéressant », l'agriculteur ne pourra pas augmenter immédiatement sensiblement la taille de son troupeau. L'agriculteur a en fait deux possibilités. Une première consiste à augmenter ses effectifs de veaux élevés femelles (de baisser le nombre de femelles vendues à l'extérieur). L'augmentation du nombre de vaches laitières ne sera donc effectif que deux années suivants leur naissance. La seconde consiste à acheter des vaches/génisses sur le marché, en fonction naturellement de leur prix et disponibilité.

La production laitière est au centre du processus de reproduction modélisé dans FARMDYN. En effet, les vaches laitières (et leur suite) sont différenciées en fonction de leur potentiel génétique. De manière plus précise, le modèle distingue différents types d'animaux au sein des différents sous-cheptels en fonction de leur production laitière potentielle. Le modèle distingue 35 types de vaches laitières, pouvant produire de 4000 à 10800 litres de lait par an (par palier de 200l/an). Chaque animal est donc défini par son potentiel génétique initial. La reproduction permet à l'agriculteur d'augmenter la production laitière de son troupeau de deux manières :

Elle permet d'augmenter les effectifs animaux tous les ans ;

Elle permet d'améliorer la qualité génétique du troupeau.

Il est par ailleurs supposé une augmentation graduelle de la qualité génétique des troupeaux (implicitement dans les choix d'insémination). Ainsi, même si tout le troupeau a un potentiel génétique de 6 400 L/an la première année de simulation, tous les animaux du cheptel auront un potentiel supérieur au bout de plusieurs années.

Cette dynamique du potentiel génétique du troupeau influence de nombreuses facettes de la gestion de l'atelier. En effet, le modèle considère que les coûts variables non-imputables à l'alimentation (les frais de vétérinaire, de médication et de fécondation), les besoins alimentaires, la durée de vie de l'animal et le nombre de lactation maximale sont tous des fonctions linéaires du rendement laitier. L'augmentation du potentiel génétique d'une année à l'autre modifie donc la dynamique du cheptel et la conduite d'élevage de manière générale.

Pour les coûts variables, ils augmentent avec le rendement laitier dans le cas des vaches mais sont identiques pour tous les animaux d'un même sous-cheptel, quel que soit le potentiel génétique.

Les porcins

La dynamique du cheptel porcin est plus simple que celle du cheptel bovin. En effet, le cheptel porcin est modélisé de telle sorte qu'une truie qui sort du cheptel ne peut être remplacée que par une truie provenant du marché. Cela limite les difficultés liées au passage d'un sous-cheptel à un autre. Comme pour les vaches, les truies sont obligatoirement abattues quand elles ont atteint leur âge maximal mais l'agriculteur peut aussi procéder à des abattages supplémentaires de truies non-mâtures dans le but de réduire la taille de son cheptel encore plus rapidement (dans le cas d'une baisse relative du prix du porc par rapport aux céréales ou encore dans le cas d'une réglementation environnementale particulièrement sévère).

Le reste de la gestion du troupeau est similaire à celle du cheptel bovin. Les éleveurs peuvent vendre les porcelets ou les engraisser. Les porcelets sont normalement vendus quand ils ont atteint un poids compris entre 25 et 30 kg.

Le nombre de porcelets nés dépend des coefficients de natalité des truies, ces coefficients évoluant dans le temps. Les équations liées à la taille et à l'équilibre du cheptel sont les mêmes que celles utilisés dans la gestion du troupeau laitier. Les coûts variables des animaux sont les mêmes pour tous les éléments d'un même sous-cheptel.

iv/ Le module de l'alimentation animale

Les besoins alimentaires des animaux sont considérés comme des contraintes dans le modèle. L'agriculteur doit mettre en place des actions de telle sorte que ces besoins soient assurés pour l'ensemble du cheptel. Pour cela, il peut soit produire des fourrages et des céréales sur l'exploitation, soit les acheter à l'extérieur (notamment les aliments concentrés composés).

Pour les bovins, les auteurs distinguent les besoins alimentaires pour les différents sous-cheptels. Les besoins alimentaires à satisfaire pris en compte par le modèle sont : les quantités ingérées (brutes et sèches), l'énergie et les protéines. L'ensemble des besoins alimentaires des animaux doivent être couverts par les productions produites sur l'exploitation et, si nécessaire, celles achetées à l'extérieur. Pour les quantités ingérées, le modèle calcule les quantités maximales et minimales requises par chaque animal. Cela permet à l'agriculteur d'adapter les rations à la situation économique.

Les besoins alimentaires diffèrent entre les vaches laitières du cheptel en fonction de leur rendement annuel et de la période de lactation. Pour calculer les besoins adaptées à chaque vache, Britz et al. (2014) calculent le pourcentage de lait produit quotidiennement par la vache sur l'année à partir de la

méthode de Huth (1995) en fonction des 5 périodes de la lactation identifiées. Ces quantités produites permettent de connaître les besoins alimentaires individuels pour chaque mois de l'année.

Plus précisément, les besoins minimaux et maximaux en énergie, protéine ou matière sèche des animaux dépendent des taux butyreux du lait (brut et corrigé), de la quantité de lait produite et de leurs poids vifs moyens. A défaut d'information, le modèle considère que le taux butyreux moyen est de 4% et que le poids vif moyen est de 650 kg. Les formules du GIEC sont utilisées pour calculer ces besoins. Par exemple, les quantités de matières sèches minimum sont égales à 0,0185 fois le poids vif de la vache plus 0,305 fois la quantité de taux butyreux corrigé du lait pour une phase donnée, le tout multiplié par la durée de la phase. Des formules similaires permettent de calculer les quantités d'énergies nettes nécessaires pour la lactation, les besoins d'entretien, l'activité quotidienne et la gestation. Le modèle calcule les besoins en protéine à partir des quantités de gras produits quotidiennement dans le lait. Les quantités maximales prises par les vaches sont aussi calculées.

Le principe de modélisation est similaire mais plus simple pour les génisses et les veaux puisqu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de la production de lait. Les quantités nécessaires vont dépendre de la prise de poids journalière. Le modèle calcule les besoins liés à la croissance, à l'activité quotidienne et à la maintenance à l'aide des formules du GIEC.

Les besoins des animaux sont séparés par mois. Pour les veaux et les génisses, il est supposé une distribution égale tout au long de l'année. Pour les vaches laitières, les besoins sont calculés en fonction de la date prévue de leur mise à bas. Ainsi à un instant donné, les vaches qui vèleront dans les deux mois suivants sont en période de tarissement et ont donc des besoins inférieurs au reste de leur lactation. Pour calculer ces besoins mensuels, on a besoin des coefficients exogènes des besoins alimentaires par période de lactation et sous-cheptels. Les besoins mensuels sont ensuite sommés et fixés sur 3 mois pour chaque sous-cheptel, race et phase de lactation.

Ces différents besoins peuvent être atteints à partir de différentes rations alimentaires (différentes rations en céréales et en herbes produites ainsi que des achats de concentrés). Les quantités de nourriture nécessaires pour l'alimentation sont sommées sur l'année pour l'ensemble des sous-cheptels et des phases de lactation. Le modèle calcule aussi les besoins alimentaires pour chaque période intra-annuelle de l'année. Ainsi, la quantité de nourriture nécessaire pour l'année dépend de la taille du cheptel et des quantités déterminées plus haut. Pour calculer les rations alimentaires, il est nécessaire d'avoir des coefficients exogènes renseignant sur les quantités de valeurs nutritives (énergie métabolisable, protéines brutes ou matière sèche) présentes dans chaque type d'aliments (ensilage herbe, maïs grain, concentrés, etc.). Il est important de noter que différentes rations peuvent suffire aux besoins des animaux. Par ailleurs, trois types de concentrés sont distingués dans le modèle

en fonction de leurs teneurs en énergie et en protéine. Les quantités d'azote disponible et d'énergie brute ingérées et la digestibilité de chaque type d'aliments sont calculées à partir de formule mobilisant les teneurs en énergie métabolisable, protéines, graisses, fibres, sucres et cendres.

Par ailleurs, le modèle tient compte du fait que les exploitants peuvent décider de ne pas couvrir les besoins alimentaires des vaches laitières et donc de ne pas exprimer totalement le potentiel laitier d'une partie du cheptel. Cela peut être par exemple le cas quand le prix des concentrés augmente relativement par rapport au prix du lait.

Le module alimentation porcin fonctionne à partir de quantités fixées de concentrés et de céréales pour chaque sous-cheptel. Les quantités individuelles nécessaires sont ensuite multipliées par la taille des sous-cheptels. Il n'y a donc pas de variation au sein d'un sous-cheptel comme dans le cas des bovins. Les types de concentrés sont différents en fonction des sous-cheptels.

v/ Le module culture

Le module « culture » a été développé par Lengers afin de simuler la gestion de cet atelier en intégrant différentes techniques de culture. Les productions végétales sont différenciées par cultures, types de sols, intensité de culture et type de labour. Le modèle suppose que n'importe quelle culture (autorisée par l'utilisateur au début de la simulation) peut être mise en place sur les parcelles arables dès lors que cela augmente la fonction objective et que les contraintes ne sont pas saturées (travail nécessaire supplémentaire, besoin en nouvelles machines).

Si l'utilisateur du modèle peut définir le nombre de parcelles et leur taille moyenne, celles-ci sont aussi différenciées en fonction de leur qualité : arables ou en prairies permanentes. Si les terres arables peuvent être transformées en prairies temporaires ou permanentes, l'inverse est impossible par la réglementation. Par ailleurs, même si la taille de la SAU est définie initialement, elle peut augmenter ou diminuer puisque le modèle rend compte de la possibilité d'acheter ou de louer des parcelles.

Les cultures prises en compte par le modèle sont les suivantes : céréales d'hiver, colza, céréales d'été, pommes de terre, betteraves à sucre, haricots d'été, pois d'été, maïs grain, maïs fourrage, herbe à ensiler, herbe à pâturer.

C'est l'utilisateur qui définit au début de la modélisation quels types de culture la ferme modélisée peut cultiver sur sa surface. Dans le cas de la Bretagne, il est aujourd'hui réaliste de ne pas prendre en compte certaines cultures, comme les betteraves à sucre (absence de sucreries).

Pour chacune de ces cultures, les auteurs définissent les rendements en matière fraîche et en matière sèche (en tonnes/ha). Pour les prairies, les rendements sont séparés en fonction des mois de l'année.

A partir de ces rendements et grâce à l'utilisation de coefficients techniques, les auteurs calculent les quantités d'azote et de phosphate présents dans les récoltes.

L'intensité de culture et le type de labour sont des ensembles qui définissent les différentes techniques pouvant être adoptées par les exploitations. Les paramètres techniques et économiques clés dans le module culture sont les coûts des semences, des traitements en herbicides, fongicides, insecticides et régulateurs de croissance ; le coût de l'assurance contre la grêle ; les quantités de fertilisants, de chaux et d'eau.

Lorsque les quantités d'intrants nécessaires pour les pratiques agricoles sont déterminées, elles sont multipliées par les prix des intrants afin de connaître l'ensemble des coûts variables associées à la pratique. Les coûts associés aux passages des tracteurs sont pris en compte dans le module « mécanisation ». Le modèle distingue aussi la distribution des besoins au cours de l'année. Cela permet de connaître les fréquences et les intensités des traitements de manière mensuelle pour chaque culture. De même, en fonction de l'humidité du sol, les besoins évoluent. Les prairies et les terres au repos sont toujours fertilisées à une intensité normale mais ne sont pas labourées. Des spécifications supplémentaires sont ajoutées en fonction de la profondeur du sol.

Le choix d'une pratique agricole modifie les coûts des intrants variables et aussi les itinéraires techniques. Ainsi, le modèle détaille pour chaque couple culture-technique culturale les besoins en machine (voir le « module machines » plus loin) pour chaque quinzaine de jours. Le choix d'un itinéraire technique modifie donc les coûts en intrants variables, les investissements (pour les différentes machines), les besoins en main d'œuvre (totaux et par mois) et les rendements. Le choix d'une technique par rapport à une autre doit permettre d'augmenter le profit de l'exploitation.

Enfin, les rotations culturales sont spécifiées en « option » dans le modèle. Aussi, l'utilisateur du modèle peut choisir de ne pas en tenir compte au début de la modélisation. Un ensemble de rotations triennales est déclarée et peut être mis en place par l'agriculteur. En fonction des cultures cultivées lors de la situation initiale, l'agriculteur peut mettre en place l'une ou plusieurs des rotations. La prise en compte des rotations va avoir un impact, notamment sur le module de fertilisation puisque les reliquats liés à certaines cultures peuvent être relativement plus riches en minéraux/adventices. Dans le cas où les rotations culturales ne sont pas mises en place, des contraintes sur l'assolement sont introduites pour chacune des cultures. Par exemple, il est possible de spécifier que les céréales d'hiver ne peuvent être cultivées sur plus de deux tiers de la SAU.

vi/ Le module mécanisation

Ce module est directement en lien avec ceux sur les cultures, les investissements et le travail (voir plus loin). Alors que le module culture définit différents itinéraires techniques qui supposent l'utilisation d'une ou plusieurs machines à un moment précis de l'année, ce module définit les caractéristiques des machines.

Une cinquantaine de machines sont distinguées dans le modèle dont une dizaine qui est spécifique à l'élevage. Parmi les machines prises en compte, nous pouvons citer les tracteurs de différentes puissances, la charrue, le chisel, la herse (à dent, circulaire, rotative ou autre), le semoir, l'andaineuse, le pulvérisateur. Si l'exploitation présente une activité d'élevage, le modèle prend aussi en compte les équipements spécifiques à ces ateliers comme les équipements nécessaires à l'épandage (par exemple tonne à lisier).

Chaque machine est caractérisée par un ensemble de caractéristiques comprenant son prix, le nombre d'heure d'utilisation maximale, ses coûts variables par hectare ou par heure associés, la quantité de diesel utilisée et ses coûts fixes. Dans le modèle, les coefficients sont issus d'un livre technique agricole allemand, le KTBL (2010, 2013).

Si les pratiques agricoles sont d'abord caractérisées pour un niveau de mécanisation et une taille de parcelle donnés, le modèle tient compte de la puissance des machines et de la taille des parcelles. Plus la puissance du tracteur est élevée et plus son prix est élevé. Pour une même taille de parcelle, les coûts associés aux pratiques ont tendance à être plus élevés pour une machine de puissance supérieure (c'est moins vrai pour les parcelles très larges). En contrepartie, les travaux prennent moins de temps quand les machines sont plus puissantes (c'est moins vrai pour les parcelles les plus petites). Par contre, pour un niveau de mécanisation donné, il est toujours moins coûteux et plus rapides de travailler sur des surfaces plus larges. Les auteurs renseignent les coûts et les temps de travaux associés à un couple puissance de la machine – taille de parcelle donné. Ces différentes caractéristiques techniques permettent de représenter explicitement le phénomène de substitution entre la terre, le travail et le capital et par suite le phénomène continu d'agrandissement des exploitations agricoles.

Les besoins en machine, exprimés en heure de travail, doivent être couverts par les machines présentes sur l'exploitation. Dans le cas contraire, l'exploitant peut investir dans une nouvelle machine. Il pourrait éventuellement recourir aux travaux par tiers (si disponible à prix « intéressant »). Les nouvelles machines sont alors converties en temps de travail disponible. Le temps total de travail des machines sur l'année dépend des besoins en travail des animaux et des cultures.

vii/ Le module travail

Ce module fait le lien entre les dotations initiales en main d'œuvre de l'exploitation et les besoins des différents ateliers de production. Les coefficients unitaires de travail nécessaire sont définis pour chaque hectare (via les besoins en machine notamment) et chaque animal. En fait, le modèle distingue trois types de travaux :

Les travaux relatifs à la gestion de la ferme entière qui doivent être réalisés tant que la ferme existe et qui ne dépendent pas des caractéristiques de la ferme.

Les travaux relatifs à la gestion des ateliers (cultures, ateliers laitiers et porcins) qui dépendent de leur taille. Ces travaux, comptabilisés en heure de travail, dépendent d'un temps incompressible lié à la gestion de l'atelier et d'un temps variable en fonction de la taille de l'atelier.

Les travaux relatifs à certains travaux agricoles (labour).

La somme de ces travaux ne doit pas excéder la main d'œuvre annuelle disponible. Il est donc nécessaire de connaître les coefficients liés à ces trois types de travaux.

Les travaux relatifs à la gestion d'un atelier dépendent directement de sa taille, la surface cultivée ou la taille du cheptel. Il est important de noter que la taille d'un atelier dépend en partie des autres ateliers puisqu'ils sont liés les uns entre les autres. La taille de l'atelier lait englobe en partie l'atelier cultures car une partie de cette culture est à la destination de l'alimentation animale. Pour les ateliers animaux, des temps de travail unitaires sont requis pour chaque type d'animal et chaque type de stabulation. Une distinction est ainsi prise en compte pour les périodes de vêlage des vaches ou mises bas des truies.

Le modèle définit différents itinéraires techniques pour chaque culture. En fonction des différents travaux agricoles nécessaires pour un couple culture-itinéraire technique, les besoins en main d'œuvre pour l'atelier végétal varient. En effet, même si les besoins pour l'utilisation d'une machine ou la réalisation d'un technique particulière sont fixes, la définition de l'itinéraire technique va requérir la mise en place de différentes techniques agricoles, avec plus ou moins d'intensité (labour plus ou moins intensif). En accord avec les niveaux de fertilisations distingués, le modèle réduit les quantités de travail pour certaines pratiques agricoles, et non pas seulement celles relatives à la fertilisation. Le modèle tient aussi compte des caractéristiques des parcelles et de la mécanisation présente sur l'exploitation. En effet, les quantités de travail ne sont pas les mêmes sur des parcelles de tailles différentes et le travail est réalisé plus rapidement avec des tracteurs plus puissants.

La quantité de travail nécessaire sur l'exploitation est donc égale à la somme de ces travaux agricoles ainsi que ceux relatifs à la production de biogaz (voir plus loin). Cette quantité totale doit être

inférieure aux dotations initiales de l'exploitation en main d'œuvre. Par contre, le modèle autorise une personne (salariée ou non) à effectuer des heures supplémentaires à la moyenne hebdomadaire calculée sur l'année pour couvrir les pics de travail, notamment au moment de l'été et des travaux de récolte.

Outre les travaux sur l'exploitation, l'agriculteur et les membres de sa famille peuvent choisir travailler à l'extérieur de la ferme, à temps plein, à temps partiel ou seulement quelques heures par semaine. Dans ce dernier cas, l'individu peut adapter son temps de travail.

Vii/ Le module étable et autres bâtiments

Comme pour le module mécanisation, ce module est directement en lien avec les modules sur les productions animales et celui sur l'investissement. En effet, l'objectif de ce module est de couvrir les besoins en stabulation des veaux, vaches, génisses, truies, porcelets et porcs à l'engraissement. L'agriculteur cherche à minimiser les coûts des bâtiments (ceux variables et ceux liés à l'investissement) tout en assurant une place à chaque animal élevé sur la ferme. L'arbitrage peut être délicat puisque bien que des bâtiments de petites tailles coûtent moins cher que ceux de plus grands, ils contraignent la taille du cheptel et donc les produits associés. L'agriculteur doit donc faire un arbitrage entre les coûts liés au bâtiment et les bénéfices qu'il peut potentiellement lui rapporter. FARMDYN prend aussi en compte les silos qui permettent de stocker les productions végétales.

De nouveau, chaque bâtiment est décrit par un ensemble de caractéristiques techniques qui lui sont propres (places disponibles, coûts de maintenance, durée de vie). Chaque bâtiment se déprécie avec le temps. A un instant donné, les bâtiments disponibles sont égaux aux bâtiments initiaux plus les investissements réalisés entre temps auxquels on soustrait les parts dépréciées (comme les pratiques des amortissements comptables).

Plusieurs tailles de stabulations sont distinguées en fonction du nombre de places et du cheptel à destination (vaches laitières, jeunes bovins, veaux, truies, porcelets, porcs à l'engraissement). Le nombre de places nécessaires dépend de la taille du troupeau. L'ensemble du troupeau doit pouvoir tenir dans l'étable. Si ce n'est pas le cas, l'agriculteur doit investir dans un bâtiment de taille supérieure. Lorsque cette étable se déprécie, l'agriculteur peut investir dans une nouvelle étable, de taille similaire ou non, ou la rénover.

Il est important de noter que pour les veaux et les jeunes bovins, les effectifs annuels peuvent être supérieurs à la capacité du bâtiment car les animaux ne restent pas dans les étables toute l'année. En effet, les veaux vendus à l'extérieur ne restent que deux mois dans les bâtiments. Les veaux élevés ne

restent dans l'étable que la moitié de l'année avant de passer la seconde moitié dans l'étable des jeunes bovins.

Le prix des étables et des autres infrastructures diffèrent en fonction de leur qualité, mais aussi, bien sûr de leur taille. De même, le prix unitaire par place des étables est différent en fonction de la taille des bâtiments et de l'horizon d'investissement. Il est marginalement plus coûteux de construire une petite étable qu'une grosse et les étables à durée de vie moyenne (15 ans) sont marginalement moins chères. Le coût d'entretien ne dépend pas que de la taille du bâtiment mais aussi du taux de remplissage.

D'autres spécifications sont ajoutées au niveau de l'achat et de la gestion des étables. Les auteurs définissent des besoins en main d'œuvre relatifs à la taille des étables. Enfin, le modèle associe aussi pour chaque sous-cheptel et pour chaque taille de bâtiments des quantités maximales de fumier pouvant être stocké.

Au-delà des étables, le modèle prend en compte les besoins en silos pour l'ensilage et ceux nécessaires pour le stockage du fumier. Le nombre d'infrastructures disponibles pour une année est déterminé comme pour les étables. Les caractéristiques des bâtiments comprennent leur prix, capacité de stockage, durée de vie, coûts d'entretien. Ce module prend notamment en compte les stratégies de réduction d'émissions de GES en considérant des coûts liés à la couverture du silo avec de la paille ou des feuilles. Comme pour les étables, les investissements dans ces infrastructures dépendent des niveaux des activités.

viii/ Le module investissement

Ce module est évidemment important dans un modèle dynamique comme FARMDYN car l'investissement est une variable clé faisant le lien entre les différentes périodes. Il s'agit par ailleurs d'une caractéristique originale de FARMDYN qui n'apparaît pas (ou peu) dans de nombreux autres modèles bioéconomiques centrés sur l'exploitation agricole. Cette modélisation permet d'étudier explicitement les changements de structure de certains intrants semi-fixes (ici le capital matériel), ce qui l'un des objectifs principal de Britz et al. (2014). Le fonctionnement de ce module est très simple mais essentiel pour la qualité de la modélisation.

Les investissements réalisés sur l'exploitation modélisée peuvent avoir attiré à l'achat de terre, de nouveaux bâtiments d'élevage, de nouvelles infrastructures (silos, fosse à lisier), de nouvelles machines (tracteur, charrue, etc.), voire d'un méthaniseur.

Les investissements nécessaires peuvent être réalisés à partir des fonds propres ou bien à partir de crédits. Ils sont inclus dans le solde de la trésorerie. Celui-ci est calculé à partir du solde de l'an passé plus le cash flow net de l'année en cours plus les nouveaux crédits moins les dépenses fixes des ménages et les nouveaux investissements. Les annuités des crédits sont égales sur toute la période du remboursement. Plus la durée du crédit est longue, plus le taux d'intérêt est élevé.

Il nous faut souligner ici un point technique de modélisation. Même avec les considérables progrès informatiques permettant la résolution d'équations complexe, il reste encore aujourd'hui nettement plus facile de résoudre des modèles avec des variables continues par rapport à des variables discrètes/entières/binaires. Ceci signifie qu'il est plus facile de résoudre un programme où, par exemple, il est possible d'acheter 0,85 unité de tracteur au lieu d'un tracteur. Bien évidemment dans la réalité, cela est plus complexe. Certes il est possible d'acheter des tracteurs/matériels de différentes puissances, seul ou en commun. Mais il y a bien souvent des variables discrètes (salle de traite par exemple). La prise en compte de variables discrètes est la plus intéressante pour étudier les choix discrets et effets de « seuils ». La taille d'une exploitation n'est jamais « idéale » dans le sens où les machines ne sont pas toujours toutes de la même puissance, les surfaces/bâtiments non plus. Dès lors, les investissements trop « grands » dans un actif à une période peut, plus ou moins vite, se révéler quelques périodes plus tard trop « petits ». Très concrètement, la puissance d'un tracteur à son achat peut apparaître trop forte par rapport à la surface d'une exploitation. Mais si celle-ci s'agrandit peu de temps après, alors cela n'est plus le cas. Prendre en compte ces phénomènes de rigidités/fixités est potentiellement très important mais force est d'admettre que cela complexifie considérablement la résolution du modèle, surtout lorsque le nombre de rigidités potentielles est important.

ix/ Le module de la gestion des effluents

Britz et al. (2014), Remble et al. (2013), Lengers et Britz (2012), Garbert (2013) et Garbert et al. (2015) ont mobilisé ce modèle FARMDYN pour étudier la réglementation environnementale azotée et les émissions de GES. Plusieurs instruments politiques sont simulés (taxes et normes) pour réduire l'impact de l'élevage laitier allemand sur l'environnement. Il s'en suit que les deux modules sur la gestion des effluents et la fertilisation minérale sont très détaillés. En particulier, l'ensemble des entrées et sorties des bilans azotés sont calculées dans ces deux modules.

Au niveau de la production d'effluents, les quantités individuelles excrétées sont fixées pour les veaux et les génisses. Ces quantités dépendent des rendements laitiers pour les vaches. Pour les porcins, les quantités d'effluents excrétées sont identiques au sein de chaque sous-cheptel. Les teneurs en azote/phosphate varient selon les truies/porcelets/porcs à l'engrais.

Le modèle distingue plusieurs techniques pour stocker les effluents d'élevage. Ceux-ci vont affecter les volatilisations de l'azote. Les silos peuvent être couverts pour limiter les volatilisations d'azote mais la couverture dépend du type de silo. Si les coûts de maintenance des silos de ces différentes techniques sont déjà définis dans le module sur les infrastructures, des coûts variables sont ajoutés dans cette partie (ajout de pailles ou de feuilles). Les auteurs définissent par ailleurs les quantités d'azote volatilisé en fonction de la technique de stockage des effluents. Par exemple, il n'y a aucune volatilisation dans le cas de l'ajout de feuilles.

Les quantités d'azote présent pour un mois donné dépendent des quantités présentes le mois précédents plus les quantités excrétées et ajoutées au cours du mois moins les pertes liées au stockage et moins les épandages. Le volume d'effluent stocké est égal aux quantités présentes le mois passé plus les quantités excrétées moins les quantités épandues. Les quantités excrétées doivent pouvoir être contenu dans l'ensemble des fosses ou silos. On doit donc connaître les volumes de chaque type de fosses. Il est aussi possible de stocker des effluents dans la stabulation. Les capacités du bâtiment dépendent de leur taille.

Plusieurs types de machines peuvent être utilisés pour épandre les effluents. Chaque technique est caractérisée par des coûts, des temps de travail et des émissions de GES différents. Ces coefficients sont définis dans le module fertilisation. Par exemple, les techniques d'injection demandent plus de temps que les techniques d'épandage classique. L'agriculteur peut investir dans chacune de ces machines et la durée de vie de ces machines dépend du volume total transporté depuis sa mise en marche. Certaines techniques ne sont pas possibles en fonction des cultures. Il est à noter que le modèle considère qu'il n'y a aucun coût associé à ces pratiques outre la consommation de diesel. Les instruments politiques simulés peuvent cependant ajouter des coûts sur les quantités épandues afin de simuler une taxe sur l'épandage.

x/ Le module fertilisation minérale

Ce module fait le lien entre le module sur l'épandage et celui sur les besoins azotés (et/ou phosphatés) des cultures. Par ailleurs, ce module est plus porté sur la réglementation que le précédent et calcule aussi les flux d'azote, notamment entre la surface, le sol et l'air. Le calcul des bilans azotés dépendent donc beaucoup de ce module.

Pour atteindre les niveaux d'azote requis par les différentes cultures (déterminer de manière exogène), il est possible pour les agriculteurs d'ajouter de l'azote minérale ou organique. Les différents minéraux sont caractérisés par des prix différents (en EUR/kg N). Par ailleurs, les quantités appliquées dépendent du type de labour et de mécanisation. L'agriculteur va donc chercher à mettre en place la meilleure

pratique de fertilisation afin de maximiser sa fonction objective. Toutes choses égales par ailleurs, l'agriculteur intensifie ses pratiques si le prix de la culture augmente. Il est important de noter que l'agriculteur peut aussi avoir recours aux services d'une entreprise extérieure pour épandre les effluents, notamment pour les périodes de pics de travail.

La réglementation allemande empêche de fertiliser ou d'épandre de Novembre à Janvier pour l'ensemble des cultures. Cependant, pour les céréales, il est aussi impossible pour l'agriculteur d'épandre ou de fertiliser de mai à août. De même, il est impossible d'épandre le fumier sur les prairies pour les mois de Mars, Avril, Juin, Juillet et Octobre.

Deux méthodes sont ensuite distinguées pour calculer les besoins en fertilisation minérale. La première consiste au calcul de surplus azoté sur année complète. La deuxième méthode, plus complexe, consiste à modéliser les flux de minéraux par culture, pour chaque mois de l'année, profondeur de sol et parcelles.

Dans la première méthode, on calcule le surplus azoté comme la différence annuelle entre les entrées d'azote et les sorties d'azote. Les entrées d'azote correspondent à la somme des applications nettes d'engrais organiques et minéraux et des quantités issues des sols et de l'air. Les sorties d'azotes sont les besoins en azote des cultures. Le surplus azoté peut être restreint pour chaque type de parcelle à l'aide de coefficients unitaires par cultures, type de labour, niveaux d'intensification et année.

Pour cette première méthode, les réductions d'ajouts d'éléments nutritifs des sols peuvent être réalisées à partir de plusieurs dimensions :

Réduire les quantités d'azote appliquées afin de réduire le surplus ;

Réduire le niveau d'intensification afin de limiter à la fois les besoins et les quantités perdues ;

Passer de la fertilisation minérale à organique ;

Modifier l'assolement.

Pour la deuxième méthode, le modèle calcule les flux de minéraux pour chaque mois de l'année et en fonction des caractéristiques de l'exploitation et des parcelles. Ainsi, les besoins en éléments nutritifs pour une parcelle caractérisée par la culture, le type de labour, le niveau de fertilisation et par le type et la profondeur de son sol dépendent des éléments suivants :

Le stock initial d'éléments nutritifs dans la parcelle ;

L'application nette de fertilisants organiques et minéraux ;

Les dépôts atmosphériques et la fixation symbiotique ;

Les flux de minéraux des sols les plus profonds vers ceux les plus hauts ;

Les besoins des cultures : les besoins annuels sont multipliés par la distribution mensuelle des besoins et par un coefficient d'efficacité des prélèvements en fonction des cultures et de la profondeur des sols.

Les flux de minéraux des sols les plus proches de la surface vers ceux les plus profonds.

Les dépôts atmosphériques et la fixation symbiotique sont définis par mois et évoluent en fonction de l'humidité du sol.

Les flux des minéraux de la surface vers les zones profondes du sol sont calculés comme une fraction du surplus, i.e. de la différence entre les entrées d'azote (fertilisation organique et minérale, dépôts atmosphériques, fixation symbiotique et flux ascendants des sols profonds vers ceux en surface) et les besoins des cultures. Ces flux évoluent en fonction de la période de l'année.

La distribution des besoins des céréales à travers l'année est séparée arbitrairement en fonction de la catégorie de cultures. Par exemple les céréales d'hiver ont des besoins plus faibles en février qu'en mars ou avril. De même, les besoins mensuels en éléments nutritifs pour le maïs fourrage et les prairies sont déterminées. Dans le cas où les besoins de certaines cultures ne suivent pas de distribution, les besoins sont répartis également entre les mois de l'année. Ces besoins sont les mêmes quelque soit le niveau d'intensité de la fertilisation choisi.

Si les auteurs reconnaissent qu'il aurait été utile de considérer des stocks d'éléments nutritifs en fonction des motifs de rotation et des cultures présentes l'année passée, le solveur qu'ils utilisent ne leur permet pas d'introduire ce type de spécification dans le modèle. A la place, ils indiquent que le stock initial de minéraux de l'année t pour l'ensemble de l'exploitation est égal à la quantité d'éléments nutritifs présents à la fin de l'année $t-1$. Ce stock initial est redistribué par le modèle entre les parcelles.

xi/ Le module Méthanisation

Ce récent module a pour objectif de relier économiquement et technologiquement les activités liées à la production de gaz issu de l'agriculture et le reste de la ferme. Il présente à la fois les revenus liés à la production d'énergie (chaleur et électricité) ainsi que les coûts variables et les investissements liés à la pratique. L'agriculteur peut avoir une unité de méthanisation au début de la simulation comme en acheter une plus tard.

Le calcul du prix de l'électricité est assez complexe. Il suit la réglementation allemande avec pour les 150 premiers kW un prix assuré puis un prix dégressif pour le reste de la production. Des prix peuvent être différenciés en fonction que l'électricité soit vendue en heures creuses ou en heures pleines. Par

ailleurs, les producteurs de biogaz peuvent recevoir des bonus s'ils produisent leur électricité à partir d'au minimum 30% d'effluents. Le producteur ne peut produire plus de 60% de son énergie à partir du maïs et doit vendre au moins 35% de la chaleur produite à l'extérieur. La chaleur produite est vendue à 2% du prix de l'électricité. Dans le modèle, 25% de la chaleur produite est réutilisée directement dans le digesteur.

Le modèle distingue trois types de taille de matériel avec des puissances de production du digesteur (150, 250 ou 500 kWh), des quantités de chaleur et d'électricité produites, des coûts variables et des investissements différents. Pour chaque capacité de production, des contraintes sur la taille des unités de fermentation sont ajoutées. La taille des unités est déterminée de manière exogène sous les hypothèses d'un temps de rétention hydraulique annuel de 90 jours et d'une utilisation de 70% de maïs et 30% d'effluents. De même, trois types de qualité de matériel sont définis de telle sorte que l'agriculteur doit réinvestir dans une machine neuve au bout de 7, 10 ou 20 ans. Les prix des méthaniseurs dépendent à la fois de leur puissance et de leur durée de vie.

Par ailleurs, l'activité méthanisation demande du travail à l'agriculteur. Le temps de travail augmente avec la puissance du digesteur bien que le temps de travail marginal pour la production d'un kW supplémentaire diminue avec la puissance du digesteur. De même, les coûts variables augmentent avec la puissance. Ces coûts couvrent à la fois les coûts en électricité, en approvisionnement, en maintenance et en assurance.

L'exploitant peut utiliser soit le reste des cultures soit des effluents pour produire de l'énergie. Dans tous les cas, la production dépend de la teneur en méthane des intrants. Le module définit les rendements en méthane des différents inputs. Ces rendements dépendent des teneurs en matière sèche et en matière organique. Les quantités d'intrants utilisés dans l'unité de fermentation peuvent être produites sur la ferme mais aussi achetées à l'extérieur.

Enfin le chargement d'intrants est limité afin d'assurer une digestion par les bactéries optimales.

xii/ Le module des indicateurs environnementaux

Dans la suite des travaux entrepris (Lengers et Britz, 2012 ; Remble et al., 2013), l'un des objectifs du modèle FARMDYN est d'estimer les coûts marginaux liés à la réduction des émissions de GES des exploitations agricoles. Ce module en particulier permet d'estimer les émissions de GES à partir de différents indicateurs (Lengers and Britz 2012). A partir des préconisations de l'IPCC Guidelines (2006), le module considère plusieurs sources d'entrées et de sorties d'azote. De nombreux coefficients sont appliqués de manière linéaire à des quantités d'inputs ou d'outputs issues des processus de

production. C'est par exemple le cas pour les pertes d'azote dues aux ruissellements et aux lixiviations au moment du stockage des effluents ou des volatilisations en N₂O des effluents lors du pâturage.

xiii/ La résolution du modèle

La résolution du modèle est complexe, essentiellement lié à la modélisation de variables dynamiques et discrètes. En fait la résolution est effectuée en trois temps. Dans un premier temps, le modèle est résolu en programmation linéaire « simple » avec des variables continues pour un unique contexte de prix pour l'ensemble des périodes considérées. Dans un second temps, différents prix pour les futures périodes sont introduits. Dans un dernier temps, la résolution tient compte de variables discrètes. La programmation mixte en nombre entier complexifie considérablement la résolution du modèle. Alors que la résolution en programmation linéaire ne prend que quelques dizaines de seconde, celle en programmation mixte prend plusieurs heures au solveur. Les différentes étapes permettent de réduire le temps de résolution du modèle en problème mixte avec nombre entier.

Xiv/ les données nécessaires

Nous présentons à présent une liste des coefficients techniques nécessaires pour la modélisation de FARMDYN. Cette liste n'est pas complètement exhaustive, notamment en ce qui concerne l'expression des contraintes, mais elle montre la diversité et la quantité de coefficients nécessaires à la modélisation bioéconomique.

Dynamique du cheptel

Les bovins

les liens entre production laitière moyenne et le reste des variables (coûts variables par animal, nombre de lactation, durée de vie).

Les coefficients de reproduction (nombre de veaux femelles et mâles par vache par an)

Les porcins

Les coefficients de reproduction (nombre de porcelets par truie par an).

Le pourcentage de porcelets élevés.

Les coûts variables par animaux en dehors de l'alimentation.

Alimentation

Les bovins

Nombre et durées des phases de lactation. A défaut, nous proposons de garder 5 phases de lactation et la durée des phases de FARMDYN (30, 70, 100, 105 puis 60 jours).

Les quantités produites de lait dans chaque phase en pourcentage de la quantité de lait produite annuelle.

Les teneurs moyennes en matière grasse du lait.

Le calcul du taux butyreux corrigé.

Le poids vif des vaches, des génisses et des veaux.

Les formules des besoins en quantités de matière sèche, en protéine et en énergie pour les différentes activités de la vache, des génisses et des veaux (lactation, besoins d'entretien, activité quotidienne, gestation et croissance). A défaut, nous proposons de garder les formules celles du GIEC qui sont utilisées dans FARMDYN.

Les quantités en énergie métabolisable, protéines, graisses, fibres, sucres, cendres et matières sèches des concentrés (3 types de concentrés dans le modèle), de la pâture, des ensilages herbe et maïs et de l'huile.

Les porcins

Les besoins en concentrés et en céréales pour chaque sous-cheptel.

Cultures

Les rendements pour chaque culture dans le cas des pratiques conventionnelles (labour et fertilisation à 100%).

Les rendements pour chaque culture dans les situations où la fertilisation n'est qu'à 20, 40, 60 et 80% des niveaux de fertilisation en agriculture conventionnelle.

Distribution des rendements en herbe au cours de l'année.

Composition des cultures en matière sèche (en pourcentage de la matière fraîche).

Composition des cultures en azote et en phosphate (en kg/dt⁷)

Quantités et coûts des intrants associés à chaque culture - labour - intensification.

Distribution des besoins des cultures au cours de l'année.

Niveaux de fertilisation en fonction de la qualité du sol (humidité et profondeur).

⁷ dt = décitonne. Il s'agit d'une unité souvent employé dans FARMDYN.

Mécanisation

Les prix d'achats des machines ;

La durée de vie des machines ;

Les coûts associés aux machines (coûts variables, coûts fixes, consommation de gasoil). Ces coûts peuvent être exprimés en EUR/Ha ou en EUR/h.

Les besoins unitaires en machine des applications de fertilisants minéraux.

Les temps de travaux et les coûts (variables, en diesel et fixes) associés à un niveau de mécanisation et une taille de parcelle.

Travail

Le travail sur l'exploitation

Les temps de travaux sur les parcelles (en fonction de la puissance du tracteur et de la taille de la parcelle).

Les coefficients de temps de travail relatifs aux cheptels (alimentation, vêlages, etc.).

La distribution des vêlages.

Les besoins en main d'œuvre pour les différentes techniques agraires.

Les itinéraires techniques pour chaque culture et en fonction de la technique de labour.

Le travail hors de l'exploitation

Les salaires horaires et leurs taux d'augmentation annuelle.

Les temps de trajet hebdomadaire.

Etables et bâtiments

Tailles des étables pour chaque sous-cheptel ;

Prix des étables ;

Coût de l'assurance et coûts de maintenance ;

Capacité de stockage du fumier associé ;

Temps passé dans l'étable pour chaque animal ;

Besoins en main d'œuvre pour chaque type d'étables ;

Investissement

Le taux des crédits en fonction de leur durée.

Fertilisation animale

Les équivalents gros bovins ;

Les quantités d'effluents excrétés pour chaque sous-cheptel ;

Coefficients de volatilisation pour chaque étapes et techniques ;

Coûts et besoin en main d'œuvre en fonction des techniques de stockage et d'épandage.

Fertilisation minérale

Coefficients techniques des techniques de fertilisation (coût, besoin en main d'œuvre, coefficients).

Coefficients techniques des fertilisants minéraux (prix, teneur en azote) et organiques.

Taux de volatilisation et de lixiviation en fonction de l'humidité du sol (par mois).

Coefficients de dépôts atmosphériques et de fixation atmosphérique en fonction de l'humidité du sol (par mois).

Méthanisation

Teneurs en CH₄ des productions et des effluents. Il faut aussi les taux de matière sèche des différents inputs si les teneurs en CH₄ sont exprimées en kg/MS.

Coûts de l'investissement en fonction de la puissance et de la durée de vie du matériel.

Coûts variables et fixes pour chaque type de digesteur.

Besoins en main d'œuvre pour chaque puissance.

Efficacité des méthaniseurs pour la transformation en énergie et en électricité.

Nombre d'heures de fonctionnement dans l'année du méthaniseur.

Capacité maximale en m³ (par an et par mois) en fonction de la puissance du digesteur.

xv/ synthèse

Nous avons rapidement décrit ci-dessus les principes du modèle FARMDYN, qui est un récent modèle de programmation mathématique appliqué à l'échelle d'une exploitation agricole. Initié au début des années 2010, il a été surtout mobilisé jusqu'à présent pour étudier la problématique du changement climatique pour des exploitations laitières allemandes. Il inclut de nombreuses mécanismes biotechniques, économiques et financiers et donc permet d'analyser de nombreux scénarios à l'échelle

de fermes. Différentes pratiques agricoles y sont incluses ainsi que différentes réglementations environnementales. Ce type de modèle est donc pertinent pour l'analyse de conséquences économiques de changements de pratiques agricoles en lien avec la qualité de l'eau.

Sa construction a été rendu possible par un travail collectif d'économistes-modélisateurs et d'acteurs économiques allemands. En effet, ce modèle dépend d'un nombre considérable de paramètres qui ne sont pas directement accessibles par les premiers. Les résultats obtenus peuvent être utiles pour les acteurs économiques allemands (producteurs agricoles mais aussi leurs fournisseurs/clients).

Comme tout modèle de programmation mathématique, les résultats générés par ce modèle vont crucialement dépendre des valeurs des paramètres, qui ne sont pas tous observables à partir des données comptables usuelles sur les exploitations agricoles. Par suite, la robustesse statistique des résultats obtenus peut facilement être contestée. Ceci constitue évidemment une faiblesse potentielle lorsque ce type de modèle est utilisé pour quantifier des problématiques « publiques » cristallisant de fortes oppositions.