



HAL
open science

Analyse des flux de matières pour la modélisation agricole - Vers la scénarisation d'alternatives

Olivier Mauviel

► **To cite this version:**

Olivier Mauviel. Analyse des flux de matières pour la modélisation agricole - Vers la scénarisation d'alternatives. Modélisation et simulation. 2020. hal-03016313

HAL Id: hal-03016313

<https://inria.hal.science/hal-03016313>

Submitted on 11 Jan 2021

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

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

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

**Analyse des flux de matières pour la
modélisation agricole
Vers la scénarisation d'alternatives**

Olivier MAUVIEL

Sous la tutelle de :
Peter STURM
Jean-Yves COURTONNE
Guillaume MANDIL

RAPPORT DE STAGE M2 MATHS EN ACTION
INRIA - ÉQUIPE STEEP

Soutenance de stage le 16 septembre 2020

Table des matières

1	Le cycle de l'azote : du diagnostic à la scénarisation	10
1.1	Introduction biogéochimique au cycle de l'azote	12
1.2	Le modèle GRAFS, une grille qui fait système	13
1.2.1	La population humaine	14
1.2.2	L'élevage	14
1.2.3	Les terres cultivées et les prairies	18
1.3	Du modèle GRAFS à une AFM dans l'agriculture	21
1.3.1	Produits et secteurs	22
1.3.2	La paramétrisation	23
1.3.3	La détermination des flux	27
1.4	Évaluation de cohérence	32
1.4.1	Les scénarios OS et ARD	32
1.4.2	Les hypothèses du scénario ARD	33
1.4.3	Le problème de la fixation symbiotique	35
1.4.4	Le problème de l'alimentation animale	36
1.4.5	La paramétrisation de l'AFM	37
1.4.6	Qualité de la réconciliation et cohérence avec le scénario ARD	37
2	Modularisation de l'AFM à l'aune du problème de la concurrence alimentaire	42
2.1	Le problème de la concurrence alimentaire entre humains et animaux	42
2.2	L'intérêt d'une approche modulaire	44
2.3	Construction d'une classe de modules pour l'élevage bovin-viande en Corrèze	45
2.3.1	Fonctionnement de la classe de modules	46
2.3.2	Les trois modules de la production de viande bovine en Corrèze	55
2.3.3	Réconciliation des modules	56
2.4	Analyse des flux de matière pour la Corrèze	62
A	Produits animaux	68
B	Déjections animales	70
C	Conversion UGB	74
D	Cas-types Inosys	75

Introduction

Les enjeux métaboliques de l'agriculture

Comme les autres espèces vivantes, l'espèce humaine s'adapte en même temps qu'elle modifie le milieu dans lequel elle évolue. Depuis le XIX^{ème} siècle, les modifications de l'environnement empruntent des trajectoires qui remettent en cause sa capacité d'héberger la vie de l'humanité. Et contrairement à d'autres espèces qui sont aussi passées par là, les humains sont capables de prendre du recul par rapport à ces trajectoires et tenter de redresser leur rapport avec la nature pour préserver l'environnement.

Depuis 2009, il est courant de poser le débat environnemental en termes de limites planétaires à ne pas dépasser sans quoi l'équilibre de la biosphère est mis en danger [Rockström et al., 2009]. Ces limites, au nombre de 9 sont : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles géochimiques de l'azote et du phosphore, les changements d'utilisation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation de l'eau, l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique et l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère. Sur ces 9 limites, 4 sont d'ores et déjà dépassées [Steffen et al., 2015] : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation du cycle de l'azote et celle du cycle du phosphore.

Le terme de limites peut être trompeur. Ces limites séparent moins des zones de catastrophe assurée et des zones sûres qu'elles ne balisent différentes zones plus ou moins « grises » en tentant d'anticiper les dynamiques possibles à partir d'un point donné et des interactions connues entre les phénomènes - par exemple, l'érosion accélérée des sols ou bien de la biodiversité a un impact sur le cycle de l'azote. Mais surtout, il s'agit ici de donner des repères globaux plutôt que d'expliquer pourquoi on se situe de telle ou telle manière par rapport aux limites précitées. Ainsi, la présentation de ces limites et l'explicitation des liens entre les phénomènes ne présagent pas des potentielles évolutions dans les sociétés humaines, en termes technico-scientifiques mais surtout en termes socio-économiques, ni de comment ces évolutions interagissent avec les repères environnementaux.

On est donc obligé, si on veut comprendre la trajectoire passée et anticiper sur les évolutions à venir, de centrer l'étude sur le rapport entre les sociétés et leur environnement. Comment ces sociétés s'organisent-elles et organisent parallèlement leurs interactions avec leur milieu pour produire ce qui est nécessaire à leur reproduction ? Comment ces interactions modifient-elles l'environnement ? Ces différentes interactions définissent un métabolisme de l'humain et de la nature, un ensemble d'échanges à différentes échelles qu'il s'agit d'étudier. Les problèmes environnementaux se posent alors comme des dysfonctionnements et des déséquilibres de ce métabolisme.

Dans ce métabolisme global entre l'humain et la nature, l'agriculture occupe une place importante. Elle joue un rôle par rapport aux 9 limites planétaires. La production de méthane par les animaux d'élevage - une unité de méthane a un potentiel de réchauffement global (PRG) sur 100 ans de 25¹ -, l'émission de protoxyde d'azote comme conséquence de l'épandage d'engrais

1. Le potentiel de réchauffement global est un indicateur de l'effet sur le changement climatique d'un gaz à effet de serre : un PRG sur 100 ans de 25 signifie qu'une quantité x de ce gaz a sur 100 ans le même effet qu'une

de synthèse - le PRG du protoxyde d'azote sur 100 ans est de 298 -, ajoutées à l'utilisation de carburants d'origine fossile pour faire fonctionner les machines agricoles, pour fabriquer les intrants de synthèse ou pour transformer les produits agricoles en produits consommables par les animaux d'élevage ou les humains, concourent à ce que l'agriculture participe de beaucoup au changement climatique. De même, l'uniformisation des espèces utilisées pour des raisons de rendement et la pulvérisation de produits phytosanitaires nuit à la biodiversité. Et on pourrait mener le même genre de raisonnement pour les autres limites.

L'agriculture occupe donc une place centrale dans le métabolisme entre les sociétés humaines et leur environnement. Centrale puisqu'elle constitue une activité indispensable à la survie de l'espèce. Et centrale puisque son organisation pose aujourd'hui toute une série de questions relatives à la préservation de l'environnement.

L'analyse de flux de matière, un outil de modélisation

Pour étudier ce métabolisme, la méthode de l'analyse des flux de matière (AFM) développée au sein de l'équipe STEEP présente un grand intérêt.

L'idée de la méthode est de coupler l'utilisation du formalisme des tables emplois-ressources avec des techniques d'optimisation pour fournir un descriptif du fonctionnement d'une filière sur un territoire à partir des données disponibles, éventuellement lacunaires. On définit une filière comme un ensemble de secteurs reliés entre eux par des flux de produits. Par exemple, pour la filière agricole, on prendra comme secteurs : les terres cultivées, les prairies, etc. et comme produits : les engrais synthétiques, les céréales, la viande, les déjections animales, etc. Génériquement, on note $n \in \mathbf{N}^*$ le nombre de secteurs et $m \in \mathbf{N}^*$ le nombre de produits. Des tables emplois-ressources sont deux matrices $S, U \in \mathcal{M}_{(n,m)}\mathbf{R}$ telles que pour $(i, j) \in \{1; \dots; n\} \times \{1; \dots; m\}$, $S_{i,j}$ est la quantité de produit j sortant du secteur i et $U_{i,j}$ la quantité de produit j entrant dans le secteur i , ces quantités étant en certaines unités - monétaires, de masse, d'énergie, etc. Avec des tables emplois-ressources $S, U - S$ pour *supply* soit ressources et U pour *use* soit emplois -, on peut recenser la totalité des échanges entre les différents pôles d'une filière. Ce formalisme est donc tout indiqué pour étudier les échanges qui ont lieu au sein de l'agriculture.

Les différents instituts qui produisent des données et des études statistiques sur l'agriculture² expriment leurs résultats en unités monétaires, ou en unités de masse. Mais, très souvent, les problématiques qu'ils cherchent à résoudre sont liées à des questions de performance, d'efficacité et de rentabilité, et les catégories utilisées aussi bien que les données répondent à ces objectifs. Cela vient du fait que l'agriculture contemporaine, notamment dans les pays développés, est une branche d'activité capitaliste à part entière et que la statistique sert ici à organiser la production au plus rentable. Nos questions ne sont pas exactement celles-ci dans la mesure où on cherche à étudier les déséquilibres ou les dysfonctionnements de la filière agricole d'un point de vue écologique, c'est-à-dire à partir de catégories pertinentes de ce point de vue et d'unités physiques (masse d'azote, de phosphore, énergie). Deux problèmes vont donc se poser. D'abord, quand on commencera à vouloir définir notre filière, ses secteurs et ses produits, on devra faire attention à ne pas reprendre malgré nous les catégories utilisées à d'autres fins. Pour ce faire, on s'appuiera sur des travaux qui étudient le cycle de l'azote [Billen et al., 2015], [Billen et al., 2018]. Ensuite, quand on va vouloir renseigner les flux parcourant la filière, on va être confronté à la nécessité de transformer des données - de transformer des kilogrammes d'un produit en kilogrammes d'azote par exemple -, à des incohérences entre données - les données venant de tel institut ne recouvriront pas les données venant de tel autre - voire à des données manquantes. Il est donc

quantité de 25x de dioxyde de carbone

2. On s'appuiera sur les données publiées par ces instituts lors de ce rapport donc nous mentionnons ici leur nom : Institut de l'élevage (Idele) pour l'élevage, l'Institut du végétal (Arvalis), le service de l'Insee lié au ministère de l'Agriculture (Agreste) qui publie tous les 10 ans le recensement agricole et tous les ans la statistique agricole annuelle

extrêmement improbable qu'on réussisse à remplir en une seule fois des tables emplois-ressources complètes et cohérentes. On va donc utiliser une méthode de réconciliation de données développée dans [Courtonne, 2016], [Jean-Yves Courtonne (Inria), 2019] pour améliorer la qualité des tables emplois-ressources.

L'objectif de cette méthode de réconciliation est, à partir de tables emplois-ressources S, U incomplètes ou incohérentes, de trouver deux tables \hat{S}, \hat{U} suffisamment « proches » des tables originales, cohérentes et aussi complètes que possible. Il y a donc bien deux problèmes : supprimer les incohérences et compléter les données manquantes. Pour supprimer les incohérences, on va résoudre un problème d'optimisation sous contraintes, les contraintes garantissant que \hat{S}, \hat{U} soient des tables cohérentes. Pour compléter les données manquantes, on va essayer d'estimer, à partir des données existantes et des contraintes connues d'autres données. Mais il est possible qu'on n'ait pas assez d'informations pour estimer toutes les données : on peut toutefois *a priori* distinguer les données manquantes que l'on ne pourra pas estimer de manière unique (données libres) des données manquantes pour lesquelles on pourra fournir une estimation (données déterminables).

On a donc un problème d'optimisation sous contraintes puisqu'on doit minimiser la distance entre des données originales connues et des données à estimer en respectant des contraintes de cohérence. On peut choisir n'importe quelle distance mais on va choisir une distance euclidienne. Si on note O_S et O_U l'ensemble des couples (i, j) pour lesquels on connaît la valeur respectivement dans la table ressources S et dans la table emplois U , le problème est donc de minimiser la quantité suivante sous certaines contraintes que l'on détaille ensuite :

$$\sum_{(i,j) \in O_S} \frac{(S_{i,j} - \hat{S}_{i,j})^2}{\sigma_{S_{i,j}}} + \sum_{(i,j) \in O_U} \frac{(U_{i,j} - \hat{U}_{i,j})^2}{\sigma_{U_{i,j}}} \quad (1)$$

où σ désigne un facteur d'incertitude sur les données originales, qui permet par exemple de discriminer entre des données dont on est sûr des données sur lesquelles on a plus de doute.

Ces contraintes sont de sept types différents. Premièrement, on veut que tous les termes des tables estimées soient positifs

$$\hat{X}_{i,j} \geq 0, \forall i \in \{1; \dots; n\}, j \in \{1; \dots; m\} \quad (2)$$

et deuxièmement, que pour deux ensembles de couples (i, j) que l'on note Z_S, Z_U , les termes soient nuls

$$\hat{X}_{i,j} = 0, \forall (i, j) \in Z_X \quad (3)$$

où X désigne S ou U . Les ensembles Z_S et Z_U dépendent des choix de modélisation et permettent de préciser *a priori* les produits qui peuvent et ne peuvent pas entrer et sortir d'un secteur. Troisièmement, pour certains secteurs $E_s \subset \{1; \dots; n\}$, on a conservation de la masse, c'est-à-dire qu'il y a autant de flux entrants dans le secteur que de flux qui en sortent :

$$\sum_{1 \leq j \leq m} \hat{U}_{i,j} = \sum_{1 \leq j \leq m} \hat{S}_{i,j}, \forall i \in E_s. \quad (4)$$

Quatrièmement, pour certains produits $E_p \subset \{1; \dots; m\}$, on a également conservation de la masse³, c'est-à-dire que l'ensemble des flux sortants d'un même produit est de même quantité que l'ensemble des flux entrants du produit dans les différents secteurs :

$$\sum_{1 \leq i \leq n} \hat{S}_{i,j} = \sum_{1 \leq i \leq n} \hat{U}_{i,j}, \forall j \in E_p. \quad (5)$$

Cinquièmement, on a des phénomènes d'agrégation, c'est-à-dire que certains produits ou secteurs sont en fait la réunion de sous-produits ou de sous-secteurs. Autrement dit, il existe

3. Dans la suite, on parlera indifféremment de conservation de la masse et d'équilibre matière.

$A_s \subset \{1; \dots; n\}$ et $A_p \subset \{1; \dots; m\}$ tel que

$$\begin{aligned}\hat{X}_{i^*,j} &= \sum_{i \in x(i^*)} \hat{X}_{i,j}, & \forall i^* \in F_s, \forall j \in \{1; \dots; m\} \\ \hat{X}_{i,j^*} &= \sum_{j \in x(j^*)} \hat{X}_{i,j}, & \forall i \in \{1; \dots; n\}, \forall j^* \in F_p\end{aligned}\quad (6)$$

où, pour $i^* \in F_s$ un secteur qui est la réunion de sous-secteurs, $x(i^*) \subset \{1; \dots; n\} - \{i^*\}$ est l'ensemble des sous-secteurs dont il est la réunion, et pareillement pour $j^* \in F_p$.

Sixièmement, sans savoir la valeur précise d'un flux, on peut avoir des renseignements concernant des bornes minimales ou maximales. Autrement dit, on a deux ensembles de couples (i, j) que l'on note \mathcal{M}_S et \mathcal{M}_U et deux familles de couples de nombre réels positifs $((m_{X_{i,j}}; M_{X_{i,j}}))_{(i,j) \in \mathcal{M}_X}$ tels que

$$m_{X_{i,j}} \leq \hat{X}_{i,j} \leq M_{X_{i,j}}, \forall (i, j) \in \mathcal{M}_X. \quad (7)$$

Septièmement, et dernièrement, on peut connaître *a priori* une relation linéaire entre certains flux, par exemple pour capturer des phénomènes de transformation de produits au sein d'un secteur - telle proportion de l'animal abattu finit sous forme de viande consommable immédiatement. On formalise une telle relation linéaire par deux ensembles de couples (i, j) que l'on note C_S et C_U et deux familles de coefficients réels $(\alpha_{i,j})_{(i,j) \in C_S}$ et $(\beta_{i,j})_{(i,j) \in C_U}$ tels que

$$\sum_{(i,j) \in C_S} \alpha_{i,j} \hat{S}_{i,j} + \sum_{(i,j) \in C_U} \beta_{i,j} \hat{U}_{i,j} = 0. \quad (8)$$

Dans l'équation précédente, le signe d'égalité peut être remplacé par un signe d'inégalité selon le type d'information dont on dispose.

Pour récapituler, on cherche donc à minimiser la quantité (1) sous les contraintes (2), (3), (4), (5), (6), (7) et (8). Une fois ce problème résolu, on aura donc deux tables \hat{S}, \hat{U} dont au moins les coefficients O_S et O_U seront connus. Ces coefficients sont, de manière générale, différents des coefficients que l'on avait renseignés. Pour quantifier cette différence, le modèle renvoie pour chacun de ces flux une quantité appelée nombre de sigmas et notée n_σ . Pour $(i, j) \in O_X$ avec $X = S, U$, on interprète $\sigma_{X_{i,j}}$ comme le double de l'écart-type d'une loi normale d'espérance $\sigma_{X_{i,j}}$. Donc, dans 95% des cas $\hat{X}_{i,j}$ est contenu entre $X_{i,j} - \sigma_{X_{i,j}}$ et $X_{i,j} + \sigma_{X_{i,j}}$ et dans plus de 99% des cas, entre $X_{i,j} - 1,5\sigma_{X_{i,j}}$ et $X_{i,j} + 1,5\sigma_{X_{i,j}}$. La quantité $n_\sigma = \frac{\hat{X}_{i,j} - X_{i,j}}{0,5X_{i,j}\sigma_{X_{i,j}}}$ permet alors de mesurer la distance entre la donnée d'entrée et la donnée réconciliée : si elle est supérieure à 2 et, en particulier, supérieure à 3, c'est qu'il peut y avoir un problème dans la construction de notre modèle, soit qu'on a sous-estimé les incertitudes.

Le jeu de contraintes utilisé pour rendre ces tables cohérentes peut également servir à les compléter : les données inconnues sont alors dites déterminables. Ainsi, l'égalité (3) qui repose sur un choix de modélisation *a priori*, permet souvent de déterminer bon nombre de flux. Mais en dépit de ce jeu de contraintes, certains flux ne peuvent toujours pas être déterminés : ces données sont dites libres. Il est possible d'estimer une valeur pour le flux et à partir du jeu de contraintes, il est même possible de déterminer un intervalle d'appartenance du flux plus précis que $[0; +\infty[$, mais la résolution du problème d'optimisation sous contraintes ne fournit pas de valeur unique. On ne va pas présenter l'ensemble de la classification des flux inconnus selon qu'ils sont libres ou déterminables, mais dans la figure 1, on présente un exemple simple qui permet d'illustrer la notion.

Enjeux du stage

Pour présenter les données d'une AFM, il existe un type simple de diagrammes, les diagrammes de Sankey. On en montre un exemple dans la figure 2. L'idée est de tracer les flux de produits entre secteurs en se laissant la possibilité de distinguer les flux sortants des flux entrants

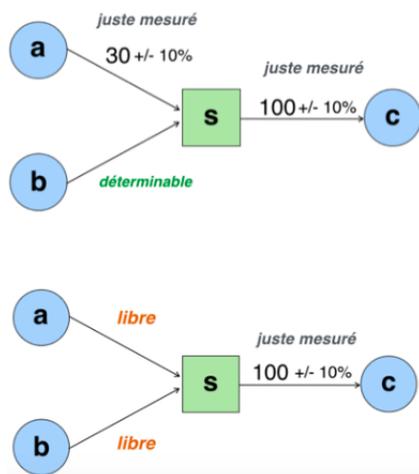


FIGURE 1 – Source : [Jean-Yves Courtonne (Inria), 2019]. Un flux « juste mesuré » est un flux connu *a priori* c'est-à-dire qui appartient à O_S ou à O_U . Dans le premier schéma, le flux de produit *a* entrant dans le secteur *s* ainsi que le flux de produit *c* sortant du secteur *s* sont connus. Comme il n'y a qu'un autre flux entrant dans le secteur *s*, le flux de produit *b*, et qu'il y a conservation de la masse pour le secteur *s*, on peut avec la contrainte (5), déterminer ce dernier flux entrant à plus ou moins 10%, qui correspond à l'incertitude évoquée dans la formule (1). En revanche, dans le second schéma, on connaît le flux de produit *c* sortant du secteur *a* mais en l'absence d'autres informations, on ne peut pas déterminer les flux de produits *a* et *b* entrants dans le secteur *s* : ces flux sont libres.

- par exemple, pour qu'un flux de produit sortant d'un secteur se répartisse en flux entrants de différents secteurs. Le diagramme de la figure 2 correspond à une situation où on dispose de trois secteurs *A*, *B* et *C* et de deux produits 1 et 2. Le produit 1 est produit par le secteur *A* et utilisé par les secteurs *B* et *C*. Le secteur *B* peut également convertir le produit 1 en produit 2, à raison de deux unités du produit 1 pour une unité du produit 2 - on ne précise pas ici les unités. Le produit 2 est, à son tour, utilisé dans le secteur *C*. Ce diagramme modélise parfaitement ce qui se passe quand on considère l'agriculture : les végétaux (produit 1) produits par la terre (secteur *A*) peuvent aussi bien servir à nourrir les humains (secteur *C*) qu'à nourrir les animaux (secteur *B*) qui, à leur tour, produisent de la nourriture (produit 2) pour les humains.

On voit bien l'intérêt du formalisme de l'AFM pour étudier le métabolisme entre les sociétés et leur environnement. On voit également l'intérêt de la méthode de réconciliation de données, surtout dans le cadre de l'étude de l'agriculture où, comme on l'a dit, on ne dispose pas *a priori* de données qui nous conviennent et qu'il va falloir collecter, rassembler et transformer des données d'origine diverse. À condition de bien définir, dans un premier temps, la structure de ce métabolisme - quels secteurs échangent quels produits -, on peut obtenir une cartographie des échanges qui ont lieu entre les différents domaines de ce qui est nécessaire à la reproduction de la vie humaine.

Le premier enjeu de ce stage au sein de l'équipe STEEP a donc été de mettre ce formalisme et cette méthode au service de l'étude des enjeux métaboliques de l'agriculture. Plus précisément, on s'est intéressé à deux de ces enjeux : le dérèglement du cycle de l'azote et la concurrence alimentaire entre humains et animaux. Le dérèglement du cycle de l'azote constitue une des 9 limites planétaires, une des 4 qui est d'ores et déjà dépassée. Autrement dit, une quantité trop importante d'azote réactif, notamment des nitrates, s'accumule chaque année dans les cours d'eau, les nappes phréatiques et les océans, faisant courir à ces zones le risque de s'asphyxier. Dans le chapitre 1, après être revenu brièvement sur la description géochimique du cycle de

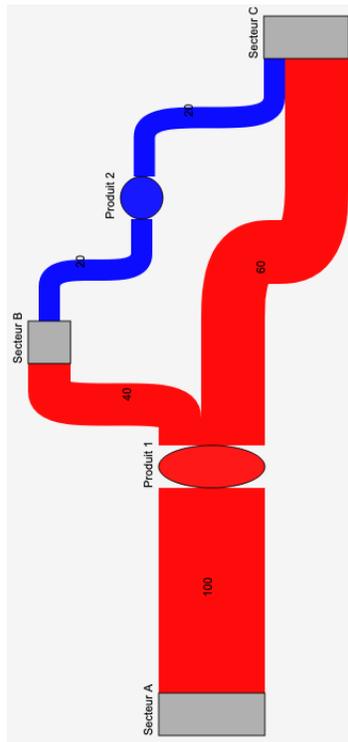


FIGURE 2 – Diagramme de Sankey d’une filière à trois secteurs et deux produits. Il y a conservation de la masse pour les produits mais pas pour les secteurs.

l'azote, on introduit une AFM à partir des travaux de [Billen et al., 2015], [Billen et al., 2018]. On évaluera ensuite la pertinence de cette AFM pour étudier le cycle de l'azote. Cela constituera un test de la capacité du formalisme de l'AFM à intégrer les travaux d'autres chercheurs. Dans la mesure où l'un des objectifs de l'équipe STEEP est de mettre différentes expertises sous le même format et de les combiner pour, à terme, proposer un modèle des interactions entre toutes les filières de l'économie, il s'agit là d'une question directement liée aux problématiques de recherche de l'équipe.

Mais si l'on veut étudier les enjeux métaboliques de l'agriculture, on ne peut se contenter de décrire la situation actuelle. Il faut aussi essayer d'étudier les effets d'éventuels changements dans ce métabolisme. Dans le cadre d'une AFM, cela revient à faire évoluer certains flux et à en étudier les conséquences sur l'ensemble de la filière. Par exemple, dans la figure 2, voir ce qu'il se passe si on augmente ou si on diminue la part du produit 1 qui se dirige vers le secteur B . En intégrant cette modification dans notre AFM, on passe de la description de la réalité à la construction d'un scénario, c'est-à-dire à la définition d'une situation alternative à celle qui existe. La construction d'un scénario suppose de distinguer ce qu'on veut rendre évolutif de ce qui est fixé d'une alternative à l'autre. Dans la figure 2, on peut vouloir modifier la répartition du produit 1 entre les secteurs B et C mais ne pas changer le taux de conversion du secteur B , par exemple si celui-ci est déterminé par l'état de la technique commun à différentes alternatives. Bien sûr, le choix de ce qui est évolutif et de ce qui est fixe est un choix de modélisation et dépend de la question posée. On voit que ce choix tient à la définition d'un ensemble de variables que l'utilisateur pourra faire varier - on appelle ces variables des paramètres - et d'un autre ensemble de variables non-modifiables mais définies *a priori* par le modélisateur - on appelle ces variables des indicateurs.

Concernant les paramètres, la manière la plus simple - et la plus simpliste - de raisonner serait de paramétrer directement chaque flux $X_{i,j}$ pour $(i, j) \in O_X$ ($X = S$ ou $X = U$). Mais cela ne permet pas d'intégrer dans le modèle les liens qui peuvent exister entre ces quantités $X_{i,j}$. A plus forte raison, si on veut construire un scénario alternatif, on est obligé d'intégrer ces liens et donc, à un certain degré, les effets de telle modification sur les autres variables. Autrement dit, plus que la manière simpliste évoquée ci-dessus, on a intérêt à déterminer une grille de paramètres à partir de laquelle on va pouvoir calculer les quantités $X_{i,j}$. Dans le même temps, cette grille doit concentrer un ensemble de paramètres pertinents pour résumer qualitativement l'alternative en question. La réflexion autour des paramètres, de leur articulation et de leur facilité d'usage a constitué le deuxième enjeu de ce stage et il est développé dans le chapitre 1. Car l'objectif de l'équipe STEEP n'est pas seulement de réconcilier des données de sources différentes, mais de proposer des modèles accessibles, non seulement utilisables par d'autres chercheurs, mais aussi par les différents acteurs d'un territoire.

Un troisième enjeu du stage a été de réfléchir à l'implémentation des indicateurs. Concernant l'élevage, on dispose au terme du chapitre 1 d'indicateurs globaux qui agrègent des processus différents, parfois contradictoires et donc qui occultent les diverses options entre lesquelles on voudrait arbitrer - ce qui relève de la détermination des paramètres. De plus, ces indicateurs globaux sont suffisants pour étudier, d'un point de vue général, les perturbations du cycle de l'azote mais sont complètement défaillants pour apporter des éléments au débat sur la concurrence alimentaire entre humains et animaux. Or, plus encore que la question de l'azote qui est parfois un peu technique, le thème de la concurrence alimentaire traverse les enjeux de société contemporains : l'élevage a-t-il une place trop importante par rapport à son impact écologique ? Constitue-t-il un détour inutile pour les végétaux qui nourrissent les animaux au lieu de nourrir les humains ? Faut-il donc réduire la production de viande et dans quelles proportions ? Pour résoudre ces deux types de problème - problème de paramétrisation, problème thématique sur la concurrence alimentaire -, on propose dans le chapitre 2 une approche modulaire. On décortique les indicateurs agrégés en un ensemble détaillé d'indicateurs simples qui, ensemble, définissent les produits qui rentrent et qui sortent de l'élevage, bref qui résument une manière de produire à partir des animaux. Cela permet déjà de placer le choix de paramétrisation au niveau de l'ar-

bitrage entre ces différents modes de production, chacun ayant ses propres conséquences. Cela permet, ensuite, d'intégrer au modèle la question de ce que mangent les animaux.

Chapitre 1

Le cycle de l'azote : du diagnostic à la scénarisation

Des différents enjeux métaboliques de l'agriculture, celui qui a plus particulièrement attiré notre attention est le cycle de l'azote, c'est-à-dire l'ensemble des échanges d'azote entre l'atmosphère, le sol, l'hydrosphère et les espèces vivantes (plantes, animaux et l'espèce humaine). Du point de vue de l'agriculture, ce cycle est résumé dans la figure 1.1.

Il y a trois raisons à l'intérêt porté à ce cycle. Tout d'abord, l'ingestion de protéines est indispensable à la survie et au développement des humains. Or, ces protéines ne peuvent être obtenues que par liaison d'acides aminés, eux-mêmes obtenus à partir d'azote. C'est là la seule source d'un azote pourtant nécessaire au bon fonctionnement du corps humain. Et cet azote peut avoir deux origines : une origine végétale et une origine animale, sachant que les protéines animales ne sont obtenues que par la transformation, dans le corps des animaux, des protéines végétales. D'où la deuxième raison : les matières azotées sont fondamentales pour la croissance des plantes et des animaux d'élevage. La maîtrise des apports en azote constitue une condition de la productivité agricole et donc de la capacité de l'agriculture à fournir suffisamment de nourriture. Mais, et c'est la troisième raison, les perturbations du cycle de l'azote - c'est-à-dire le rejet trop important d'azote dans l'hydrosphère - sont quasi-uniquement dues au fonctionnement de l'agriculture. Ainsi, comprendre ce qui, dans l'organisation de la production agricole, perturbe le cycle de l'azote est fondamental pour comprendre comment rétablir un fonctionnement viable. De ces trois raisons émerge un problème à deux contraintes : comment garantir à toute l'humanité une fourniture suffisante en matières azotées tout en rendant le cycle de l'azote viable du point de vue de la fertilité des sols et des pollutions ?

Ce problème dépasse bien largement le cadre de ce stage. Toutefois, il s'inscrit totalement dans les questions de recherche énumérées plus haut : utiliser l'AFM comme une méthode pour comprendre le métabolisme entre les sociétés et leur environnement et pour proposer des alternatives à la situation actuelle. L'étude du cycle de l'azote va nous permettre de construire un prototype d'AFM pour l'agriculture. Dans la section 1.1, on introduit brièvement, du point de vue biogéochimique, le cycle de l'azote et les problèmes posés par ses perturbations. Dans la section 1.2, on présente le modèle GRAFS [Billen et al., 2015], [Billen et al., 2018], un modèle agrégé du cycle de l'azote qui se révèle proche, dans l'esprit, d'une AFM. Cela nous permet, dans la section 1.3, d'introduire un prototype pour une telle analyse avant d'en évaluer la pertinence dans la section 1.4.

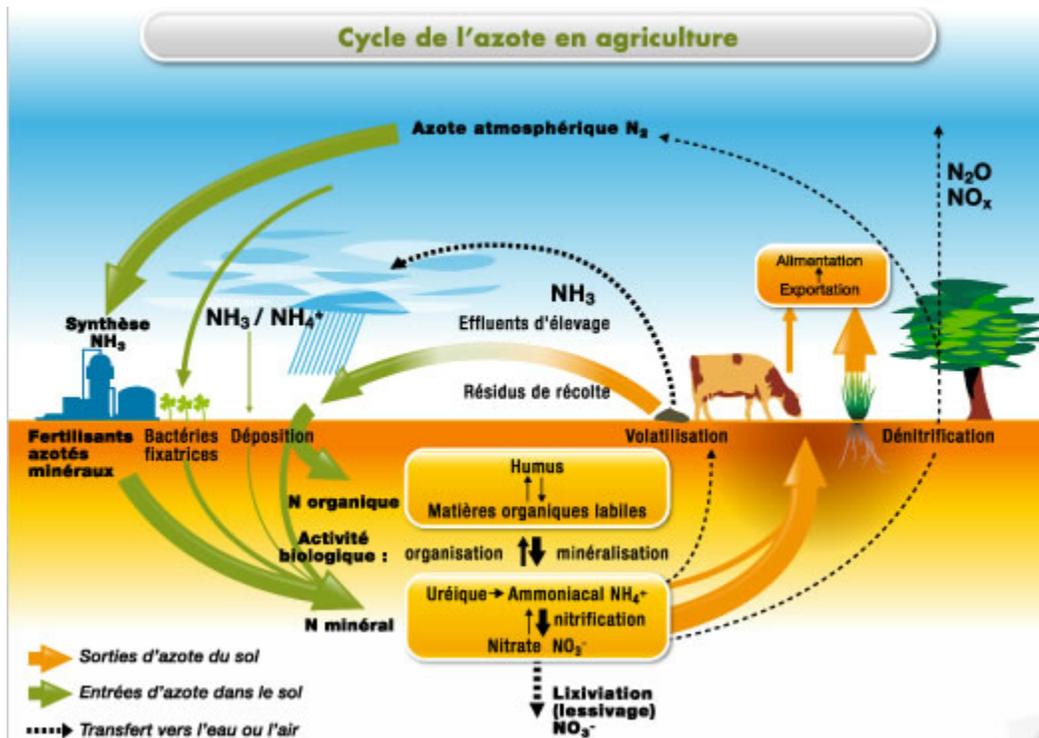


FIGURE 1.1 – Cycle de l'azote en agriculture. Source : Union des Industries de la Fertilisation (Unifa). Précisons qu'à l'échelle mondiale et contrairement à ce qu'on voit sur ce graphique, la fixation symbiotique d'azote n'est pas aussi réduite par rapport à l'épandage d'engrais de synthèse. Tous les termes présents sur ce schéma ont été introduits dans la section 1.1, sauf « uréique » qui désigne une catégorie de composés chimiques azotés utilisés dans la fertilisation synthétique

1.1 Introduction biogéochimique au cycle de l'azote

Dans l'atmosphère, l'azote est disponible de manière abondante sous forme de diazote (N_2) qui représente environ 80% du volume de l'atmosphère, et de manière plus marginale sous forme d'ammoniac (NH_3) et d'ion ammonium (NH_4^+). Dans le sol, on retrouve deux types d'azote : l'azote organique (présent dans le humus à hauteur de 5%) et l'azote minéral (ions ammonium, nitrites NO_2^- et nitrates NO_3^-).

Pour pousser, une plante a besoin d'assimiler de l'azote minéral : principalement des nitrites/nitrates, et plus marginalement des ions ammonium. L'activité des décomposeurs dans le sol transforme l'azote organique en azote minéral - processus de minéralisation - et celle de certaines bactéries transforme les ions ammonium en nitrites/nitrates - processus de nitrification.

L'apport d'azote au sol se fait par différents canaux : par épandage de fertilisants azotés minéraux, par épandage d'effluents d'élevage ou restitution de résidus de récolte (azote organique), par déposition des ions ammonium présents dans l'atmosphère - ce qu'on appelle le dépôt atmosphérique. Mais aucun de ces canaux n'est capable de capter l'azote existant dans l'atmosphère sous forme de diazote. La seule manière de fixer cet azote est le processus de fixation symbiotique. Des bactéries présentes dans le sol, les rhizobiums, rentrent en symbiose avec les plantes de la famille des fabacées (les légumineuses). Ces bactéries, en formant des nodosités dans les racines, captent des sucres et de l'énergie issus de la photosynthèse grâce auxquels elles fixent le diazote atmosphérique et le transforment en ions ammonium, assimilables par la plante. Mais celle-ci n'est pas la seule à en profiter : c'est, en réalité, l'ensemble du sol qui est enrichi en azote. Ce processus est une des principales sources d'approvisionnement et une des conditions de la fertilité d'un sol : c'est l'équivalent, pour l'azote, de ce que la photosynthèse est au carbone, à ceci près qu'une seule catégorie de végétaux peut effectuer cette fixation, alors que tous peuvent effectuer de la photosynthèse.

Une fois rendu disponible pour la croissance des plantes, l'azote présent dans le sol peut en être extrait de deux façons : soit lors de la récolte de ces plantes, soit par restitution à l'atmosphère - volatilisation de l'ammoniac ou dénitrification des nitrates devenant ainsi monoxyde d'azote, protoxyde d'azote et diazote. Mais rien ne force *a priori* ces retraits d'azote à être du même ordre que les apports d'azote au sol. Il peut en résulter des déséquilibres : ou bien un manque d'azote qui se traduit par une perte de fertilité du sol, ou bien un trop-plein d'azote qui risque donc d'être lessivé, c'est-à-dire que les nitrates, très solubles dans l'eau, peuvent être emportés par les eaux de pluies dans l'hydrosphère, principalement les rivières, les nappes phréatiques et les océans. Dans l'hydrosphère, une trop forte concentration en azote provoque des risques d'eutrophisation, c'est-à-dire de surdisponibilité de certains nutriments azotés qui provoquent la prolifération de certains organismes - comme les algues vertes en Bretagne ou certains phytoplanctons dans le Mississippi et au nord du Golfe du Mexique. En se décomposant, ces organismes consomment l'oxygène présent dans le milieu aquatique et peuvent l'appauvrir au point de l'asphyxier et d'empêcher le développement des autres espèces.

C'est de ça dont on parle quand on évoque les perturbations du cycle de l'azote : une trop grande quantité d'azote finit dans l'hydrosphère avec les risques énoncés ci-dessus. Il y a un excès d'azote apporté au sol par rapport à ce qui en est extrait. Historiquement, ce cycle a été perturbé au passage du XIXème et du XXème siècle [Holtgrieve et al., 2011], moment à partir duquel des quantités de plus en plus importantes d'azote ont été apportées aux surfaces agricoles pour maîtriser et augmenter les rendements. Au XIXème siècle, des filières industrielles et commerciales se sont mises en place à l'échelle mondiale pour extraire l'azote disponible à la surface de la terre et l'apporter aux sols européens et américains qui en manquaient, soutenant ainsi le développement d'une agriculture très productive dans ces régions : il en va ainsi de l'exploitation du nitrate de sodium dans le désert d'Atacama au Chili à partir des années 1820, il en va de même de la collecte du guano péruvien tout au long du XIXème siècle. Mais cette extraction de l'azote disponible va se révéler insuffisante pour satisfaire la demande d'engrais azotés, d'autant que les ressources se tarissent. Le procédé Haber, mis au point en 1909, permet d'effectuer la

synthèse de l'ammoniac à partir du diazote atmosphérique et de dihydrogène. Ce procédé trouve une application industrielle dès 1913 - procédé Haber-Bosch - qui ouvre la voie à une production massive et bon marché d'azote de synthèse. On estime aujourd'hui que 30% de l'azote fixé est issu du procédé Haber-Bosch [Smith et al., 2013]. Cet apport massif d'engrais de synthèse au sol pour augmenter et stabiliser les rendements agricoles a depuis largement perturbé le cycle de l'azote. Des 9 limites planétaires évoquées, celle-ci est déjà dépassée. Par an, 150 millions de tonnes d'azote réactif sont rejetés dans l'environnement alors qu'il en faudrait seulement entre 68 et 88 millions de tonnes, soit 41 à 55 kilogrammes par hectare [Steffen et al., 2015].

1.2 Le modèle GRAFS, une grille qui fait système

Ce problème des rejets trop importants d'azote dans l'hydrosphère est à l'origine du modèle GRAFS (pour *Generalized representation of agri-food systems*) développé récemment par une équipe de chercheurs autour de Gilles Billen du laboratoire Metis. Ce modèle propose un recensement des flux physiques¹ sur un territoire du point de vue de son agriculture afin d'identifier l'état et l'origine des perturbations et de proposer des alternatives. Ce modèle a été appliqué à la France, à un niveau régional puis national par agrégation² [Billen et al., 2018], et au monde entier, à un niveau sous-continentale [Billen et al., 2015], avec à chaque fois une partie de description de la situation actuelle et une partie de scénarisation de l'avenir. C'est d'ailleurs le double intérêt de ce modèle : comme grille de recensement des flux d'azote, il permet de dresser un tableau de la situation actuelle ; comme système intégré, il permet d'échafauder des scénarios alternatifs à partir d'un certain nombre d'hypothèses.

Ce modèle se trouve donc proche du formalisme de l'AFM. C'est à partir de lui que l'on va construire notre prototype : il s'agit ici de restituer les éléments pertinents de sa mécanique interne telle que présentée dans [Billen et al., 2018], aussi bien comme grille de recensement que comme système intégré. Il ne s'agit pas de présenter le modèle mais de se donner les armes pour construire notre prototype, aussi nous serons amenés à formuler des critiques qui ne seront pas des corrections du modèle GRAFS mais des repères relativement à notre objectif.

Le modèle GRAFS distingue quatre pôles entre lesquels circulent des masses d'azote et de phosphore³. Chacun de ces pôles convertit une masse d'azote entrante en masse d'azote sortante disponible pour les autres pôles : la **population humaine**, l'**élevage**, les **terres cultivées** et les **prairies**. L'état actuel des interactions entre ces quatre pôles en France est donné par la figure 1.2

Disons tout de suite que cette conversion à l'intérieur d'un pôle ne change pas, d'un point de vue quantitatif, la masse d'azote : il y a une même quantité d'azote entrant que d'azote sortant. Ce qui compte, c'est l'origine de l'azote qui rentre et la destination de l'azote qui sort. Ainsi, l'azote qui n'est pas extrait des terres cultivées sous forme de protéines végétales finit par se trouver dans l'hydrosphère ou dans l'atmosphère.

Mais si la quantité d'azote reste équilibrée à travers un pôle, sa qualité se modifie. Comme protéines, l'azote est une chaîne d'acides aminés. Or, il existe 20 types d'acides aminés dont 9 sont qualifiés d'acides aminés indispensables car, d'une part, le corps humain ne peut pas les synthétiser et d'autre part, ils sont nécessaires pour assimiler totalement la protéine. Et toutes les protéines ne présentent pas les acides aminés dans les mêmes proportions : les protéines des céréales, par exemple, sont dépourvues de lysine, un des indispensables, alors que les protéines d'origine animale contiennent les 9 indispensables. Le modèle GRAFS ne se penche pas sur cette question car ce n'est pas le problème qu'il cherche à résoudre : il s'intéresse, lui, aux rejets d'azote dans l'environnement, pas aux transformations de la qualité de l'azote dans la filière

1. Principalement de l'azote mais aussi du phosphore et, dans une moindre mesure, du carbone.

2. Les régions ne sont pas les régions administratives mais correspondent à des bassins hydrographiques ; on somme ensuite les résultats sur ces bassins hydrographiques pour obtenir des résultats à l'échelle du pays

3. Dans la suite, nous n'évoquerons plus que l'azote et laisserons de côté le phosphore

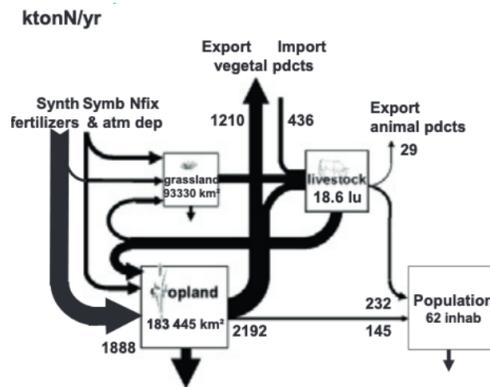


FIGURE 1.2 – Source : [Billen et al., 2018]. On remarque que le système des quatre pôles n’est pas clos : de l’azote extérieur y entre, comme l’azote atmosphérique apporté aux terres cultivées (*cropland*) et aux prairies (*grassland*) via la fixation symbiotique, la déposition atmosphérique ou le procédé Haber-Bosch pour fabriquer des engrais de synthèses, et de l’azote en sort, via le commerce avec d’autres territoires ou le lessivage (flèches noires en bas du schéma).

agricole. Mais pour nous, concernant notre questionnement sur la concurrence alimentaire entre humains et animaux, c’est une problématique intéressante.

1.2.1 La population humaine

La population humaine est envisagée sous l’angle de l’alimentation et de la digestion : elle consomme des protéines végétales et animales et elle produit des déjections qui sont, dans une certaine mesure, recyclées puis restituées aux terres cultivées.

L’azote entrant est ici déterminé par trois facteurs : la taille de la population, la consommation de protéines par tête et la répartition de cette consommation entre protéines végétales, protéines animales d’origine marine (poissons, fruits de mer), protéines animales d’origine non-marine (viande, lait, oeufs). L’extraction et la consommation de protéines animales d’origine marine ne rentre pas dans le modèle : il s’agit ici d’une donnée exogène. En revanche, les protéines animales d’origine non-marine⁴ et les protéines végétales sont le produit des trois autres pôles. Dans leur description de la situation actuelle en France, les auteurs retiennent une consommation de protéines de 6,6 kilogrammes d’azote par tête et par an, à 56% d’origine animale et à 35% d’origine végétale.

L’azote sortant est ici déterminé par un facteur : le taux de recyclage des déjections humaines. Ce taux détermine la part de l’azote ingéré qui est restitué aux terres cultivées en guise d’engrais organiques. Le reste de l’azote ingéré ne disparaît pas mais finit dans les eaux usées. La destination de cet azote n’apparaît pas dans le modèle GRAFS.

1.2.2 L’élevage

L’élevage, divisé en 6 cheptels (bovins, ovins, caprins, porcins, volailles, équins)⁵ est envisagé sous l’angle de la production de protéines animales (viande, lait, oeufs) et d’azote contenu dans les déjections à partir de l’ingestion de protéines végétales. L’azote sort donc de l’élevage sous trois formes : les protéines contenues dans les produits animaux comestibles (viande

4. Dans la suite, on dira juste « protéines animales » pour ces protéines.

5. Dans la suite, quand on parlera de cheptels, on aura systématiquement en tête cette division en 6 catégories de l’ensemble des animaux d’élevage

%	Bovins
Viande désossée	69,2
Os	19,2
Graisse comestible	11,5
Peau	15,4
Sang	7,7
Boyaux	48,1
Tête et pied	5,8
Abats	5,8
Graisse non-comestible	9,6
Poids vif	192,3

TABLE 1.1 – Source : [Billen et al., 2018]. Le poids de la viande désossée représente 69,2% du poids de la carcasse et le poids vif, 192,3% (ce qui revient à dire que le rendement carcasse est de 52%). Précisons ici que lors de l’abattage, processus par lequel l’animal vif devient carcasse, la bête est abattue et on lui retire la peau, le sang, les boyaux, la tête et les pieds, les abats, la graisse non-comestible. La carcasse ne contient alors que la viande désossée, les os et la graisse comestible et on peut vérifier que $69,2 + 19,2 + 11,5 = 99,9$ c’est-à-dire 100 si on met de côté l’erreur dû à l’arrondi au dixième.

désossée, abats, graisse comestible, oeufs et lait), celles contenues dans les produits animaux non-comestibles (peau, os, sang, boyaux, tête et pied, graisse non-comestible) et l’azote organique des déjections.

Les produits animaux

La quantité de produits animaux est déterminée par trois ensembles de facteurs : la production annuelle, de carcasse, en masse équivalent carcasse pour la viande⁶, ou en masse de coproduits pour le lait et les oeufs ; la composition de l’animal, c’est-à-dire le poids de chaque partie de la bête relativement au poids de la carcasse ; et la teneur en azote de chaque produit (viande, lait, oeufs). À titre d’exemple, on présente dans les tables 1.1 et 1.2 la composition des bovins et la teneur en azote de chaque partie ; pour les autres cheptels, des tables similaires sont disponibles en annexe. La composition de la bête tout comme la teneur en azote peuvent évoluer au cours du temps, du fait des améliorations génétiques ou zootechniques. Mais pour la scénarisation, c’est surtout la production de carcasse que l’on fera varier en lien avec l’évolution des habitudes alimentaires.

Les déjections animales

La quantité de déjections est déterminée par deux ensembles de quantités : les quantités d’azote excrétées par les différentes têtes de bétail et le nombre de têtes de bétail. Cette quantité multipliée par le nombre de têtes donne la quantité globale d’azote rejetée sous forme de déjections. C’est ici l’occasion de soulever deux points. Premièrement, on distingue les quantités excrétées au niveau de chaque cheptel mais également à un niveau plus détaillé, en distinguant des populations au sein de ces cheptels. À titre d’exemple, on énumère les différents catégories du cheptel bovins dans la table 1.3 : on aura l’occasion d’y revenir par la suite quand on construira les modules de production. Deuxièmement, dans la comptabilité agricole, il existe deux moyens de dénombrer les animaux. On peut, d’abord, compter les têtes de bétail, mais

6. La masse équivalent carcasse est une unité de comptabilité agricole qui permet de comparer les différents animaux morts ou vifs. Pour déterminer la masse équivalent carcasse d’une tête de bétail vive, on applique un rendement carcasse à son poids vif. Ce rendement est égal au poids de la carcasse de l’animal une fois abattu. Ainsi, le rendement carcasse d’un bovin oscille entre 50% et 65% selon les races.

Produit	Teneur en azote (en %)
Viande désossée	3,13
Os	5,5
Graisse comestible	0,3
Peau	5,28
Sang	2,4
Boyaux	0,5
Tête et pied	6
Abats	2,9
Graisse non-comestible	0,3
Lait	0,53

TABLE 1.2 – Source : [Billen et al., 2018]. Ainsi, 100 kilogrammes de viande désossée contiennent 3,13 kilogrammes d’azote.

Catégorie	Quantité excrétée par an (kgN)
Vaches laitières	103,1
Vaches allaitantes	91,3
Génisses >2 ans	54,8
Mâles > 2 ans	83,0
Génisses 1-2 ans	47,5
Mâles 1-2 ans	67,5
Veaux de boucherie	5,5
Autres femelles, <1 an	18,3
Autres mâles, <1 an	11,0

TABLE 1.3 – Source : [Billen et al., 2018]. « kgN » signifie kilogrammes d’azote. Les vaches désignent les bovins femelles ayant déjà vêlé, c’est-à-dire donné un veau. Les vaches laitières sont élevées pour la production de lait et, accessoirement, pour leur viande de réforme. Les vaches allaitantes désignent les vaches élevées pour produire d’autres bovins élevés et abattus pour leur viande. Les génisses désignent les bovins femelles qui n’ont pas encore vêlé. Les veaux de boucherie sont les bovins abattus avant leurs 8 mois pour leur viande.

alors on agglomère ensemble des animaux qui n’ont rien à voir - 2 vaches laitières et 3 poules pondeuses font autant de têtes de bétail que 5 porcs adultes - et cela pose problème dès qu’il s’agit de manipuler ou d’interpréter des quantités agrégées sur l’ensemble du bétail. Une solution est alors de convertir les têtes de bétail en unité gros bétail (UGB, *livestock unit* (LU) en anglais) et c’est la solution empruntée par le modèle GRAFS. L’idée est de comparer chaque catégorie de bétail à la catégorie des vaches laitières en ramenant ce que mange par an une tête de bétail à ce que mange par an, en équivalent herbe pâturée, une vache laitière produisant 3000 kg de lait annuellement⁷. Par exemple, une poule pondeuse représente 0,014 UGB et un porc adulte 0,3 UGB : ainsi, 2 vaches laitières et 3 poules pondeuses valent 2,042 UGB tandis que 5 porcs adultes valent 1,5 UGB. Dans la table 1.4, on présente la valeur UGB de différentes catégories du cheptel bovins.

Une première résolution du problème de l’alimentation animale

Il y a autant d’azote qui rentre dans l’élevage que d’azote qui en sort. Une fois déterminées toutes les sorties d’azote (produits animaux, déjections), on connaît la masse d’azote entrante.

⁷. Une autre manière de construire les UGB est de comparer les animaux en fonction de ce qu’ils excrètent, ce qui explique qu’on peut, réciproquement, utiliser les UGB à ces deux fins.

Catégorie	Valeur UGB
Moins d'1 an	0,4
1-2 an	0,7
Mâles >2 ans	1
Génisses >2 ans	0,8
Vaches laitières	1
Autres vaches	0,8

TABLE 1.4 – Source : Eurostat. Les catégories utilisées ici sont, à un niveau plus agrégé, les mêmes que celles utilisées dans la table 1.3. Ce n'est pas un hasard, car il s'agit de la manière classique de mettre en catégorie le cheptel bovins.

L'alimentation des animaux devient endogène : sans avoir à définir *a priori* ce que mange le bétail, on sait quelle quantité d'azote il mange. Cela permet d'économiser du temps tout en présentant deux problèmes. Pour la description de la situation actuelle, on laisse de côté l'enjeu de déterminer la ration alimentaire des animaux, quand bien même cette question est au coeur de nombreux débats⁸. Et pour la scénarisation d'alternatives, on s'interdit de jouer sur ce paramètre. Et ce, alors même que les flux de protéines végétales vers l'élevage constituent les flux d'azote les plus importants à l'intérieur du système (voir figure 1.2).

Mais le modèle GRAFS ne se contente pas de déterminer la quantité globale d'azote ingérée par l'élevage. Il propose une détermination *a posteriori* de la ration alimentaire des animaux. Une fois déterminée la quantité I d'azote ingérée (égale à la somme des protéines dans les produits animaux et de l'azote dans les déjections), on va tenter de séparer l'azote qui vient des terres cultivées (hors blé) du territoire $I_{TC,hb}$, la partie qui vient des prairies du territoire I_P et la partie constituée de nourriture pour animaux provenant d'autres territoires I_{Ext} . Pour ce faire, on fonctionne par saturation successive, c'est-à-dire qu'on commence par saturer l'alimentation avec toute l'herbe des prairies possible, puis avec toute la nourriture importée possible puis on complète, si besoin est, avec la production locale issue des terres cultivées afin d'obtenir l'égalité

$$I = I_P + I_{Ext} + I_{TC,hb}. \quad (1.1)$$

On commence par calculer l'ingestion maximum d'herbes (MIG) sur la base de l'hypothèse que les animaux pouvant pâturer (bovins, ovins et caprins, équins) pâturent au maximum. Cette hypothèse se concrétise par l'égalité

$$MIG = \sum_{a \in P} prod_a \times r_a + exc_a \quad (1.2)$$

où P est l'ensemble des animaux pouvant pâturer (bovins, ovins et caprins, équins), $prod_a$ est la production annuelle du type a (en agrégeant carcasse, lait, oeufs), r_a est le taux d'azote dans la production pour le type a (intégrant la partie comestible et non-comestible) et exc_a est la quantité d'excréments pour le type a . Autrement dit, l'ingestion maximum d'herbes est égale au flux sortant d'azote des cheptels pouvant pâturer, sous l'hypothèse que l'intégralité de l'alimentation de ces cheptels est constituée d'herbe pâturée. On détermine ensuite l'ingestion d'azote originaire des prairies I_P en prenant le minimum de MIG et de la production effective de ces prairies. Comme $MIG \leq I$ (car MIG compte l'azote sortant de quelques cheptels là où I compte l'azote sortant de tous les cheptels), on a bien $I_P \leq I$.

On calcule ensuite la nourriture animale importée ingérée par les animaux en posant que $I_{Ext} = \max(0, \min(M_{Ext}, I - I_P))$ où M_{Ext} est la quantité (connue empiriquement) de nourriture

8. Celui sur la concurrence alimentaire entre animaux et humains, bien sûr, mais pas seulement : les débats sur les performances zootechniques de telle ou telle ration, avec derrière la question des rendements et de la rentabilité économique.

animale importée sur le territoire. Cela revient à poser $I_{Ext} = 0$ si $I_P = I$ i.e. si toute la nourriture ingérée par les animaux d'élevage provient des prairies. Puisque $\min(M_{Ext}, I - I_P) + I_{grass} \leq I - I_{grass} + I_P = I$, on a que

$$I_P + I_{Ext} \leq \max(I_P, \min(M_{Ext}, I - I_P) + I_P) \leq I \quad (1.3)$$

Le modèle termine en complétant l'alimentation des animaux par la production issue des terres cultivées en posant $I_{TC, hb} = \min(Y_{TC}^{hb}; I - (I_P + I_{Ext}))$ où Y_{TC}^{hb} est la production des terres cultivées moins la production de blé, cette dernière étant considérée comme réservée à l'alimentation humaine et non-animale⁹.

Cette détermination de la ration alimentaire des animaux par saturation successive est valable d'un point de vue approximatif pour estimer globalement les flux prairies - élevage et terres cultivées - élevage car, en France, la ration alimentaire des animaux pouvant pâturer - ruminants et équins - est effectivement composée d'une grande partie d'herbe. Mais cela masque que l'herbe ne constitue pas une ration alimentaire complète, ne serait-ce que du fait de la saisonnalité de la pousse de l'herbe ou des besoins physiologiques des bêtes. Pour effectuer un diagnostic ou scénariser des alternatives, on a besoin d'explicitier *a priori* la ration alimentaire des animaux.

1.2.3 Les terres cultivées et les prairies

Les terres cultivées et les prairies sont envisagées comme des productrices de protéines végétales à partir de l'azote contenu dans les fertilisants apportés au sol. La différence entre terres cultivées et prairies est affaire de définition : par prairies, on entend prairies permanentes ou naturelles, c'est-à-dire des prairies qui ont été ensemencés depuis au moins 5 ans et qui n'ont pas connu d'autres ensemencements depuis. Certaines prairies sont artificielles ou temporaires - par exemple, celles qui rentrent dans un cycle de rotation de culture pour régénérer le sol - et font alors partie des terres cultivées. Pour autant, ces dernières prairies peuvent être pâturées par le bétail.

L'azote est apporté au sol de six manières différentes pour les terres cultivées (engrais synthétiques, déjections animales, déjections humaines, semences, dépôt atmosphérique, fixation symbiotique) et de quatre manières différentes pour les prairies (engrais synthétiques, déjections animales, dépôt atmosphérique, fixation symbiotique). Chacun de ces apports en azote est déterminé de manière spécifique mais à plusieurs reprises, la quantité d'azote entrant dépend d'un facteur « à l'hectare », c'est-à-dire d'un facteur exprimé en kilogrammes d'azote par hectare et par an (kgN/ha). On retrouve la quantité globale d'azote apporté annuellement au sol en multipliant ce facteur à l'hectare par la surface agricole considérée (terres cultivées ou prairies).

Déjections animales

On sait comment les quantités de déjections animales sont déterminées (voir 1.2.2) mais on ne sait pas comment ces quantités sont utilisées.

Il existe trois types de déjections animales : les déjections déposées directement sur la prairie (au moment du pâturage), le fumier déposé en intérieur - mélange des déjections avec une litière de paille -, et le lisier également déposé en intérieur - mélange des déjections avec de l'eau. Le seul apport de déjections animales aux prairies se fait par dépôt direct. En revanche, l'apport de déjections animales aux terres cultivées se fait par dépôt direct (pour les prairies temporaires) ou par épandage de fumier et de lisier. Dans la mesure où une partie de l'azote contenu dans les déjections se volatilise avant d'atteindre le sol, deux ensembles de quantités, définies pour chaque cheptel, permettent de déterminer les quantités d'azote apportés au sol : la répartition des déjections selon le type et le taux de volatilisation selon le type. Le tableau 1.5 rappelle ces quantités pour le cheptel bovins.

9. Il peut arriver, en théorie, que la production des terres cultivées soit insuffisante pour combler l'écart restant. C'est un problème qui va d'ailleurs se poser à nous

Type de déjections	Répartition (%)	Taux de volatilisation (%)
En extérieur	52,3%	10,2%
Fumier	40,9%	27,04%
Lisier	6,8%	27,81%

TABLE 1.5 – Source : [Billen et al., 2018]. 52,3% de l’azote excrété par les bovins l’est directement en extérieur sur prairie et 10,2% de cet azote se volatilise dans l’atmosphère avant d’atteindre le sol

Fixation symbiotique

La quantité d’azote fixée par fixation symbiotique peut se déterminer de deux manières. D’abord, en se donnant une quantité d’azote fixée à l’hectare et en multipliant cette quantité par le nombre d’hectares. Cette quantité est aujourd’hui de 9,5 kgN/ha par an pour les terres cultivées et de 32,6 kgN/ha par an pour les prairies. Mais cette quantité est elle-même déterminée par l’activité du sol, notamment par la présence des rhizobiums et leur symbiose avec les fabacées : fixer juste une quantité synthétique à l’hectare occulte les changements qui peuvent avoir lieu si on modifie les cultures, par exemple, si une plus large part est laissée aux légumineuses.

Une autre manière de déterminer la quantité d’azote fixée par fixation symbiotique est donc d’estimer dans quelles proportions les fabacées fixent effectivement de l’azote. Le modèle GRAFS distingue deux types de légumineuses : les légumineuses graines (soja, fèves et féveroles, pois, haricots secs, haricots verts, pois verts) et les légumineuses fourragères (luzerne et trèfle). Les légumineuses graines fixent au sol dans la proportion de 1,23 kilogramme d’azote fixé par kilogramme d’azote extrait¹⁰ et les légumineuses fourragères (luzerne et trèfle) dans la proportion de 1,47 [Anglade et al., 2015]. Ainsi, si on connaît la production de légumineuses, on peut déterminer la quantité d’azote issu de la fixation symbiotique apporté aux terres cultivées. De même, les prairies sur lesquelles poussent des légumineuses fixent de l’azote : le modèle GRAFS prend comme proportion 0,3675 kilogramme d’azote fixé par kilogramme d’azote produit. La quantité de fertilisants apportés au sol est, de cette manière, reliée à la quantité d’azote extrait du sol par les récoltes ou le pâturage.

Autres

Parmi les autres apports d’azote au sol, on compte les engrais synthétiques, les déjections humaines, le dépôt atmosphérique et les semences.

La quantité d’engrais synthétiques est déterminée par deux facteurs : la quantité épandue par hectare (en kgN par hectare) et le taux de volatilisation dans l’atmosphère. En France, la quantité épandue par hectare est de 108 kgN/ha pour les terres cultivées et de 25 kgN/ha pour les prairies ; le taux de volatilisation est de 4,5% pour les prairies et de 5,1% pour les terres cultivées.

On sait comment sont déterminées les quantités de déjections humaines (voir 1.2.1). Ces déjections ne sont épandues que sur les terres cultivées (comme le fumier et le lisier).

La quantité de dépôt atmosphérique est déterminée par un seul facteur : la quantité déposée à l’hectare qui, en France aujourd’hui, est de 11,8 kgN/ha.

La quantité de semences est anecdotique (de l’ordre de 1% des apports totaux annuels en azote aux terres cultivées) et on la néglige dans la suite de l’étude.

10. Ainsi, pour chaque kilogramme d’azote récolté sous forme de soja, il y a 1,23 kilogramme d’azote qui a été apporté au sol pendant la croissance du soja du fait de l’activité symbiotique

La production végétale : l'équation de rendement

On a vu, dans la section 1.1, que l'azote était extrait du sol de trois façons : par récolte ou pâturage, par dénitrification ou volatilisation ou bien par lessivage. Le processus de dénitrification n'est pas pris en compte par le modèle GRAFS et les phénomènes de volatilisation ont été intégrés avant que l'azote n'arrive jusqu'au sol (pour les déjections animales et les engrais synthétiques, voir précédemment). Il est plus facile d'estimer la quantité d'azote extraite par récolte et pâturage - estimation qui repose sur la comptabilité agricole - que d'estimer celle qui est en trop dans le sol et qui finit dans l'hydrosphère du fait du lessivage des nitrates. Aussi, on obtiendra le surplus d'azote dans le sol, la quantité qui nous intéresse du point de vue des limites planétaires, en faisant la différence entre la fertilisation totale apportée au sol (après déduction des pertes gazeuses) et la quantité totale extraite du sol par les récoltes et le pâturage.

Se pose maintenant la question de déterminer la quantité d'azote récoltée et pâturée. Dans une optique de description de la situation actuelle, la comptabilité agricole est suffisamment complète pour fournir toutes les informations dont on a besoin. Il suffit de considérer la production de chaque végétal¹¹ et la teneur en azote de chaque végétal¹². Mais dans une optique de scénarisation d'alternatives, on ne dispose pas *a priori* des quantités produites pour chaque végétal, dans la mesure où ces quantités sont influencées par un certain nombre de paramètres du modèle. Cela exclut, au passage, de vouloir raisonner avec des quantités à l'hectare comme précédemment, c'est-à-dire avec des rendements. Faire cela reviendrait à l'hypothèse que le seul facteur qui influence la production végétale est la surface agricole - puisque les rendements sont donnés *a priori*. Or, la production végétale est déterminée par une large palette d'autres facteurs : quel végétal est produit, de quelle façon (conventionnel, biologique, raisonné), comment il s'inscrit dans une rotation de culture, etc. On cherche donc un modèle de détermination de la production végétale et trouver un tel modèle est d'ailleurs un enjeu historique de l'agronomie.

Le modèle GRAFS utilise le modèle issu de [Lassaletta et al., 2014] que l'on appellera dans la suite l'équation de rendement :

$$Y^N = \frac{Y_{max}F}{Y_{max} + F} \quad (1.4)$$

où Y^N désigne la production végétale globale (en masse d'azote), F désigne la fertilisation globale (en masse d'azote) et Y_{max} est un paramètre strictement positif obtenu par estimation. Remarquons que si on fait tendre F vers $+\infty$ dans (1.4), alors Y^N tend vers Y_{max} . Dans la mesure où le terme de droite est croissant en F , on a la justification de la notation Y_{max} : on peut l'interpréter comme la production maximale que l'on ne pourra pas dépasser même en saturant le sol d'azote. En notant f la fonction qui à $F \geq 0$ associe $f(F) = \frac{Y_{max}F}{Y_{max} + F}$, on remarque qu'un certain nombre de phénomènes agronomiques simples sont respectées :

- (i) $f(0) = 0$, autrement dit quand il n'y a pas d'apport d'azote au sol, il n'y a pas de production possible.
- (ii) f est de classe C^∞ sur \mathbf{R}_+ et pour $F \geq 0$, on a

$$f'(F) = \left(\frac{Y_{max}}{Y_{max} + F} \right)^2 \geq 0$$

$$f''(F) = -\frac{2Y_{max}^2}{(Y_{max} + F)^3} \leq 0$$

donc f' est positive et décroissante, autrement dit le rendement marginal est positif et décroissant - quand on augmente la masse d'azote apporté au sol, on augmente la production végétale mais dans des proportions de moins en moins grandes.

11. En masse de matière sèche, ce qui permet d'agréger les différents végétaux indépendamment de leur taux d'humidité

12. Exprimée en kilogrammes d'azote par quintal de matière sèche, c'est-à-dire en pourcentage.

- (iii) $f'(F) \rightarrow_{F \rightarrow 0} 1$, autrement dit pour de faibles niveaux de fertilisation, quasiment tout l'azote supplémentaire apporté au sol est converti en production végétale.

Étant donné un Y_{max} , l'équation de rendement fait donc dépendre la masse d'azote récoltée de la masse d'azote apporté au sol grâce à une relation hyperbolique qui reproduit un certain nombre de phénomènes agronomiques simples. Reste à savoir ce qui se cache derrière le Y_{max} . En tant que « rendement potentiel » du sol, il synthétise un certain nombre d'informations sur le contexte pédoclimatique - le climat interne du sol - et technico-agronomique. Ainsi, dans le cadre d'une scénarisation d'alternatives, il faut réfléchir à la façon dont les changements dans le pédoclimat ou les techniques de culture influencent des changements dans la valeur de Y_{max} , d'autant que de tels changements se sont déjà constatés dans différents pays [Lassaletta et al., 2014]. Mais soulignons que le niveau de Y_{max} semble ne pas dépendre du mode de production [Billen et al., 2018] - conventionnelle ou biologique. Ainsi, dans le cas où l'on voudrait confronter, dans un scénario, l'agriculture biologique et conventionnelle, on pourrait disposer du même Y_{max} .

La masse d'azote récolté ou pâturé Y^N dépend donc de la masse d'azote apporté au sol par l'équation (1.4). Mais par ce qu'on a dit précédemment sur la fixation symbiotique, la masse d'azote apporté au sol dépend à son tour de la masse d'azote récolté. Pour sortir de ce raisonnement circulaire, on verra que les auteurs doivent sortir la production des fabacées du modèle GRAFS. Cette production est connue *a priori*, elle détermine donc la quantité d'azote fixé par fixation symbiotique qui permet de déterminer la masse d'azote apporté au sol et, finalement, la masse d'azote qui en est extrait. Nous proposerons une autre résolution de ce problème.

1.3 Du modèle GRAFS à une AFM dans l'agriculture

Ainsi s'achève la présentation des éléments du modèle GRAFS qui vont nous permettre de construire une AFM pour l'agriculture. Rappelons que le modèle GRAFS a deux dimensions : une dimension « grille de recensement » des flux d'azote à travers l'agriculture, qui permet de fournir un descriptif de la situation actuelle et une dimension « système intégré » qui relie les flux d'azote les uns aux autres - par exemple grâce à l'équation de rendement ou grâce à l'équilibre entre l'azote entrant et l'azote sortant d'un secteur - et qui ouvre la voie à la construction de scénarios à partir d'un nombre suffisant d'hypothèses.

Pour construire notre AFM, on ne pourra se contenter d'énumérer des secteurs, des produits et de copier telles quelles les quantités qui circulent au sein de la filière à partir des données recensées dans [Billen et al., 2018]. Car ainsi faisant, on n'intégrerait pas alors le fonctionnement interne de la filière agricole. Or, si on veut élaborer des scénarios d'alternatives à l'agriculture actuelle, il faut tenir compte de ce fonctionnement et le relier à des facteurs sur lesquels on aurait envie de jouer. Autrement dit, il faut qu'on définisse, en plus des secteurs et des produits à partir desquels on va décrire la filière agricole, un ensemble de paramètres modifiables qui vont résumer l'ensemble des facteurs sur lesquels on veut jouer pour définir un scénario alternatif et qui vont permettre, en même temps, de calculer la valeur de nos flux à partir des relations détaillées précédemment. Dans cette section, on va donc d'abord présenter les produits et les secteurs à partir desquels décrire la filière agricole, c'est-à-dire la structure du modèle qui n'est pas amenée à bouger d'une utilisation à l'autre, puis présenter l'ensemble des paramètres, c'est-à-dire l'interface modifiable à partir de laquelle on va pouvoir élaborer des scénarios d'alternatives, et enfin, détailler la mécanique interne du modèle, c'est-à-dire la détermination des flux que l'on est en mesure de connaître à partir de cette structure et de ces paramètres.

La période du modèle est l'année. L'unité est la masse d'azote - par commodité le kgN pour éviter la mobilisation de puissances de 10 mais selon les ordres de grandeur, on sera amené, dans la pratique, à passer en tonnes d'azote tN ou en kilotonnes d'azote ktN.

1.3.1 Produits et secteurs

À l'instar du modèle GRAFS, notre AFM est structurée autour de quatre principaux secteurs : les terres cultivées, les prairies, l'élevage et la population humaine. Ces quatre secteurs respectent la contrainte (4) de conservation de la masse. On distingue six sous-secteurs de l'élevage, à raison d'un par cheptel : bovins, ovins, caprins, porcins, volailles, équins. Ces sous-secteurs respectent également la contrainte (4). À ces secteurs, on en rajoute quatre autres qui ne suivent pas la contrainte de conservation de la masse : deux secteurs qui s'apparentent à des stocks et qui vont nous permettre de quantifier les pollutions - l'atmosphère et l'hydrosphère -, la fertilisation synthétique, productrice d'engrais de synthèse, et l'extérieur pour intégrer les échanges entre le territoire et les autres territoires.

Par rapport au modèle GRAFS, on est obligé de définir des produits - le modèle GRAFS n'en avait pas besoin puisque tout était finalement agrégé en masse d'azote. On distingue trois grandes familles de produits : les fertilisants apportés au sol - prairies, terres cultivées - et qui finissent parfois dans l'atmosphère ou dans l'hydrosphère, les produits végétaux tirés du sol et apportés aux animaux d'élevage ou à la population humaine et enfin les produits animaux issus de l'élevage et fournis à la population humaine. Ces grandes familles sont ensuite subdivisées en sous-familles par catégorie de produits. On va d'abord détailler ces sous-familles puis préciser quels flux peuvent exister et quels flux sont impossibles, c'est-à-dire déterminer la contrainte (3).

Les fertilisants

Concernant les fertilisants, on distingue six sous-produits déjà détaillés : les engrais synthétiques, l'azote fixé par fixation symbiotique, le dépôt atmosphérique, les déjections humaines et les déjections animales où l'on distingue entre fumier, lisier et déjections directement en extérieur. On néglige les semences.

On ajoute un dernier sous-produit : les pertes par lessivage du sol vers l'hydrosphère. On pourrait se passer de ce sous-produit si on était en mesure de déterminer pour chaque fertilisant la proportion d'azote qui finit lessivé mais cela est impossible : une fois dans le sol, les fertilisants sont tous agrégés et les nitrates sont lessivés indifféremment selon les précipitations, qu'il s'agisse d'engrais de synthèse ou de déjections bovines. En revanche, il serait intéressant d'étudier en fonction de quoi un sol est vulnérable au lessivage et si la composition de la fertilisation y joue un rôle - par exemple, un sol très amendé avec des engrais de synthèse est-il plus exposé au lessivage qu'un sol traité de manière biologique ?

Tous ces sous-produits sont contraints par la loi (5) de conservation de la masse.

Les produits animaux

Concernant les produits animaux, on distingue deux sous-familles contenant respectivement cinq et six sous-produits : la famille des produits comestibles - viande désossée, abats, graisse comestible, lait, oeufs - et la famille des produits non-comestibles - peau, sang, os, boyaux, tête et pied et graisse non-comestible.

Les sous-produits de la famille des comestibles sont contraints par la loi (5) mais pas ceux de la famille des non-comestibles dans la mesure où on n'a pas eu la possibilité d'étudier le devenir, après l'abattage, de ces produits.

Les produits végétaux

Concernant les produits végétaux, on va adapter les catégories statistiques utilisées par Agreste, le service statistique du ministère de l'Agriculture, aux contraintes de notre modèle. On distingue ainsi trois grandes sous-familles : les produits de culture, issus des terres cultivées,

les produits des prairies naturelles issus des prairies et la nourriture animale importée, c'est-à-dire les produits végétaux importés de l'extérieur pour nourrir les bêtes. On aurait pu se passer de cette dernière catégorie et ventiler les importations de produits végétaux à destination de l'élevage dans les deux autres sous-familles. Mais on disposait d'une information agrégée sur les importations nettes de nourriture animale et il s'agit là d'une manière *ad hoc* d'en tenir compte. Ceci dit, on tient là une piste d'amélioration de notre modèle.

On distingue ensuite au sein des produits de culture, d'autres sous-familles en suivant Agreste : les céréales - blé, seigle, orge, avoine, maïs grain, riz et autres -, les oléagineux - colza, tournesol, soja et autres -, les protéagineux - fèves et féveroles, pois verts, pois secs, haricots verts, haricots secs, légumes secs et autres - les racines - pommes de terre, betteraves à sucre et autres -, les fourrages - maïs fourrage, choux fourragers, luzerne et trèfle (comptés ensemble) ainsi que la paille -, les fruits et légumes - fruits secs, courges et melons, choux, légumes à feuilles, fruits, olives, agrumes - les productions végétales à usage non-alimentaire - lin, chanvre - et les produits des prairies temporaires non-légumineuses. Tous ces sous-produits sont contraints par la loi (5).

Deux tables de possibilité

À partir de ces secteurs et de ces produits, on présente dans la table 1.6 les tables de possibilité, c'est-à-dire des tables emplois-ressources où, en lieu et place de quantités déterminées, on indique juste si tel flux est possible ou impossible. On présente des tables à un niveau agrégé, les tables complètes étant disponibles en annexe. On associe à ces tables de possibilité le diagramme de Sankey de possibilité de la figure 1.3.1

Comme vu en section 1.2, les déjections humaines ne sont épandues que sur les terres cultivées, tout comme le fumier et le lisier qui n'apparaissent pas ici. Les produits des prairies naturelles ne peuvent être importés ou exportés même si, dans la pratique, il peut exister du commerce de foin ou d'enrubannage. On suppose, de même, que la nourriture animale importée n'est pas ré-exportée. Les produits animaux non-comestibles ne sont employés nulle part dans le modèle.

1.3.2 La paramétrisation

Dans la section précédente, on a défini la structure de notre modèle. Présentons maintenant l'interface des paramètres à partir desquels on va « remplir » notre modèle, c'est-à-dire déterminer les flux et donc pouvoir construire des scénarios d'alternatives. Il s'agit ici de recenser l'ensemble des variables suffisantes pour décrire une organisation de la filière agricole tout en étant simple à collecter et à utiliser.

On distingue alors cinq catégories de paramètres : la surface agricole, le plan de culture, la population humaine, la fertilisation synthétique et le cheptel. On résume ces paramètres dans la table 1.7

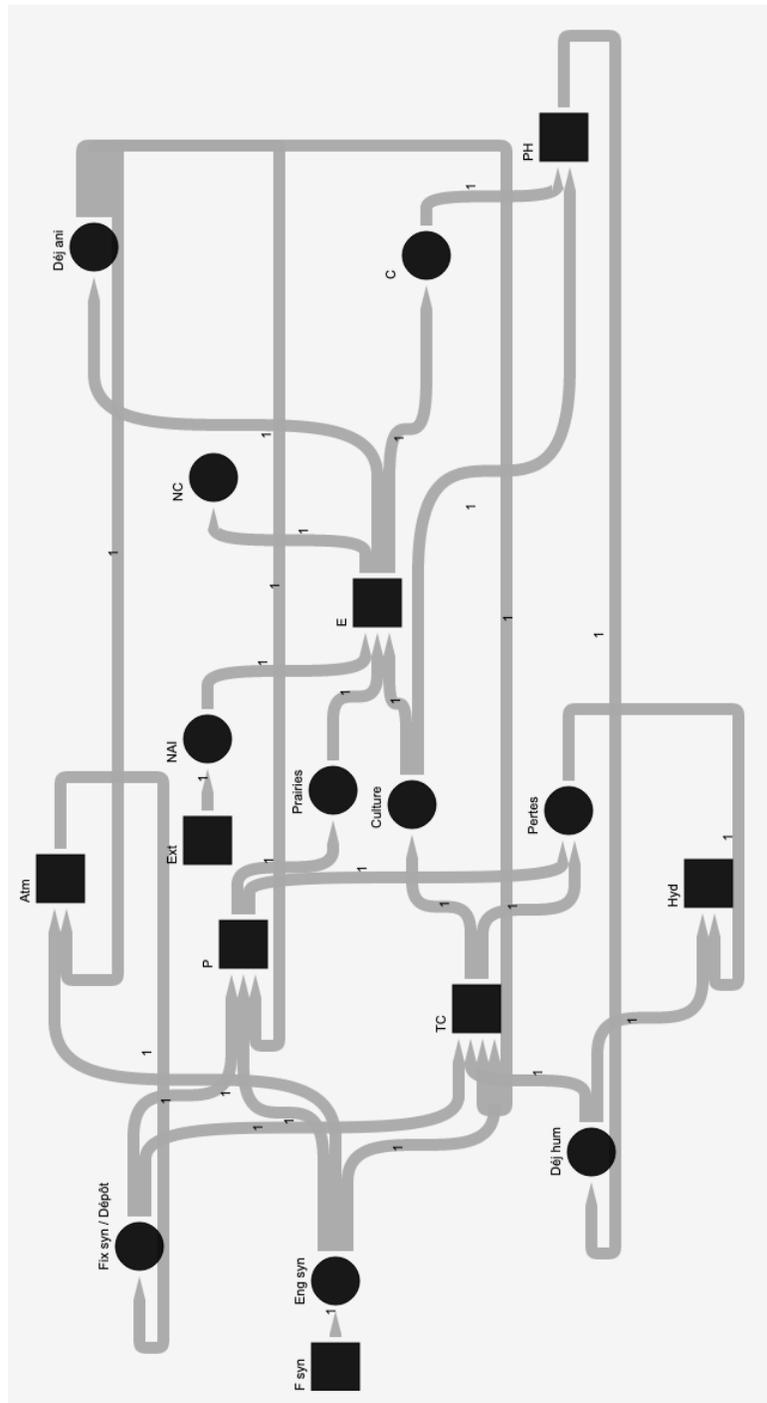
La surface agricole

Cette première catégorie de paramètres dépend de la structure des autres paramètres dont beaucoup sont des quantités à l'hectare, par exemple, une quantité d'engrais synthétiques épandues à l'hectare. Pour passer de ces quantités à l'hectare à des données sur l'ensemble du territoire, il faut donc des informations sur la surface agricole. On se donne ici deux paramètres :

- (i) La surface agricole utilisée que l'on note SAU , en hectares, qui agrège les terres arables, les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes et vergers).
- (ii) La composition en pourcentage de cette surface agricole entre terres cultivées hors prairies temporaires r_{TC1} , prairies temporaires r_{TC2} et prairies permanentes r_P . Cette dernière

Ressources		PH	F syn	TC	P	E	Atm	Hyd	Ext
Fertilisants									
	Eng. syn.								
	Déj. hum.								
	Déj. ani.								
	Dépôt								
	Fix. sym.								
	Pertes								
Végétaux									
	Culture								
	Prairies								
	NAI								
Animaux									
	C								
	NC								
Emplois		PH	F syn	TC	P	E	Atm	Hyd	Ext
Fertilisants									
	Eng. syn.								
	Déj. hum.								
	Déj. ani.								
	Dépôt								
	Fix. sym.								
	Pertes								
Végétaux									
	Culture								
	Prairies								
	NAI								
Animaux									
	C								
	NC								

TABLE 1.6 – Tables de possibilité des emplois et des ressources. PH : population humaine ; F syn : fertilisation synthétique ; TC : terres cultivées ; P : prairies ; E : élevage ; Atm : atmosphère ; Hyd : hydrosphère ; Ext : extérieur ; eng. syn. : engrais synthétiques ; déj. hum. : déjections humaines ; déj. ani. : déjections animales ; dépôt : dépôt atmosphérique ; fix. sym. : azote fixé par fixation symbiotique ; pertes : pertes par lessivage ; culture : produits de culture ; prairies : produits des prairies naturelles ; NAI : nourriture animale importée ; C : produits animaux comestibles ; NC : produits animaux non-comestibles.



Pour alléger le diagramme, on n'a pas fait figurer les différents flux entrants et sortants de l'extérieur, à part le flux de nourriture animale importée.

Pour alléger le diagramme, on n'a pas fait figurer les différents flux entrants et sortants de l'extérieur, à part le flux de nourriture animale importée.

FIGURE 1.3 – Diagramme de Sankey de possibilité. Les secteurs sont en carré et les produits en cercle. La légende est la même que dans la table 1.6, si ce n'est qu'on a fusionné les produits azote fixé par fixation symbiotique et dépôt atmosphérique.

Pour alléger le diagramme, on n'a pas fait figurer les différents flux entrants et sortants de l'extérieur, à part le flux de nourriture animale importée.

Catégorie	Param.	Unité	Rang
Surface agricole	Surface agricole utilisée	ha	1
	Composition	%	2
Plan de culture	Plan de culture	%	34
Population humaine	Taille de la population	M d'hab	1
	Taux d'urbanisation	%	1
	Quantité de protéines ingérées	kgN/hab	1
	Origine des protéines ingérées	%	2
Fertilisation synthétique	Épandage	kgN/ha	2
Cheptel	Taille des cheptels	Têtes	6
Total			50

TABLE 1.7 – Le rang désigne le rang de la famille de paramètres, c’est-à-dire le nombre minimal d’informations dont on a besoin. Par exemple, comme il y a 35 productions végétales différentes issues des terres cultivées, le plan de culture contient 35 paramètres. Mais dans la mesure où la somme de ces paramètres doit valoir 1, cela réduit le rang de 1 qui est donc de 34.

distinction au sein des prairies va permettre de déterminer les flux de déjections animales vers le sol.

Le plan de culture

À partir de l’équation de rendement (1.4), on est en mesure de déterminer la production végétale globale en masse d’azote modulo la résolution d’un problème de circularité du raisonnement. Mais cela ne donne pas d’information sur la quantité produite pour chaque végétal. Or, que ce soit pour étudier la ration alimentaire des animaux, la composition de l’assiette humaine ou tout simplement pour avoir des précisions sur la place de tel ou tel végétal, on a besoin, à un certain niveau de détail, de connaître les quantités produites par les terres cultivées.

Pour ce faire, on se donne comme paramètre le plan de culture, c’est-à-dire la part de chaque production végétale dans la production globale des terres cultivées, en masse de matière sèche. Autrement dit, si on note $cult$ l’ensemble des productions végétales issues des terres cultivées, on appelle plan de culture une famille $(r_i)_{i \in cult}$ de réels entre 0 et 1 telle que $\sum_{i \in cult} r_i = 1$. On raisonne en matière sèche dans la mesure où c’est l’unité la plus courante qui permet de comparer toutes les productions végétales.

La population humaine et le régime alimentaire

À l’instar de ce qu’on a présenté dans la section 1.2.1, on se donne ici cinq paramètres : la taille de la population en nombre d’habitants que l’on note hab , le taux d’urbanisation en pourcentage que l’on note urb et qui joue sur la proportion des déjections qui sont recyclées, la quantité globale de protéines ingérées par habitant par an en kgN par tête que l’on note $alim$ et l’origine de ces protéines en pourcentage - soit d’origine végétale r_{veg} , soit d’origine animale r_{ani} ¹³.

La fertilisation synthétique

On se donne ici deux paramètres, un pour les terres cultivées - la quantité épandue par hectare (en kgN par ha) que l’on note syn_{TC} - et un pour les prairies - idem, que l’on note syn_P .

13. La somme $r_{veg} + r_{ani} \leq 1$ car on rappelle que dans les protéines animales, on ne compte pas celles issues des produits de la mer.

Produit	Secteur de destination	Formule
Engrais synthétiques	Terres cultivées	$SAU.(r_{TC1} + r_{TC2}).syn_{TC}.(1 - vol_{TC})$
Engrais synthétiques	Prairies	$SAU.r_P.syn_P.(1 - vol_P)$
Engrais synthétiques	Atmosphère	$SAU.((r_{TC1} + r_{TC2}).syn_{TC}.vol_{TC} + r_P.syn_P.vol_P)$

TABLE 1.8 – Détermination des flux d’engrais synthétiques

Le cheptel

Dans la section 1.2.2, on a vu que l’on disposait d’un certain nombre de données sur les produits animaux et les déjections animales : production annuelle, composition de la carcasse, teneur en azote, production de déjections, etc. Il est donc possible, à partir de la seule information du nombre de têtes dans chacun des cheptels et de ces données, de reconstruire l’ensemble des flux qui passent par ce secteur. On note $elev = \{bov; ovi; cap; por; vol; equ\}$ l’ensemble des 6 cheptels et pour $i \in elev$, on note $chep_i$ la taille du cheptel, en nombre de têtes.

1.3.3 La détermination des flux

On a maintenant une structure - des secteurs, des produits et des flux possibles de produits entre ces secteurs - et une grille de paramètres modifiables : il reste à détailler comment on exploite ces informations en calculant la valeur des flux. Pour effectuer ces calculs, on va faire intervenir des quantités numériques que l’on a appelées des indicateurs. Ils sont fondamentaux pour que le modèle fonctionne mais ce ne sont pas des quantités que l’on peut faire varier au moment de l’utilisation du modèle : elles sont fixées en amont et dépendent du contexte environnemental ou technique dans lequel la modélisation intervient. On différencie bien ces deux types de quantités à l’aide d’un code couleur : **rouge** pour les indicateurs, **bleu** pour les paramètres modifiables.

On va présenter ces calculs dans l’ordre des produits : dans un premier temps, on va détailler le calcul des flux de fertilisants vers le sol - terres cultivées et prairies -, puis celui des flux de produits végétaux sortant du sol et leur destination et enfin, les flux de produits animaux et leur destination.

Les flux de fertilisants

Les engrais synthétiques proviennent du secteur fertilisation synthétique et sont destinés à trois secteurs - les terres cultivées, les prairies et l’atmosphère. On a deux paramètres syn_{TC} et syn_P . On a également besoin de deux indicateurs : le taux de volatilisation, en pourcentage, qui quantifie quelle part des engrais synthétiques épandus sur le sol se volatilise dans l’atmosphère. On dispose d’un taux de volatilisation pour les terres cultivées vol_{TC} et d’un taux de volatilisation pour les prairies vol_P . Comme on a un équilibre matière sur les engrais synthétiques, on n’a pas besoin de calculer *a priori* la quantité d’engrais synthétiques sortant du secteur fertilisation synthétique : ce flux est déterminable. La table 1.8 résume les calculs.

Les déjections humaines proviennent du secteur population humaine et sont destinées à deux secteurs - les terres cultivées et l’hydrosphère. À partir des paramètres hab et $alim$, on connaît la quantité globale d’azote entrant dans la population humaine. Comme on a un équilibre matière sur ce secteur, on connaît la quantité globale sortante. Donc si on détermine la quantité qui est épandue sur les terres cultivées, on connaîtra la quantité qui arrive dans l’hydrosphère. On a alors besoin de deux indicateurs : le taux de recyclage en pourcentage des déjections humaines à la ville r_{urb} et celui à la campagne r_{rur} . La table 1.9 résume le calcul.

Les déjections animales proviennent du secteur élevage et sont destinées à trois secteurs - les terres cultivées, les prairies et l’atmosphère. Il y a donc deux partages pour l’azote contenu dans les déjections animales : le partage entre celui qui finit dans le sol et celui qui se volatilise

Produit	Secteur de destination	Formule
Déjections humaines	Terres cultivées	$hab.alim.(urb.r_{urb} + (1 - urb).r_{rur})$

TABLE 1.9 – Détermination des flux de déjections humaines

Secteur d'origine j	Produit	Formule
$i \in elev$	$j \in dejani$	$chep_i.dej_i.typ_{i,j}$

TABLE 1.10 – Détermination des flux de déjections animales - table ressources

et le partage entre celui qui finit dans les terres cultivées et celui qui finit dans les prairies. Pour quantifier ces deux partages, on a besoin de trois catégories d'indicateurs : les productions de déjections pour les différents cheptels, la répartition de ces déjections entre fumier, lisier et déjections directement déposées en extérieur, et enfin le taux de volatilisation de ces déjections dans l'atmosphère selon le cheptel et le type de déjections.

Pour $i \in elev$, on note dej_i la quantité excrétée par tête de bétail du cheptel i , en kgN par an¹⁴. On note $dejani = \{fum; lis; ext\}$ l'ensemble des types de déjections animales et pour $i \in elev, j \in dejani$, on note respectivement $typ_{i,j}$ et $vol_{i,j}$ la part en pourcentage des déjections du cheptel i qui sont de type j et la part des déjections du cheptel i de type j qui se volatilise dans l'atmosphère.

Cela permet déjà d'évaluer pour chaque type de déjections, le flux sortant de chaque cheptel comme on le voit dans la table 1.10

Concernant la destination de flux, on sait que le fumier et le lisier ne sont épandus que sur les terres cultivées. En revanche, les déjections déposées directement en extérieur peuvent l'être sur les prairies temporaires - c'est-à-dire sur les terres cultivées - ou permanentes au moment du pâturage. Pour distinguer ces deux flux, on compare la part relative des prairies permanentes et des prairies temporaires grâce à la quantité $\frac{r_X}{r_{TC2} + r_P}$ où X peut désigner $TC2$ ou P .

Pour le dépôt atmosphérique, on mobilise un indicateur à l'hectare, en kgN/ha, que l'on note dep . La formule en découle simplement comme on le voit dans la table 1.12. Comme on a un équilibre matière sur le dépôt atmosphérique, le flux de dépôt atmosphérique sortant de l'atmosphère est déterminable.

L'azote fixé par fixation symbiotique provient de l'atmosphère et est destiné aux terres cultivées et aux prairies. On ne peut pas déterminer ce flux par une formule comme les flux précédents, car on ne dispose pas d'indicateurs libres mais d'une contrainte linéaire reliant la quantité d'azote fixé par fixation symbiotique à la production de certains végétaux. En notant $Y_{gra}^N, Y_{fou}^N, Y_P^N$ respectivement la production de légumineuses graines, de légumineuses fourragères et la production des prairies naturelles en kgN, la contrainte est

$$sym_P = 0,3675.Y_P^N \quad (1.5)$$

$$sym_{TC} = 1,23.Y_{gra}^N + 1,47.Y_{fou}^N \quad (1.6)$$

14. On a vu dans la section 1.2.2 que l'on disposait des quantités excrétées à un niveau de détail supérieur à celui du cheptel. Dans la pratique, on agrège ces quantités grâce à une moyenne pondérée.

Produit j	Secteur de destination	Formule
$j = fum, lis$	Terres cultivées	$\sum_{i \in elev} chep_i.dej_i.typ_{i,j} \cdot (1 - vol_{i,j})$
$j = ext$	Terres cultivées	$\frac{r_{TC2}}{r_{TC2} + r_P} \cdot \sum_{i \in elev} chep_i.dej_i.typ_{i,j} \cdot (1 - vol_{i,j})$
$j = ext$	Prairies	$\frac{r_P}{r_{TC2} + r_P} \cdot \sum_{i \in elev} chep_i.dej_i.typ_{i,j} \cdot (1 - vol_{i,j})$
$j = fum, lis, ext$	Atmosphère	$\sum_{i \in elev} chep_i.dej_i.typ_{i,j}.vol_{i,j}$

TABLE 1.11 – Détermination des flux de déjections animales - table emplois

Produit j	Secteur de destination	Formule
Dépôt atmosphérique	Terres cultivées	$dep.SAU.(r_{TC1} + r_{TC2})$
Dépôt atmosphérique	Prairies	$dep.SAU.r_P$

TABLE 1.12 – Détermination du dépôt atmosphérique

où sym_P, sym_{TC} est la quantité d'azote fixé par fixation symbiotique respectivement sur les prairies et les terres cultivées. Comme on a un équilibre matière sur l'azote fixé par fixation symbiotique, le flux sortant de l'atmosphère est déterminable. Précisons tout de suite que $Y_{gra}^N, Y_{fou}^N, Y_P^N$ ne sont pas des indicateurs : ce sont des flux du modèle, que l'on va déterminer dans la section suivante.

Les derniers flux de fertilisants non-estimés sont les pertes par lessivage. Mais on s'appuie là sur l'équilibre matière des secteurs prairies et terres cultivées : comme on connaît l'ensemble des flux qui y entrent et tous les flux de produits végétaux qui en proviennent, les seuls autres flux qui sortent de ces secteurs - les pertes par lessivage - sont déterminables.

Les flux de produits végétaux

Les produits végétaux proviennent des terres cultivées et des prairies. On a une famille de paramètres $(r_i)_{i \in cult}$, le plan de culture, qui donne la part de chaque production végétale dans la production végétale globale, en matière sèche. L'unité de notre modèle est la masse d'azote, donc il faut convertir ce plan de culture en matière sèche en un plan de culture en azote $(r_i^N)_{i \in cult}$. Pour $i \in cult$, on a la formule de conversion suivante :

$$r_i^N = \frac{r_i \cdot N_i}{\sum_{j \in cult} r_j \cdot N_j} \quad (1.7)$$

où $(N_i)_{i \in cult}$ désigne la famille des teneurs en azote (en kgN par quintal de matière sèche) des productions végétales - c'est un indicateur. À partir de ce plan de culture en azote, on peut déterminer le flux sortant de chaque végétal à partir de la production végétale globale.

On a vu dans la section 1.2.3 l'équation (1.4) qui relie la production végétale globale à la fertilisation globale. Mais dans la mesure où la fixation symbiotique relie la fertilisation globale à la production végétale globale, on a un problème de circularité du raisonnement que l'on va essayer de résoudre dans un sens différent du modèle GRAFS. Précisons les termes : si on note $Y_{gra}^N, Y_{fou}^N, Y_P^N$ respectivement la production de légumineuses graines, de légumineuses fourragères et des prairies (en masse d'azote), alors on a

$$F_{s,TC} = 1,23.Y_{gra}^N + 1,47.Y_{fou}^N \quad (1.8)$$

$$F_{s,P} = 0,3675.Y_P^N \quad (1.9)$$

où $F_{s,X}$ désigne la quantité d'azote fixé par fixation symbiotique sur les terres cultivées (si $X = TC$) ou sur les prairies (si $X = P$). Donc, si on note r_{gra}^N, r_{fou}^N la part respectivement des légumineuses graines et des légumineuses fourragères dans la production végétale globale des terres cultivées, on obtient

$$F_{s,TC} = (1,23.r_{gra}^N + 1,47.r_{fou}^N).Y^N. \quad (1.10)$$

Donc, en posant $\gamma_{TC} = 1,23.r_{gra}^N + 1,47.r_{fou}^N$ et $\gamma_P = 0,3675$, on a $F_{s,X} = \gamma_X Y_X^N$ où Y_X^N désigne la production végétale globale des terres cultivées (si $X = TC$) ou des prairies (si $X = P$). Or, $F_X = F_{s,X} + F_{0,X}$, avec $F_{0,X}$ la quantité d'azote apporté à X hors fixation symbiotique. On obtient alors

$$F_X = F_{X,0} + \gamma_X Y_X^N. \quad (1.11)$$

Secteur d'origine	Produit	Formule
Terres cultivées	$i \in cult$	$r_i^N \cdot Y_{TC}^N$
Prairies	Produits des prairies naturelles	Y_P^N

TABLE 1.13 – Détermination des flux de produits végétaux - table ressources

Produit	Secteur de destination	Formule
Produits végétaux	Population humaine	$hab.alim.r_{veg}$

TABLE 1.14 – Détermination des flux de produits végétaux - table emplois

L'équation de rendement (1.4) devient donc, en effectuant la décomposition (1.11) :

$$\gamma_X Y_X^{N^2} + ((1 - \gamma_X) Y_{maxX} + F_{0,X}) Y_X^N - F_{0,X} Y_{maxX} = 0; \quad (1.12)$$

autrement dit, la production végétale globale est la solution d'une équation polynômiale de degré 2. D'un point de vue théorique, remarquons deux choses :

- (i) Le discriminant Δ vaut $((1 - \gamma_X) Y_{maxX} + F_{0,X})^2 + 4\gamma_X F_{0,X} Y_{maxX} > 0$ donc le polynôme admet deux racines réelles ;
- (ii) L'ordonnée à l'origine, $-F_{0,X} Y_{maxX}$ est négative donc une racine est négative et l'autre est positive.

En d'autres termes, l'équation (1.12) admet deux solutions, l'une négative et l'autre positive égale à la production végétale Y_X^N . Ainsi, si l'on connaît Y_{maxX} , $F_{0,X}$ et γ_X , on peut déterminer Y_X^N : Y_{maxX} est déterminé par estimation à partir du modèle (1.4), $F_{0,X}$ par ce qu'on a vu précédemment et γ_X à partir du plan de culture.

En appliquant le plan de culture converti en azote à la production végétale globale, on peut retrouver la production de chaque végétal. La table 1.13 synthétise ces calculs.

Les produits végétaux ont pour destination la population humaine, l'élevage et l'extérieur. Concernant la population humaine, on connaît le nombre d'habitants et la consommation moyenne par habitant. On peut donc déterminer le flux de produits végétaux entrant dans la population humaine comme dans le tableau 1.14 mais n'ayant pas plus d'information sur la composition de l'assiette moyenne - quels végétaux sont consommés ? Quels produits animaux ? -, on ne peut pas les détailler davantage. C'est une piste d'amélioration de notre modèle.

Concernant l'élevage, on a vu dans la section 1.2.2 comment le modèle GRAFS déterminait l'alimentation animale et les problèmes que cela peut poser. On sera amené, par la suite, à résoudre certains de ces problèmes. Mais dans un premier temps, on va reprendre les résultats du modèle GRAFS. En effet, comme on ne peut pas implémenter une méthode par saturation successive dans le formalisme d'une AFM qui ne comprend au plus que les relations affines, on ne va considérer que les résultats finaux de GRAFS, c'est-à-dire, en reprenant les notations de l'équation (1.1), l'ingestion globale I , l'ingestion de produits de culture hors blé $I_{TC, hb}$, l'ingestion de produits des prairies naturelles I_P et l'ingestion de nourriture animale importée I_{Ext} . À partir de ces quatre quantités, on calcule trois indicateurs de notre modèle que l'on note $ing_{TC, hb}$, ing_P et ing_{Ext} qui désignent les parts respectives des produits de culture hors blé, des produits des prairies naturelles, et de la nourriture animale importée dans l'ingestion des animaux d'élevage. Ces termes sont donc égaux à

$$ing_X = \frac{I_X}{I} \quad (1.13)$$

où $X = TC, hb; P; Ext$. Dans notre modèle, on a un équilibre matière pour le secteur de l'élevage. Donc, le flux de végétaux entrant dans l'élevage, que l'on note $alimani$ est égale à la somme des

flux sortants de l'élevage, c'est-à-dire

$$alimani = \sum_{i \in elev} Y_i + exc_i \quad (1.14)$$

où exc_i est égal à la formule de la table 1.10 et Y_i désigne l'ensemble des produits animaux du cheptel i que l'on va déterminer dans la section 1.3.3. Autrement dit, si on note $alimani_{TC, hb}$, $alimani_P$, $alimani_{Ext}$ respectivement les quantités de produits de culture hors blé, de produits des prairies naturelles et de nourriture animale importée entrant dans l'élevage, ces trois flux sont déterminables grâce aux contraintes linéaires suivantes

$$alimani_X = \text{ing}_X \cdot \sum_{i \in elev} Y_i + exc_i. \quad (1.15)$$

Soulignons à nouveau qu'en nous appuyant uniquement sur le modèle GRAFS, on ne réussit à décrire les flux entrants dans l'élevage qu'à un niveau très agrégé : on ne distingue pas la ration alimentaire des différents cheptels¹⁵ et on ne distingue pas le contenu de cette ration si ce n'est qu'en opposant prairies et terres cultivées hors production de blé. C'est, là encore, une piste d'amélioration de notre modèle et ce n'est pas étonnant qu'il faille proposer des améliorations sur la destination des produits végétaux. En effet, le modèle GRAFS sur lequel on s'appuie cherche surtout à quantifier les pollutions de l'environnement par l'azote et donc apporte beaucoup de détails sur l'azote qui est apporté au sol et qui peut finir dans l'atmosphère ou dans l'hydrosphère et moins sur l'azote qui en est extrait par les récoltes ou le pâturage dans la mesure où il suffit de quantifier à un niveau global l'azote extrait du sol pour en déduire les quantités volatilisées ou lessivées.

Les flux de produits animaux

La dernière catégorie de flux que l'on doit déterminer est la catégorie des flux de produits animaux. Il y a deux catégories de flux : les flux de produits comestibles et ceux de produits non-comestibles. Ces deux flux sortent de l'élevage mais seul le flux des produits comestibles a pour destination la population humaine et l'extérieur. Comme paramètres, on dispose d'un côté de la taille de chaque cheptel et de l'autre, de la quantité de protéines animales mangées par les humains. Pour faire le lien entre le secteur élevage et le secteur population humaine, on a donc besoin d'un certain nombre d'indicateurs de production.

Pour $i \in elev$, on note y_i et y_i^c respectivement la productivité viande en masse équivalent carcasse par tête de bétail et la productivité co-produit (lait, oeufs) en masse par tête de bétail du cheptel i . Pour la viande, elle est divisée en plusieurs parties : viande désossée, abats, graisse comestible, peau, sang, os, boyaux, tête et pied, graisse non-comestible. On note $viande$ l'ensemble de ces parties et pour $j \in viande$, on note $part_j$ la masse de la partie j par rapport à la masse de la carcasse et N_j la teneur en azote de la partie j en pourcentage - on note de même N_{lt} , N_{oe} la teneur en azote du lait et des œufs. Ces indicateurs ont déjà été donnés pour les bovins dans les tables 1.1 et 1.2. Pour les autres cheptels, on place des tables similaires en annexe. On peut donc déterminer les flux de produits animaux sortant de l'élevage dans la table 1.15.

Le flux de produits animaux comestibles entrant dans la population humaine est, à l'instar du flux de produits végétaux, déterminé par les paramètres sur la population humaine et résumé dans la table 1.16.

Tout au long de cette détermination des flux de notre AFM, nous n'avons pas du tout déterminé les flux de produits vers l'extérieur ou depuis l'extérieur, sauf pour la nourriture animale importée. C'est un angle mort de notre modèle et nous pourrions réfléchir à comment

15. Plus, en reprenant les résultats de la méthode par saturation successive, on fait l'hypothèse implicite que la ration alimentaire des animaux pouvant pâturer est autant que faire se peut constituée de pâturage.

Secteur d'origine	Produit	Formule
$i \in elev$	$j \in viande$	$chep_i \cdot y_i \cdot part_j \cdot N_j$
$i \in elev$	$j = lt, oe$	$chep_i \cdot y_i^c \cdot N_j$

TABLE 1.15 – Détermination des flux de produits animaux - table ressources

Produit	Secteur de destination	Formule
Produits animaux comestibles	Population humaine	$hab \cdot alim \cdot r_{ani}$

TABLE 1.16 – Détermination des flux de produits animaux - table emplois

l'intégrer davantage. Cela suppose d'intégrer les déterminations du commerce entre différents territoires, un pan de de la filière agricole que nous n'avons pas étudié mais qui ont fait l'objet de travaux dans l'équipe STEEP.

1.4 Évaluation de cohérence

À partir du modèle GRAFS introduit dans la section 1.2, on a introduit dans la section 1.3 une AFM qui permet de décrire le fonctionnement de la filière agricole d'un territoire et de construire des scénarios d'alternatives. Il s'agit maintenant d'évaluer *a posteriori* la qualité de notre modèle. On va procéder en le confrontant au modèle GRAFS dont il est inspiré.

On pourrait le comparer à la description de l'agriculture française contemporaine faite dans [Billen et al., 2018]. Mais en procédant de la sorte, on ne vérifierait rien d'autre que l'absence d'erreurs de calcul dans la mesure où c'est sur cette description et les liens qui y existent entre les variables que l'on s'est appuyé pour construire notre modèle. Dans [Billen et al., 2018], les auteurs proposent également deux scénarios de l'agriculture française en 2040. Ces scénarios sont des ensembles d'hypothèses à partir desquelles ils calculent les quantités dont ils ont besoin et pour implémenter ces hypothèses, ils ont besoin de modifier certains calculs qui avaient cours dans la description actuelle. En traduisant ces hypothèses dans le langage de notre grille de paramètres modifiables puis en comparant les résultats d'un des scénarios obtenus par GRAFS et du scénario équivalent obtenu par l'AFM, on pourra constater si notre modèle reproduit les résultats du modèle GRAFS ou s'il s'en éloigne et pourquoi.

1.4.1 Les scénarios OS et ARD

Dans [Billen et al., 2018], les auteurs distinguent deux scénarios envisageables pour l'agriculture française en 2040. Ces scénarios sont plus des idéaux-types très contrastés que des projections vraisemblables. Il s'agit de faire ressortir les caractéristiques et les effets de chacune des organisations de la filière agricole.

Le premier scénario, « ouverture et spécialisation » (OS), poursuit la tendance actuelle, celle qui s'est entamée dans les années 1950 avec l'intégration de l'agriculture française au marché mondial et, parallèlement, la grande spécialisation des régions agricoles (grandes plaines céréalières vs. régions d'élevage). La production est conventionnelle, avec le recours aux engrais de synthèse pour fertiliser le sol et le régime alimentaire ne change pas beaucoup, voire accorde une plus large place à la consommation de produits de l'élevage (viande, lait). Le second scénario, « autonomie, reconnexion et démitarianisme » (ARD), présente trois grandes ruptures avec la situation actuelle. D'abord, les pratiques alimentaires évoluent avec une réduction de la consommation des produits d'élevage et une plus forte consommation de produits biologiques. Ces changements dans la consommation provoquent ensuite le développement de l'agriculture biologique (donc la baisse de l'utilisation d'engrais de synthèse et de pesticides) et enfin la déspecialisation des territoires (fin des grandes monocultures et des grandes régions d'élevage, mais

mélange des deux).

1.4.2 Les hypothèses du scénario ARD

On va confronter notre modèle au scénario ARD. Dans le formalisme du modèle GRAFS, il est implémenté grâce à sept hypothèses : une sur la démographie (H1), une sur l'alimentation (H2), une sur la surface agricole utilisée (H3), une sur la fertilisation synthétique (H4), une sur le plan de culture (H5), une sur le bétail (H6) et une sur la surface des prairies naturelles (H7).

Pour la démographie - hypothèse (H1) -, les auteurs reprennent les projections de l'INSEE pour 2040 mais en redistribuant un million d'habitants depuis Paris vers l'Est du pays. Du point de vue de l'alimentation - hypothèse (H2) -, la quantité globale de protéines ingérées diminue ainsi que la quantité de protéines animales tandis que la quantité de protéines végétales augmente - ces quantités passent respectivement de 6,6 à 5,6, de 3,7 à 1,8 et de 2,3 à 3,6 par kgN par tête et par an : c'est la généralisation du régime démitarien. Dans chaque région, la surface agricole utilisée est la même qu'actuellement - hypothèse (H3) - et il n'y a plus de fertilisation synthétique dans la mesure où l'agriculture biologique s'est généralisée - hypothèse (H4). Cette généralisation modifie également les plans de culture qui doivent intégrer des rotations de culture compatibles avec ce mode de production - hypothèse (H5).

Quant aux hypothèses (H6) et (H7), qui ont pour objectif de quantifier la reconnexion (« R » de ARD) entre les activités de culture et d'élevage et l'autonomie (« A » de ARD) des territoires, elles font l'objet d'une détermination conjointe. On cherche à calculer le couple (LU, P) , où LU est la taille du bétail, en nombre d'UGB, et P est la surface des prairies naturelles, en hectares, sachant que ce couple suit quatre contraintes. D'abord, le chargement¹⁶ ne doit pas être inférieur à 0,5 dans chaque région. Autrement dit, on a

$$\frac{LU}{SAU} \geq 0,5 \quad (1.16)$$

où SAU est la surface agricole utilisée, en hectares, et est déterminée par l'hypothèse (3). Cela garantit que dans toutes les régions, il y a une activité d'élevage et pas uniquement des cultures - c'est la reconnexion. Ensuite, la surface des prairies ne doit pas être moindre que ce qu'elle aujourd'hui à savoir P_{act} . Ainsi,

$$P \geq P_{act}. \quad (1.17)$$

Ensuite, l'autonomie des territoires impose, d'une part, qu'il n'y ait pas d'importation de nourriture animale, d'autre part, que les prairies fournissent au moins 30% de l'alimentation animale, c'est-à-dire que

$$I_{Ext} = 0, \quad (1.18)$$

$$\frac{I_P}{I} \geq 0,3 \quad (1.19)$$

en reprenant les notations de l'équation (1.1). Enfin, le surplus d'azote des terres cultivées, c'est-à-dire la différence entre l'azote apporté au sol et l'azote extrait par les récoltes et le pâturage, ne doit pas dépasser 40 kgN par hectare, autrement dit

$$F_{TC} - Y_{TC}^N \leq 40. \quad (1.20)$$

La contrainte (1.18) revient à dire que la nourriture animale disponible sur place - la production des prairies naturelles Y_P^N et celles des terres cultivées hors blé que l'on note $Y_{TC,hb}^N$ - suffit à nourrir les bêtes et donc qu'elle est au moins supérieure à l'ensemble de ce qui est produit par

16. Le nombre d'UGB par hectare de surface agricole utilisée

l'élevage - les déjections et les produits animaux - comme le secteur de l'élevage est équilibré. En reprenant les notations de l'équation (1.14), la contrainte (1.18) est alors équivalente à

$$Y_P^N + Y_{TC,hb}^N \geq \sum_{i \in elev} Y_i + exc_i. \quad (1.21)$$

L'équilibre du secteur de l'élevage donne aussi une expression équivalente de la contrainte (1.19) :

$$Y_P^N \geq 0,3 \sum_{i \in elev} Y_i + exc_i. \quad (1.22)$$

Les inégalités (1.21) et (1.22) sont équivalentes à

$$\sum_{i \in elev} Y_i + exc_i \leq \min \left(\frac{Y_P^N}{0,3}, Y_P^N + Y_{TC,hb}^N \right). \quad (1.23)$$

Or, comme on va le voir, le scénario ARD fait suffisamment d'hypothèses pour que tous les termes de cette inégalité dépendent uniquement du couple (LU, P) . On va le montrer successivement pour le terme de gauche et le terme de droite.

Pour le terme de gauche, le scénario ARD suppose qu'en 2040, la composition des animaux d'élevage en UGB par cheptel et par catégorie au sens de la table B.1, c'est-à-dire la proportion de chaque catégorie en UGB dans le nombre total d'UGB, est la même que ce qu'elle est actuellement - et cette dernière est déterminée grâce à la comptabilité agricole. Ainsi, en appliquant ces proportions à LU , on a la taille de chaque catégorie en UGB dans le scénario ARD. À l'aide de la table de conversion C.1, on retrouve le nombre de têtes de bétail pour chaque catégorie. D'une part, avec la table B.1, on calcule un taux ρ_1 tel que $\sum_{i \in elev} exc_i = \rho_1 LU$. D'autre part, avec la table A.1, on calcule un taux ρ_2 tel que $\sum_{i \in elev} Y_i = \rho_2 LU$. Autrement dit, le terme de gauche de l'inégalité (1.23) vaut $(\rho_1 + \rho_2)LU$.

Quant au terme de droite, pour calculer la production des terres cultivées hors blé et la production des prairies naturelles, le scénario ARD utilise l'équation de rendement (1.4). D'un côté, hypothèse est faite que le paramètre Y_{max} est le même qu'actuellement. D'un autre côté, comme on le montre ensuite, les différentes masses de fertilisants apportées au sol ne dépendent que de (LU, P) et des hypothèses précédentes.

Premièrement, les engrais synthétiques sont déterminés par l'hypothèse (4). Deuxièmement, les déjections humaines (pour les terres cultivées) le sont par l'hypothèse (2). Troisièmement, on suppose que la quantité d'azote apporté par hectare par déposition atmosphérique que l'on note dep est la même qu'actuellement et qu'elle est connue : en la multipliant par P et $SAU - P - SAU$ découlant de l'hypothèse (3) -, on a une expression du dépôt atmosphérique respectivement sur les prairies et sur les terres cultivées.

Quatrièmement, en combinant le raisonnement précédent sur les déjections animales avec les quantités renseignées dans les tables B.2 et B.3, on peut déterminer ρ_P et ρ_{TC} deux taux tels que $\rho_P LU$ et $\rho_{TC} LU$ soient respectivement la quantité de déjections animales épandues sur les prairies et sur les terres cultivées.

Cinquièmement, l'azote fixé par fixation symbiotique fait l'objet d'une détermination *a priori*. Pour les prairies naturelles, on suppose que la quantité d'azote apporté au sol par hectare par fixation symbiotique, que l'on note fix_P est la même qu'actuellement - elle est déterminée à partir de la production des prairies naturelles et du taux de fixation 0,3675. Il suffit alors de multiplier fix_P et P pour obtenir la quantité globale issue de la fixation symbiotique. Pour les terres cultivées, on suppose que le rendement à l'hectare des productions de fabacées - légumineuses graines et légumineuses fourragères - est la même qu'actuellement - elle est déterminée à partir de la comptabilité agricole. À partir des taux de fixation 1,23 et 1,47 et de la quantité $SAU - P$, on obtient alors la quantité globale issue de la fixation symbiotique. La masse de

chaque fertilisant est connu : la masse globale apportée au sol est donc connue et par l'équation (1.4), Y_P^N et Y_{TC}^N sont connus. Pour trouver $Y_{TC,hb}^N$, il suffit d'utiliser le plan de culture déterminé par l'hypothèse (5).

On a donc déterminé quatre fonctions $f_{TC}, y_{TC}, y_{TC,hb}, y_P$ tels que $F_{TC} = f_{TC}(LU, P), Y_X^N = y_X(LU, P)$ et $Y_{TC,hb}^N = y_{TC,hb}(LU, P)$. Autrement dit, les contraintes (1.23) et (1.20) se réécrivent

$$(\rho_1 + \rho_2)LU \leq \min \left(\frac{y_P(LU, P)}{0,3}, y_P(LU, P) + y_{TC,hb}(LU, P) \right), \quad (1.24)$$

$$40 \geq f_{TC}(LU, P) - y_{TC}(LU, P). \quad (1.25)$$

Les quatre contraintes (1.16), (1.17), (1.24) et (1.25) définissent un ensemble de couples (LU, P) : on retient parmi ces couples celui qui maximise LU ¹⁷ afin d'avoir le plus de bétail dans les limites fixées ci-dessus.

1.4.3 Le problème de la fixation symbiotique

Dans la section 1.4.2, on a vu comment était déterminée *a priori* la fixation symbiotique pour pouvoir calculer les quantités de végétaux produits. Cela appelle deux remarques.

Concernant les prairies naturelles, les auteurs font le choix de supposer connue et constante dans le temps la quantité d'azote fixé par hectare par fixation symbiotique. De la sorte, en reprenant les notations de l'équation (1.5) et de la section 1.4.2, on a

$$sym_P = fix_P.P \quad (1.26)$$

En reprenant les notations de l'équation (1.11), on a donc

$$Y_P^N = \frac{Y_{maxP}(fix_P.P + F_{0,P})}{Y_{maxP} + fix_P.P + F_{0,P}} \quad (1.27)$$

et donc

$$\frac{sym_P}{Y_P^N} = \frac{Y_{maxP}fix_P^2.P^2 + Y_{maxP}fix_P.F_{0,P}P}{fix_P.P + Y_{maxP} + F_{0,P}}. \quad (1.28)$$

La fertilisation hors fixation symbiotique $F_{0,P}$ est la somme des déjections animales et du dépôt atmosphérique. En reprenant les calculs de la section 1.4.2, cela donne $F_{0,P} = \rho_P LU + dep.P$ et donc

$$\frac{sym_P}{Y_P^N} = \frac{Y_{maxP}fix_P(fix_P + dep).P^2 + Y_{maxP}fix_P\rho_P.LU.P}{(fix_P + dep).P + \rho_P.LU + Y_{maxP}} \quad (1.29)$$

Pour les prairies, on savait jusque-là que le terme de gauche de l'équation (1.28), à savoir la quantité d'azote apporté par fixation symbiotique par rapport à la production, valait 0,3675 et, *a priori*, cette quantité n'était déterminée que par leur composition végétale - la proportion de fabacées parmi les plantes qui y poussent. Dans le scénario ARD, non seulement cette quantité n'est plus fixe, elle devient déterminée par le modèle elle-même, mais en plus elle est déterminée par le couple (LU, P) - en effet, les quantités Y_{maxP}, fix_P, dep sont supposées connues. Or, rien dans les contraintes qui déterminent le couple (LU, P) n'implique un quelconque changement quant à la fixation symbiotique. Tout compte fait, cela revient à faire l'hypothèse implicite que la production des prairies est en mesure de fixer plus ou moins d'azote que la quantité 0,3675 kgN par kgN sans expliquer ce qui, dans cette production, permet cela. En l'occurrence, dans le scénario ARD, il y a 0,5 kgN d'azote apporté par fixation symbiotique par kgN de production des prairies naturelles. C'est un point aveugle du scénario ARD.

¹⁷. On ne vérifie pas, ici, si l'ensemble des solutions est non-vide et si, parmi ces solutions, une seule maximise LU : dans la pratique, le scénario ARD le détermine grâce à un programme informatique. L'objectif, ici, est de restituer la logique des hypothèses du scénario ARD pour voir comment notre AFM s'en distingue.

Concernant les terres cultivées, on a bien, comme dans l'équation (1.6), que

$$sym_{TC} = 1, 23Y_{gra}^N + 1, 47Y_{fou}^N \quad (1.30)$$

mais là encore, il faut relever deux points. D'abord, le périmètre des légumineuses graines change : le soja en sort, les légumes secs *legS* et les autres protéagineux *opr* y entrent. Ensuite, Y_{gra}^N et Y_{fou}^N ne sont pas déterminés à partir de l'équation (1.4) mais à partir du plan de culture, plus particulièrement des proportions r_{gra}^N et r_{fou}^N dans lesquelles ces légumineuses sont produites, et de l'hypothèse selon laquelle les rendements à l'hectare des différents types de légumineuses sont les mêmes qu'actuellement - on les note y_{gra} et y_{fou} . Autrement dit, on a

$$sym_{TC} = (1, 23r_{gra}^N y_{gra} + 1, 47r_{fou}^N y_{fou})(SAU - P). \quad (1.31)$$

Le problème est qu'en raisonnant de la sorte, on fait l'hypothèse que le rendement à l'hectare des légumineuses ne dépend pas de la quantité d'azote que ces mêmes légumineuses participent à apporter au sol. Or, tout porte à croire que plus on laisse de la place aux légumineuses dans le plan de culture - et c'est le cas dans le scénario ARD -, plus celles-ci fixent de l'azote et participent à rendre le sol fertile et donc plus le rendement à l'hectare de ces légumineuses peut être important.

Pour les prairies comme pour les terres cultivées, la détermination de la fixation symbiotique par le scénario ARD présente donc un problème que l'on va résoudre avec l'équation de rendement modifiée (1.12).

1.4.4 Le problème de l'alimentation animale

Le couple (LU, P) détermine la ration alimentaire animale. D'abord, LU , par ρ_1 et ρ_2 , détermine les besoins globaux de l'élevage en produits végétaux. Puis, par la fonction y_P , P et LU déterminent la production des prairies naturelles et donc la quantité provenant des prairies ingérée par les animaux I_P . Enfin, par la fonction $y_{TC, hb}$, P et LU déterminent la production des terres cultivées hors blé et donc, par saturation successive, la quantité provenant des terres cultivées hors blé ingérée par les animaux $I_{TC, hb}$. Mais dans le scénario ARD, pour certaines régions, la contrainte (1.21) n'est pas tenable, par exemple si le blé occupe une place trop importante dans le plan de culture. Dans ce cas, l'ensemble des solutions du système formé par les inégalités (1.16), (1.17), (1.24) et (1.25) est vide mais le scénario ARD définit tout de même un couple (LU, P) qui ne vérifie pas, par conséquent, la contrainte (1.21). Dans ces régions, il n'y a donc pas d'équilibre du secteur de l'élevage : la masse des végétaux qui y entre est plus petite que la masse des produits animaux et des déjections qui en sort. Par conséquent, au niveau national, il n'y a pas non plus d'équilibre du secteur d'élevage.

Cela n'empêche pas le scénario ARD de produire des résultats mais dans le cadre de notre AFM, ne pas respecter *a priori* un équilibre matière est pénalisant au moment de la réconciliation et altère la qualité des résultats - le modèle va forcer l'équilibre matière et réduire à 0 les flux entrants et sortants. Dans le langage des contraintes linéaires (1.15), cela veut dire respecter l'égalité $ing_{TC, hb} + ing_P + ing_{Ext} = 1$. Pour rester dans l'idée d'autonomie des territoires du scénario ARD, on va laisser $ing_{Ext} = 0$ mais on proposera deux solutions *ad hoc* : ou bien augmenter ing_P , ou bien augmenter $ing_{TC, hb}$ ¹⁸.

18. Cela peut paraître contradictoire avec ce qu'on disait précédemment, à savoir que le territoire ne peut pas fournir, à lui seul, toute la nourriture nécessaire à l'alimentation des animaux. Mais, en réalité, les territoires où il y a des blocages sont des régions et nous raisonnons au niveau national. Autrement dit, cela revient à faire l'hypothèse que de la nourriture animale peut circuler d'une région à l'autre mais pas de l'intérieur du pays vers l'extérieur. C'est une entorse nécessaire à l'idée d'autonomie, moins importante que si on autorisait les importations de l'extérieur.

1.4.5 La paramétrisation de l'AFM

À partir de ce qu'on a dit précédemment, on est en mesure de renseigner les paramètres et les indicateurs de notre AFM respectivement dans les tables 1.17, 1.18 et 1.19, 1.20. L'étendue de l'AFM est la France toute entière et l'unité le ktN.

Remarquons que, dans le plan de culture, la part des fèves et féveroles, des pois, des autres protéagineux, des pois verts et des haricots verts est nulle. Cela vient du fait que, pour simplifier, le scénario ARD fait l'hypothèse que les légumineuses graines ne sont que de deux types : les légumes secs et les haricots secs. Notons également que notre implémentation des indicateurs $y_{vol}, y_{por}, y_{equ}, y_{vol}^c$ diffère de celle du modèle GRAFS : cela vient d'une coquille dans le programme du modèle GRAFS.

1.4.6 Qualité de la réconciliation et cohérence avec le scénario ARD

Les tableaux Excel 'Solution P.xlsx' et 'Solution TC.xlsx' contiennent l'ensemble des résultats évoqués ici.

La réconciliation permet de juger *a posteriori* de la qualité et de la cohérence des données renseignées en entrée. Dans la solution où l'on augmente ing_P que l'on appelle solution P, le nombre de sigmas n_σ ne dépasse pas 0,7 en valeur absolue ; dans la solution où on augmente ing_{TC} que l'on appelle solution TC, c'est 1,34. Ce n'est pas étonnant puisque l'on a récolté des données à la même source.

Mais on a surtout effectué cette réconciliation pour voir si l'on trouvait les mêmes résultats que [Billen et al., 2018], afin d'évaluer la capacité du formalisme de l'AFM à intégrer des expertises d'autres chercheurs. Dans la table 1.21, on compare les résultats du scénario ARD par le modèle GRAFS avec les résultats des solutions P et TC, pour les flux où l'on peut comparer. On constate que, comme on pouvait s'y attendre, les flux de fixation symbiotique diffèrent beaucoup entre le modèle GRAFS et notre AFM. Cela a une influence sur les pertes par lessivage et les productions végétales depuis les terres cultivées et les prairies. Mais, mis à part pour ces flux, les écarts sont contenus dans une fourchette raisonnable de plus ou moins 10%. Cela permet de conclure positivement, du moins pour ce test, quant à la capacité de l'AFM de mettre une expertise dans un même format.

Catégorie	Param.	Unité	Valeur
Surface agricole	Surface agricole utilisée	ha	27861297
	TC - hors prairies temporaires	%	51,0
	Prairies temporaires	%	13,8
	Prairies permanentes	%	35,1
Plan de culture	Blé	%	13,75
	Seigle	%	0,05
	Orge	%	3,78
	Avoine	%	0,17
	Maïs grain	%	4,82
	Riz	%	0,08
	Autres céréales	%	0,87
	Paille	%	6,00
	Colza	%	2,81
	Tournesol	%	2,35
	Soja	%	0,27
	Autres oléagineux	%	0,03
	Fèves et féveroles	%	0
	Pois	%	0
	Autres protéagineux	%	0
	Betterave sucrière	%	11,03
	Pommes de terre	%	3,21
	Autres racines	%	0
	Pois vert	%	0
	Haricots secs	%	7,66
	Haricots verts	%	0
	Légumes secs	%	3,19
	Fruits secs	%	0,17
	Courges et melons	%	0,97
	Choux	%	0,72
	Légumes à feuilles	%	1,51
	Fruits	%	6,33
	Olives	%	0,05
	Agrumes	%	0
	Lin	%	0,06
	Chanvre	%	0,18
	Maïs fourrage	%	0
	Choux fourragers	%	0
Luzerne et du trèfle	%	29,96	
Prairies temporaires non légumineuses	%	0	

TABLE 1.17 – Table des paramètres pour l’implémentation du scénario ARD dans le modèle AFM - 1.

Population humaine	Taille de la population	M d'hab	75,1
	Taux d'urbanisation	%	75,5
	Quantité de protéines ingérées	kgN/hab	5,6
	Protéines végétales	%	65,3
	Protéines animales		32,4
Fertilisation synthétique	Terres cultivées	kgN/ha	0
	Prairies	kgN/ha	0
Cheptel	Bovins	Têtes	11349220
	Ovins	Têtes	908429
	Caprins	Têtes	5942087
	Porcins	Têtes	6837255
	Volailles	Têtes	170433003
	Équins	Têtes	468633

TABLE 1.18 – Table des paramètres pour l'implémentation du scénario ARD dans le modèle AFM - 2.

Catégorie	Indicateur	Unité	Valeur
Flux de fertilisants	$(vol_X)_{X=P,TC}$	%	Pas nécessaire
	r_{rur}	%	9,4
	r_{urb}	%	9,4
	$(de_j)_{i \in elev}$	kgN/tête	Table B.1
	$(typ_{i,j})_{i \in elev, j \in dejani}$	%	Table B.2
	$(vol_{i,j})_{i \in elev, j \in dejani}$	%	Table B.3
	dep	kgN/ha	12,03
Flux de produits animaux	$(y_i)_{i \in elev}$	kg éq. carcasse/tête	Table A.1
	$(y_i^c)_{i \in elev}$	kg/tête	Table A.1
	$(part_j)_{j \in viande}$	%	Table A.3
	$(N_j)_{j \in viande}$	kgN/100kg	Table A.4

TABLE 1.19 – Table des indicateurs pour l'implémentation du scénario ARD dans le modèle AFM - 1.

Catégorie	Indicateur	Unité	Valeur
Flux de végétaux	Blé	kgN/100kgMS	1,95
	Seigle	kgN/100kgMS	1,76
	Orge	kgN/100kgMS	1,76
	Avoine	kgN/100kgMS	2,08
	Maïs grain	kgN/100kgMS	1,52
	Riz	kgN/100kgMS	1,07
	Autres céréales	kgN/100kgMS	1,8
	Paille	kgN/100kgMS	0,5
	Colza	kgN/100kgMS	3,5
	Tournesol	kgN/100kgMS	1,96
	Soja	kgN/100kgMS	6
	Autres oléagineux	kgN/100kgMS	3,5
	Fèves et féveroles	kgN/100kgMS	3,5
	Pois	kgN/100kgMS	3,6
	Autres protéagineux	kgN/100kgMS	3,6
	Betterave sucrière	kgN/100kgMS	0,21
	Pommes de terre	kgN/100kgMS	0,26
	Autres racines	kgN/100kgMS	0,23
	Pois vert	kgN/100kgMS	0,5
	Haricots secs	kgN/100kgMS	1,5
	Haricots verts	kgN/100kgMS	0,5
	Légumes secs	kgN/100kgMS	3,6
	Fruits secs	kgN/100kgMS	2
	Courges et melons	kgN/100kgMS	0,18
	Choux	kgN/100kgMS	0,36
	Légumes à feuilles	kgN/100kgMS	1,22
	Fruits	kgN/100kgMS	0,1
	Olives	kgN/100kgMS	0,67
	Agrumes	kgN/100kgMS	0,18
	Lin	kgN/100kgMS	0,35
	Chanvre	kgN/100kgMS	0,35
	Maïs fourrage	kgN/100kgMS	1
	Choux fourragers	kgN/100kgMS	0,36
Luzerne et du trèfle	kgN/100kgMS	2,8	
Prairies temporaires non légumineuses	kgN/100kgMS	1,25	
Produits des prairies naturelles	kgN/100kgMS	2,05	
	γ_{TC}		0,8719
	γ_P		0,3675
	Y_{maxTC}	ktN	8606,65
	Y_{maxP}	ktN	4856,16
	ing_P	%	42,8 ou 44,61
	$ing_{TC,hb}$	%	57,2 ou 55,39
	ing_{Ext}	%	0

TABLE 1.20 – Table des indicateurs pour l’implémentation du scénario ARD dans le modèle AFM - 2.

Origine	Destination	GRAFS	Sol. P	Écart (%)	Sol. TC	Écart (%)
Alimentation humaine						
Végétaux	PH	272,5	272,5	0	272,5	0
C	PH	135,1	135,1	0	135,1	0
Élevage						
E	Animaux	240,18	216	-10,1	218,7	-8,9
E	C	157,8	154,4	-2,2	156,4	-0,9
Végétaux	E	1263,5	1247,3	-1,3	1256,8	-0,5
E	Déj ani	1023,3	1031,3	0,8	1038	1,4
Prairies	E	540,8	556,4	2,9	537,9	-0,5
Culture	E	699,9	690,9	-1,3	718,9	2,7
Terres cultivées						
Déj ani	TC	488,4	487,36	-0,2	490,5	0,4
Fix sym	TC	1561,1	1810,6	16	1606,1	2,9
Déj hum	TC	39,3	39,2	-0,2	39,2	-0,2
Dépôt	TC	220,1	217,4	-1,2	217,4	-1,2
TC	Pertes	560	508,1	-9,3	511,3	-8,7
TC	Végétaux	1769,46	1842,1	4,1	1842,1	4,1
Prairies						
Déj ani	P	343,1	331,6	-3,4	333,7	-2,7
Fix sym	P	323,1	204,5	-36,72	197,7	-38,8
Dépôt	P	115,2	117,8	2,2	117,8	2,2
P	Pertes	146,7	97,6	-33,43	111,4	-24
P	Prairies	634,9	556,4	-12,37	537,9	-15,3
Volatilisation						
Déj ani	Atm	191,8	212,5	10,8	213,9	11,5

TABLE 1.21 – Comparaison AFM-GRAFS pour le scénario ARD. L'écart en pourcentage est obtenu par la formule (AFM-GRAFS)/GRAFS. PH : population humaine ; TC : terres cultivées ; P : prairies ; E : élevage ; Atm : atmosphère ; déj. hum. : déjections humaines ; déj. ani. : déjections animales ; dépôt : dépôt atmosphérique ; fix. sym. : azote fixé par fixation symbiotique ; pertes : pertes par lessivage ; Culture : produits de culture ; Prairies : produits des prairies naturelles ; C : produits animaux comestibles.

Chapitre 2

Modularisation de l'AFM à l'aune du problème de la concurrence alimentaire

L'AFM présentée dans le chapitre 1, dans la mesure où on l'a construite à partir du modèle GRAFS dont ce n'est pas le sujet, n'intègre pas la problématique de la concurrence alimentaire entre humains et animaux. La ration alimentaire animale est déterminée par la méthode de saturation successive présentée en section 1.2.2 et repose sur une hypothèse forte : la seule limite au pâturage des animaux pouvant pâturer est la production disponible des prairies. Mais cette hypothèse présente le risque de surestimer le pâturage par rapport aux autres végétaux dans la ration des animaux, par exemple les céréales, et donc de sous-estimer la concurrence alimentaire, les humains ne pouvant digérer l'herbe et les végétaux poussant dans les prairies alors que les céréales, oui. Pour pouvoir étudier cette concurrence et les potentielles conséquences d'un changement dans l'alimentation des animaux ou des humains, il faut donc intégrer l'alimentation animale dans le modèle non pas comme le résultat d'un calcul *a posteriori* mais comme une donnée du problème. On commence par revenir sur la discussion sur la concurrence alimentaire est les différentes manières de l'envisager dans la section 2.1 puis, dans la section 2.2, on définit l'approche modulaire grâce à laquelle on intègre l'alimentation animale dans le problème tout en proposant une manière originale d'implémenter les indicateurs de notre AFM. On teste cette approche modulaire dans les sections 2.2 et 2.3 à partir de l'exemple de la production bovine en Corrèze.

2.1 Le problème de la concurrence alimentaire entre humains et animaux

Le débat sur la concurrence alimentaire entre humains et animaux se pose régulièrement dans les termes suivants : dans quelle mesure est-il intéressant, pour l'humanité, de nourrir des animaux avec des végétaux plutôt que de se nourrir directement avec des végétaux ? Les exemples de l'effet de cette concurrence sont bien connus, parfois emblématiques, comme ces gigantesques monocultures gourmandes en eau destinées à nourrir les animaux : le maïs fourrager ici, le soja au Brésil, etc. Mais ce débat tourne souvent à l'opposition tranchée entre des positions qui se veulent contradictoires mais qui ne sont bien souvent que parcellaires. On ne va pas résoudre ici ce débat aux mille implications qui engage des choix de société, mais en rappelant un certain nombre de processus et en utilisant notre AFM, on va essayer de lui apporter des éléments de construction.

Il y a deux grandes approches, inverses l'une de l'autre, pour quantifier la concurrence alimentaire. La première est celle des efficacités de conversion [Laisse et al., 2019], la seconde celle des ratios de conversion [Mottet et al., 2017]. Un ratio de conversion mesure la quantité de végétaux ingérés par les animaux par unité de produits animaux sortant de l'élevage. C'est une mesure directe pour mettre en rapport la quantité de produits animaux disponible pour l'alimentation humaine avec la quantité de végétaux qu'il a fallu pour produire cette quantité. Une efficacité de conversion est l'inverse d'un ratio de conversion, c'est-à-dire que c'est la quantité de produits animaux sortant de l'élevage par unité de végétaux ingérés. Il s'agit bien d'une efficacité puisque c'est une mesure de la proportion dans laquelle le secteur de l'élevage convertit des *inputs* en *outputs*. De ce fait, elle peut servir à des descriptions plus générales de la filière agricole, au-delà du débat sur la concurrence alimentaire, comme dans [Harchaoui and Chatzimpiros, 2017], [Harchaoui and Chatzimpiros, 2019] où les auteurs mettent en lumière une augmentation de l'efficacité de conversion des différents cheptels, mesurée en énergie, depuis les années 1960 en France, parallèlement à une augmentation de l'efficacité de toute l'agriculture, c'est-à-dire l'augmentation de sa capacité à fournir de la nourriture aux humains à partir du même apport énergétique de base.

Mais dans les deux approches, deux questions se posent pour fournir une information : la question de l'unité et la question du périmètre. Concernant l'unité, le plus simple est de comparer des masses de végétaux - éventuellement en matière sèche pour supprimer l'humidité - et des masses de produits animaux. Mais la masse est un indicateur très médiocre des qualités nutritives des différents aliments : dire qu'il faut, tant de kilogrammes de végétaux pour produire un kilogramme de produits animaux ne présage absolument pas des qualités nutritives respectives des végétaux et des produits animaux. Pour étudier ces qualités nutritives, d'autres unités peuvent être utilisées : les protéines en masse d'azote, l'énergie ou, de manière proche, la masse de carbone, la masse de phosphore, etc. Dans [Mottet et al., 2017], les auteurs proposent de comparer les masses de végétaux en matière sèche avec les protéines animales en masse d'azote. Cela donne une indication sur la conversion qui a lieu dans l'élevage mais cela ne permet pas d'évaluer la concurrence alimentaire, puisque on n'intègre pas, de cette façon, l'usage alternatif qui pourrait être fait des protéines initialement contenues dans les végétaux. Reprenant une des remarques introductives de la section 1.2, on peut aussi réfléchir à intégrer dans les calculs le fait que les protéines végétales soient de moins bonne qualité que les protéines animales en introduisant une unité « masse d'azote équivalent protéines animales » qui ne compte pas la quantité d'azote dans les végétaux mais la quantité d'azote qui y est assimilable par les humains aussi bien que le seraient des protéines animales qui contiennent tous les acides aminés. Cela demanderait d'étudier plus à fond les différents acides aminés.

Concernant le périmètre, il s'agit de savoir ce qu'on intègre au numérateur et au dénominateur du ratio de conversion ou de l'efficacité de conversion, c'est-à-dire ce qu'on compte parmi ce qui rentre dans la ration alimentaire et ce qui sort de l'élevage. Pour ce qui sort, les auteurs s'accordent à ne compter que les produits comestibles, au sens de notre AFM, voire à calculer des indicateurs séparés pour la viande et les co-produits [Mottet et al., 2017] (quand il est possible de séparer la ration consacrée à la production de viande et celle consacrée à la production de lait ou d'oeufs). Le débat porte plus sur ce qui constitue la ration alimentaire. Par exemple, dans l'élevage bovin pastoral des pays développés - de l'OCDE -, il faut 8 kilogrammes d'azote végétal pour obtenir un kilogramme d'azote de produits bovins - viande, lait - alors qu'il n'en faut que 6 dans l'élevage bovin intensif [Mottet et al., 2017]. Mais ces deux quantités ne rendent pas compte du fait que dans le système pastoral, l'essentiel de la ration est constituée par la pâture tandis que dans le système intensif, une part beaucoup plus importante est laissée aux concentrés - tourteaux de soja par exemple - et que si les humains peuvent manger du soja, il leur est beaucoup plus compliqué de digérer l'herbe. Ainsi, la comparaison que l'on vient de faire est trompeuse.

Pour résoudre ce problème, différentes solutions peuvent être envisagées. Dans [Mottet et al., 2017], les auteurs calculent trois ratios de conversion qui diffèrent par le périmètre des produits végé-

taux considérés. Dans le premier ratio de conversion, on compte tous les produits végétaux qui participent de l'alimentation animale : cela donne les résultats évoqués précédemment. Dans le deuxième ratio, on ne compte que les produits végétaux qui sont directement consommables par les humains - les céréales, les graines de soja -. Pour les bovins, les ratios tombent alors à 0,5 pour le système pastoral et 4,1 pour le système intensif. Le troisième ratio intègre, outre les produits végétaux directement consommables par les humains, les tourteaux de soja qui, bien que non consommables par les humains, sont considérés comme le principal objectif des cultures de soja et donc la principale détermination dans l'usage du sol. Cela intègre le fait que l'on utilise le sol pour nourrir des animaux et pas pour nourrir des humains : ces végétaux valent comme les végétaux que l'on n'a pas produit pour nourrir des animaux. Mais alors, dans la même logique, on peut regretter que les auteurs n'intègrent pas également, dans ce ratio, la production des prairies qui seraient convertibles en terres cultivées pour l'alimentation humaine.

Dans [Laisse et al., 2019], les auteurs proposent une solution différente. Plutôt que faire varier directement le périmètre des produits végétaux rentrant dans l'alimentation animale, ils calculent pour chacun de ces produits la part consommable par les humains (Ppc pour les protéines, Pec pour l'énergie), c'est-à-dire la proportion des protéines ou de l'énergie du produit qui peut faire partie de la ration alimentaire humaine, éventuellement après transformation. Par exemple, la Ppc du blé tendre est 66% car, même si le grain de blé n'est pas ingérable directement par l'homme, il peut être transformé en farines ou en d'autres produits - amidon, gluten, etc. -, et dans ces produits, 66% des protéines initiales du grain de blé sont conservées. De même, la Ppc du colza est de 0% car la seule valorisation possible du colza pour l'alimentation humaine est son huile qui ne contient aucune des protéines initiales. En appliquant ces parts consommables par les humains¹ à la ration alimentaire animale effective, on peut calculer des efficacités de conversion qui intègrent le fait qu'humains et animaux ne mangent pas la même chose. On appelle nettes ces efficacités de conversion, par rapport aux efficacités brutes qui prennent en compte l'ensemble des produits végétaux. Par exemple, l'efficacité de conversion des protéines de la production intensive de lait de vache, du type de ce qu'on trouve dans l'ouest de la France, basée sur l'ensilage de maïs complétée avec des céréales, est de 0,24 en brut et de 1,01 en net. Pour la production plus extensive qui laisse la part belle au pâturage, c'est 0,19 en brut et 2,57 en net. On retrouve la même conclusion que dans [Mottet et al., 2017] : moins efficace que le système intensif quand on considère l'ensemble des produits, le système pastoral devient plus efficace quand on tient compte de manière fine de la concurrence humains-animaux.

2.2 L'intérêt d'une approche modulaire

Comme on l'a vu avec la comparaison entre le système intensif et le système pastoral pour la production bovine, le débat sur la concurrence alimentaire prend un jour différent selon le choix des unités et du périmètre d'étude. Mais cela montre aussi que plus qu'une opposition entre humains et animaux, c'est un débat sur la manière d'élever des animaux. Les vaches qui pâturent ne sont pas les concurrentes des humains², d'un certain point de vue, elles leur sont même complémentaires puisqu'elles valorisent un végétal qui n'est pas assimilable par notre système digestif. La question devient donc de pouvoir comparer les différents types d'élevage pour comprendre les pressions que chacun exerce sur l'alimentation humaine.

Pour résoudre ce problème dans le cadre de notre AFM, il faut donc qu'on puisse y discriminer différentes organisations de la production agricole, en l'occurrence de l'élevage. Pour l'instant, on dispose concernant l'élevage de six paramètres - la taille, en têtes, des six cheptels - et de cinq familles d'indicateurs - la productivité viande par cheptel, la productivité co-produit par cheptel,

1. Remarquons ici que ces parts sont des mesures, pour chaque produit végétal, de la concurrence qui existe entre alimentation animale et alimentation humaine.

2. Si on considère la question sous l'angle de l'alimentation, on ne parle pas ici des pollutions générées par l'élevage.

la composition de la bête par cheptel, la teneur en azote de chaque produit par cheptel, et les quantités excrétées par cheptel³. D'un côté, rien sur l'alimentation des animaux, de l'autre, des indicateurs très agrégés sur les produits de l'élevage et éventuellement difficiles à obtenir. Ces indicateurs ne différencient pas les types d'élevage entre eux : élevage orienté vers la viande ou vers les coproduits ? Élevage biologique ou conventionnel ? Élevage orienté vers la production de bêtes vivantes ou de bêtes pour l'abattage ? Pour différencier ainsi les types d'élevage, il faut donc pouvoir différencier les indicateurs d'un type à l'autre, mais aussi proposer de nouveaux indicateurs plus détaillés.

Pour ce faire, on va introduire dans notre AFM des modules. On appelle module une fonction des paramètres définie à partir d'un ensemble d'indicateurs et dont l'image est la détermination d'un ensemble de flux de l'AFM. Non seulement ces indicateurs sont pensés pour être suffisamment simples à renseigner, mais en plus ils font système entre eux, l'idée étant qu'un module soit une petite modélisation d'une manière de produire. Par exemple, dans les modules pour l'élevage bovin que l'on va construire, on va retrouver un modèle du fonctionnement des troupeaux dans les différents types d'élevage : proportion des veaux abattus, proportion des veaux qui renouvellent la population des vaches, proportion des vaches qui sont abattues, etc. Un module modélise donc un type de production agricole. Pour comparer différents types, on introduit une classe de modules, c'est-à-dire un ensemble de modules qui sont fonction des mêmes paramètres, dont l'un est un paramètre de répartition - la proportion du type de production associée au module dans la production globale -, et qui déterminent les mêmes flux. Au sein d'une classe, ce sont les types de production et donc les indicateurs qui changent d'un module à l'autre. Par exemple, si on recense sur un territoire deux types d'élevage différents - pour aller vite, un intensif et un extensif -, on va définir une classe de modules à deux modules, l'un modélisant la production intensive, l'autre la production extensive.

Cette approche modulaire est inspirée des travaux de l'association Solagro sur le modèle Afterres 2050 [Association Solagro, 2016] qui propose un scénario complet d'alternative à l'agriculture contemporaine en intégrant les différents enjeux environnementaux. Dans ce modèle, on différencie des types de culture - conventionnel, raisonné, biologique, intégré en rajoutant des sous-catégories selon qu'il y a de l'agroforesterie ou des cultures associées aux cultures principales - et des types d'élevage - pour l'élevage bovin, ils sont différenciés selon la productivité en lait des vaches. Chaque type détermine des productions végétales ou animales qui permet ensuite de dresser un tableau d'ensemble de l'agriculture. Les données précises pour chaque type ne sont pas publiées mais l'idée est là.

2.3 Construction d'une classe de modules pour l'élevage bovin-viande en Corrèze

On va mettre en pratique les idées développées dans la section 2.2 en construisant une classe de modules pour l'élevage bovin-viande en Corrèze. Le choix de la Corrèze comme territoire-test est le fruit de la combinaison de deux facteurs. D'abord, la statistique agricole annuelle (SAA) qui constitue la source d'informations la plus régulière sur l'agriculture française, est construite par département. On aurait pu agréger certains départements entre eux pour obtenir un territoire qui recouvre des limites moins administratives et plus proches de la réalité de la production mais pour des raisons de simplicité, on raisonne à ce niveau-là. Le choix, ensuite, de la Corrèze, résulte de son intégration dans le bassin limousin, haut-lieu de la production de viande bovine en France. Le bassin limousin recouvre, outre la Corrèze, les autres départements limousins que sont la Creuse et la Haute-Vienne et les départements limitrophes de la Vienne, de la Charente et de la Dordogne. La production de viande bovine en Corrèze est suffisamment

3. Pour cette dernière famille d'indicateurs, on dispose toutefois d'informations à un niveau de détail supérieur que celui du cheptel.

vaste et détaillée pour que l'on ait matière à construire des modules de production. L'Institut de l'Élevage, en partenariat avec les chambres d'agriculture, est à l'origine d'un programme qui recense, décrit et analyse le fonctionnement des exploitations, Inosys - Réseaux d'élevage, que l'on appellera dans la suite Inosys. Pour chaque région agricole et chaque production animale, le programme détaille des cas-types des différentes manières d'élever et de produire. Un cas-type est la description d'une exploitation agricole typique. Pour la production de viande bovine dans le bassin limousin, douze cas-types sont recensés⁴. Selon la Chambre d'agriculture de Corrèze⁵, la production de bovins viande dans le département est organisée autour de trois types de production : la production de veaux de lait sous la mère - bovins abattus avant leur 8 mois qui ne broutent pas et dont l'alimentation principale est le lait de vache -, la production de maigre - bovins de moins de 8 mois sevrés, donc qui ne têtent plus mais qui pâturent, élevés pour être vendus vifs afin de finir leur croissance ailleurs, on les appelle aussi broutards - et la production de jeunes bovins et de génisses de boucherie - bovins de plus de 8 mois élevés pour être abattus. Ainsi, parmi les douze cas-types de la typologie Inosys, on n'en retient que trois : système Limousin veaux de lait sous la mère, système naisseur Limousin broutards mâles et femelles, système naisseur Limousin avec génisses de boucherie. Le système naisseur-engraisseur Limousin jeunes bovins et génisses de Lyon semble mieux correspondre à ce que dit la Chambre d'agriculture, mais ce cas-type ne se retrouve pas dans le département de la Corrèze, selon Inosys.

Dans cette section, on va commencer par présenter la classe de modules, c'est-à-dire non pas ce qui différencie les modules entre eux mais ce qui leur est commun. On va présenter l'ensemble des indicateurs et leur formule, tout en détaillant leur articulation. Ensuite, on présentera les trois modules qui appartiennent à cette classe, en reprenant le contenu des cas-types Inosys. Enfin, on réconciliera ces modules dans le formalisme de l'AFM afin de les rendre équilibrés.

2.3.1 Fonctionnement de la classe de modules

Les cas-types Inosys présentent des exploitations et leur fonctionnement. Nous ne voulons pas étudier des exploitations agricoles mais un territoire entier, le département de la Corrèze. Cela suppose d'effectuer un chemin inverse à celui qu'emprunte la typologie Inosys : non pas synthétiser le général dans un cas-type, mais retourner de l'exemple typique à ce qui se passe sur tout le territoire. En faisant cela, on néglige d'éventuels effets macroscopiques. On va donc calculer, à partir des cas-types, un certain nombre de quantités qui vont nous permettre de décrire un type de production à l'échelle de l'ensemble du territoire, et non plus à l'échelle de la ferme : pour bien distinguer les différentes quantités en jeu, on écrit en rouge les indicateurs du module et en vert les données tirées des cas-types Inosys qui permettent de les calculer.

Ces cas-types présentent la vie du troupeau et son alimentation, la gestion du sol (surface, amendements, récolte) et celle des bâtiments et des machines. Ces deux dernières informations nous intéressent moins, pour l'instant, et c'est surtout la première partie qui concentrera notre attention. On donne dans la figure 2.1, la vie et l'alimentation du troupeau dans le système Limousin veaux de lait sous la mère. On y trouve la composition du cheptel en croisière c'est-à-dire dans des conditions normales, les produits animaux vendus chaque année (animal à abattre ou vendu vif) et l'alimentation. Dans notre module, on décrit un type de production à partir du troupeau divisé en différentes parties interagissant entre elles, émettrices et réceptrices de flux : cela vient de la description du cheptel en croisière dans les cas-types. On reprend donc à notre compte une certaine partie de l'esprit qui a présidé à l'élaboration de la typologie Inosys. Cela n'est pas sans risque mais l'intérêt principal est qu'outre le paramètre de répartition $(p_i)_{i \in \mathcal{C}}$ - \mathcal{C} désigne l'ensemble des modules et $0 \leq p_i \leq 1$ pour $i \in \mathcal{C}$ la proportion du module i dans l'ensemble de la production - notre classe de modules ne prend qu'un seul autre paramètre comme

4. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/les-systemes-de-production-bovins-viande-en-limousin.html

5. <https://correze.chambre-agriculture.fr/filieres-et-innovation/productions-animales/bovin-viande/>

LE TROUPEAU

LE CHEPTEL EN CROISIERE



LES VENTES ANNUELLES

Catégories	Poids	Mois	
8 vaches de boucherie + 1 accident 1 vache laitière	380 kgc	Mars-Juill-Sept	59 UGB techniques
	300 kgc	Juillet	
17 VSLM femelles - 15 limousines - 2 croisées	130 kgc	- 60% des ventes de janvier à mai - 25% des ventes de juin à octobre - 15% des ventes sur octobre et novembre	14 820 kg Production brute de Viande Vive = kg vendus - kg achetés ± variations inventaires
	125 kgc		
26 VSLM mâles : - 24 limousins - 2 croisés	135 kgc		250 kg Vifs / UGB 270 kg Vifs / vêlage
	135 kgc		



Les performances

Reproduction	
Taux de gestation	95%
Mortalité	5%
Productivité numérique.....	90%
Taux de renouvellement	18%
Age au 1 ^{er} vêlage.....	31 mois 30% d'1.A.

Croissance

VSLM mâles limousins :	GMQ naissance-vente : 1 200 g/j
VSLM femelles limousines :	GMQ naissance-vente : 1 100 g/j

L'ALIMENTATION SUR STOCK

Principales catégories	Durée (jours)	Apports journaliers (kg brut/jour)					BESOINS TOTAUX	
		Fourrages		Concentrés				
		Foin	Enruban.	Céréales	CMAV	Cplt.Brout.		
21 VA gestantes en période hivernale	135	11					Enrubannage	26 TMS
25 VA en lactation en période hivernale	135	7	11	1,0	0,7		Foin	85 TMS
16 VA en lactation en période estivale	135	2		0,6	0,3		Paille litière	42 T
4 VL en lactation en période hivernale	135	10,5	9	4,0	1,5		1,9 TMS / UGB techniques	
9 génisses avant sevrage	135					2,0	Céréales (produites)	16,7 T
9 génisses de 1 an	135	2,5	5	0,5	0,2		Poudre de lait	825 kg
9 génisses de 2 ans	135	7,5		1,0			CMAV (acheté)	5,3 T
							Compl. Brout. (acheté)	1,8 T
							420 kg / UGB	
							445 kg / vêlage	

FIGURE 2.1 – Source : Inosys. Vie du troupeau dans le système Limousin veaux de lait sous la mère.

argument : le nombre de têtes de vaches que l'on note $n \in \mathbf{N}^*$. Pour $i \in \mathcal{C}$ le produit $p_i n$ que l'on notera aussi n_i est le nombre de têtes de vaches dans le type de production correspondant au module i .

Faisons ici remarquer que le programme Inosys est destiné aux professionnels du secteur donc le contenu des cas-types ne recouvre pas exactement les informations dont on a besoin : certaines informations sont en trop, certaines manquent. Un premier problème sera donc de mobiliser d'autres sources pour compléter les informations manquantes. C'est d'ailleurs à ce titre qu'il faudra réconcilier les modules dans la section 2.3.3. Un deuxième problème qui se pose à nous réside dans le fait que la typologie Inosys ne précise pas la répartition des cas-types sur le territoire. On déterminera ce paramètre dans la section 2.3.2.

Dans cette section, on va présenter ce qu'il y a de commun entre les différents modules de la classe, la structure, la manière de calculer les indicateurs et leur articulation. On va donc commencer par expliciter les différentes parties d'un troupeau et leurs liens. Puis, on va détailler, pour ces différentes parties, les entrées - l'alimentation - et les sorties - les produits et déjections. On fixe un paramètre $n \in \mathbf{N}^*$ et $i \in \mathcal{C}$ un module.

Les parties du troupeau et leurs liens

Les équations (2.2), (2.4), (2.6) et (2.7) permettent de calculer, à partir des paramètres n et p_i de produit np_i noté n_i , la taille des différentes parties du troupeau en UGB - on raisonne en UGB à partir de la table 1.4 pour tout exprimer dans le même langage - et donnent, par là même, les liens existants entre ces parties.

Les vaches sont la première composante du troupeau. Ce sont les bovins femelles qui ont déjà vêlé, c'est-à-dire donné un veau. Il y a deux catégories de races de vaches : les vaches allaitantes - comme la Limousine -, que l'on élève pour leur viande et celle de leurs petits, et les vaches laitières - comme la Prim Holstein -, que l'on élève pour la production de lait destiné à l'alimentation humaine. Ces deux catégories de races de vaches ne sont pas équivalentes en UGB : les vaches laitières comptent pour 1, les vaches allaitantes pour 0,8. Dans le module, on appelle taux de laitières la part que l'on note t_L des vaches laitières dans l'ensemble des vaches du module. Ce taux se calcule à partir du nombre N_{VA} de vaches allaitantes et N_{VL} de vaches laitières par la formule

$$t_L = \frac{N_{VL}}{N_{VL} + N_{VA}} = \frac{N_{VL}}{N_{Va}} \quad (2.1)$$

en notant $N_{Va} = N_{VA} + N_{VL}$ le nombre de têtes de vache dans le cas-type. À partir de ce taux, on peut déterminer, dans le module, le nombre d'UGB correspondant à des vaches que l'on note U_{Va} et qui vaut

$$U_{Va} = (t_L + 0,8(1 - t_L))n_i. \quad (2.2)$$

Les veaux et jeunes bovins, c'est-à-dire les bovins de moins d'un an - moins de 8 mois pour les veaux, plus pour les jeunes bovins - sont la deuxième composante du troupeau. Ce sont des bovins mâles ou femelles qui comptent pour 0,4 UGB. Dans le module, on appelle taux de vêlage le nombre noté t_{vel} d'UGB veaux et jeunes bovins par UGB vache. Pour déterminer ce taux à partir des cas-types Inosys, on ramène le nombre de veaux sevrés N_{Ve} convertis en UGB au nombre de vaches comptées en UGB qui est de $(t_L + 0,8(1 - t_L))N_{Va}$. Les cas-types Inosys distinguent le taux de gestation, le nombre de vêlages et celui de veaux sevrés : le taux de gestations correspond au nombre de vaches enceintes sur le nombre total de vaches, le nombre de vêlages au nombre de naissances de veaux - les gestations qui sont arrivés à terme - et le nombre de veaux sevrés au nombre de veaux qui ne sont pas morts avant la fin de l'allaitement. C'est cette dernière quantité, qui renseigne le nombre de veaux qui pourront être abattus, vendus ou élevés sur place, qui nous intéresse. On a donc l'égalité suivante

$$t_{vel} = \frac{0,4N_{Ve}}{(t_L + 0,8(1 - t_L))N_{Va}} \quad (2.3)$$

et donc on a la relation suivante dans le module

$$U_{Ve} = t_{vel}U_{Va} \quad (2.4)$$

où U_{Ve} est le nombre d'UGB correspondant à des veaux et jeunes bovins.

Les bovins de plus d'un an qui ne sont pas des vaches se divisent en deux catégories. Il y a les génisses - bovins femelles n'ayant pas encore vêlé - qui sont amenées à devenir des vaches en remplacement de celles qui vieillissent pour reconstituer le troupeau. Dans le module, on fait comme hypothèse que le premier vêlage a lieu au troisième anniversaire, même si des techniques de vêlage précoce sont mises au point. Donc, parmi les génisses de renouvellement, certaines ont entre un et deux ans et comptent pour 0,7 UGB, d'autres ont plus de deux ans et comptent pour 0,8 UGB. On appelle taux de renouvellement et on note t_r la proportion des veaux et jeunes bovins qui deviennent des génisses de renouvellement. Pour calculer ce taux à partir des cas-types Inosys, on divise le nombre de génisses de plus de 2 ans destinées à vêler N_{Re} - déterminé en déduisant du nombre de génisses de plus de 2 ans celles qui sont abattus au cours de leur troisième année - par le nombre de veaux sevrés. On a donc l'égalité suivante :

$$t_r = \frac{N_{Re}}{N_{Ve}}. \quad (2.5)$$

On fait donc l'hypothèse qu'en comparant, dans le cas-type, les génisses d'aujourd'hui avec les veaux d'aujourd'hui, on obtient, dans le module, la part des veaux d'aujourd'hui qui vont devenir des génisses de renouvellement demain : on suppose une relative stabilité à moyen-terme du fonctionnement des cas-types. Dans le module, la quantité $t_r \frac{U_{Ve}}{0,4}$ désigne le nombre de têtes de génisses de renouvellement qui ont entre un et deux ans ou bien le nombre de celles qui ont plus de deux ans - on suppose que les génisses de renouvellement ne meurent pas accidentellement avant de devenir des vaches. Pour convertir ces nombres de têtes en UGB, il faut multiplier cette quantité respectivement par 0,7 et 0,8 de sorte qu'en notant U_{Re} le nombre d'UGB correspondant à des génisses de renouvellement, on a, au sein du module, la relation

$$U_{Re} = 0,7t_r \frac{U_{Ve}}{0,4} + 0,8t_r \frac{U_{Ve}}{0,4} = \frac{1,5}{0,4}t_r U_{Ve}. \quad (2.6)$$

Les autres bovins de plus d'un an sont les bovins de boucherie, ceux qui sont élevés pour être abattus. Ils diffèrent par leur sexe mais surtout par l'âge auquel ils sont abattus. Certains le sont entre un et deux ans, d'autres au-delà de deux ans. Pour déterminer le nombre d'UGB correspondant à des bovins de boucherie que l'on note U_{Bo} , on se donne donc, dans le module, trois indicateurs : le taux de boucherie 1-2 ans t_{Bo} , le taux de boucherie femelles > 2 ans t_{2f} et le taux de boucherie mâles > 2 ans t_{2m} que l'on calcule, à partir des cas-types Inosys, en divisant le nombre respectivement de bovins entre un et deux ans N_{Bo} (mâles et femelles hors génisses destinées à devenir du renouvellement), les femelles de plus de deux ans (hors génisses prêtes à vêler) N_{2f} , et les mâles de plus de deux ans N_{2m} par le nombre de veaux sevrés. Remarquons que la somme des trois taux ne peut pas s'interpréter comme la part des veaux et jeunes bovins qui deviennent des bovins de boucherie, contrairement au taux de boucherie 1-2 ans qui comprend aussi bien les bovins abattus au cours de leur deuxième année que ceux qui seront abattus plus tard, d'où les notations t_{Bo} et N_{Bo} . Comme les mâles de plus de deux ans comptent pour 1 UGB, on a la relation suivante

$$U_{Bo} = (0,7t_{Bo} + 0,8t_{2f} + t_{2m}) \frac{U_{Ve}}{0,4}. \quad (2.7)$$

On a donc détaillé les différentes parties du troupeau et les liens existants entre elles, ce que l'on récapitule dans la figure 2.2. Dans la suite, on aura besoin, pour passer de données du cas-type à des indicateurs du module, de ramener des quantités par tête en quantités par UGB.

Pour ce faire, on introduit des taux de conversion $t_{c,i}$ pour $i = Va, Ve, Re, Bo$ tels que $t_{c,i}N_i$ soit la taille, dans le cas-type, de la catégorie i en UGB. On a donc :

$$t_{c,Va} = t_L + 0,8(1 - t_L); \quad (2.8)$$

$$t_{c,Ve} = 0,4; \quad (2.9)$$

$$t_{c,Re} = 1,5; \quad (2.10)$$

$$t_{c,Bo} = 0,7 + 0,8\frac{t_{2f}}{t_{Bo}} + \frac{t_{2m}}{t_{Bo}}. \quad (2.11)$$

Par exemple, $t_{c,Bo}N_{Bo} = (0,7t_{Bo} + 0,8t_{2f} + t_{2m})N_{Ve}$ qui est bien le nombre d'UGB correspondant à des bovins de boucherie. De même, $t_{c,Re}N_{Re} = 0,7N_{Re} + 0,8N_{Re}$ qui est bien le nombre d'UGB correspondant à des génisses de renouvellement, en séparant celles qui ont entre un et deux de celles qui ont plus de deux ans. Ces taux de conversion ne sont pas des indicateurs, ce sont des auxiliaires de calcul.

La ration alimentaire

Comme on le voit dans la figure 2.1, les cas-types Inosys donnent un certain nombre d'informations sur l'alimentation des animaux que l'on va exploiter. Il n'y a rien sur l'herbe pâturée car cette information n'est pas pertinente pour les éleveurs : il leur suffit, dans l'exercice de leur travail, de déterminer le chargement nécessaire - ici, entre 1,1 et 1,35 UGB par hectare de surface fourragère principale, c'est-à-dire la surface consacrée à la production de fourrages (comme le maïs), les prairies temporaires et les prairies permanentes.

Or, la production de viande bovine en Corrèze, comme dans le reste du bassin limousin, fait du pâturage la base de l'alimentation. Les prairies sont pâturées entre 7 et 8 mois, entre avril et novembre. L'hiver, quand la pâture n'est plus possible, l'herbe est remplacée par d'autres fourrages récoltés à la belle saison, du foin - herbe fauchée et conservée par séchage - ou de l'enrubannage - herbe fauchée et conservée emballée dans du plastique. On ne peut se passer d'une estimation de la quantité ingérée par le pâturage et on fait l'hypothèse que les vaches, laitières ou allaitantes ayant donné un veau, pâturent 17,2 kilogrammes de matière sèche par jour par UGB [Pat, 2011] - cela intègre l'éventuel pâturage des veaux et jeunes bovins. Pour les autres bovins - génisses de renouvellement, bovins de boucherie -, on calcule la quantité de 12,6 kilogrammes de matière sèche par jour par UGB [Guillaume, 2010]. Dans l'article cité, l'auteur mentionne entre 7,5 et 9,5 kilogrammes par tête pour une génisse de 12 à 18 mois et 9,5 à 11,5 pour une génisse de 24 à 30 mois. On considère donc d'un côté, la moyenne de 7,5 et 9,5, soit 8,5 divisé par l'équivalent UGB d'une génisse entre 1 et 2 ans soit 0,7, ce qui donne 12,1 kilogrammes de matière sèche par UGB et, de l'autre côté, la moyenne de 9,5 et 11,5, soit 10,5 divisé par l'équivalent UGB d'une génisse entre 1 et 2 ans soit 0,8, ce qui donne 13,1 kilogrammes de matière sèche par UGB. On fait ensuite la moyenne des deux quantités et on trouve 12,6 kilogrammes de matière sèche par UGB. À noter que l'on n'intègre pas l'alimentation des mâles et donc on sous-estime éventuellement l'alimentation des bovins hors vaches.

On fait l'hypothèse haute que le pâturage dure pendant 8 mois soit $30 \times 8 = 240$ jours et que la teneur en azote de l'herbe pâturée est de 30 kgN par tonne de matière sèche [Marc Hervé, 2013]. Donc, en notant he_i pour $i = Va, Re, Bo$ la quantité d'herbe pâturée, en kgN par UGB et par an, on a

$$he_{Va} = 0,3.240.17,2 = 123,84; \quad (2.12)$$

$$he_{Re} = he_{Bo} = 0,3.240.12,6 = 90,96. \quad (2.13)$$

Pour le foin et l'enrubannage, le tableau du bas dans la figure 2.1 donne quatre informations. D'abord, une catégorie du troupeau : on note \mathcal{T} l'ensemble des catégories et $j \in \mathcal{T}$ une de ces catégories - par exemple, dans la figure, les vaches allaitantes en période hivernale ou les génisses

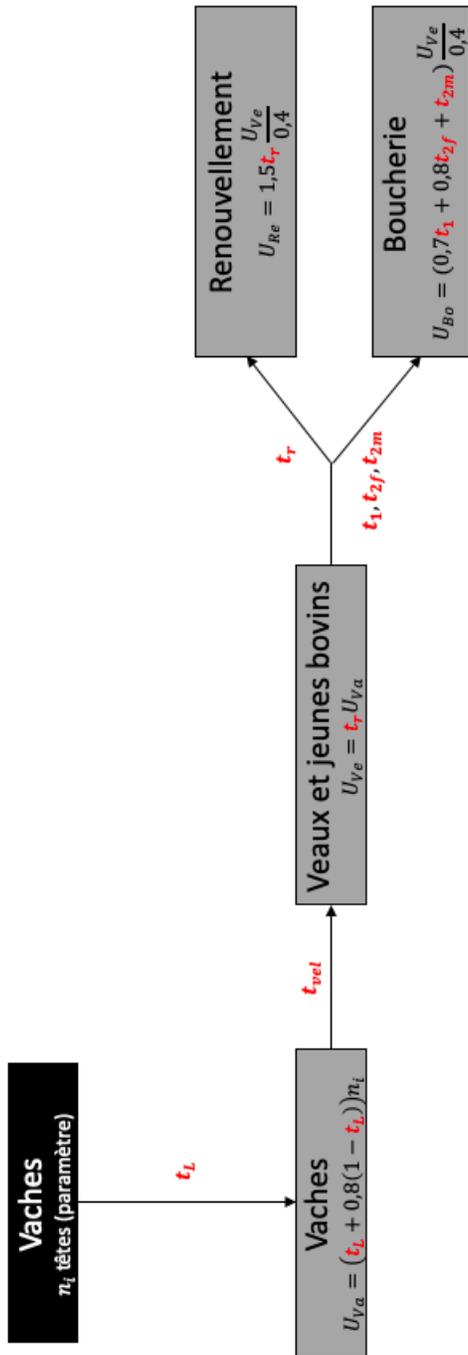


FIGURE 2.2 – Composantes du troupeau (les cases grises), liens entre ces composantes (flèches noires et indicateurs en rouge) et formules (dans les cases grises) pour déterminer la taille de ces composantes en UGB en fonction du nombre de têtes de vaches n_i . La case noire « Vaches » désigne les paramètres n et p_i dont on a noté n_i le produit.

d'un an. L'ensemble \mathcal{T} des catégories n'est pas égal à notre quadriptyque vaches, veaux et jeunes bovins, génisses de renouvellement et bovins de boucherie mais on pourra toujours partitionner \mathcal{T} en sous-ensembles $\mathcal{T}_{Va}, \mathcal{T}_{Ve}, \mathcal{T}_{Re}$ et \mathcal{T}_{Bo} de sorte que pour $i = Va, Ve, Re, Bo, \mathcal{T}_i$ soit l'ensemble des catégories qui relèvent de la partie i du troupeau telle qu'on l'a défini. Les trois autres informations sont, pour une catégorie $j \in \mathcal{T}$, sa taille N_j en nombre de têtes, les consommations fo_j et en_j respectivement de foin et d'herbe de cette catégorie en kilogrammes par jours et par tête et la durée d_j , en jours, de cette consommation. Pour passer de ces données du cas-type à des indicateurs de notre module, on va déterminer à partir d'elles la consommation par UGB. Pour $i = Va, Ve, Re, Bo$, on note fo_i, en_i la consommation respectivement de foin et d'enrubannage de la partie i du troupeau (en kgN par UGB par an) et on a l'égalité suivante

$$fo_i = 20 \times 0,85 \frac{\sum_{j \in \mathcal{T}_i} N_j fo_j d_j}{1000 t_{c,i} N_i} \quad (2.14)$$

$$en_i = 25 \times 0,55 \frac{\sum_{j \in \mathcal{T}_i} N_j en_j d_j}{1000 t_{c,i} N_i}. \quad (2.15)$$

Les quantités 0,85 et 0,55 désignent les taux de matière sèche du foin et de l'enrubannage⁶, 20 et 25 désignent leur teneur en azote, en kgN par tonne de matière sèche [Marc Hervé, 2013].

Outre les fourrages, les animaux se nourrissent également avec des céréales qui complètent l'alimentation. Pour chaque catégorie $j \in \mathcal{T}$, on dispose de la consommation ce_j de céréales en kilogrammes par jour et par tête. Donc, pour $i = Va, Ve, Re, Bo$, la consommation annuelle de céréales par UGB de la partie i du troupeau ce_i , en kgN par UGB par an, est égale à

$$ce_i = 19,5 \times 0,85 \frac{\sum_{j \in \mathcal{T}_i} N_j ce_j d_j}{1000 t_{c,i} U_i}. \quad (2.16)$$

On prend un taux de matière sèche de 85%, ce qui est un arrondi inférieur du taux de matière sèche des différentes céréales⁷, et une teneur en azote de 19,5 kgN par tonne de matière sèche qui est égale à celle du blé dans notre AFM.

Les cas-types n'intègrent pas d'autres végétaux dans l'alimentation. C'est une première différence avec notre AFM puisque tous les produits végétaux pouvaient rentrer dans la ration et certains semblaient y être même spécialement dédiés comme les fourrages - maïs fourrage, choux fourragers, luzerne et trèfle. D'ailleurs, la Corrèze est un producteur de maïs fourrage, à raison d'environ 50 kilotonnes de matière sèche par an, mais ce maïs ne se retrouve pas dans l'alimentation des animaux élevés sur le département, si l'on s'en tient à la typologie Inosys.

Pour les veaux et jeunes bovins, outre l'éventuelle herbe pâturée qui a déjà été comptée, l'aliment principal est le lait de vache qui n'est pas renseigné dans les cas-types Inosys. On fait l'hypothèse que le veau ingère 1800 litres de lait et que l'allaitement dure 5 mois [CIV, 2005], ce qui représente 4635 kilogrammes par UGB par an⁸, c'est-à-dire, en prenant 0,53% comme teneur en azote pour le lait de vache

$$lav_e = 4635 \times 0,0053 = 24,57 \quad (2.17)$$

où lav_e désigne la quantité de lait consommée par les veaux et jeunes bovins, en kgN par UGB et par an.

Tous les animaux sont également susceptibles de recevoir dans leur alimentation des compléments qui permettent de pallier à certains manques (en vitamines, en protéines, etc.). Ce ne sont pas des végétaux et ils ne peuvent faire partie d'aucune des catégories de produits de notre AFM. On les a donc négligés.

6. Source : Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation_animale.

7. Source : <https://www.feedtables.com/fr/content/matiere-seche>.

8. La masse volumique du lait est de 1,030 : <http://www.filiere-laitiere.fr/fr/laits-liquides>

Enfin, la paille pour la litière, si elle n'est pas un aliment, est indispensable dans l'élevage. Les cas-types Inosys donnent la quantité de paille utilisée par an en tonnes que l'on note P . À partir de cette quantité, du taux de matière sèche de la paille de 90%⁹ et de la teneur en azote de la paille de 5 kgN par tonne de matière sèche¹⁰, on calcule la quantité pa de paille en kgN par an et par UGB

$$pa = \frac{5 \times 0,9P}{\sum_i t_{c,i} N_i}. \quad (2.18)$$

Les produits et déjections

Comme on l'a déjà vu, l'élevage bovin est producteur à la fois de produits animaux - viande, lait -, et de déjections.

La production de lait n'est pas renseignée dans la typologie Inosys. Pour les vaches laitières, on suppose que la production est de 4204 litres de lait par an - on divise la production laitière en Corrèze par le nombre de vaches laitières présentes sur le département¹¹ - soit 4330 kilogrammes. Pour les vaches allaitantes, on suppose que la production est de 1628 kilogrammes par an [Sepchat et al., 2017]. La productivité lait y_L en kgN par UGB et par an est donc égale à

$$y_L = \frac{0,0053(4330N_{VL} + 1628N_{VA})}{t_{c,va}N_{va}} = t'_L 22,99 + (1 - t'_L)8,67 \quad (2.19)$$

en notant t'_L la quantité $\frac{t_L}{t_{c,va}}$ que l'on appelle taux de laitières UGB.

La production de viande est le fait des vaches, des veaux et des bovins de boucherie. Les génisses de renouvellement, élevées pour reconstituer le troupeau, n'en produisent pas.

Quand leur vieillissement est trop avancée pour qu'elles continuent à donner des veaux, certaines vaches sont réformées, c'est-à-dire abattues. On note s_{va} le taux de sortie des vaches, c'est-à-dire le nombre de vaches abattues par rapport au nombre de vaches, UGB, et y_{va} la productivité viande en kilogrammes équivalent carcasse par an et par UGB sortant. Dans le cas-type, on dispose de N_{VA}^a et N_{VL}^a les nombres de têtes de vaches abattues, et de y_{VA}^a et y_{VL}^a le poids de la carcasse de chaque vache abattue, respectivement allaitantes et laitières. On obtient donc les formules

$$s_{va} = \frac{0,8N_{VA}^a + N_{VL}^a}{t_{c,va}N_{va}}; \quad (2.20)$$

$$y_{va} = \frac{N_{VA}^a y_{VA}^a + N_{VL}^a y_{VL}^a}{0,8N_{VA}^a + N_{VL}^a}. \quad (2.21)$$

Les cas-types Inosys recensent également des accidents, des animaux qui meurent sans que cela soit contrôlé par l'éleveur. Pour simplifier, on considère ces accidents comme des sorties voulues du troupeau et donc on les intègre dans le nombre d'animaux abattus.

Les veaux peuvent être abattus ou vendus vifs pour finir leur croissance dans un autre élevage. Pour déterminer s_{ve} le taux de sortie des veaux - le nombre de veaux qui sortent du troupeau par rapport au nombre de veaux dans le troupeau, en UGB - ainsi que y_{ve} la productivité viande des veaux en kilogrammes équivalent carcasse par an et par UGB sortant, on doit agréger les veaux abattus et les veaux vifs et donc convertir le poids vif au moment de la vente en masse équivalent carcasse. On considère un rendement carcasse de 61% pour les jeunes bovins de race limousine¹². Dans le cas-type, on dispose de N_{Ve}^a , N_{Ve}^v le nombre de têtes

9. Source : <https://feedtables.com/fr/content/paille-de-ble>.

10. Source : notre AFM.

11. Source : <https://correze.chambre-agriculture.fr/filieres-et-innovation/productions-animales/bovin-lait/>

12. Source : <http://www.mon-cultivar-elevage.com/content/idele-et-interbev-actualisent-les-rendements-carcasses>

de veaux respectivement abattus et vendus vifs ainsi que y_{Ve}^a, y_{Ve}^v respectivement le poids de la carcasse de chaque veau abattu et le poids vif de chaque veau vendu. On a donc les formules

$$s_{Ve} = \frac{0,4(N_{Ve}^a + N_{Ve}^v)}{t_{c,Ve}N_{Ve}}; \quad (2.22)$$

$$y_{Ve} = \frac{N_{Ve}^a y_{Ve}^a + 0,61N_{Ve}^v y_{Ve}^v}{0,4(N_{Ve}^a + N_{Ve}^v)} \quad (2.23)$$

Les bovins de boucherie sont élevés pour être abattus mais pas tous au même moment : ceux qui ont plus de deux ans sont abattus dans l'année mais certains, parmi ceux qui ont entre un et deux ans, vont continuer leur croissance. Dans le cas type, ceux-ci sont au nombre de $N_{Bo} - N_{2f} - N_{2m}$, en reprenant les notations précédentes, si on suppose que les cas-types sont stables dans le temps. Donc, si on note s_{Bo} le taux de sortie des bovins de boucherie - le nombre de bovins de boucherie sortant du troupeau sur le nombre total de bovins de boucherie, en UGB -, on a alors

$$s_{Bo} = \frac{N_{2m} + 0,8N_{2m} + 0,7(N_{Bo} - N_{2f} - N_{2m})}{t_{c,Bo}N_{Bo}} \quad (2.24)$$

Dans le cas-type, on dispose de y_1^a, y_{2f}^a et y_{2m}^a le poids de la carcasse de chaque bovin de boucherie respectivement entre un et deux ans, femelles de plus de deux ans et mâles de plus de deux ans. En notant y_{Bo} la productivité viande des bovins de boucherie en kilogrammes équivalent carcasse par an et par UGB sortant, on a

$$y_{Bo} = \frac{y_1^a(N_{Bo} - N_{2f} - N_{2m}) + y_{2f}^a N_{2f} + y_{2m}^a N_{2m}}{N_{2m} + 0,8N_{2m} + 0,7(N_{Bo} - N_{2f} - N_{2m})} \quad (2.25)$$

Pour $i = Va, Ve, Bo$, $s_i y_i$ désigne donc la production de viande, en kilogrammes équivalent carcasse par an et par UGB de la partie i du troupeau. À partir des tables 1.1 et 1.2, on peut calculer la production, en kgN par UGB et par an, de chaque produit animal.

Pour calculer les déjections animales, on va combiner la composition du troupeau telle que détaillée dans la typologie Inosys avec les quantités excrétées par tête de la table 1.3. Pour $i = Va, Ve, Re, Bo$, on note dej_i la quantité de déjections de la catégorie i en kgN par UGB par an. Pour les vaches et les génisses de renouvellement, on obtient les formules

$$dej_{Va} = \frac{103,1N_{VL} + 91,3N_{VA}}{t_{c,Va}N_{Va}} = t'_L 103,1 + (1 - t'_L)91,3; \quad (2.26)$$

$$dej_{Re} = \frac{(54,8 + 47,5)N_{Re}}{t_{c,Re}N_{Re}} = 68,2 \quad (2.27)$$

car les catégories de la table 1.3 recouvrent celles d'Inosys. Pour les bovins de boucherie, on doit différencier les bovins entre un et deux ans selon le sexe et on note M_1 le nombre de mâles entre un et deux ans. On a donc

$$dej_{Bo} = \frac{67,5M_1 + 47,5(N_{Bo} - M_1) + 83N_{2m} + 54,8N_{2f}}{t_{c,Bo}N_{Bo}}. \quad (2.28)$$

Pour les veaux et jeunes bovins, on doit différencier, parmi ceux qui n'ont pas été abattus, les mâles et les femelles et on note M_0 le nombre de mâles de moins d'un an qui n'ont pas été abattus. On a donc

$$dej_{Ve} = \frac{5,5N_{Ve}^a + 11M_0 + 18,3(N_{Ve} - N_{Ve}^a - M_0)}{t_{c,Ve}N_{Ve}}. \quad (2.29)$$

2.3.2 Les trois modules de la production de viande bovine en Corrèze

On a donc décrit la structure de notre classe de modules, c'est-à-dire l'organisation générale de la modélisation et les indicateurs de chaque module. À présent, nous allons présenter qualitativement et quantitativement les trois modules qui appartiennent à notre classe : le système Limousin veaux de lait sous la mère (module VSLM), le système naisseur Limousin broutards (module N-Bro) et le système naisseur Limousin avec génisses de boucherie (module N-GenBou). La table 2.1 et les figures 2.3, 2.4 et 2.5 résument les trois modules et leurs indicateurs. On met en annexe (figures D.1 et D.2) les extraits des cas-types Inosys qui nous ont permis de faire nos calculs, à l'instar de la figure 2.1.

On ne peut pas comparer, en général, les indicateurs entre eux au sein d'un module car ils peuvent venir de sources différentes et rien ne garantit qu'ils soient cohérents entre eux. Remarquons, par exemple, que les besoins en lait d'un veau sont de $0,4 \times 24,57 = 9,828$ kgN par an et par tête tandis que la capacité de production d'une vache allaitante est de $0,8 \times 10,786 = 8,629$. Or, dans la pratique, le lait des vaches suffit à nourrir les veaux sans qu'il soit nécessaire de faire venir du lait de l'extérieur. Pour rendre ces quantités cohérentes, on va les réconcilier dans le formalisme de l'AFM, ce que l'on verra dans la section 2.3.3.

On peut comparer, en revanche, les indicateurs entre les modules, et cela permet de dresser un portrait rapide de chaque mode de production. Constatons déjà qu'outre ceux qui sont constants par définition même (herbe pâturée, lait consommé par les veaux), certains indicateurs n'évoluent pas beaucoup d'un module à l'autre, en particulier, tous les indicateurs relatifs aux génisses de renouvellement - le taux de renouvellement t_r évolue peu, l'alimentation et les déjections sont constantes. La gestion du renouvellement du troupeau ne change pas beaucoup d'un module à l'autre et cela vient probablement du fait qu'il est en partie contraint par l'espérance de vie des vaches qui est la même à l'échelle d'un bassin de production.

Entre les trois modules, les indicateurs qui varient le plus sont ceux relatifs à la consommation de céréales par les vaches, à la production de viande par les veaux et aux déjections des veaux. Les différences dans la consommation de céréales par les vaches vient du fait que, dans les module N-Bro et N-GenBou, les vaches primipares - celles dont c'est le premier vêlage - reçoivent des céréales en amont et en aval de l'accouchement tandis que ce n'est pas le cas dans le module VSLM. On ne sait pas si cela est un oubli de la typologie ou si cela correspond à une vraie différence dans la production, en tout cas rien ne vient le justifier.

Dans les modules VSLM et N-Bro, les taux de sortie des veaux et jeunes bovins sont de l'ordre de 80% tandis que dans le module N-GenBou, il est de 55%. Cela vient du fait que ces modes de production sont dirigés vers la production de veaux, pour l'abattage dans VSLM, pour la vente vif dans N-Bro. Mais dans VSLM, la productivité viande des veaux est beaucoup moins importante que dans N-Bro. Dans VSLM, les veaux sont abattus avant la fin de l'allaitement avec une carcasse d'environ 130 kilogrammes tandis que dans N-Bro, ils sont vendus vifs plus tardivement, vers 9 mois, et ils ont eu le temps de prendre du poids pour atteindre 300 kilogrammes vifs (soit environ 180 kilogrammes équivalent carcasse). Mais comme il reste plus longtemps dans l'exploitation, les quantités excrétées sont plus importants, du simple au double entre VSLM et N-Bro.

Un autre élément remarquable est le supplément d'entrées et de sorties du fait de la production de bovins de boucherie dans N-GenBou. Leur consommation de fourrages - herbe pâturée, foin, enrubannage - se situe dans la moyenne des vaches et des génisses de renouvellement mais ils consomment beaucoup plus de céréales qui sont nécessaires à la finition des animaux avant l'abattage.

Derrière les différences entre ces trois indicateurs se dessinent trois types d'élevage différents. Pour achever le tableau, expliquons ici comment nous avons calculé le paramètre de répartition $(p_i)_{i \in C}$. L'autre paramètre est n le nombre total de têtes de vaches sur le territoire. Donc, p_{VSLM} , p_{N-Bro} et $p_{N-GenBou}$ sont la part des vaches dans un élevage orienté respectivement veaux de lait sous la mère, naisseur broutards et naisseur génisses de boucherie. Mais ces parts

ne sont pas accessibles dans les données existantes. Pour les estimer, on va utiliser des proxy à partir de la SAA. D’abord, on sait que 39484 veaux de boucherie abattus ont été abattus en 2018 en Corrèze. Dans le cas-type Inosys correspondant au module VSLM, il y a 52 veaux sevrés pour 58 vaches fécondées, donc $39484 \times \frac{58}{52} = 44040$ est un estimateur du nombre de vaches dans les élevages veaux de lait sous la mère. Ensuite, on sait que 3762 génisses de plus d’un an ont été abattus en 2018. Dans le cas-type Inosys correspondant au module N-GenBou, il y a 17 génisses de boucherie - 10 abattus après leur deux ans, 7 abattus avant - pour 78 vaches fécondées donc $3762 \times \frac{78}{17} = 17261$ est un estimateur du nombre de vaches dans les élevages naisseur avec génisses de boucherie. Enfin, on sait que 52010 jeunes bovins d’entre huit mois et un an sont sortis vifs de Corrèze en 2018 - ce qu’on suppose être une bonne approximation du nombre de broutards vendus vifs dans la mesure où les broutards nés en Corrèze finissent souvent leur croissance en Italie ou en Espagne. Les modules N-Bro et N-GenBou produisent des broutards, donc pour approcher le nombre de broutards venant de l’élevage naisseur broutards et pouvoir faire un calcul similaire aux précédents, il faut d’abord estimer le nombre de broutards venant de l’élevage N-GenBou. Dans le cas-type correspondant, il y a 17 génisses abattues après leur un an et 39 broutards vendus vifs donc $3762 \times \frac{39}{17} = 8630$ est une approximation du nombre cherché et $52010 - 8630 = 43380$ en est une du nombre de broutards venant de l’élevage naisseur broutards. Dans le cas-type Inosys correspondant à cet élevage, il y a 76 veaux sevrés pour 84 vaches fécondées, donc $43380 \times \frac{84}{76} = 47946$ est un estimateur du nombre de vaches dans les élevages naisseur broutards. Enfin, À partir de ces estimateurs, on peut définir

$$p_{VSLM} = \frac{44040}{109799} = 40,1\%; \quad (2.30)$$

$$p_{N-Bro} = \frac{48498}{109799} = 44,2\%; \quad (2.31)$$

$$p_{N-GenBou} = \frac{17261}{109799} = 15,7\%. \quad (2.32)$$

Avec notre mode de calcul, on estime à 109799 le nombre total de vaches en Corrèze en 2018 alors que celui-ci était de 138728 : cela donne une mesure de l’erreur effectuée dans l’estimation.

2.3.3 Réconciliation des modules

Le tableur Excel ‘module corrigé.xlsx’ contient l’ensemble des résultats évoqués ici.

On a vu que chacun de nos modules n’est pas *a priori* cohérent : souvenons de l’exemple du lait. Or, de la même manière que dans le secteur de l’élevage et pour chaque cheptel, il y avait un équilibre matière - la quantité d’azote entrant par l’alimentation est égal à la quantité d’azote sortant par les produits animaux et les déjections -, il doit y en avoir un pour chaque module. Il n’y a pas de raison que chaque partie du troupeau soit équilibrée : l’azote ingéré par les vaches se retrouve dans les veaux qu’elles font naître et les génisses de renouvellement accumulent de l’azote durant leur croissance avant de devenir des vaches. Mais le troupeau tout entier est à l’équilibre, si on fait abstraction des animaux y entrant vifs - ce qui est marginal en Corrèze. Pour établir cet équilibre, on va donc réconcilier chacun de nos modules avec la méthode de l’AFM.

On peut en effet voir chaque module comme une filière avec ses produits et ses secteurs. Le secteur principal, que l’on appelle Élevage, est la somme de quatre sous-secteurs correspondant aux différentes parties du troupeau : Vaches, Veaux - pour veaux et jeunes bovins -, Renouvellement - pour les génisses de renouvellement -, Boucherie - pour les bovins de boucherie. Conformément à ce qu’on a dit, on impose un équilibre matière sur le secteur Élevage mais pas sur ses sous-secteurs. On rajoute également deux secteurs qui n’ont d’intérêt que pour la réconciliation, Inputs et Outputs, respectivement la source des produits végétaux qui constituent la ration alimentaire et la destination des produits animaux et des déjections animales. Du côté des produits végétaux, on retrouve ceux qu’on a déjà énumérés : herbe pâturée, foin, enrubannage,

Indicateur	VSLM	N-Bro	N-GenBou
Troupeau			
t_L	0,069	0	0
t'_L	0,085	0	0
t_{vel}	0,441	0,452	0,455
t_r	0,192	0,211	0,211
t_{Bo}	0	0	0,239
t_{2f}	0	0	0,141
t_{2m}	0	0	0
Entrées			
he_{Va}	123,84	123,84	123,84
he_{Re}	90,96	90,96	90,96
he_{Bo}			90,96
fo_{Va}	23,339	25,785	26,185
fo_{Ve}	0	4,983	0
fo_{Re}	15,3	15,3	15,3
fo_{Bo}			24,494
en_{Va}	12,231	11,343	13,337
en_{Ve}	0	0	0
en_{Re}	6,188	6,188	6,188
en_{Bo}			7,929
ce_{Va}	2,399	4,025	3,064
ce_{Ve}	0	0	0
ce_{Re}	2,238	2,238	2,238
ce_{Bo}			7,502
la_{Ve}	24,57	24,57	24,57
pa	2,319	1,998	1,993
Sorties			
y_L	11,816	10,786	10,786
sv_a	0,174	0,190	0,192
yv_a	453,7	475	500
sv_e	0,827	0,789	0,549
yv_e	332	472	476,3
s_{Bo}			0,648
y_{Bo}			449,6
dej_{Va}	113,2	114,1	114,1
dej_{Ve}	19,3	36,6	36,5
dej_{Re}	68,2	68,2	68,2
dej_{Bo}			68,1

TABLE 2.1 – Valeur des indicateurs pour chaque module. Sont vides les cases qu'on peut ne pas remplir.

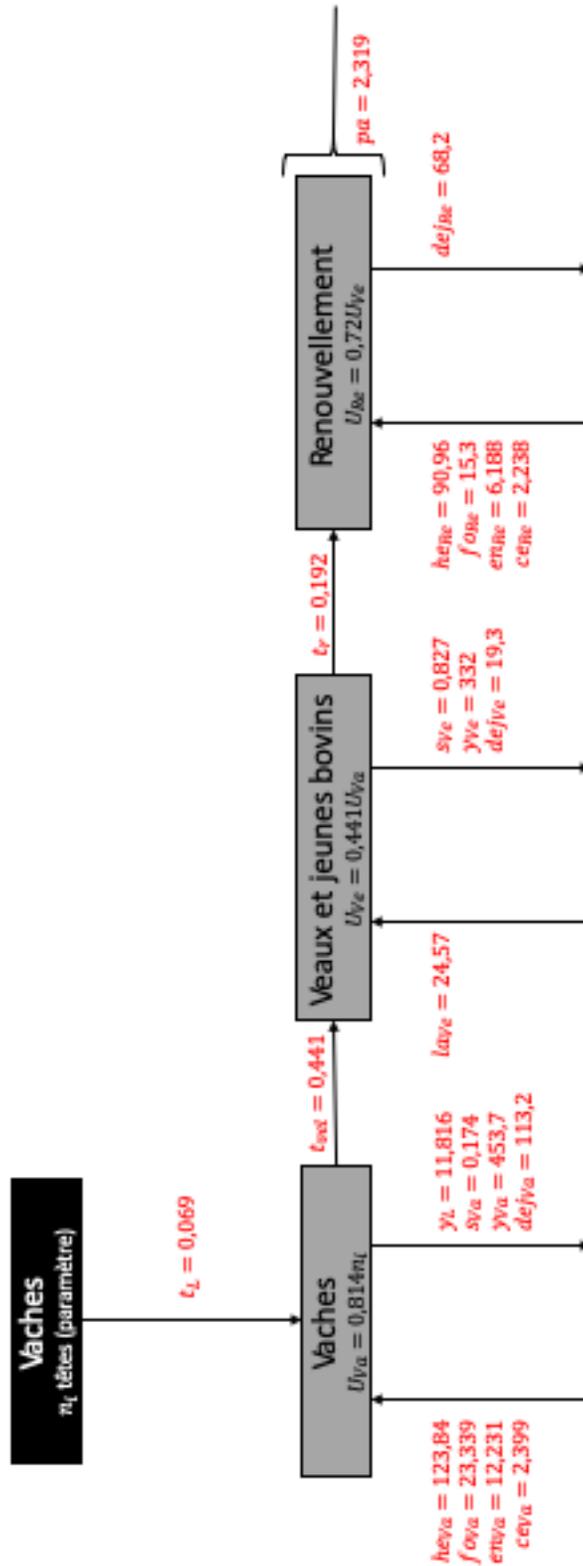


FIGURE 2.3 – Système Limousin veaux de lait sous la mère. Remarquons ici que l'on compte, parmi les génisses de renouvellement, la génisse laitière qui vient remplacer la vache laitière réformée.

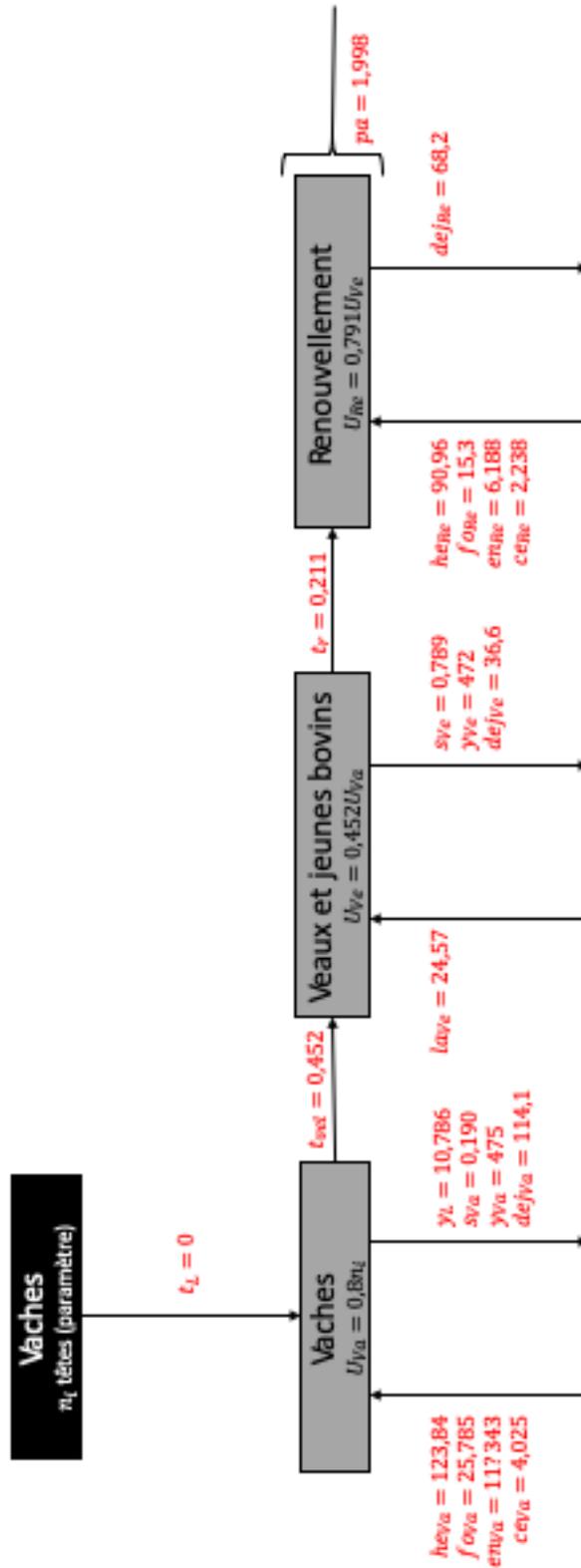


FIGURE 2.4 – Système naisseur Limousin brouards

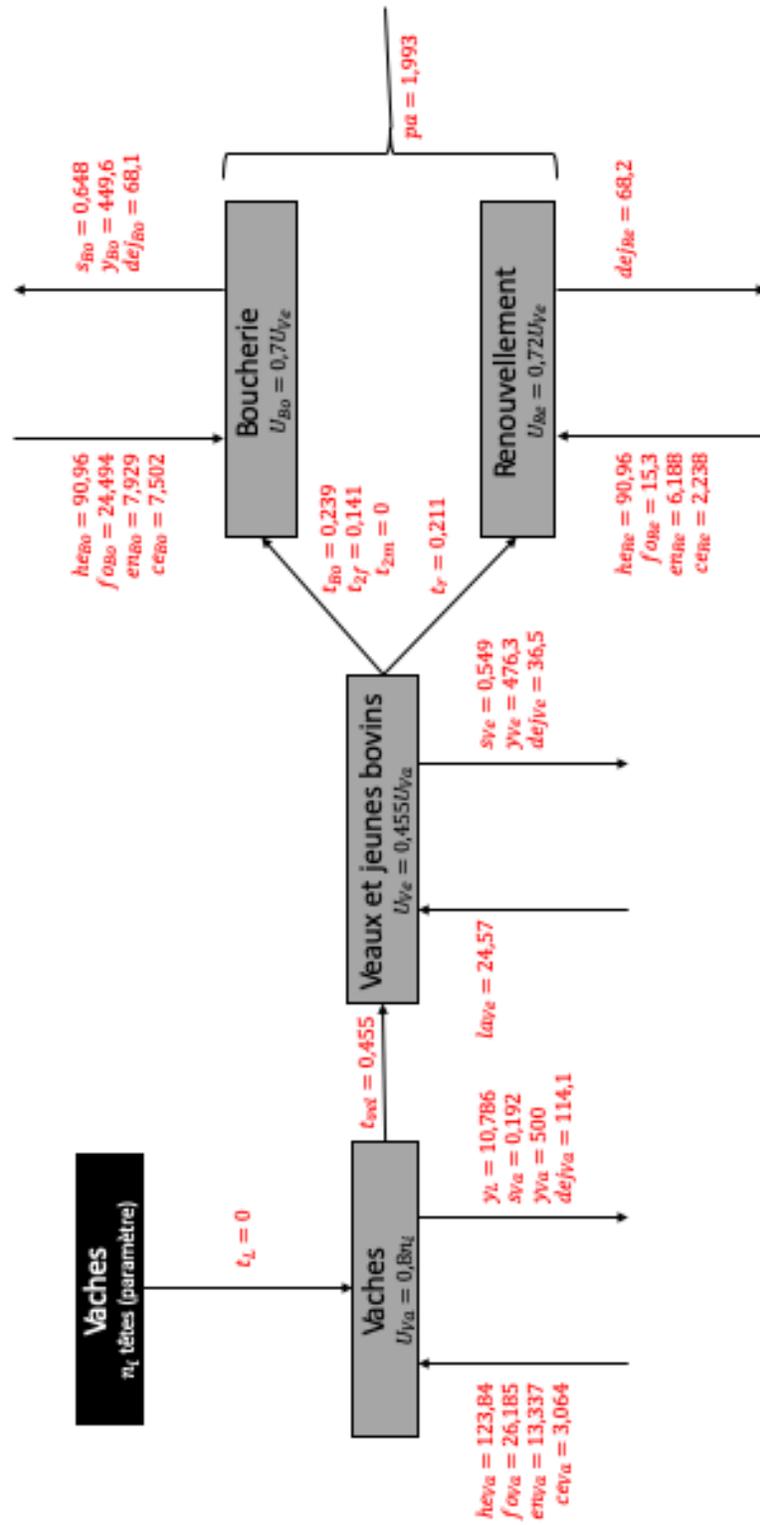


FIGURE 2.5 – Système naisseur Limousin avec génisses de boucherie.

céréales, paille. Ils rentrent dans les sous-secteurs de l'Élevage. Du côté des produits animaux, outre le lait qui sort du sous-secteur Vaches, les autres produits - viande désossée, os, graisse comestible, peau, sang, boyaux, tête et pied, abats, graisse non-comestible - sortent des sous-secteurs Vaches, Veaux, Boucherie. Notons ici que l'on s'intéresse à la production de viande et on suppose donc que les élevages produisent le lait dont ils ont besoin, sans surplus ou manque. Le dernier produit est ce qu'on appelle les déjections brutes qui s'obtiennent en sommant les déjections et la paille. En effet, cette dernière n'est pas ingérée mais sert de litière. Mélangée aux déjections, elle sort de l'élevage - c'est le fumier. Pour respecter autant que faire se peut l'équilibre matière sur l'Élevage, il faut donc que la paille qui y entre en sorte également, d'où ce produit de déjections brutes. Tous les produits respectent la contrainte (5). On résume les flux possibles dans les tables de possibilité 2.2.

À partir des formules (2.2), (2.4), (2.6) et (2.7), on a, sachant les paramètres $n = 138728$ et $(p_i)_{i \in C}$ déterminés aux équations (2.30), (2.31) et (2.32), la taille pour chaque module de chaque partie du troupeau en UGB. Tous les indicateurs que l'on a définis sont en kgN par UGB par an - pour les produits animaux, on dispose de la production de carcasse en kilogrammes par UGB par an et avec les tables 1.1 et 1.2, on obtient des kgN par UGB par an pour chaque produit. Donc, par une simple multiplication, on détermine tous les flux de produits végétaux entrant dans les sous-secteurs de l'Élevage et tous les flux de produits animaux en sortant, ainsi que le lait. Concernant les déjections brutes, on ne connaît pas l'utilisation de la paille par chaque partie du troupeau mais, en sommant les déjections de chaque partie - ce que l'on calcule avec de_j pour $i = Va, Ve, Re, Bo$ - avec la quantité globale de paille - calculée avec pa -, on calcule le flux de déjections brutes sortant de l'Élevage.

Avant la réconciliation, on est loin de l'équilibre comme on le voit dans la table 2.3 : il faut augmenter les sorties entre 20% et 25% pour qu'elles atteignent les entrées. Plusieurs hypothèses peuvent être faites sur l'origine de cet écart : cela peut venir d'une surestimation de la consommation d'herbe pâturée, d'une sous-estimation de la consommation en lait des veaux, ou d'une incompatibilité plus globale entre les données tirées de [Billen et al., 2018] - teneur en azote des différents produits animaux et végétaux, composition de l'animal mort, déjections par tête - et des données venant d'Inosys.

Quoi qu'il en soit, la réconciliation n'a pas pour objet de déterminer des flux à partir du jeu de contraintes mais de rendre ces flux cohérents entre eux. Ainsi, une fois que la réconciliation a eu lieu, les flux déterminés le sont du fait de l'équilibre matière sur les produits ou par agrégation des sous-secteurs. Les seuls flux libres sont les flux de déjections brutes sortant des sous-secteurs de l'Élevage que l'on ne peut déterminer comme on ne connaît pas la quantité de paille utilisée par chaque partie du troupeau. Les autres flux sont redondants. Ce qui nous intéresse, c'est le nombre de sigmas n_σ qui indique de combien les données de sortie s'éloignent des données d'entrée. À part les flux de lait qui sont réconciliés différemment, tous les flux ont le même n_σ qui est respectivement de $\pm 2,49$ pour le module VSLM, $\pm 2,1$ pour le module N-Bro et $\pm 2,73$ le module N-GenBou - - pour les flux de produits végétaux entrant dans l'élevage, + pour les flux de produits animaux ou de déjections brutes sortant de l'élevage. Pour le comprendre, considérons la table 2.2 en faisant abstraction des quatre colonnes correspondant aux sous-secteurs et à la ligne du lait. On a un modèle extrêmement simple avec trois secteurs A, B et C et deux produits, 1 et 2, le produit 1 reliant A et B , le produit 2 reliant B et C . Comme le flux de produit 1 dépasse le flux de produit 2 alors qu'il y a un équilibre matière sur le secteur B , la réconciliation procède en égalisant les flux de la même manière pour l'un et pour l'autre, c'est-à-dire avec le même n_σ en valeur absolue. Pour le lait, la différence vient du fait qu'il n'est produit et employé que par l'Élevage : l'équilibre matière sur le produit (et non plus sur le secteur) force le flux sortant à être égal au flux entrant.

Les valeurs de n_σ pour nos trois modules, entre 2 et 3, nous informent de la faible cohérence *a priori* de nos données. Une piste peut être de creuser les hypothèses évoquées ci-dessus qui expliquent ces écarts.

Ressources	Inputs	Outputs	Élevage	Vaches	Veaux	Renouvellement	Boucherie
Produits végétaux							
Lait							
Produits animaux							
Déjections brutes							
Emplois	Inputs	Outputs	Élevage	Vaches	Veaux	Renouvellement	Boucherie
Produits végétaux							
Lait							
Produits animaux							
Déjections brutes							

TABLE 2.2 – Tables de possibilité des emplois et des ressources. Par hypothèse, le lait ne peut être utilisé à autre chose qu’à nourrir les veaux

Module	Entrées	Sorties	Écart (en %)
VSLM	9651	7668	25,86
N-Bro	10820	8944	20,97
N-GenBou	4621	3652	26,53

TABLE 2.3 – Modules avant la réconciliation. Les entrées désignent l’ensemble des produits végétaux - y compris la paille - et le lait, les sorties l’ensemble des produits animaux - y compris le lait - et les déjections brutes. L’écart est relatif aux sorties.

2.4 Analyse des flux de matière pour la Corrèze

À partir des modules corrigés de la section 2.3, on peut donc implémenter une AFM pour le département de la Corrèze dont l’unité est la tonne d’azote tN . Pour réaliser cette AFM, on a largement repris le cadre développé dans la section 1.3. Toutefois, du fait de nouvelles informations ou de l’approche modulaire empruntée, nous avons dû changer, à la marge, quelques éléments.

Concernant les produits, on a rajouté le triticale comme sous-produit des céréales - la Corrèze en produit 18000 tonnes par an. On a retenu une teneur en azote de 1,74 kgN par 100 kilogrammes de matière sèche¹³. On a également dissocié, au sein des produits des prairies naturelles - renommées produits des prairies -, l’herbe pâturée, le foin et l’enrubannage, sans donner de formule pour déterminer ces flux. Concernant les secteurs, on a rajouté les trois modules comme sous-secteurs du sous-secteur bovins de l’élevage.

Outre ces changements mineurs, le premier changement réside dans le traitement de la paille. Jusque-là, on considérait la paille comme entrant dans l’élevage mais, en construisant nos modules, on s’est rendu qu’elle y servait de litière. La paille n’est pas digérée et transformée en produits animaux ou en déjections mais mélangée à ces déjections pour constituer le fumier. Aussi, on doit la compter comme un produit sortant de l’élevage à destination des terres cultivées : dans la pratique, on va rajouter au fumier la quantité de paille en question. Les tables 1.11 et 1.10 deviennent alors la table 2.4. Comme on ne connaît pas les quantités de paille utilisées dans les autres élevages, la juxtaposition, dans la table emplois, des deux manières de compter le fumier revient à supposer que les autres élevages n’utilisent pas de paille.

L’autre changement réside dans l’alimentation animale : on ne définit plus les indicateurs ing_x mais la ration alimentaire est donnée par les modules. Pour les bovins, cela change la ration. Alors qu’auparavant, tous les produits végétaux étaient susceptibles d’en faire partie, dorénavant seuls les céréales, les produits des prairies - herbe, foin, enrubannage - et la nourriture

13. Source : <https://www.arvalis-infos.fr/triticale-une-production-en-legere-hausse-et-de-qualite-pour-l-alimentation-animale-@/view-20468-arvarticle.html>

Secteur d'origine	Produit	Formule
$j \in \mathcal{C}$	Fumier	$typ_{bov.fum} \sum_i de_j U_i + \sum_i U_i pa =: fum_{bov}$
Produit j	Secteur de destination	Formule
Fumier	Terres cultivées	$\sum_{i \in elev} chep_i . de_j . typ_{i,j} . (1 - vol_{i,j}) + fum_{bov}$

TABLE 2.4 – Détermination des flux de déjections animales - table ressources et emplois. \mathcal{C} désigne toujours l'ensemble des modules vus également comme des sous-secteurs de l'élevage bovin. Notons que *elev* ne comprend plus les bovins qui en ont été extraits pour construire les modules.

animale importée peuvent être consommés par les bovins. De cela vient une incohérence déjà mentionnée : les bovins ne se nourrissent plus des fourrages cultivées en partie pour eux, quand bien même ceux-ci sont produits en abondance en Corrèze - par exemple le maïs fourrage. On n'a pas déterminé si cela vient d'une lacune des données venant d'Inosys ou si, en réalité, le maïs produit en Corrèze n'est que peu consommé sur place par les bovins - ce qui serait étrange, vu l'importance de la production. Pour les autres cheptels, faute d'informations et en l'absence des indicateurs *ingx*, cela revient à moins déterminer leur ration que, par exemple, dans le scénario ARD.

Ces deux changements montrent que notre AFM sur la Corrèze est plus le révélateur de ce qui reste à faire que l'aboutissement du travail. En particulier, le fait de préciser davantage la filière sur un de ces points - l'élevage bovin - oblige à clarifier des informations qui jusque-là ne l'étaient pas - les autres cheptels. Dans les tables 2.5 et 2.6, on détaille les paramètres de l'AFM : la surface agricole, le plan de culture et le cheptel vienne de la SAA de 2018, la démographie vient de l'Insee, l'alimentation et la fertilisation synthétique viennent de [Billen et al., 2018]. Dans la table 2.7, on détaille les indicateurs de l'AFM, outre ceux des modules : outre la teneur en azote du triticale, ils viennent tous de [Billen et al., 2018]. Dans cet article, si la Corrèze n'est pas une région de l'étude, une région proche existe, la Cantal-Corrèze et on a supposé que toutes les quantités à l'hectare étaient valables pour la Corrèze.

Catégorie	Param.	Unité	Valeur
Surface agricole	Surface agricole utilisée	ha	238271
	TC - hors prairies temporaires	%	9,6
	Prairies temporaires	%	22,3
	Prairies permanentes	%	68,1
Plan de culture	Blé	%	10,39
	Seigle	%	0,93
	Orge	%	4,79
	Avoine	%	0,58
	Maïs grain	%	3,57
	Riz	%	0
	Triticale	%	11,29
	Autres céréales	%	2,74
	Paille	%	22,47
	Colza	%	0,55
	Tournesol	%	0,16
	Soja	%	0,09
	Autres oléagineux	%	0,01
	Fèves et féveroles	%	0,04
	Pois	%	0,03
	Autres protéagineux	%	0,02
	Betterave sucrière	%	0
	Pommes de terre	%	0,32
	Autres racines	%	0
	Pois vert	%	0
	Haricots secs	%	0
	Haricots verts	%	0
	Légumes secs	%	0
	Fruits secs	%	1,7
	Courges et melons	%	0
	Choux	%	0
	Légumes à feuilles	%	0
	Fruits	%	5,47
	Olives	%	0
	Agrumes	%	0
	Lin	%	0,02
	Chanvre	%	0
Maïs fourrage	%	34,84	
Choux fourragers	%	0	
Luzerne et du trèfle	%	0	
Prairies temporaires non légumineuses	%	0	

TABLE 2.5 – Table des paramètres pour l’implémentation de la Corrèze dans le modèle AFM - 1.

Population humaine	Taille de la population	M d'hab	0,241
	Taux d'urbanisation	%	49,7
	Quantité de protéines ingérées	kgN/hab	6,6
	Protéines végétales	%	34,8
	Protéines animales		56,1
Fertilisation synthétique	Terres cultivées	kgN/ha	25,7
	Prairies	kgN/ha	15,7
Cheptel	Ovins	Têtes	59600
	Caprins	Têtes	4100
	Porcins	Têtes	46700
	Volailles	Têtes	1090000

TABLE 2.6 – Table des paramètres pour l'implémentation de la Corrèze dans le modèle AFM - 2.

Catégorie	Indicateur	Unité	Valeur
Flux de fertilisants	$(vol_X)_{X=P,TC}$	%	2,8
	r_{rur}	%	2,27
	r_{urb}	%	9,4
	$(dej_i)_{i \in elev}$	kgN/tête	Table B.4
	$(typ_{i,j})_{i \in elev, j \in dejani}$	%	Table B.5
	$(vol_{i,j})_{i \in elev, j \in dejani}$	%	Table B.6
	dep	kgN/ha	10,57
Flux de produits animaux	$(y_i)_{i \in elev}$	kg éq. carcasse/tête	Table A.1
	$(y_i^c)_{i \in elev}$	kg/tête	Table A.1
	$(part_j)_{j \in viande}$	%	Table A.3
	$(N_j)_{j \in viande}$	kgN/100kg	Table A.4
Flux de végétaux	Triticale	kgN/100kgMS	1,74
	γ_{TC}		0,01
	γ_P		0,3675
	Y_{maxTC}	tN	12226
	Y_{maxP}	tN	110642

TABLE 2.7 – Table des indicateurs pour l'implémentation de la Corrèze dans le modèle AFM.

Conclusion

Au terme de ce travail, les problèmes fixés en introduction ont été pour partie résolus, pour partie à résoudre encore. On a réussi à construire une analyse des flux de matière pour l'agriculture à partir de l'expertise de [Billen et al., 2018] : cela montre que le formalisme de l'AFM peut permettre de traduire des savoirs académiques en un langage simple et complet. Reste encore à déterminer plus précisément comment combiner des informations d'origine différente et comment évaluer la crédibilité à accorder à chacune d'elles. Lors de la construction de nos modules, on a été confronté à ce problème et si la réconciliation de données permet de rendre cohérent un modèle qui ne l'est pas *a priori*, elle ne dit rien sur le degré de confiance que l'on peut accorder à telle ou telle source.

On a également construit, dans notre AFM, une grille de paramètres. À partir de la connaissance des liens entre les flux, cette grille permet d'en calculer un certain nombre, et donc permet de répercuter une éventuelle modification de la filière. Bref, en développant cette grille de paramètres, on rend possible la scénarisation, c'est-à-dire la capacité de se projeter dans une alternative et d'en étudier les contours. Il reste à améliorer cette grille pour qu'elle ne soit pas seulement un auxiliaire de calcul mais aussi une description qualitative suffisante du scénario que l'on veut étudier. Il n'est pas suffisant de définir des variables à partir desquelles on peut calculer les flux, il faut aussi que ces variables aient un sens pour l'utilisateur, qu'elles lui permettent de se projeter dans le scénario qu'il veut étudier. Si on a commencé à travailler sur cette question-là avec les modules, elle reste encore ouverte.

Les modules justement nous ont permis d'intégrer dans l'AFM la question de l'alimentation animale tout en y intégrant le fonctionnement détaillé de l'élevage bovin. C'était-là l'objectif fixé : réussir à déployer des indicateurs agrégés en un ensemble d'indicateurs simples articulés entre eux qui permettent de décrire un mode de production. Mais les modules ouvrent la voie à plus. En effet, ils transforment la question de la paramétrisation : il ne s'agit plus de modifier des quantités mais d'arbitrer entre des organisations complètes de la production et de pouvoir étudier les effets respectifs de chacune sur le métabolisme des sociétés avec leur environnement. Les scénarios alternatifs ne sont plus des paquets de nombres mais des systèmes de production occupant chacun une certaine place. Reste alors à définir les modules manquants pour pouvoir obtenir une description complète d'un territoire.

Comme ce stage inaugure une thèse au sein de l'équipe STEEP, énonçons ici deux autres questions que l'on n'a pas eu le temps d'aborder dans notre stage mais qu'il faudrait creuser durant le doctorat.

D'abord, la question des unités. On a essentiellement travaillé sur des masses d'azote du fait des informations dont on disposait. Mais la description d'une situation ou d'un scénario est forcément multi-unités, pour tenter de capter un ensemble large de phénomènes pertinents. Concernant l'agriculture, outre la masse d'azote, les autres unités physiques que l'on voudrait intégrer sont la masse de phosphore, la masse de carbone, l'énergie, etc. Mais si l'on veut étudier le métabolisme entre des sociétés et leur environnement, il ne faut pas seulement étudier, d'un point de vue physique, la viabilité d'une organisation de la production, mais aussi en décrire les aspects sociaux. En ce sens, on pourrait réfléchir à intégrer une unité de temps de travail.

Ensuite, la question du lien avec d'autres filières. L'agriculture n'est pas un isolat au milieu de

la production humaine. Elle est profondément intégrée à d'autres filières : l'industrie chimique - production d'engrais, de semences -, l'industrie métallurgique - production de machines agricoles -, l'industrie agro-alimentaire - transformation des aliments - et la grande distribution. Dans l'avenir, elle est peut être même amenée à se rapprocher de la filière énergétique. Sur le plan social comme sur le plan environnemental, cet entrelacs de l'agriculture et de l'industrie est décisif : c'est lui qui explique les progrès de productivité dans la culture et l'élevage depuis des dizaines d'années. C'est lui aussi qui explique les conditions de vie modernes de bien des agriculteurs, forcés, pour rester dans la concurrence, de s'endetter pour accéder au matériel dernier cri tout en voyant leurs ressources fondre sous les coups de butoir des grosses centrales d'achat.

Annexe A

Produits animaux

Les tables A.1 et A.2 présentent les rendements viande et coproduit pour le scénario ARD et dans la région Corrèze. Pour le scénario ARD, on fait l'hypothèse que les rendements sont les mêmes qu'actuellement. Ceux-ci sont alors déterminés par la comptabilité agricole. Les tables A.3 et A.4 présentent respectivement la composition de la carcasse pour chaque cheptel et la teneur en azote de chaque produit animal. Ces quantités sont les mêmes pour le scénario ARD et la région Corrèze.

Cheptel	Rendement viande	Rendement coproduit
Bovins	80,7	1247,9
Ovins	15,9	88,3
Caprins	8,3	88,3
Porcins	155,4	0
Volailles	2,9	1,9
Équins	0,1	0

TABLE A.1 – Source : [Billen et al., 2018]. Rendement viande annuel, en masse de carcasse par tête, et rendement coproduit annuel, en masse par tête, par cheptel, pour le scénario ARD.

Cheptel	Rendement viande	Rendement coproduit
Ovins	15,1	32,1
Caprins	5,4	32,1
Porcins	137,4	0
Volailles	0,8	1,1

TABLE A.2 – Source : [Billen et al., 2018]. Rendement viande annuel, en masse de carcasse par tête, et rendement coproduit annuel, en masse par tête, par cheptel, pour la région Corrèze.

	Bovins	Ovins	Caprins	Porcins	Volailles	Équins
Viande désossée	69,2	75,0	75,0	78,6	67,1	69,2
Os	19,2	15,4	15,4	14,3	28,6	19,2
Graisse comestible	11,5	9,6	9,6	7,1	4,3	11,5
Total carcasse	99,9	100	100	100	100	99,9
Peau	15,4	15,4	15,4	11,4	14,3	15,4
Sang	7,7	7,7	7,7	4,9	4,9	7,7
Boyaux	48,1	48,1	48,1	14,3	11,4	48,1
Tête et pied	5,8	5,8	5,8	4,3	4,3	5,8
Abats	5,8	5,8	5,8	3,6	3,6	5,8
Graisse non-comestible	9,6	9,6	9,6	4,4	4,4	9,6
Total	192,3	192,3	192,3	142,9	142,9	192,3

TABLE A.3 – Source : [Billen et al., 2018]. Part en pourcentage de chaque partie de la bête dans la carcasse. Les termes de la ligne « **Total carcasse** » valent bien 100% modulo les erreurs d’arrondi car la carcasse comprend la viande désossée, les os et les graisse comestible. Les termes de la ligne « **Total** » valent plus que 100% car la carcasse ne comprend pas la peau, le sang, les boyaux, la tête et les pieds, les abats, la graisse non-comestible.

	Bovins	Ovins	Caprins	Porcins	Volailles	Équins
Viande désossée	3,13	2,7	2,7	3,5	3	3,13
Os	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Graisse comestible	0,3	0,3	0,3	0,75	0,32	0,3
Peau	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28
Sang	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Boyaux	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tête et pied	6	6	6	6	6	6
Abats	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Graisse non-comestible	0,3	0,3	0,3	0,75	0,32	0,3
Lait	0,53	0,94	0,94			
Oeufs					1,79	

TABLE A.4 – Source : [Billen et al., 2018]. Teneur en azote des différents produits animaux, en pourcentage ou, de manière équivalente, en kgN par 100kg de produits animaux.

Annexe B

Déjections animales

Les tables B.1, B.2, B.3 présentent respectivement, pour le scénario ARD, les quantités excrétées par tête et par an selon le cheptel et la catégorie, la répartition des déjections animales selon le cheptel et le type de déjections et les taux de volatilsation des déjections animales selon le cheptel et le type de déjections. Les tables B.4, B.5, B.6 présentent respectivement, dans la région Cantal-Corrèze, les quantités excrétées par tête et par an selon le cheptel et la catégorie, la répartition des déjections animales selon le cheptel et le type de déjections et les taux de volatilsation des déjections animales selon le cheptel et le type de déjections. Dans les tables B.1 et B.4, les moyennes sont calculées à partir de la composition de chaque cheptel en nombre de têtes qui viennent de [Billen et al., 2018].

Cheptel	Catégorie	Quantité excrétée par an (kgN)
Bovins	Vaches laitières	110
	Vaches allaitantes	98
	Génisses >2 ans	59
	Mâles > 2 ans	89
	Génisses 1-2 ans	51
	Mâles 1-2 ans	72
	Veaux de boucherie	6
	Autres femelles, <1 an	20
	Autres mâles, <1 an	12
	Moyenne	65,2
Ovins	Agneaux	7,1
	Moutons	15,3
	Autres ovins (y.c. béliers)	6,3
	Moyenne	12,4
Caprins	Chevreaux	7,6
	Chèvres	15,3
	Autres caprins (y.c. boucs)	15,1
	Moyenne	13,6
Porcins	Porcelets <20kg	3,8
	Jeunes porcs 20<50 kg	3,8
	Truies reproductrices >50kg	22,2
	Verrats >50kg	22,2
	Porcs à l'engraissement >50kg	12,2
	Moyenne	8,7
Volailles	Poules pondeuses	0,7
	Jeunes poules	0,3
	Poulets de chair	0,3
	Canards	0,6
	Dindes	1,0
	Oies	1,4
	Pintades	0,3
	Cailles	0,1
	Lapins mères	1,0
	Moyenne	0,5
Équins	Chevaux	120,0
	Ânes	40,0
	Moyenne	120

TABLE B.1 – Source : [Billen et al., 2018]. Quantité de déjections animales par tête et par an en kgN selon le cheptel et la catégorie dans le scénario ARD. Pour les bovins, il y a une différence avec la table 1.3.

	Fumier	Lisier	En extérieur
Bovins	40	0	60
Ovins	40	0	60
Caprins	40	0	60
Porcins	100	0	0
Volailles	10	90	0
Équins	40	0	60

TABLE B.2 – Source : [Billen et al., 2018]. Répartition en pourcentage des déjections animales selon le type et le cheptel dans le scénario ARD

	Fumier	Lisier	En extérieur
Bovins	27,04		10,2
Ovins	27,04		10,1
Caprins	27,04		10,1
Porcins	24,82		
Volailles	36,4	36,05	
Équins	27,04		61,2

TABLE B.3 – Source : [Billen et al., 2018]. Taux de volatilisation en pourcentage dans l’atmosphère des déjections animales selon le type et le cheptel dans le scénario ARD

Cheptel	Catégorie	Quantité excrétée par an (kgN)
Ovins	Agneaux	6,7
	Moutons	14,4
	Autres ovins (y.c. béliers)	5,9
Caprins	Chevreaux	7,2
	Chèvres	14,4
	Autres caprins (y.c. boucs)	14,2
Porcins	Porcelets <20kg	3,7
	Jeunes porcs 20<50 kg	3,7
	Truies reproductrices >50kg	21,8
	Verrats >50kg	21,8
	Porcs à l’engraissement >50kg	12,1
Volailles	Poules pondeuses	0,7
	Jeunes poules	0,3
	Poulets de chair	0,3
	Canards	0,6
	Dindes	1,0
	Oies	1,4
	Pintades	0,3
	Cailles	0,1
	Lapins mères	1,0

TABLE B.4 – Source : [Billen et al., 2018]. Quantité de déjections animales par tête et par an en kgN dans la région Cantal-Corrèze. Pour les bovins, voir la section 2.3

	Fumier	Lisier	En extérieur
Bovins	37,5	7,9	54,6
Ovins	54,8	0	45,2
Caprins	69,4	0	30,6
Porcins	27,2	72,8	0
Volailles	10	90	0

TABLE B.5 – Source : [Billen et al., 2018]. Répartition en pourcentage des déjections animales selon le type et le cheptel dans la région Cantal-Corrèze

	Fumier	Lisier	En extérieur
Bovins	27,04	27,81	10,2
Ovins	27,04		10,1
Caprins	27,04		10,1
Porcins	24,82	27,54	
Volailles	36,4	36,05	

TABLE B.6 – Source : [Billen et al., 2018]. Taux de volatilisation en pourcentage dans l’atmosphère des déjections animales selon le type et le cheptel dans la région Cantal-Corrèze

Annexe C

Conversion UGB

La table C.1 donne la valeur UGB des différents animaux selon le cheptel et la catégorie. Les catégories utilisées ici sont plus agrégées que celles utilisées dans les tables B.1 et B.4.

Cheptel	Catégorie	Valeur UGB
Bovins	Moins d'1 an	0,4
	1-2 an	0,7
	Mâles >2 ans	1
	Génisses >2 ans	0,8
	Vaches laitières	1
	Autres vaches	0,8
Ovins		0,1
Caprins		0,1
Porcins	Porcelets <20 kg	0,027
	Truies reproductrices >50kg	0,5
	Autres porcins	0,3
Volailles	Poulets de chair	0,007
	Poules pondeuses	0,014
	Autres volailles	0,03
	Lapins mères	0,2
Équins		0,8

TABLE C.1 – Source : Eurostat. Valeur UGB selon le cheptel et la catégorie.

Annexe D

Cas-types Inosys

Les figures D.1 et D.2 sont les extraits des cas-types Inosys respectivement pour le système naisseur Limousin broutards et pour le système naisseur Limousin avec génisses de boucherie.

LE TROUPEAU

LE CHEPTEL EN CROISIÈRE



LES VENTES ANNUELLES

Catégories	Poids	Mois	
15 vaches de boucherie + 1 accident	380 kgc	Déc, janv, févr mai, juin.	103 UGB techniques
22 broutardes (10 mois)	300 kg	Oct, nov, déc	30 085 kg Production brute de Viande Vive = kg vendus - kg achetés ± variations inventaires
38 broutards (8,5 mois)	315 kg	Août, sept, oct.	
1 taureau	600 kgc	Novembre	290 kg Vifs / UGB 375 kg Vifs / vêlage



Les performances

Reproduction

Taux de gestation	95%
Mortalité.....	5%
Productivité numérique	90%
Taux de renouvellement.....	19%
Age au 1 ^{er} vêlage	33 mois
20% d'I.A. réalisées sur génisses et/ou multipares	

Croissance

Broutards :	GMQ naissance-vente : 1 100 g/j
Broutardes :	GMQ naissance-vente : 845 g/j

L'ALIMENTATION SUR STOCK

Principales catégories	Durée (jours)	Apports journaliers (kg brut/jour)					BESOINS TOTAUX
		Fourrages		Concentrés			
		Foin	Enruban.	Céréales	CMAV	Cplt.Brout.	
65 vaches avant vêlage	60	11					Enrubannage 37 TMS Foin 133 TMS Paille litière 54 T
60 vaches après vêlage	75	7	11				1,6 TMS / UGB techniques
15 primipares avant vêlage	45	9		1,4	0,3		Céréales (produites) 16,7 T
15 primipares après vêlage	90	5,5	10	1,0	0,3		CMAV (acheté) 2,7 T
16 génisses de 2 ans	135	7,5		1,0			Compl. Brout. 19,1 T (acheté)
16 génisses de 1 an	135	2,5	5	0,5	0,2		375 kg / UGB 480 kg/vêlage
76 broutard(e)s avant sevrage	100					2,0	
22 broutard(e)s après sevrage	90	4,5				2,0	
15 vaches de réforme	110	8,5		6,0	0,9		

FIGURE D.1 – Système naisseur Limousin broutards

LE TROUPEAU

LE CHEPTTEL EN CROISIERE

LES VENTES ANNUELLES



Les performances

Reproduction		Croissance	
Taux de gestation	95%	Broutards : GMQ naissance-vente : 1 100 g/j	
Mortalité	5%	Génisses de Lyon : GMQ naissance-sevrage : 940 g/j	
Productivité numérique	90%	GMQ finition : 960 g/j	
Taux de renouvellement	19%	GMQ naissance-vente : 700 g/j	
Age au 1 ^{er} vêlage	33 mois	Génisses lourdes : GMQ naissance-sevrage : 940 g/j	
20% d'I.A. réalisées sur génisses et/ou multipares		GMQ sevrage-début finition : 510 g/j	
		GMQ finition : 930 g/j	
		GMQ naissance-vente : 635 g/j	

L'ALIMENTATION SUR STOCK

Principales catégories	Durée (jours)	Apports journaliers (kg brut/jour)					BESOINS TOTAUX
		Fourrages		Concentrés			
60 vaches avant vêlage	60	Foin	Enruban.	Céréales	CMAV	Cplt.Brout.	Enrubannage 41 TMS
57 vaches après vêlage	75	7	11				Foin 144 TMS
15 primipares avant vêlage	45	9		1,4	0,3		Paille litière 59 T
15 primipares après vêlage	90	5,5	10	1,0	0,3		1,6 TMS / UGB techniques
25 génisses de 2 ans	135	7,5		1,0			Céréales (produites) 24,8 T
32 génisses de 1 an	135	2,5	5	0,5	0,2		CMAV (acheté) 5,2 T
71 broutard(e)s avant sevrage	100					2,0	Compl. Brout. 14,2 T
10 génisses lourdes en finition	105	7		3,8	1,3		390 kg / UGB
7 génisses de Lyon en finition	120	6,5		3,0	1,0		590 kg/vêlage
14 vaches de réforme	110	8,5		6,0	0,9		

FIGURE D.2 – Système naisseur Limousin avec génisses de boucherie

Bibliographie

- [CIV, 2005] (2005). *Bien maîtriser l'allaitement de vos veaux : pour une croissance et une qualité optimales*. Comité interprofessionnel Veau sous la mère.
- [Pat, 2011] (2011). *Guide du Pâturage, méthode du programme Herbe et Fourrages*. Chambres d'agriculture Limousin.
- [Anglade et al., 2015] Anglade, J., Billen, G., Garnier, J., Makridis, T., Puech, T., and Tittel, C. (2015). Nitrogen soil surface balance of organic vs conventional cash crop farming in the seine watershed. *Agricultural Systems*, 139 :82–92.
- [Association Solagro, 2016] Association Solagro, Christian Couturier, M. C. S. D. e. P. P. (2016). *Le scénario Afterres 2050 version 2016*, volume 1.
- [Billen et al., 2015] Billen, G., Lassaletta, L., and Garnier, J. (2015). A vast range of opportunities for feeding the world in 2050 : trade-off between diet, n contamination and international trade. *Environmental Research Letters*, 10(2) :025001.
- [Billen et al., 2018] Billen, G., Le Noë, J., and Garnier, J. (2018). Two contrasted future scenarios for the french agro-food system. *Science of the Total Environment*, 637 :695–705.
- [Courtonne, 2016] Courtonne, J.-Y. (2016). *Environmental assessment of territories through supply chain analysis : biophysical accounting for deliberative decision-aiding*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.
- [Guillaume, 2010] Guillaume, A. (2010). Vaches allaitantes, un pâturage de qualité. performances et réduction des coûts assurés. *Cap Élevage*.
- [Harchaoui and Chatzimpiros, 2017] Harchaoui, S. and Chatzimpiros, P. (2017). Reconstructing production efficiency, land use and trade for livestock systems in historical perspective. the case of france, 1961–2010. *Land Use Policy*, 67 :378–386.
- [Harchaoui and Chatzimpiros, 2019] Harchaoui, S. and Chatzimpiros, P. (2019). Energy, nitrogen, and farm surplus transitions in agriculture from historical data modeling. france, 1882–2013. *Journal of Industrial Ecology*, 23(2) :412–425.
- [Holtgrieve et al., 2011] Holtgrieve, G. W., Schindler, D. E., Hobbs, W. O., Leavitt, P. R., Ward, E. J., Bunting, L., Chen, G., Finney, B. P., Gregory-Eaves, I., Holmgren, S., et al. (2011). A coherent signature of anthropogenic nitrogen deposition to remote watersheds of the northern hemisphere. *Science*, 334(6062) :1545–1548.
- [Jean-Yves Courtonne (Inria), 2019] Jean-Yves Courtonne (Inria), Julien Alapetite, M. B. I. V. W. A.-E. Y. R. A.-E. (2019). Af filières – analyse des flux des filières biomasse pour des stratégies régionales de bioéconomie. rapport final. page 46.

- [Laisse et al., 2019] Laisse, S., Baumont, R., Dusart, L., Gaudré, D., Rouillé, B., Benoit, M., Veysset, P., Rémond, D., and Peyraud, J.-L. (2019). L’efficience nette de conversion des aliments par les animaux d’élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l’élevage à l’alimentation humaine.
- [Lassaletta et al., 2014] Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., and Garnier, J. (2014). 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems : the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*, 9(10) :105011.
- [Marc Hervé, 2013] Marc Hervé, Prune Rosengarten, M. B. (2013). *Teneurs en N des organes végétaux récoltés, méthode d’établissement et valeurs de référence*. Comifer.
- [Mottet et al., 2017] Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., and Gerber, P. (2017). Livestock : On our plates or eating at our table ? a new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14 :1–8.
- [Rockström et al., 2009] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., et al. (2009). Planetary boundaries : exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).
- [Sepchat et al., 2017] Sepchat, B., Agabriel, J., and Dhour, P. (2017). Production laitière des vaches allaitantes : caractérisation et étude des principaux. *INRA Productions Animales*, 30(2) :139–152.
- [Smith et al., 2013] Smith, B. E., Richards, R. L., and Newton, W. E. (2013). *Catalysts for nitrogen fixation : nitrogenases, relevant chemical models and commercial processes*, volume 1. Springer Science & Business Media.
- [Steffen et al., 2015] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., et al. (2015). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223).