



HAL
open science

Empreintes énergie et azote des filières agricoles aux échelles France et régions

Alexandre Pannier

► **To cite this version:**

Alexandre Pannier. Empreintes énergie et azote des filières agricoles aux échelles France et régions. Environnement et Société. 2022. hal-03885932

HAL Id: hal-03885932

<https://inria.hal.science/hal-03885932>

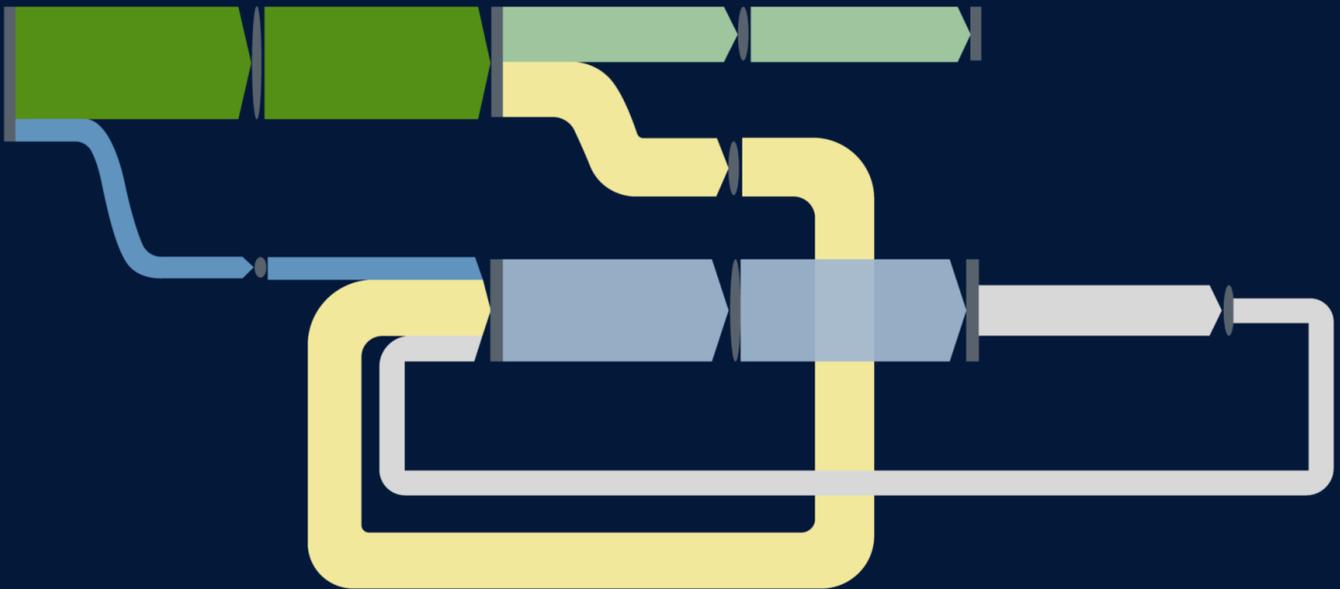
Submitted on 6 Dec 2022

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.

Rapport de stage de fin d'études

Empreintes énergie et azote des filières agricoles aux échelles France et régions



Alexandre PANNIER

Tuteur industriel : Jean-Yves COURTONNE (INRIA – Equipe STEEP)

Co-encadrant : Julien ALAPETITE (TerriFlux)

Tuteur pédagogique : Arnaud PERONA (Sup'EnR)

1^{er} semestre 2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Yves et Julien pour m'avoir encadré tout au long de ce stage et m'avoir confié ce travail. Témoignage de leur confiance en moi, j'ai pu mener à bien cette étude du début à la fin avec une grande autonomie, de la manière que je souhaitais et sans contraintes imposées (temps, manière de travailler, méthodologie à appliquer, études à faire) : tous les résultats de mon travail qui seront présentés dans ce rapport sont donc complètement assumés.

Malgré cette grande liberté accordée, ils ont su me guider dans les moments charnières de ce stage et se rendre rapidement disponibles pour répondre à mes divers besoins et questionnements. Ils ont également fait preuve d'une grande écoute et montré un intérêt certain à propos des quelques idées/pistes d'amélioration (concernant les outils qu'ils développent) que j'ai pu leur soumettre tout au long du stage.

Merci également à Yazid, qui a effectué son stage chez STEEP dans le même contexte que moi (inclut dans le projet SCALABLE, dans la même équipe de travail et à la même période), pour le partage de ses réflexions sur tous les sujets (son stage, le mien ou bien d'autres sujets encore !). J'ai pu suivre durant mon stage le déroulement de son travail, autant intéressant, et ainsi en apprendre beaucoup sur les sujets qu'il traitait.

Un grand merci aussi à toute l'équipe STEEP qui m'a très bien accueilli et qui, victime de son succès (il n'y a pas de hasard), s'agrandit d'année en année (voire de mois en mois...) : elle a et aura un rôle certain à jouer dans la transition de la situation actuelle de la planète vers une situation plus souhaitable. La diversité des expériences, réflexions, opinions et visions des membres qui composent cette équipe couplée avec leur humilité et leur grande tolérance lui permet de débattre de manière constructive et ainsi pousser la réflexion jusqu'à soulever des questions auxquelles il est souvent moins confortable d'apporter des réponses, remettant en cause la structure profonde de nos modes de vie. La participation à ces riches échanges m'a forcé à développer ma réflexion personnelle sur ces sujets complexes, ce qui impactera nécessairement autant ma vie professionnelle que ma vie personnelle.

Pour finir, je souhaite remercier tous les collaborateurs du projet SCALABLE qui, eux aussi, ont su faire preuve de bienveillance à mon égard. Ils ont pu me faire part de leurs remarques qui ont contribué à améliorer/préciser mon travail afin qu'il remplisse au mieux les objectifs visés par le projet. Cela m'a également permis de découvrir l'organisation et la conduite d'un projet de recherche et, par la même occasion, suivre l'avancement de certains autres travaux composant le projet qui étaient menés en parallèle de mon stage (ce qui est toujours intéressant) : c'est toujours plus motivant de savoir que son travail s'inscrit dans un projet global avec des objectifs plus larges et qu'il sera utile et non pas laissé sans suite.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	2
I. Introduction	4
II. Présentation du stage	6
1) Contexte	6
A. Présentation de l'INRIA	6
B. Présentation de l'équipe STEEP.....	6
C. Présentation de l'entreprise TerriFlux	7
a) Outils informatiques développés par TerriFlux.....	7
Réconciliation de données.....	7
Représentation sous forme de diagramme de Sankey	7
b) Etudes réalisées	8
Projet AF Filières	8
Présentation et analyse d'une AFM.....	8
D. Présentation du projet SCALABLE	12
2) Présentation du sujet.....	14
III. Travaux réalisés.....	16
1) Déroulement du travail.....	16
2) Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées.....	17
A. Méthodologie commune à toutes les filières et toutes les empreintes.....	18
a) Fonctionnement global des filières agricoles	18
b) Contenu azote et énergie des matières des AFM.....	20
B. Métabolisme azoté des filières agricoles.....	21
a) Filières végétales	21
Secteur « Producteur »	21
Secteurs « Chaîne d'approvisionnement » et « Stock »	23
Secteur « Consommateur ».....	24
b) Filières animales.....	24
Secteur « Producteur »	24
Secteurs « Chaîne d'approvisionnement » et « Stock »	26
Secteur « Consommateur ».....	27
C. Métabolisme énergétique des filières agricoles.....	27
a) Filières végétales	27
Secteur « Producteur »	27
Secteurs « Chaîne d'approvisionnement » et « Stock »	29
Secteur « Consommateur ».....	31

3) Mise en forme des résultats	31
A. Traitement des données	31
a) Structure du classeur Excel	31
b) Comparaison de plusieurs sources de données.....	34
B. Traçage des diagrammes de Sankey.....	34
C. Indicateurs	37
4) Pistes de poursuite.....	39
5) Planning du stage.....	41
IV. Conclusion.....	42
Bibliographie.....	43
Liste des abréviations	45
Table des figures	46
Table des tableaux.....	47
Table des annexes.....	48
Résumé.....	55
Abstract	55

I. Introduction

Un constat, maintenant largement accepté, menace les sociétés humaines telles qu'elles existent actuellement : l'atteinte des limites planétaires de la planète Terre (définies par Rockström et al. (2009) comme étant le changement climatique, les pertes de biodiversité, les perturbations globales des cycles de l'azote et du phosphore, l'usage des sols, l'acidification des océans, la déplétion de la couche d'ozone, les aérosols atmosphériques, l'usage de l'eau douce et les pollutions chimiques), aussi bien en termes d'impacts environnementaux qu'en termes de disponibilité des ressources. L'ironie de l'histoire est que ce soient justement ces mêmes sociétés humaines qui ont généré cette menace pour leur existence (et continuent de la générer !). Les impacts environnementaux déclenchent des mécanismes qui rendent de plus en plus hostile la Terre pour l'Homme (multiplication de catastrophes naturelles, perte de services écosystémiques, émergence de pandémies, etc.) et l'épuisement des ressources va contraindre l'espèce humaine à trouver des alternatives pour ses activités (soit les mener autrement, soit les réduire) : l'atteinte – ou même déjà le simple rapprochement – de ces limites planétaires ralentira donc nécessairement le développement (tel qu'on l'entend aujourd'hui, principalement économique) des activités humaines, ce qui limitera les impacts de ces activités (sorte d'autorégulation).

La bonne nouvelle (ou pas, compte-tenu des faibles changements mis en œuvre jusqu'à présent) est que les êtres humains ont le pouvoir de réduire cette menace qui pèse sur eux, s'ils le souhaitent. En effet, même si 6 des 9 limites planétaires ont déjà été dépassées à l'heure actuelle (*Freshwater Boundary Exceeds Safe Limits*, 2022), il est encore possible de limiter les conséquences de ces dépassements et, surtout, d'éviter les prochains en réorganisant les sociétés humaines.

Dans cet objectif, il semble indispensable de connaître et être capable de décrire l'organisation actuelle de ces sociétés – voire l'organisation passée, ce qui pourrait permettre d'expliquer leur fonctionnement actuel et comprendre la situation mondiale d'aujourd'hui – afin de caractériser leur dépendance avec leur environnement et leurs impacts sur ce même environnement. Pour cela, il est pertinent de modéliser les flux de matières et d'énergie (flux biophysiques) qui constituent la base des activités humaines et caractérisent ainsi leur métabolisme, également appelé « métabolisme social » (de Molina et al., 2014 ; Haberl et al., 2016 ; Gabriel et al., 2020) ou « métabolisme socioéconomique » (Fischer-Kowalski & Haberl, 1998 ; Pauliuk & Hertwich, 2015). Cette modélisation peut permettre d'évaluer les performances de ces sociétés et, dans un second temps, des analyses prospectives peuvent permettre d'éclairer le champ des possibles (pris ici au sens des contraintes biophysique) pour le futur.

Une des activités humaines majeure de nos sociétés est l'agriculture. En effet, elle constitue une activité indispensable à la survie de l'espèce humaine – via sa production alimentaire – et, par l'organisation des sociétés actuelles, contribue grandement à l'atteinte des limites planétaires via, d'une part, sa consommation en ressources (consommation d'énergies fossiles et consommation de matériaux) et, d'autre part, ses impacts environnementaux (émissions polluantes et uniformisation des espèces utilisées qui nuisent aussi à la biodiversité). Ainsi, le secteur agricole pose aujourd'hui tout une série de questions relatives à la préservation de l'environnement.

De plus, elle est source d'espoir vers des sociétés plus durables par son potentiel de production d'énergie renouvelable et de matériaux biosourcés (tous deux issus de la biomasse produite par l'agriculture), indispensables dans une perspective de substitution des ressources non renouvelables que les sociétés consomment actuellement. Ces potentielles fonctions supplémentaires de l'agriculture – supplémentaires dans le sens qu'elles seraient utilisées dans des proportions bien supérieures à ce qui est actuellement le cas – entrent en compétition avec sa fonction première de produire une alimentation pour l'espèce humaine, ce qui fait émerger une nécessité d'arbitrer entre les différentes fonctions de l'agriculture afin qu'elle remplisse au mieux les objectifs que se fixent les sociétés.

Inscrit dans ce vaste contexte, ce stage a pour but de modéliser les flux d'énergie et d'azote des filières agricoles des territoires, à différentes échelles géographiques (France et régions). La modélisation de ces flux permettra d'apporter des éléments de réponse aux questions soulevées par les constats faits ci-dessus. De plus, il est prévu de représenter ces flux sous forme de diagramme afin d'offrir une visualisation claire du fonctionnement de ces filières, ce qui permettra la compréhension des enjeux associés et de servir d'outil d'aide à la décision pour tous les acteurs à même de modifier le comportement de ces filières.

Ce rapport sera organisé en deux grandes parties. La première permettra de contextualiser le stage, afin de situer le cadre des travaux réalisés et présenter la base de travail (outils et études antérieures), et de présenter plus en détail le sujet du stage, par ses objectifs notamment. La seconde présentera les travaux réalisés tout au long du stage, de la méthodologie appliquée aux résultats obtenus.

II. Présentation du stage

1) **Contexte**

Le stage s'est déroulé au sein de l'équipe STEEP (Soutenabilité, Transition, Environnement, Economie biophysique et Politiques locales) de l'INRIA Grenoble (laboratoire de recherche) : c'est dans cette équipe de recherche que travaille mon tuteur de stage Jean-Yves Courtonne. J'ai également beaucoup travaillé avec la start-up TerriFlux, également hébergée dans les locaux de l'INRIA, qui est portée par Julien Alapetite et qui collabore étroitement avec l'équipe STEEP notamment en développant et mettant à sa disposition des outils informatiques de traitement et de représentation de données.

Jean-Yves, en tant que chercheur et par ses travaux dans le domaine, et Julien, par les outils informatiques développés par son entreprise, sont par ailleurs tous deux engagés dans le projet de recherche SCALABLE qui vise à comprendre les flux de matières et d'énergie en jeu dans les processus de production, de transformation et de valorisation des biomasses d'origine agricole (BOA). Le travail réalisé lors de ce stage s'inscrit pleinement dans ce projet de recherche.

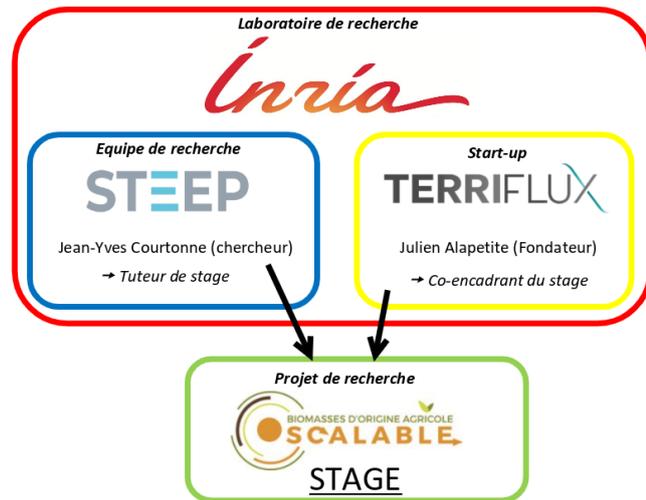


Figure 1 : Schéma présentant le contexte global du stage avec ses principaux acteurs

Tous ces acteurs et ce projet structurant mon stage (résumés en Figure 1) sont présentés plus en détail ci-dessous avec leurs objectifs, travaux et/ou rôles dans la définition et le déroulement de mon stage.

A. Présentation de l'INRIA

L'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique a été créé en 1967. Il a pour objectifs d'entreprendre des recherches fondamentales et appliquées mais aussi de soutenir l'innovation technologique. Le centre de Grenoble Rhône-Alpes a été créé en 1992 (page web du laboratoire : <https://www.inria.fr/fr/centre-inria-grenoble-rhone-alpes>). Il compte aujourd'hui 22 équipes-projets et 22 start-ups issues des équipes-projets autour de 4 principaux axes scientifiques : Science des données, Modélisation de l'environnement, Fiabilité technique, environnementale et éthique du logiciel et Informatique quantique. Ce centre de recherche mobilise plus de 360 personnes, scientifiques et personnels d'appui à la recherche et à l'innovation.

B. Présentation de l'équipe STEEP

L'équipe STEEP (site internet : <https://steep.inria.fr>) est une équipe de recherche interdisciplinaire qui se consacre à la modélisation systémique et à la simulation des interactions entre les facteurs environnementaux, économiques et sociaux. Cette équipe comprend environ une trentaine de personnes, répartie entre des chercheurs (membres permanents de l'équipe), des thésards ainsi que des stagiaires (dont j'ai fait partie). Cette équipe souhaite, par ses travaux, éclairer le débat, nécessairement politique, qui doit être mené afin de décider dans quelles directions entreprendre la transition vers une société plus soutenable. Pour cela, elle envisage de décrire, avec leurs avantages et inconvénients, différentes possibilités plutôt que de produire une prescription de ce qu'il faudrait mettre en œuvre.

Dans cette optique, elle a par exemple organisé une conférence (nommée « Archipel », du 20 au 23 juin 2022) sur les risques systémiques, trajectoires et leviers d'action afin de vulgariser et permettre un partage de connaissances et des échanges autour de ces sujets entre chercheurs de divers horizons.

Concernant son organisation, l'équipe STEEP est divisée en 2 axes :

- L'axe risques systémiques globaux (RSG), qui porte sur l'identification des risques de déstabilisation de nos sociétés à l'échelle globale. Le très fort degré d'interconnexion liant les différents secteurs qui composent nos sociétés industrielles ainsi que les conséquences des activités humaines en termes de destruction environnementale sont porteurs de ces risques systémiques. En pratique, on peut distinguer deux grandes familles de risques systémiques en fonction des processus en jeu. Il s'agit d'une part des risques tendanciels de long terme (décennies) et des risques de contagion systémique de court terme (mois ou années), de nature plus aléatoire que les précédents.
- L'axe alternatives sociotechniques (AST), qui a pour objectif d'étudier la base matérielle de l'économie (en unités physiques plutôt que monétaires), d'analyser ses impacts environnementaux, et de proposer des méthodes participatives permettant à des acteurs d'imaginer leurs propres alternatives en termes de modes de production et de consommation. Il se compose de deux sous-axes : les analyses de filières particulières (dans lequel mon stage s'inscrit), et les analyses systémiques d'alternatives sociotechniques de l'ensemble de l'économie prenant en compte les interactions entre secteurs.

Afin de réaliser ces analyses de filières (via la représentation de flux de matières principalement), STEEP collabore étroitement avec l'entreprise TerriFlux (issue des travaux de l'équipe) sur cette thématique.

C. Présentation de l'entreprise TerriFlux

a) *Outils informatiques développés par TerriFlux*

La start-up TerriFlux (site internet : <https://terriflux.com>) développe deux principaux outils informatiques (et a la capacité de les combiner) : un outil logiciel permettant de réconcilier des données et un autre permettant de tracer des données sous forme de diagramme de Sankey.

Réconciliation de données

La réconciliation de données consiste à estimer des données inconnues à partir de données connues tout en s'assurant qu'elles respectent certaines contraintes (égalités ou inégalités). De plus, l'estimation de ces données inconnues prend en compte l'incertitude des données connues, c'est-à-dire qu'une donnée connue ayant une faible incertitude aura une plus grande influence sur l'estimation de la donnée inconnue qu'une donnée connue ayant une forte incertitude. Toujours en tenant compte des incertitudes sur les données connues, la réconciliation des données peut dans certains cas aboutir à une modification des valeurs des données connues afin de toujours respecter les contraintes qui ont été renseignées (ex : une conservation de la masse), d'où le terme de réconciliation. Cet outil est particulièrement utile lorsque l'on souhaite décrire tous les flux animant une filière car les sources de données seules ne sont généralement pas suffisantes pour estimer les valeurs de tous ces flux : estimer les valeurs restantes de la manière la plus juste possible est donc primordial. Cependant, dans ce rapport, je ne décrirai pas plus en détail le fonctionnement de cette méthode car je ne l'ai pas utilisée durant mon stage.

Représentation sous forme de diagramme de Sankey

La représentation sous forme de diagramme de Sankey consiste quant à elle, à partir de valeurs de flux, à représenter ces flux, sous forme de flèches ayant une origine, une destination et une direction, dont la taille (leur largeur) est proportionnelle à leur valeur. Dans les études actuellement menées par TerriFlux, cela concerne quasi-exclusivement des flux de matières mais cela pourrait également très bien fonctionner pour représenter d'autres types de flux (flux économiques, flux de votes aux élections, etc.). J'ai beaucoup travaillé avec cet outil tout au long de mon stage et nous verrons donc des exemples de diagrammes de Sankey dans la suite de ce rapport.

Comme évoqué précédemment et par sa collaboration étroite avec l'équipe de recherche STEEP, l'entreprise TerriFlux a jusqu'à présent principalement mis en application ses outils au service d'études s'intéressant aux filières de la bioéconomie (bois, céréales ou élevage...), définies à partir d'une matière première, cherchant à cartographier les flux de matières utilisés sur toute une chaîne de valeur, depuis la production jusqu'à la consommation, en passant par la transformation et le transport.

La visualisation de ces flux de matières sous forme de diagrammes de Sankey a pour but d'aider à la prise de décision (par les décideurs) car elle permet de comprendre facilement et rapidement le fonctionnement d'une filière en constatant l'importance des flux entre les différents acteurs de cette filière. Par conséquent, cela permet à l'utilisateur de ces diagrammes d'appréhender le fonctionnement systémique (souvent complexe) d'une filière et ses interactions éventuelles avec d'autres filières ainsi qu'avec son environnement. Le pari de cette représentation est qu'elle permettra ainsi au décideur – s'il n'est pas un spécialiste de la filière étudiée – de prendre de meilleures décisions concernant l'avenir de la filière car il aura conscience de certains effets non désirés engendrés par sa prise de décision, et devrait potentiellement changer de décision en conséquence (si ces effets ne lui conviennent pas).

Remarque : cet outil est principalement utilisé pour faire un état des lieux des filières (visualisation des flux de la filière pour un périmètre donné et pour une période donnée passée, c'est d'ailleurs l'utilisation que j'en ai faite) mais il pourrait également servir à des fins prospectives pour visualiser et comparer sur différents critères des futurs alternatifs (la façon de concevoir ces alternatives fait l'objet d'une thèse dans l'équipe).

b) Etudes réalisées

Projet AF Filières

Il y a quelques années (de 2017 à 2019), l'équipe STEEP et Julien Alapetite (aujourd'hui fondateur de TerriFlux) ont activement participé au projet AF Filières (Analyse de Flux des Filières) qui avait pour objectif premier de fournir aux régions françaises un outil de gestion durable des filières biomasse (filières forêt-bois, agricoles et alimentaires), cohérent avec la vision nationale, à travers l'analyse systématique des flux de matières qu'elles mobilisent mais également des pressions sur l'environnement, chaînes de valeur et emplois associés. Dans ce cadre, ont été produites des analyses de flux de matières (AFM) mobilisés par les filières forêt-bois et agro-alimentaires au niveau de la France et, dans certains cas, à l'échelle géographique inférieure (c'est-à-dire des régions).

Les deux outils développés par l'entreprise ont donc été utilisés dans ce projet : la réconciliation afin de réaliser les AFM et la représentation afin de visualiser les résultats. A part la filière bois, ont été réalisées les AFM d'une vingtaine de filières agricoles végétales à l'échelle de la France et pour l'année 2015 : Avoine, Betterave, Blé dur, Blé tendre, Colza, Fèves, Luzerne, Maïs, Soja, etc.

Ces AFM sont accessibles en libre accès directement sur le site du projet : <https://www.flux-biomasse.fr>. Par ailleurs, l'AFM de la filière Blé tendre est disponible en Annexe 1 et je vais ici décrire cette AFM afin d'expliquer son fonctionnement ainsi que les informations qu'elle permet de faire ressortir. La compréhension de la représentation de ces AFM est très importante puisque nous verrons dans la suite de ce rapport que j'ai utilisé la même méthode dans mon travail pendant ce stage.

Présentation et analyse d'une AFM

Le graphique en Annexe 1 permet donc de visualiser les données de l'AFM sous forme de diagramme de Sankey. Comme expliqué précédemment, nous pouvons observer sur ce graphique différents flux de tailles différentes ayant différentes origines et différentes destinations, représentant les flux de matières entre les acteurs de la filière Blé tendre. Ce diagramme se lit dans le sens des flèches (qui représentent les flux), la plupart du temps de gauche à droite – il peut exister des flux de recirculation, c'est-à-dire des flux qui vont de droite à gauche (en l'occurrence, il n'y en a pas dans

l'exemple qui est présenté ici mais nous verrons qu'il y en aura dans les résultats obtenus présentés dans cette partie : *B. Traçage des diagrammes de Sankey.*

Comme illustré dans la légende de cette AFM (Annexe 2), le diagramme de Sankey est construit suivant certaines conventions : les produits, c'est-à-dire les matières qui constituent ces flux, sont représentés par des formes ellipsoïdales (ronds ici) et les secteurs, c'est-à-dire les acteurs de la filière (qui représentent ici la production, la transformation et la consommation des produits de la filière), sont représentés par des formes rectangulaires (carrés ici).

Déjà, à partir de cette description, il est possible d'identifier le périmètre de l'AFM. En effet, elle commence à partir de la récolte de la matière première, c'est-à-dire n'ayant pas subi de transformation, secteur à gauche dans lequel des produits sortent uniquement (« Récolte »), et s'arrête à la consommation de tous les produits par les types d'acteurs de la filière, secteurs souvent à droite dans lesquels des produits entrent uniquement (« FAB » = Fabrication d'Aliments du Bétail, « IAA et alim hum » = Industries Agro-Alimentaires et alimentation humaine, « Déchetterie », etc.). Entre ces deux groupes de secteurs, on peut également identifier les acteurs de la filière qui transforment ou stockent les produits (« Meunerie », « Ethanoleries », « OS » = Organisme Stockeur, etc.). Les AFM qui ont été réalisées prennent généralement uniquement en compte les premières et deuxièmes transformations de la matière première. Il ne s'agit pas d'une limite méthodologique mais simplement d'un choix de modélisation (priorité mise sur l'amont de la filière par manque de temps). Par exemple, le secteur « IAA et alim hum » pourrait être désagrégé en sous-secteurs (plats préparés...) et on pourrait ensuite étudier les différentes chaînes de distribution jusqu'au consommateur.

Un code couleur est également utilisé afin de différencier les flux de matières premières des flux de produits et co-produits (issus de la matière première). En effet, le nom de la filière désigne en réalité le nom de la matière première pour laquelle l'AFM est effectuée (ici le blé tendre) mais tous les flux présents sur le diagramme ne représentent pas uniquement des flux de matières premières mais également des flux de produits et co-produits générés par les secteurs de transformation qui ont, eux, consommé la matière première.

Par exemple, si l'on regarde le secteur de transformation « Meunerie » (voir Figure 2 ci-dessous), on peut voir qu'un flux de blé tendre (appelé grain dans la légende – la matière première –, flux vert) entre dans ce secteur et ressort sous forme de farine de blé (le produit – que cherche à fabriquer le secteur de transformation –, flux bleu) et d'issues de blé (le co-produit – qui est généré par le procédé bien qu'il ne soit pas directement souhaité et que l'on cherche à valoriser au mieux –, flux orange).

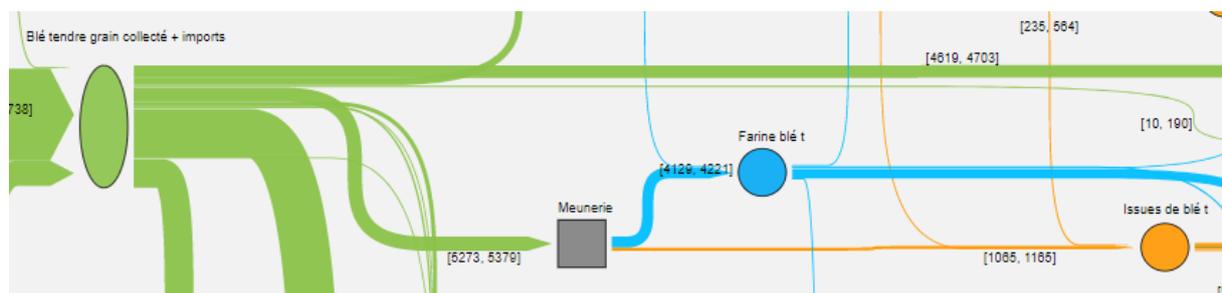


Figure 2 : Zoom sur le secteur de transformation « Meunerie » de l'AFM de la filière Blé tendre

Dans les faits, les produits sont la plupart du temps destinés à l'alimentation humaine et les co-produits à l'alimentation animale : ce que l'on visualise très bien sur l'AFM du Blé tendre en regardant la couleur des flux entrant dans les différents secteurs de consommation.

Une autre information disponible sur le diagramme est la quantité de ces flux de matières. Effectivement, comme expliqué précédemment, la taille des flux est proportionnelle à leur valeur afin de comparer rapidement l'importance des flux (en termes de quantité) les uns par rapport aux autres. Sur cette AFM, les flux sont exprimés en ktMS (kilotonnes, 10^6 kg, de Matière Sèche) afin de comparer

les quantités sur une même base et s'affranchir des taux d'humidité de chaque produit. En effet, tous les produits ont des taux d'humidité différents (le grain de blé est composé par exemple d'environ 15 % d'eau et 85 % de matière sèche) et représenter ces mêmes flux en kt brutes (c'est-à-dire le poids réel de ces matières, avec leur humidité) va nécessairement modifier leur taille mais aussi leurs proportions les uns par rapport aux autres (deux flux de matières qui auraient la même masse de matière sèche mais deux taux d'humidité différents n'auraient donc pas le même poids brut).

Ce qui est obligatoire sur ces diagrammes, est que tous les flux soient représentés dans les mêmes unités (kt brutes ou ktMS) mais chaque unité peut être plus ou moins pertinente selon ce que l'on souhaite observer sur le diagramme. Par exemple, une entreprise de fret qui s'intéresse au gisement en termes de besoins de transport de la filière Blé tendre devrait regarder les données en kt brutes car ce qui l'intéresse, c'est le poids de la matière qu'elle devra transporter (elle sera bien obligée de transporter l'eau contenue dans les produits). L'affichage du diagramme n'est actuellement disponible qu'en ktMS mais il pourrait être envisagé d'afficher le diagramme en l'une ou l'autre des unités (cela fait partie des améliorations qui pourraient être apportées à cette étude et nous verrons dans la description de mon travail que j'ai été amené à utiliser et mettre en place ce concept de changement d'unités durant ce stage).

Sur l'AFM de la filière Blé tendre qui est présentée ici, sont affichées également les valeurs de ces flux, ou plus exactement les intervalles dans lesquelles les valeurs des flux sont comprises. En effet, comme mentionné auparavant, les données ont été réconciliées et possèdent toutes une incertitude (plus ou moins grande) qui définit l'intervalle dans laquelle on estime que la vraie valeur du flux se situe. Ce sont donc ces intervalles qui sont indiquées sur l'AFM mais il aurait pu être choisi d'afficher plutôt les valeurs des flux qui ont été utilisées pour les tracer. Cela constitue encore une fois d'un choix qui a été fait lors de la représentation graphique mais d'autres choix peuvent être faits selon les informations dont l'utilisateur a besoin (comme pour l'exemple précédent avec les unités des flux).

Remarque : Comme nous venons de le voir avec les deux exemples précédents et comme nous le verrons tout au long de la description des travaux que j'ai réalisés lors de mon stage, l'avancement des travaux est présenté tel qu'il est actuellement mais, bien souvent, il peut exister des façons de faire différentes (notamment concernant la représentation graphique) sans pour autant que l'une ou l'autre ne soit plus pertinente (cela dépend des besoins de l'utilisateur des graphiques). Dans ces cas, un choix de représentation a été fait mais l'idéal serait d'être en mesure de proposer à l'utilisateur de choisir la représentation qu'il préfère (ex : il pourrait choisir les unités dans lesquelles il souhaiterait visualiser le diagramme et les données qui s'affichent (valeurs des flux ou intervalles)).

Cette fonctionnalité, désormais disponible dans le logiciel de TerriFlux, n'existait pas au moment où les AFM des filières agricoles ont été réalisées.

Au-delà des flux entrant et sortant des secteurs représentés sur l'AFM de la filière Blé tendre, il est également possible de remarquer que certains flux ne possèdent pas de secteur d'origine (en partie haute du graphique, voir Figure 3 ci-dessous) et que d'autres encore ne possèdent pas de secteur de destination (en partie basse du graphique, voir Figure 4 ci-dessous) : ces flux représentent respectivement les importations et les exportations.



Figure 3 : Zoom sur la partie haute de l'AFM de la filière Blé tendre (où sont représentées les importations)

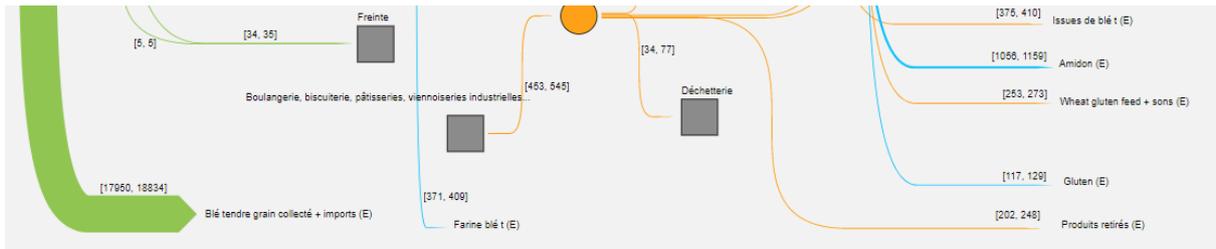


Figure 4 : Zoom sur la partie basse de l'AFM de la filière Blé tendre (où sont représentées les exportations)

En comparant la largeur de ces flux de produits importés et exportés, nous remarquons aisément que la France, concernant la filière Blé tendre en flux de matières sèches et en 2015, a importé peu de produits mais en a exporté beaucoup (la quasi-totalité sous forme de blé tendre non transformé d'ailleurs, le flux vert).

Remarque : J'ai pris soin (dans la phrase précédente) de bien préciser la totalité des caractéristiques de l'AFM (France, Blé tendre, matières sèches et 2015) pour délimiter clairement le périmètre associé à la conclusion qui a été faite au regard de l'AFM (concernant la comparaison entre les importations et les exportations). En effet, la conclusion qui a été tirée ne s'applique pas forcément si l'on change une seule de ces caractéristiques : l'AFM ayant ces mêmes caractéristiques sauf pour l'échelle géographique (ex : région Occitanie au lieu de la France) est forcément différente (et la conclusion a des chances de l'être également), pareil si l'on regarde l'AFM de 2016 au lieu de 2015, etc.

Cependant, d'une part pour être plus clair dans les explications et éviter les phrases à rallonge et d'autre part, parce que c'est dans l'habitude humaine (et ce serait difficile de faire autrement pour notre cerveau) de ne pas préciser systématiquement ce qui ne nous semble pas nécessaire (ex : je viens de remarquer que, dans le nom de la Figure 4, je n'ai pas précisé toutes les caractéristiques de l'AFM et pourtant cela ne causera pas de quiproquo normalement car grâce aux explications faites en amont, le lecteur de ce rapport est conscient qu'il s'agit bien des valeurs de flux de matières en ktMS, en France et pour l'année 2015), seront précisées dans ce rapport uniquement les caractéristiques suffisantes qui permettent au lecteur de bien saisir le périmètre d'étude des AFM.

Cette remarque peut paraître anecdotique de prime abord mais j'ai fait le choix de m'attarder sur ce point car tout au long de ce stage j'ai été confronté à ce problème, soit lors de mes recherches de données (qui seront décrites dans la partie 1) *Déroulement du travail*) où je ne connaissais pas exactement les périmètres complets associés à ces données, soit par expérience lorsque je tirais des conclusions trop hâtives des résultats obtenus (ex : toujours en visualisant l'AFM du Blé tendre, il est facile d'en conclure que la France exporte plus de blé tendre qu'elle n'en importe au lieu d'en conclure que la France exportait plus de blé tendre qu'elle n'en importait, ce qui serait plus correct puisque l'AFM décrit la situation de 2015 et non de 2022...). Encore une fois, dans cet exemple précis, l'abus de langage (appelons ça comme ça) n'est pas très grave, notamment car la situation de la filière de Blé tendre n'a pas tellement changé depuis 2015, mais dans d'autres cas (dont certains auxquels j'ai été confronté durant mon stage), cela peut amener des biais plus importants dans les résultats obtenus (et par voie de conséquence, dans les décisions qui seront prises ensuite à partir des résultats).

Afin de pallier ce problème lors de mon stage, j'ai été amené à suivre une certaine méthodologie, afin de situer mon travail systématiquement dans son périmètre complet, qui sera décrite lors dans cette partie : A. *Traitement des données*.

L'exemple précédent illustre encore une information, parmi tant d'autres, qu'il est possible de tirer de cette représentation graphique sous forme de diagramme de Sankey. Tous ces exemples d'informations extractibles du diagramme de Sankey nous démontrent la pertinence de son utilisation pour représenter les flux structurant une filière, en comparant le nombre d'informations représentées à la facilité de les extraire pour l'utilisateur, possible grâce à différentes astuces : taille des flux, formes, positions, couleurs, etc. En effet, ces mêmes données regroupées par exemple dans un tableau seraient bien moins faciles à lire et comprendre les interactions entre les différents secteurs et l'importance des flux les uns par rapport aux autres serait très complexe.

Bien que le projet AF Filières soit terminé depuis 2019, les AFM qui ont été élaborées dans le cadre de ce projet ont pour beaucoup fait l'objet d'améliorations dans les derniers mois (détail de certains flux, amélioration de la réconciliation, amélioration de la représentation, ajout de fonctionnalités pour l'utilisateur, etc.) en uniformisant toutes les AFM et même d'autres filières ont pu être étudiées (les filières animales notamment) via d'autres travaux (autres études réalisées par TerriFlux – commandées par certains organismes publics ou privés – ou doctorants et stagiaires de l'équipe STEEP utilisant ces outils informatiques pour leurs diverses études). Mon stage s'inscrit d'ailleurs dans cette lignée puisque j'ai aussi utilisé ces outils informatiques et j'ai pu apporter des idées de fonctionnalités à ajouter pour répondre à mes besoins. Ces fonctionnalités pourront profiter à tous les autres travaux réalisés avec ces outils.

D. Présentation du projet SCALABLE

Issu d'un appel à projet Graine, ce projet est financé par l'Agence de la Transition Écologique (ADEME) (site internet du projet : <https://www.projet-scalable.fr>). Les appels à projet Graine cherchent à favoriser le développement d'une bioéconomie au service de la transition écologique et énergétique des territoires. La bioéconomie est une économie « décarbonée », qui ne reposerait plus sur les énergies fossiles. Plus concrètement, il s'agit d'articuler l'accompagnement des filières de production et de valorisation des biomasses avec la réduction des impacts environnementaux et la prise en compte des services rendus par les écosystèmes. Il est intéressant de noter que ce projet s'inscrit dans la continuité de 2 anciens projets Graine : le projet BOAT et le projet AF Filières (présenté précédemment). Le projet BOAT, Biomasses d'Origine Agricole à l'échelle de Territoires, visait à caractériser le métabolisme¹ des filières de production et de valorisation des Biomasses d'Origine Agricole (BOA, voir Figure 5 ci-contre) des territoires via :

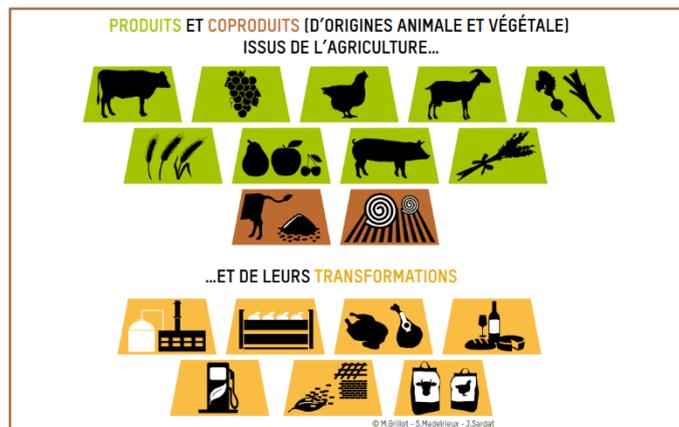


Figure 5 : Biomasses d'origine agricole dans BOAT (Grillot et al., s. d.)

- l'identification des acteurs de la production agricole, de la transformation, et de l'approvisionnement ;
- la quantification des productions potentielles ;
- l'identification des flux potentiels de biomasses ;
- l'analyse de ses formes d'ancrage, d'autonomie et d'empreinte.

¹ Par métabolisme, il faut comprendre les flux de matières et d'énergie mis en jeu dans les processus de production, transformation et valorisation des BOA.

Le projet SCALABLE est en collaboration avec l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), l'agence régionale Auvergne-Rhône-Alpes Énergie Environnement (AURA-EE), Grenoble Alpes Métropole, l'équipe STEEP de l'INRIA et l'entreprise TerriFlux. J'ai donc pu régulièrement assister à des réunions avec des membres de chacune de ces organisations.

Le titre complet de ce projet est : « Métabolisme des biomasses d'origine agricole : représentations multi-échelles, analyse des vulnérabilités et évaluation par les acteurs des territoires ». Ainsi l'objectif de ce projet est d'analyser les flux de matières de toutes les filières concernant les BOA afin d'évaluer les vulnérabilités des territoires en termes de dépendance à d'autres territoires, d'empreinte écologique ou encore de concurrence d'usage. Autrement dit, de répondre à des questions telles que : dans quelles mesures les filières de valorisation des BOA d'un territoire parviennent-elles à satisfaire les besoins de sa population ? sans compromettre les bases socio-écologiques sur lesquelles elles reposent ? Et sans transfert de vulnérabilité vers d'autres territoires ? Quels compromis s'observent et quels leviers de changement peut-on envisager ?

L'originalité de ce projet tient aussi dans la volonté d'organiser des échanges entre chercheurs et parties prenantes de la production, transformation, et valorisation des BOA, afin de confronter les résultats théoriques de ce projet avec la réalité du terrain. Ces analyses se feront à l'échelle nationale, régionale mais aussi à l'échelle du Plan Alimentaire interTerritorial « région alpine » (PAiT) qui est une zone élargie autour de Grenoble (Figure 6).

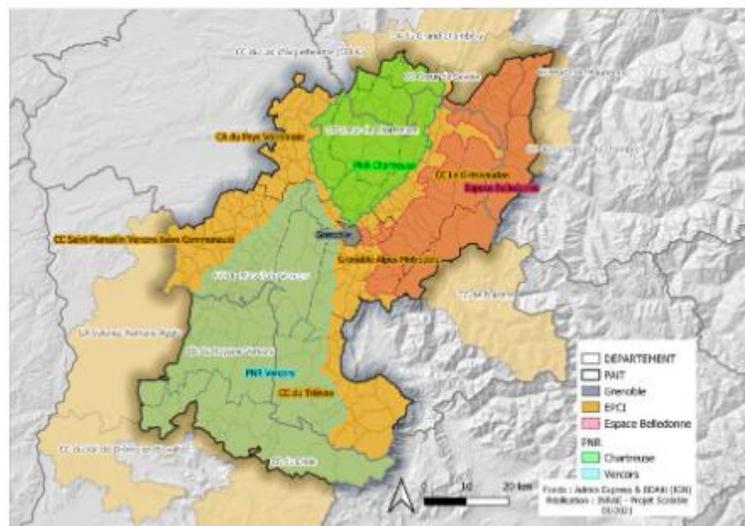


Figure 6 : Plan du PAiT de la grande région grenobloise

Ce projet est organisé en 6 lots :

- Lot 1 - Coordination : organisation de séminaires, comités de pilotage, mise en place d'un espace de partage des documents relatifs au projet, etc.
- Lot 2 – Conception d'un cadre d'analyse multi-échelle du métabolisme des BOA : analyse bibliographique, élaboration du cadre d'analyse du projet puis adaptation et spécification de ce cadre au terrain et enfin mise en discussion avec les acteurs.
- Lot 3 – Approche bioéconomique du métabolisme des BOA et des vulnérabilités : acquisition des données (croisement des projets BOAT et AF Filières), analyse du métabolisme des BOA et de ses empreintes (AFM des filières aux échelles nationales et régionales, évaluation des empreintes de ces filières et visualisation sous forme de diagrammes de flux), analyse des vulnérabilités et réflexions inter-échelles.
- Lot 4 – Approche territoriale du métabolisme des BOA et des vulnérabilités (cas d'étude du PAiT) : acquisition des données, analyse du métabolisme des BOA et de ses formes d'ancrage, analyse des vulnérabilités et réflexions inter-échelles.
- Lot 5 – Evaluation-délibération avec les acteurs.
- Lot 6 – Diffusion et valorisation : mises en discussion scientifique et valorisation opérationnelle des outils développés.

Mon stage s'inscrit dans le lot 3 du projet SCALABLE et plus particulièrement dans le volet d'évaluation des empreintes des filières. En effet, ce volet comprend notamment 2 études (qui correspondent à 2 stages, dont le mien) :

- L'évaluation des empreintes environnementales des filières via la méthode d'Analyse de Cycle de Vie² (ACV).
- L'évaluation des empreintes énergie et azote des filières via une analyse des flux d'énergie (AFE) et d'azote (AFN³).

Le premier sujet a été traité par Yazid Charkani, étudiant en dernière année du master IMEDD (Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable) à l'UTT (Université de Technologie de Troyes), lors de son stage de fin d'études réalisé chez STEEP, en même temps que le mien, également sous la tutelle de Jean-Yves.

Nous avons donc tous les deux participé aux mêmes réunions (que ce soit celles de l'équipe STEEP ou du projet SCALABLE) tout au long de notre stage. Nous suivions également l'avancement de nos stages respectifs, notamment lors de notre réunion hebdomadaire commune avec Jean-Yves et Julien où nous présentions l'avancement de notre stage ainsi que nos réflexions et interrogations survenues la semaine précédente.

Pour résumer, son stage a ainsi consisté à coupler les AFM avec l'ACV ce qui a mis en évidence deux axes de travail majeurs : territorialiser l'ACV, c'est-à-dire déterminer les impacts causés par un territoire donné via une activité exercée sur ce territoire (l'ACV étant la plupart du temps utilisée pour estimer l'impact d'un produit ou service, du « berceau à la tombe », en se référant à une unité fonctionnelle), et dissocier les impacts causés par chaque acteur qui compose les filières étudiées (producteurs, transformateurs, transporteurs, consommateurs), ce qui peut par exemple permettre de déterminer la part de responsabilité de ces acteurs dans les impacts environnementaux générés par le territoire.

Le second sujet est expliqué dans la partie suivante puisque c'est sur celui-ci que j'ai travaillé durant ce stage.

2) Présentation du sujet

L'évaluation des empreintes des filières – c'est-à-dire leur interaction avec leur environnement via la consommation de ressources (flux entrants) et le rejet de matière et énergie (flux sortants) – se fera par une analyse des flux qui animent ces filières. L'objectif est donc de quantifier tous ces flux entre les filières et leur environnement, mais également à l'intérieur même de ces filières via les échanges de flux entre les acteurs composant ces filières.

A noter que le choix de ces deux empreintes spécifiques n'est pas le fruit du hasard. En effet, la consommation d'énergie est indissociable de toute activité humaine, qui plus est dans des filières faisant intervenir des secteurs de transformation (industries) et nécessitant le transport des matières premières et transformées. Quant à l'azote, Il permet de relier trois enjeux centraux pour de l'agriculture :

- La fertilisation : l'azote fait partie des nutriments dont ont besoin les végétaux pour pousser (c'est le facteur limitant majeur de la croissance des végétaux qui reçoivent généralement suffisamment de lumière et d'eau).
- La nutrition : l'azote est le principal composant des protéines contenues dans notre alimentation.

² L'ACV est une méthode de comptabilité environnementale d'évaluation normalisée (ISO 14040 et 14044) permettant de réaliser un bilan environnemental multicritère et multi-étape d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie (Wikipedia contributors, 2022).

³ La lettre N sera utilisée tout au long de ce rapport pour désigner l'azote (vient de l'anglais « Nitrogen »).

- La pollution : deux pressions environnementales de l'agriculture sont liées à l'azote. D'une part les émissions de protoxyde d'azote, un très puissant gaz à effet de serre et d'autre part, la lixiviation des nitrates provoquant l'eutrophisation des cours d'eau et des nappes phréatiques.

Les flux de matières des filières agricoles – sous forme de matière première, produits et co-produits, transitant entre les différents acteurs – étant déjà cartographiés dans les AFM réalisés par TerriFlux (présentées précédemment), le travail consiste à traduire ces flux de matières, actuellement exprimés en ktMS, en flux d'énergie – exprimés en une unité d'énergie (Joules (J) par exemple) – puis d'azote – exprimés en masse d'azote (grammes d'azote (gN) par exemple). Par ailleurs, en plus de ces flux issus des matières échangées dans la filière, d'autres flux d'énergie et d'azote interviennent en amont de la production (ex : fertilisation), c'est-à-dire hors du périmètre actuel des AFM. Ce sont d'ailleurs ces flux qui font que ces matières contiennent ensuite de l'énergie et de l'azote (pour que la matière contienne de l'énergie et de l'azote, il faut bien que l'énergie et l'azote soient « entrés » dans la matière, qui n'existait pas avant sa production) : la détermination de ces flux et leur quantification fait également partie du travail à réaliser. Enfin, seulement concernant les flux d'énergie cette fois, les activités de production, transformation et de transport des matières en consomment obligatoirement : ces flux seront également à quantifier.

A l'image des AFM qui ont été produites par TerriFlux (exemple en Annexe 1), il faudra également représenter les valeurs des flux calculés (en énergie et azote) sous forme de diagramme de Sankey, en utilisant aussi l'outil de traçage de ces diagrammes que développe l'entreprise. Cela permettra de visualiser clairement les interactions (en énergie et azote) entre les filières et leur environnement, mais aussi entre les acteurs de ces filières. Les résultats ainsi présentés permettront leur exploitation dans le projet SCALABLE :

- pour les acteurs souhaitant visualiser le fonctionnement de ces filières,
- pour construire des indicateurs permettant de caractériser le métabolisme des filières (ex : indicateurs de taille, d'autonomie, de niveau de circularité, etc.).

Toute la méthodologie pour arriver à remplir ces objectifs ainsi que les résultats obtenus lors du stage font l'objet de la partie qui suit.

III. Travaux réalisés

1) **Déroulement du travail**

Par soucis de clarté, ne seront présentés dans cette partie que la méthode, les sources de données ainsi que les résultats les plus aboutis à l'heure où ce rapport est rédigé. En effet, ceux-ci sont le fruit d'un travail que l'on pourrait qualifier d'itératif, c'est-à-dire que plusieurs versions intermédiaires (une dizaine environ) ont vu le jour avant la version présentée ci-dessous (allant des modifications de la méthode aux résultats). Ce fut la manière de travailler tout au long de ce stage : après un premier essai de représentation des empreintes des filières (souvent très simplifiée, voir Annexe 3), a démarré un processus d'apport d'améliorations successives (d'où les différentes versions antérieures). On verra d'ailleurs (dans la partie 4) *Pistes de poursuite*) que de nombreuses améliorations sont encore envisageables concernant les résultats actuels (quelques-unes y seront sûrement apportées d'ici la fin du stage qui se termine dans un mois).

La façon de procéder que j'ai utilisée pour chaque filière peut se résumer en 4 étapes :

- Recherche bibliographique sur les travaux/études qui ont déjà quantifié les flux, d'azote et d'énergie, régissant le métabolisme des filières agricoles de près ou de loin et choix du périmètre d'étude.
- Recherche des sources de données qui permettront de quantifier ces flux (données statistiques venant d'organismes nationaux, études spécifiques de chercheurs ou d'organismes étudiant une partie de la filière, etc.).
- Calcul et estimation des valeurs des flux mis en jeu dans la filière à l'aide d'un classeur Excel et élaboration de la structure de ce classeur afin d'uniformiser la méthode pour toutes les filières et automatiser les calculs redondants.
- Visualisation des données sous forme de diagramme de Sankey à l'aide de l'outil développé par TerriFlux.

Mon stage a effectivement commencé par la lecture de ces deux thèses (Harchaoui, 2019 ; Le Noë, 2018). La première modélise l'agriculture française (voire parfois mondiale) sur plus d'un siècle (depuis 1882) de façon globale en tenant compte des flux d'énergie et d'azote. La seconde, quant à elle, modélise l'agriculture française au travers de ses flux d'azote, phosphore et carbone, également sur une longue période (depuis 1852), et fait aussi une étude de cas sur une échelle géographique plus petite. Ces deux lectures m'ont permis de me familiariser avec la description du métabolisme de l'agriculture par l'analyse de ses flux : mes premiers travaux ont donc été fortement influencés par ces deux thèses. Chacun de ces travaux possédant des études différentes et avec des périmètres différents (et différents aussi de mon sujet de stage), il a fallu extraire de ces thèses les informations, méthodologies et sources de données qui pouvaient s'appliquer à mon étude – après quoi j'ai pu obtenir mes premiers résultats. Ensuite, tout au long du stage, j'ai régulièrement effectué des recherches d'autres études sur des sujets plus ou moins spécifiques que j'avais besoin d'éclaircir pour augmenter mes connaissances et améliorer les résultats.

La recherche de sources de données a été effectuée exclusivement par internet afin de trouver les données pour quantifier les flux d'énergie et d'azote des filières agricoles. Comme on le verra dans la partie suivante (2) *Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées*), elles peuvent venir de sources diverses et, bien souvent, considèrent des périmètres d'étude différents de la mienne et possèdent des incertitudes plus ou moins grandes. Un exemple de comparaison d'une même donnée venant de plusieurs sources sera d'ailleurs montré en partie b) *Comparaison de plusieurs sources de données*.

Les deux autres points seront détaillés respectivement dans les parties a) *Structure du classeur Excel* et B. *Traçage des diagrammes de Sankey*.

Dans la partie suivante sont présentés le métabolisme des filières ainsi que les sources de données qui ont été utilisées.

Remarque : Jusqu'ici, seuls les résultats des filières agricoles Blé tendre⁴, filière végétale, (empreintes azote et énergie), Viande et Lait de vache, filières animales, (empreintes azote) ont été calculés et représentés sous forme de diagramme. Cependant, comme la méthodologie a été pensée dans l'optique d'effectuer toutes les filières agricoles (végétales et animales), elle sera volontairement décrite de façon générale – s'appliquant à toutes les filières végétales et/ou à toutes les filières animales ou les deux – mais les sources de données qui seront mentionnées ne s'appliqueront parfois qu'aux filières qui ont été réalisées jusqu'à présent (Blé tendre, Viande et Lait de vache).

Autrement dit, la réalisation d'autres filières nécessitera, pour certaines données qui seront évoquées plus loin (concernant les 3 filières réalisées), la recherche d'une autre source qui traite effectivement de ces filières.

Remarque : la quasi-totalité du temps, ce sont les sources de données disponibles qui ont représenté le facteur limitant du niveau de détail apporté aux résultats. En effet, bien souvent, le métabolisme des filières est suffisamment décrit de manière qualitative, dans les différentes études que j'ai pu trouver, pour apporter plus de détails dans les flux calculés, mais la difficulté d'obtenir ou d'estimer les données permettant de les calculer a fait qu'il n'a pas été possible de descendre à ce niveau de détail de manière quantitative. Par exemple, nous savons que les animaux d'élevage sont nourris à partir de plusieurs types de céréales (ex : blé tendre, maïs grain, orge) mais la part de chaque céréale dans leur alimentation fait l'objet d'estimations – avec beaucoup d'incertitudes associées – mais n'est pas réellement connue.

2) Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées

Cette partie est organisée de façon à rassembler les explications qui auraient été répétitives si elle avait décrit le travail dans l'ordre chronologique de sa réalisation. Cela permettra également au lecteur de bien comprendre comment se décline la méthodologie, d'une approche générale (presque universelle) vers une approche spécifique de la filière étudiée – avec les exemples réalisés pour illustrer les propos.

Remarque : la description de la méthodologie et du métabolisme des filières qui va suivre a fait partie intégrante de mon travail lors de ce stage. Elle se situe au croisement entre :

- le remplissage des objectifs du stage, description rigoureuse mais qui doit rester simple à comprendre par n'importe quel acteur de la filière (les diagrammes de représentation doivent se suffire à eux-mêmes) ;
- les sources d'information disponibles ;
- et le temps qui a été consacré à son élaboration.

Elle n'est donc pas tirée telle quelle d'une quelconque source, mais inspirée par différentes sources (dont les deux thèses présentées plus tôt par exemple). Elle a été affinée au fil du stage, jusqu'à cette version qui suit, et découle d'un raisonnement à partir de mes différentes lectures et des échanges avec les personnes suivant mon stage de près (Jean-Yves, Julien et Yazid) et les membres du projet SCALABLE.

⁴ Le nom des matières premières avec une majuscule désigne la filière et le nom sans majuscule désigne le produit (ex : Blé tendre désigne la filière du blé tendre).

A. Méthodologie commune à toutes les filières et toutes les empreintes

a) Fonctionnement global des filières agricoles

Comme évoqué lors de la présentation d'une AFM précédemment (*Présentation et analyse d'une AFM*) et constatable sur cette AFM (Annexe 1), une filière agricole comprend la matière première ainsi que les produits et co-produits obtenus après transformation de cette matière première. Ainsi, toute filière agricole est composée d'au moins un producteur (qui produit la matière première), une chaîne d'approvisionnement (qui regroupe les secteurs de transformation et du transport), éventuellement une unité de stockage (comme les AFM sont établies sur une année civile, il est possible qu'il y ait un stockage – ou déstockage – d'une année sur l'autre) et un consommateur.

Les quatre secteurs mentionnés ci-dessus, constitueront donc la base de chaque filière et tous les flux caractérisant le métabolisme de ces filières auront donc comme origine et/ou destination un de ces secteurs. Ces secteurs consomment donc des flux, les transforment et en produisent d'autres en sortie : il y a systématiquement conservation de matière et d'énergie sur ces secteurs, sauf pour le secteur de stockage qui peut être stockeur net ou déstockeur net (et donc le bilan de matière et d'énergie ne sera pas respecté par définition).

Remarque : il existe deux types de filières agricoles que l'on peut différencier : les filières végétales et les filières animales. De plus, ces filières possèdent des flux directs entre elles (par exemple l'alimentation animale qui est quasi-exclusivement sous forme végétale ; autre exemple, les déjections animales qui sont épandues dans les cultures végétales). Par conséquent, bien que l'objectif initial du stage fût de représenter ces filières individuellement, il est aussi possible de représenter ces deux types de filières sur le même graphique, « emboîtées » tel un puzzle, permettant ainsi de visualiser les interactions entre elles (et donc leur dépendance). Cela fera l'objet d'une amélioration possible et pourra notamment permettre de représenter à la fois la totalité des filières agricoles sur un seul et même graphique mais aussi la ou les filières individuelles que l'on souhaite visualiser (par un phénomène d'agrégation, qui sera expliqué plus tard).

Tout cela permet de justifier le périmètre qui a été choisi pour modéliser les filières végétales et animales séparément (les filières végétales s'arrêtent lorsque les filières animales commencent et inversement, voir Figure 7 ci-contre) : il ne faut pas de flux en double ou de flux manquant (avec l'objectif que le cœur de filière soit bien représenté lorsque l'on regarde individuellement une filière végétale ou une filière animale).

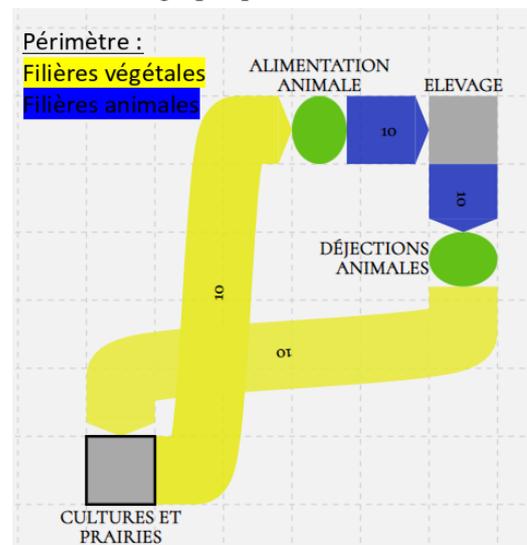


Figure 7 : Exemple simplifié de liens directs entre les filières végétales et animales (les valeurs ne correspondent à rien de réel et ont été inventées pour l'exemple)

Pour résumer, le périmètre d'étude qui a été choisi pour représenter les filières agricoles individuellement permet de représenter les filières aussi bien individuellement que collectivement (filières végétales en interaction avec les filières animales).

Les quatre secteurs connus, il suffit donc maintenant de qualifier et quantifier les flux qui viennent de l'environnement de la filière vers ces secteurs, qui transitent entre ces secteurs et qui sortent de ces secteurs vers l'environnement. Fait intéressant, concernant à la fois les flux d'azote et d'énergie, la totalité des flux qui transitent vers ou depuis les secteurs appelés « Chaîne d'approvisionnement » et

« Stock » – à part les flux d'énergie consommés pour transformer et transporter les produits, qui viennent de l'environnement –, sont des flux de matières et dont toutes les quantités sont connues grâce à la réalisation des AFM (en masse de matière sèche). Il est donc possible de quantifier en termes d'azote et d'énergie tous ces flux (illustrés sur les figures 9, 12 et 15) :

- Producteurs vers Chaîne d'approvisionnement : la production agricole de la filière.
- Chaîne d'approvisionnement vers Consommateurs : la consommation des produits.
- Chaîne d'approvisionnement vers Stock : le stockage de la matière première.
- Stock vers Chaîne d'approvisionnement : le déstockage de la matière première.
- (Reste du monde) vers Chaîne d'approvisionnement : les importations.
- Chaîne d'approvisionnement vers (Reste du monde) : les exportations.
- Chaîne d'approvisionnement vers (Environnement) : les pertes de matière lors de la transformation.
- Chaîne d'approvisionnement vers Producteurs (pour l'azote) ou vers Chaîne d'approvisionnement (pour l'énergie) : les matières qui ont été valorisées comme engrais (pour l'azote) ou comme source d'énergie (pour l'énergie).

Remarque : les flux de valorisation de la matière ont été comptabilisés comme étant valorisés en totalité à la fois comme engrais et comme énergie, ce qui n'est pas possible physiquement (à part si cette matière est valorisée par une filière de méthanisation, qui a la capacité de valoriser d'abord l'énergie contenue dans la matière puis ses nutriments). De plus, la valorisation de la matière sous forme d'énergie doit normalement subir des pertes dues au rendement du procédé de valorisation utilisé.

C'est pourquoi, du fait du peu d'informations disponibles concernant le traitement de cette matière, ce flux (sous forme d'azote et d'énergie) est surestimé actuellement mais cela n'est pas très grave puisqu'il est anecdotique – de manière quantitative – en comparaison des autres flux.

Ensuite, chacun de ces flux peut être détaillé jusqu'au degré de précision de l'AFM. Exemple : le flux de consommation des produits peut être décomposé en consommation animale + consommation humaine + consommation indéfinie⁵. Puis la consommation animale peut être décomposée en consommation FAB, consommation Alimentation Animale Rente, etc.

Remarque : C'est ce qu'on appelle la désagrégation. L'agrégation, l'inverse de la désagrégation, consiste donc à sommer des termes pour atteindre un niveau moins important de détail. Cette notion d'agrégation a été primordiale tout au long de ce stage car chaque composante du travail pouvait être agrégée ou désagrégée selon ce que l'on souhaitait représenter.

Exemples : comme on vient de le voir, tous les flux peuvent être plus ou moins détaillés et il en est de même avec les secteurs (on peut diviser les consommateurs en population humaine et élevage, puis l'élevage en bovins, porcins, ovins, caprins, etc.), les filières agricoles (la filière Viande est composée des filières Viande bovine, Viande porcine, Viande ovine, Viande caprine, etc.) ou encore l'échelle géographique de l'étude (la France peut être divisée en régions puis en départements, etc.).

Ce système d'agrégation, qui peut faire penser à des poupées russes qui s'emboîtent les unes dans les autres, permet de situer pour chaque élément du travail (comme les données utilisées par exemple) son périmètre d'étude, qui est plus ou moins restreint selon son niveau d'agrégation. Dans la partie *B. Traçage des diagrammes de Sankey* sera d'ailleurs présentée une façon d'utiliser ces niveaux d'agrégation afin de simplifier ou complexifier la représentation du métabolisme d'une filière par ses flux.

⁵ La catégorie indéfinie rassemble les matières pour lesquelles on ne sait pas qui les consomme.

Afin de pouvoir tracer des flux sur les diagrammes, chaque flux doit, au minimum, être caractérisé par trois informations : son origine, sa destination et sa valeur. Concernant les flux listés ci-dessus, les deux premières informations étant établies, il reste donc la valeur de ces flux à estimer en déterminant le contenu azoté et énergétique de chaque matière qui compose les AFM.

b) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*

Concernant les filières végétales, les contenus en azote (en %) et en énergie brute (en MJ/kg) des matières premières, produits et co-produits ont été tirés de tables de composition nutritionnelles d'aliments destinés à l'alimentation animale (INRAE et al., 2018) qui recense la quasi-totalité des produits présents sur les AFM réalisés par TerriFlux.

Concernant les filières animales, une grande partie des produits et co-produits de ces filières sont assez spécifiques aux AFM et ne font pas référence à des catégories universellement utilisées (ex : le co-produit « Farines, poudres et pellets de viandes ou d'abats » est en réalité composé d'un mix de plusieurs co-produits, cités dans son nom, il n'est donc pas possible de trouver une source qui aurait estimé le contenu azoté et énergétique de ce produit puisqu'il est spécifique à l'AFM). De nombreuses façons de procéder pour estimer ces contenus ont été testées (certaines amenant à des contenus négatifs !) et la plus satisfaisante, qui a été retenue, est décrite ci-dessous.

Pour tous les produits classiquement consommés par la population humaine et ceux qui peuvent s'y rattacher, les contenus en azote (en %) ont été extraits d'une base de données états-unienne (USDA, 2022) qui recense les valeurs nutritionnelles d'une large gamme d'aliments comestibles pour la population humaine. Le contenu en matières azotées n'étant pas donné directement en azote mais plutôt en protéines, il faut diviser le contenu en protéines par un coefficient⁶ qui quantifie l'azote contenu dans les protéines : ce coefficient peut varier en fonction du type de matière (ex : 6,38 pour les produits laitiers et 6,25 pour les produits carnés (*CHAPTER 2 : METHODS OF FOOD ANALYSIS*, s. d.)).

Pour les produits carnés présents dans l'AFM Viande, certains désignent un mélange de produits comestibles (ex : viande) et non comestibles (ex : os). Il a donc fallu estimer la part des produits non comestibles ainsi que leur contenu azoté (à partir de données tirées du modèle GRAFS (le Noë et al. 2017)) puis estimer ainsi le contenu azoté du mélange.

Pour tous les produits restants, et lorsque c'était possible, leur contenu azoté a été estimé en utilisant le rendement de transformation des secteurs présents sur l'AFM, ce qui permet à la fois de correspondre le mieux possible aux catégories spécifiques à l'AFM et de respecter le bilan d'azote sur ces secteurs. Par exemple, le contenu en azote d'un bovin fini⁷ a été estimé en additionnant – et en tenant compte des ratios – les contenus azotés des produits sortant du secteur de l'abattage (carcasses, graisses sang, peaux, abats, abats non comestibles et autres déchets non comestibles) : c'est une sorte de réconciliation manuelle. Les produits pour lesquels il n'était pas possible de calculer ainsi leur contenu azoté (par exemple si deux produits de composition inconnues sont « liés » par le même secteur), ont principalement⁸ fait l'objet d'hypothèses simplificatrices n'émanant d'aucune source de données mais étant plutôt intuitives (par exemple, le contenu azote des abats d'équins a été considéré comme équivalent à ceux des bovins).

Remarque : l'explication, ci-dessus, du calcul de la composition en azote et en énergie des filières végétales est très courte (elle tient en un petit paragraphe) alors que celle des filières animales – en azote seulement – est très longue (plusieurs grands paragraphes). Ainsi, pour

⁶ Appelé facteur de Jones.

⁷ Prêt à être abattu.

⁸ Quelques autres ont été estimées avec des méthodes de calcul assez diverses qui ne seront pas expliquées ici (car trop longues et peu d'intérêt pour ce rapport).

obtenir un même type de résultat – une composition à partir d’un produit – la méthodologie, le nombre de calculs ainsi que le temps passé pour traiter les données sont beaucoup plus longs dans un cas que dans l’autre. Tout au long de mon stage, j’ai été confronté à cette réalité avec le traitement de sources de données qui était plus ou moins rapide.

Cela vient simplement du fait de la correspondance entre la source de données utilisée et le flux que l’on souhaite calculer : plus la correspondance entre les deux est proche, moins il y aura d’étapes de traitement. Par exemple, pour obtenir la valeur des flux une fois que la composition des produits est connue, il suffit ensuite de simplement multiplier le contenu en azote et en énergie de chaque matière par la masse de son flux (donnée par l’AFM) afin d’obtenir ces mêmes flux mais convertis en azote et en énergie cette fois-ci. Cependant, dans un cas (filières végétales), cette composition est directement tirée d’une source et, dans l’autre cas (filières animales), il a parfois fallu effectuer une dizaine d’opérations avant de l’estimer. De plus, la valeur estimée dans le second cas est associée d’une plus grande incertitude car non seulement elle accumule les incertitudes de toutes les données qui ont été utilisées pour la calculer mais, en plus, des hypothèses ont souvent été utilisées par manque de données ou pour simplifier les calculs.

Dans les deux parties suivantes sont présentées les méthodologies qui ont été utilisées pour calculer les valeurs des autres flux permettant de caractériser les métabolismes azotés puis énergétiques des filières agricoles. Le métabolisme azoté étant plus simple (car moins de flux mis en jeu), c’est par celui-ci que nous commencerons.

Afin de décrire le métabolisme pas à pas et en l’illustrant par des exemples, sera expliqué le métabolisme de chaque secteur et – puisque tous les flux ont au moins un secteur comme origine ou destination – lorsque les 4 secteurs auront été décrits par les flux interagissant avec eux, alors tous les flux auront été présentés.

Les exemples qui seront utilisés pour illustrer les métabolismes des filières végétales et animales seront des zooms sur les secteurs étudiés tirés des diagrammes de Sankey effectués respectivement pour le Blé tendre et la Viande. Les diagrammes complets (rassemblant tous les secteurs) seront quant à eux présentés dans la partie *B. Traçage des diagrammes de Sankey*.

B. Métabolisme azoté des filières agricoles

a) *Filières végétales*

Secteur « Producteur »

Le producteur, pour les filières végétales, désigne la surface sur laquelle est cultivée une culture ou est présente une prairie. Le végétal présent sur cette surface réagit naturellement avec son environnement afin de se développer (comme tout être vivant). Sans intervention humaine, il peut recevoir de l’azote de deux manières : la déposition atmosphérique d’azote et la fixation symbiotique. Le dépôt atmosphérique a lieu sur toute surface et est de l’ordre de 11.8 kgN/ha, aujourd’hui en France. Afin d’obtenir la quantité totale déposée pour chaque filière, il faut multiplier cette valeur par la surface des cultures ou prairies, qui sont des données (de 2015, comme pour l’AFM) prises de la base de données de l’AGRESTE (*Agreste - Statistique agricole annuelle (SAA)*, 2000–2020). La fixation symbiotique peut, en revanche, n’être réalisée que par certains végétaux : les légumineuses. Ainsi, d’après Anglade et al. (2015), il peut être considéré que les légumineuses graines et les légumineuses fourragères sont capables de fixer au sol dans la proportion de respectivement 1,23 et 1.47 kg d’azote fixé par kg d’azote extrait. Les prairies, sur lesquelles poussent aussi des légumineuses, peuvent ainsi fixer globalement fixer au sol dans la proportion de 0.3675 kg d’azote fixé par kg d’azote extrait (d’après le modèle GRAFS (le Noë et al., 2017)). Le blé tendre ne faisant pas partie des légumineuses, ce flux représentant la fixation symbiotique n’est pas présent sur la Figure 8.

Afin d'obtenir une production végétale plus importante sur cette surface (ex : « Blé tendre produit », Figure 8), l'Homme apporte d'autres fertilisants sous deux formes : l'engrais minéral et l'engrais organique. Les apports d'azote minéral et organique sont donnés en kg/ha pour l'année 2017 (SSP - Agreste, 2017).

Remarque : lorsque les sources de données n'étaient pas disponibles pour l'année étudiée (2015 pour correspondre avec l'AFM), ce sont celles disponibles se rapprochant le plus dans le temps qui ont été utilisées (2017 dans l'exemple précédent).

Une partie de l'engrais minéral épandu sur les surfaces végétales est perdue par volatilisation dans l'atmosphère (synonyme de pollution) : ce taux de pertes par volatilisation vaut 4.5 % et 5.1 % respectivement pour les prairies et les cultures en France. L'engrais organique vient quant à lui de deux sources : la valorisation des pertes de matière de la chaîne d'approvisionnement (quantité calculée précédemment dans la partie b) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*) – qui correspond au flux « Valorisation après transformation » de la Figure 8 –, et la valorisation des pertes de matière après consommation (ex : gaspillage alimentaire) et la valorisation des excréments des consommateurs (population et élevage) qui sont regroupées dans le flux « Valorisation après consommation » sur la Figure 8. Ce dernier flux a donc été obtenu par différence entre l'azote organique total apporté à la surface et la valorisation après transformation.

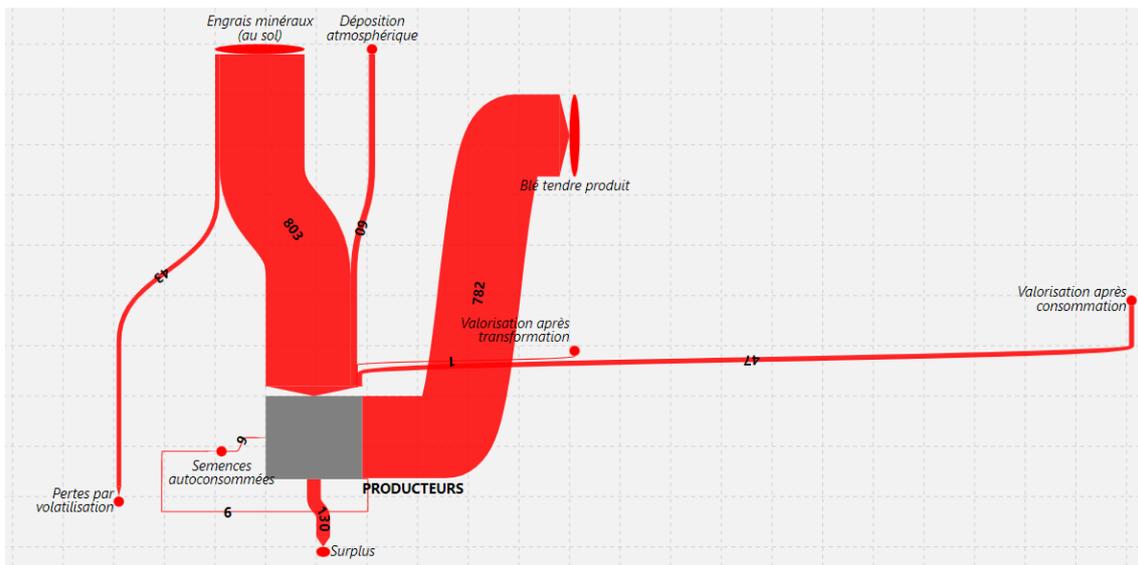


Figure 8 : Focus sur le secteur "Producteurs" de l'AFN Blé tendre de 2015

Sur les cultures, l'agriculteur apporte aussi des semences afin de démarrer sa production végétale. Ces semences sont de l'ordre de 1 % des apports totaux annuels en azote aux terres cultivées. Sur la Figure 8, on peut voir qu'une partie de la production de blé tendre est réutilisée comme semences pour la prochaine culture. En réalité, il faudrait plutôt que ce flux passe par la chaîne d'approvisionnement avant de revenir dans la culture car il existe des normes à respecter et ces semences sont donc contrôlées (elles ne peuvent pas être directement réutilisée par les agriculteurs comme le montre à tort la Figure 8) : cela fait partie des éléments à ajuster sur le diagramme.

Enfin, par différence entre les flux d'azote entrant et sortant de la surface cultivée ou de la prairie, il est possible de calculer la quantité d'azote en surplus qui a été apportée à la surface. Si cette quantité est négative, cela implique que les entrées d'azote sont inférieures aux sorties et donc que le sol s'appauvrit en azote – c'est lui qui a fourni la quantité manquante. Si cette quantité est positive (ce qui est le cas sur la Figure 8), cela indique que les entrées d'azote sont supérieures aux sorties et donc que le sol s'enrichit en azote. Cependant, lorsque le sol est déjà saturé en azote ou qu'il ne peut pas absorber tout le surplus (ce qui est le cas la majorité du temps), cette quantité d'azote est alors perdue par

lixiviation dans le sol (cause de pollution car le lixiviat peut alors atteindre les nappes phréatiques, les cours d'eau ou la mer dans les cas de milieux côtiers).

Secteurs « Chaîne d'approvisionnement » et « Stock »

Tous les flux d'azote concernant ces deux secteurs ont déjà été calculés dans la partie *b) Contenu azote et énergie des matières des AFM* et sont visualisables sur la Figure 9 ci-dessous. Cette figure représente donc exclusivement les flux de matières représentés dans l'AFM de blé tendre (Annexe 1), mais convertis en azote.

Remarque : cependant, son allure n'est pas la même (moins de flux, des secteurs positionnés différemment, des noms différents) : c'est un choix de représentation pour les filières dont le métabolisme a été décrit en azote et énergie qui sera présenté plus en détail dans la partie *B. Traçage des diagrammes de Sankey*. Le principal changement que l'on peut retenir ici est que les flux et les secteurs sont représentés à un niveau plus agrégé dans les AFN et AFE (ex : tous les co-produits ensemble et tous les secteurs de transformation ensemble). Ce choix a été fait dans le but de simplifier les AFN et AFE (flux trop nombreux si tous les flux des AFM avec en plus tous les autres flux d'azote et d'énergie supplémentaires qui sont calculés sont représentés).

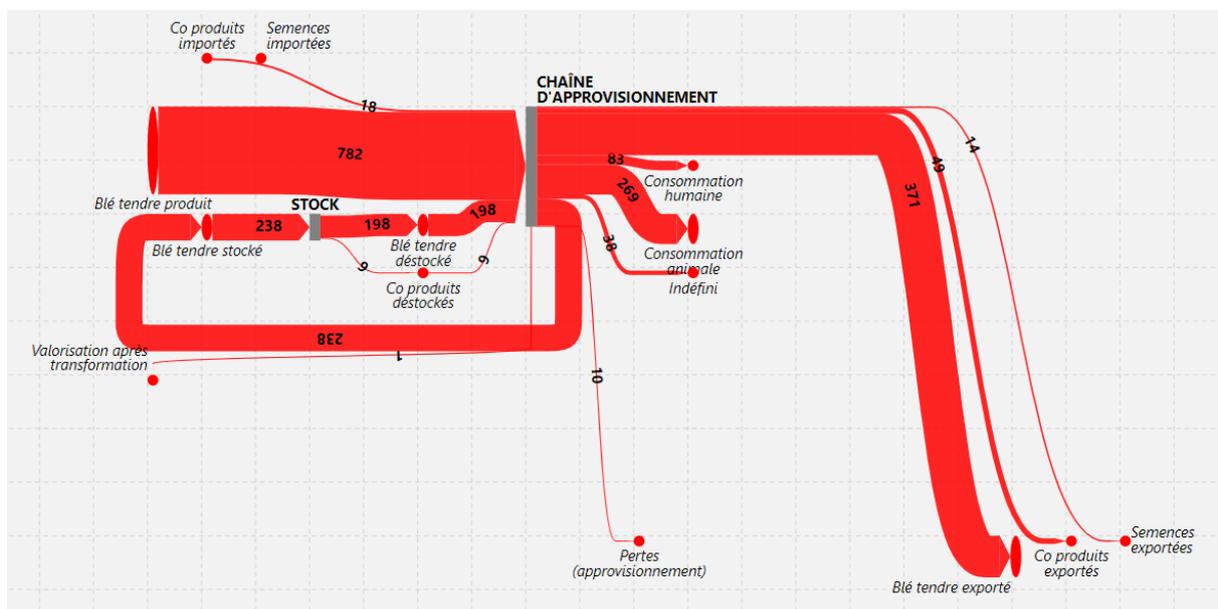


Figure 9 : Focus sur les secteurs "Chaîne d'approvisionnement" et "Stock" de l'AFN Blé tendre de 2015

On peut donc voir sur cette figure les flux des filières végétales qui sont consommés par la chaîne d'approvisionnement (les importations⁹, la production végétale et la matière première déstockée) et ceux qui sont produits par ce secteur (les exportations, la consommation humaine et animale, le stockage de la matière première, les matières valorisées en engrais ainsi que les pertes de matière lors de la transformation).

Remarque : il est intéressant de noter que la chaîne d'approvisionnement est le seul secteur où le bilan d'azote et d'énergie devrait être respecté mais ne l'est pas par les calculs (on peut en effet déceler une légère différence entre les entrées d'azote et les sorties sur la Figure 9 ci-dessus). Il y a deux raisons à cela. D'abord, c'est le seul secteur où tous les flux interagissant avec lui sont connus et calculés (le secteur de stock étant un cas particulier) : il n'y a donc pas de flux qui est déterminé par différence de manière à respecter justement les bilans de matière et

⁹ Il manque d'ailleurs sur cette représentation, manque causé par un dysfonctionnement de l'outil informatique utilisé pour le traçage et qui sera bientôt réglé, le flux de blé tendre qui est importé – ce qui n'est pas très grave puisqu'il est environ 2 fois plus petit que le flux d'azote représentant les co-produits importés.

d'énergie – alors que c'est le cas pour les secteurs « Producteurs » et « Consommateurs ». L'autre raison est que pour que les bilans d'azote et d'énergie soient parfaitement respectés, il faudrait que les compositions de tous les produits soient parfaitement représentatives des flux de matières représentés sur les AFM. Or les données utilisées sont des compositions moyennes – quand on sait par exemple que le contenu en azote du blé tendre peut varier en fonction des régions et cultures où il est produit – et donc un respect parfait des bilans en azote et en énergie ne serait que pure coïncidence. Le lecteur peut se reporter à la thèse de Michela Bevione (Bevione, 2021), figure 30, pour avoir un exemple de stratégie à mettre en place pour obtenir un bilan équilibré sur plusieurs unités simultanément.

Sur la Figure 9 ci-dessus, il y a en effet une différence de -6 % entre les entrées et sorties d'azote sur le secteur « Chaîne d'approvisionnement » (négative car la somme des entrées est plus petite que la somme des sorties).

Secteur « Consommateur »

Concernant les consommateurs, ils consomment des flux d'azote, qui sont des produits et co-produits de la matière première (ces flux ont déjà été calculés dans la partie *b*) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*). Ces produits comestibles sont ensuite digérés puis évacués par les consommateurs sous forme d'excréments. Une partie de ces excréments est ensuite valorisée en étant épandue dans les cultures et prairies (principalement via les boues de stations d'épuration – pour les humains – et le fumier et le lisier – pour les animaux d'élevage) ou est même directement excrétée dans les prairies lors du pâturage de certains animaux. Cette quantité valorisée a déjà été quantifiée un peu plus tôt. Le flux restant désigne l'azote contenu dans les excréments qui ne sont pas valorisés et a donc été obtenu par un simple bilan d'azote sur les consommateurs. Ce flux est considéré comme des pertes (voir Figure 10) car il n'est pas utilisé et représentera une source de pollution car cet azote se retrouvera forcément libéré dans l'environnement.

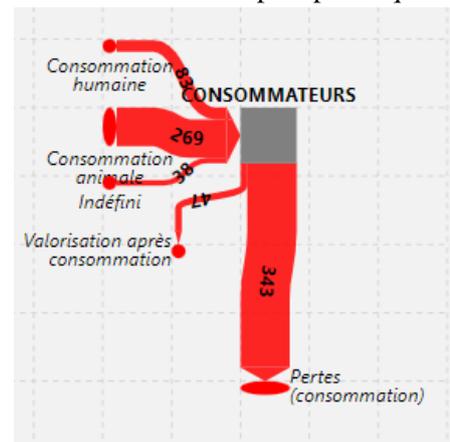


Figure 10 : Focus sur le secteur "Consommateurs" de l'AFN Blé tendre de 2015

b) Filières animales

Secteur « Producteur »

Le producteur, pour les filières animales, désigne les animaux qui sont élevés par l'Homme afin d'obtenir d'eux un produit (ex : viande, lait, œufs, laine, etc.) ou un service (ex : travail mécanique). Certains animaux fournissent même plusieurs produits (ex : les vaches laitières produisent du lait et les poules pondeuses produisent des œufs mais elles fournissent également de la viande, lorsqu'elles sont abattues en fin de vie). Ainsi, il a été considéré que tous les animaux d'élevage finissaient par être abattus puis consommés pour leur viande, et que certains de ces animaux produisaient en plus d'autres produits pendant leur durée de vie (seules les productions d'autres produits comestibles – lait et œufs – ont été considérées dans les AFN et AFE et les autres productions ont été négligées).

Ces productions sont celles qui ont été quantifiées dans les AFM réalisées par Terriflux (qui a fait les filières Viande et Lait de vache) dont le contenu azote a été estimé dans la partie *b*) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*. Cependant, comme la filière Viande concerne la production de viande de tous les animaux (dont ceux fournissant plusieurs produits), il a été nécessaire de quantifier également les productions annexes à la viande. Pour cela, les données de production des laits de brebis et de chèvre ainsi que la production d'œufs de consommation et leur contenus azotés respectifs ont été tirés respectivement des bases de données de l'AGRESTE (*Agreste - Statistique agricole annuelle* (SAA), 2000–2020) et de l'USDA (USDA, 2022).

Pour s'assurer cette productivité, les êtres humains apportent de la nourriture à ces animaux afin de répondre aux besoins de l'élevage. Cette nourriture est ainsi digérée puis l'azote, contenu dans cette

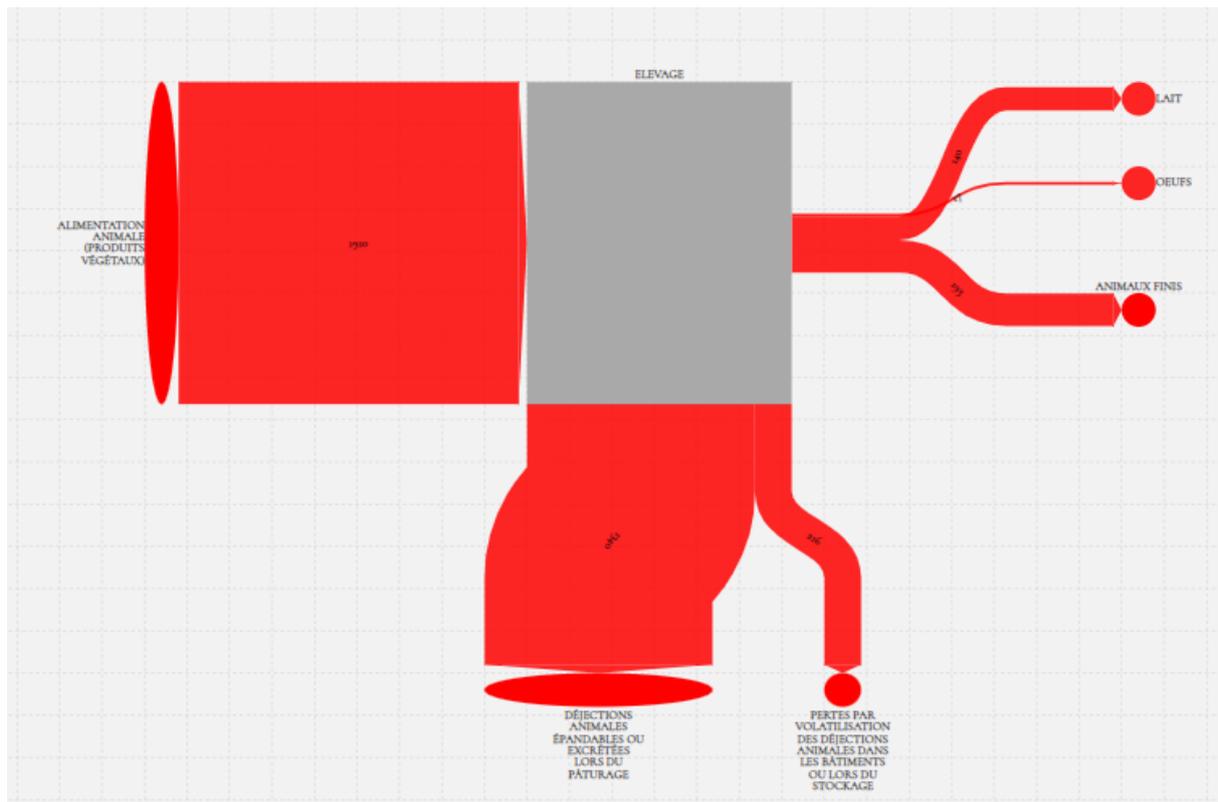


Figure 11 : Focus sur le secteur "Producteurs" simplifié de l'AFN Viande de 2015

nourriture, qui n'est pas évacué dans la ou les production(s) de ces animaux l'est dans les déjections émises par l'élevage tout au long de sa durée de vie. Les sources de données disponibles ne permettant pas de déterminer avec suffisamment de précision la quantité de matière ingérée par ces animaux par type de produit (SAILLEY et al., 2022), l'azote contenu dans l'alimentation de l'élevage a été déterminé en faisant la somme de l'azote contenu dans les productions et les déjections des animaux d'élevage.

Lors de l'émission des déjections, dans les bâtiments d'élevage ou lors du pâturage – selon le lieu de présence des animaux –, une partie de l'azote est volatilisé (sous différentes formes). Ces déjections ainsi que ces pertes par volatilisation ont été quantifiées à partir des données et de la méthodologie utilisées dans le rapport présentant l'outil NOPOLU-Agri qui cherche à spatialiser les pressions de l'agriculture (Commissariat général au développement durable & Service de l'observation et des statistiques, 2013, p. 26-28). Ces données étant fournies par animal, il a fallu les multiplier par les effectifs de l'élevage en 2015, tirés de la base de données AGRESTE (*Agreste - Statistique agricole annuelle (SAA)*, 2000–2020), afin de quantifier les flux d'azote totaux mis en jeu.

Les déjections animales ainsi que leurs pertes d'azote par volatilisation ont été quantifiées par catégorie d'animal (un peu différentes de celles utilisées dans l'outil NOPOLU-Agri). Ces catégories, au nombre de 41, sont les plus fines pour lesquelles il a été possible de différencier les déjections animales et sont listées en Annexe 4 (avec les familles desquelles elles font partie).

De plus, la source de données le permettant, les déjections ont été différenciées par lieu de déjection (les bâtiments ou les prairies) et celles émises dans les bâtiments – et qui sont donc récupérables et épandables –, ont été différenciées par la forme sous laquelle elles sont récupérées (lisier, fumier, fumier litière ou fiente). Il en est de même avec les pertes d'azote par volatilisation, qui ont aussi pu être différenciées par le lieu d'émission (bâtiments, stockage ou prairies) et la forme de gaz sous laquelle l'azote est perdu (NH_3 , N_2O ou N_2), source de pollution atmosphérique.

Remarque : le détail des déjections et des pertes dans tous ces lieux et sous toutes ces formes par catégorie d'animal, amène au calcul de plus de 1000 flux ! Théoriquement, il serait possible et intéressant de tracer tous ces flux sur les diagrammes de Sankey puisqu'ils ont tous des valeurs, origines et destinations et qu'ils apportent des informations supplémentaires, potentiellement utiles. Cependant, d'une part parce que l'outil informatique utilisé pour tracer ces diagrammes n'est pas encore très adapté pour tracer un grand nombre de flux dont les valeurs ne sont pas générées automatiquement – cela demande donc beaucoup de temps pour traiter ces données jusqu'au traçage – et d'autre part car un diagramme avec tous ces flux serait illisible¹⁰, le traçage de ces flux a été arrêté à un niveau de détail acceptable avec un compromis entre le nombre et la pertinence des informations apportées par les flux et le temps de travail nécessaire pour les tracer. C'est pourquoi la légende de la Figure 11 indique que la représentation est simplifiée et la construction de diagrammes plus ou moins simplifiés est expliquée dans la partie B. *Traçage des diagrammes de Sankey*.

Secteurs « Chaîne d'approvisionnement » et « Stock »

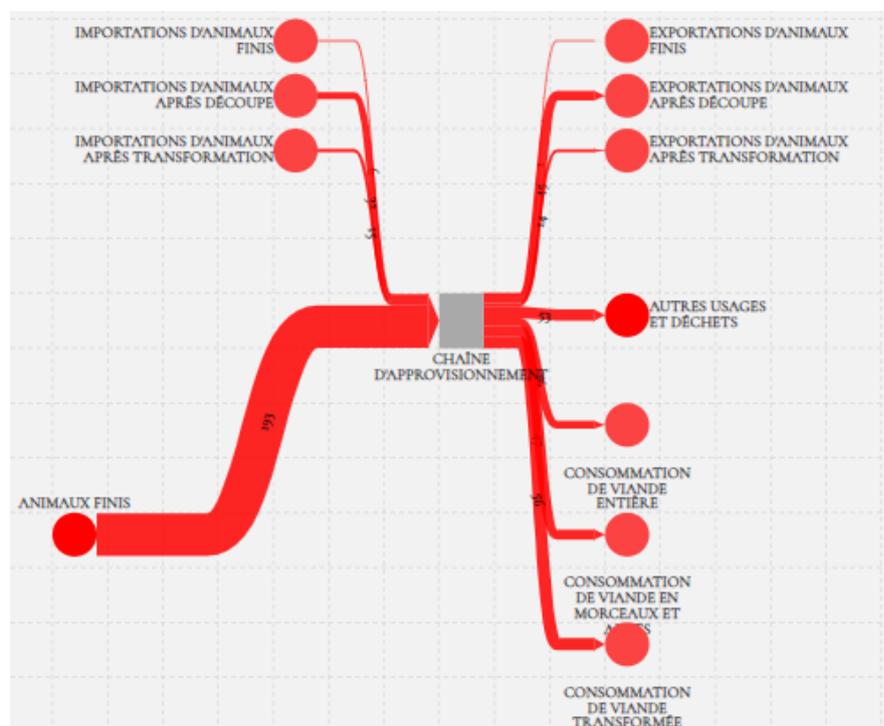


Figure 12 : Focus sur le secteur "Chaîne d'approvisionnement" simplifié de l'AFN Viande de 2015

Contrairement aux filières végétales, il n'y a pas de secteur de stockage pour les filières animales (d'après les AFM et comme on peut le constater pour la filière Viande sur la Figure 12 ci-dessus), ce qui est directement lié aux matières premières concernées – moins faciles à conserver pour les filières animales en l'occurrence. La chaîne d'approvisionnement reçoit donc les importations et la production interne au territoire étudié et en ressortent les exportations, les produits consommés sur le territoire et les pertes dues aux procédés de transformation. Tous ces flux de matières sont connus grâce aux AFM et leur conversion en azote a donc déjà été expliquée dans la partie b) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*.

¹⁰ Il faut s'imaginer que le flux nommé « Déjections animales épandables ou excrétées lors du pâturage » de la Figure 11 serait divisé en plus de 500 flux ! En plus de rendre complexe la lecture du graphique, tous les flux seraient très petits et on perdrait ainsi l'intérêt du diagramme de Sankey qui consiste à identifier rapidement les flux importants.

Par ailleurs, pour les raisons expliquées dans la partie a) *Filières végétales / Secteur « Producteur »*, le bilan d'azote sur la chaîne d'approvisionnement de l'AFN de la filière Viande fait état d'une différence de -2 % entre les entrées et les sorties.

Secteur « Consommateur »

Concernant les consommateurs – qui représentent ici uniquement la population humaine –, ils consomment des flux d'azote, qui sont des produits et co-produits de la matière première (ces flux ont déjà été calculés dans la partie b) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*). Ces produits comestibles sont ensuite digérés puis évacués par les humains sous forme d'excréments. La totalité de l'azote ainsi ingéré se retrouve donc dans les excréments : ce qui a permis de calculer le flux d'azote des déjections humaines.

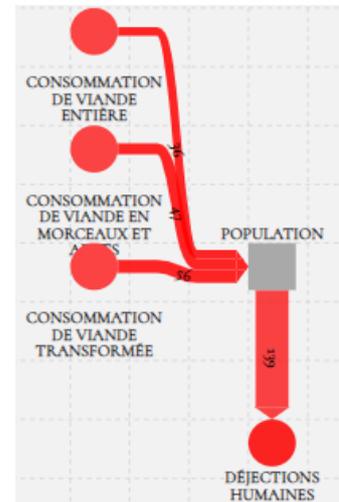


Figure 13 : Focus sur le secteur "Consommateurs" simplifié de l'AFN Viande de 2015

C. Métabolisme énergétique des filières agricoles

Il s'agit ici d'appliquer la même méthode que ce qui a été fait précédemment mais d'un point de vue énergétique cette fois-ci.

a) *Filières végétales*

Secteur « Producteur »

Comme tout être vivant, les végétaux ont besoin d'énergie pour vivre et se développer. Ils la captent de la lumière du Soleil, grâce au processus de photosynthèse qui la transforme en énergie chimique. C'est cette énergie brute qui est contenue dans la production agricole et a été calculée dans la partie b) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*. Par conséquent, le flux d'énergie représentant la lumière captée par la photosynthèse a été considéré comme égal au contenu énergétique de la production (ce que l'on voit sur la Figure 14 qui montre l'exemple de la filière Blé tendre).

Comme pour l'azote, une partie de la récolte est consommée pour servir de semences. La quantité d'énergie de ce flux a été estimée en considérant la même masse sèche de semences consommées que pour l'azote. Pour cela, il a fallu convertir la masse en azote de ces semences en masse sèche de matière puis la reconvertir en énergie. Les contenus azotés et énergétiques des semences ont été considérés équivalents à ceux de la matière première de la filière.

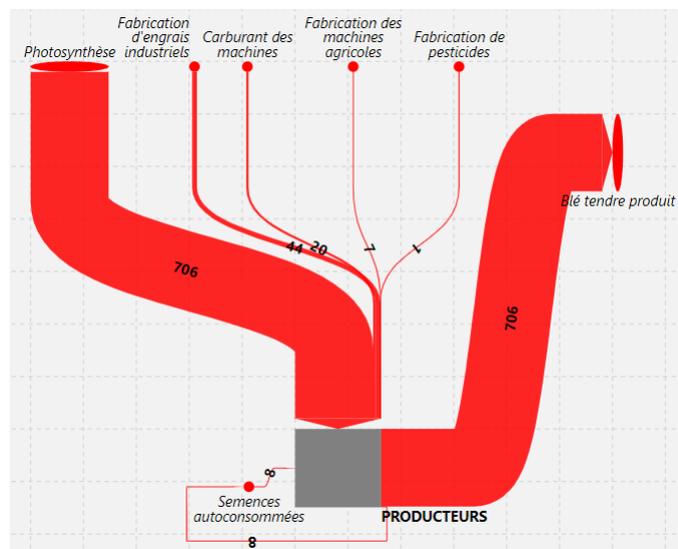


Figure 14 : Focus sur le secteur "Producteurs" de l'AFE Blé tendre de 2015

Les flux énergétiques restants concernent les consommations d'énergie qui ont servis aux agriculteurs pour produire la quantité de matière première. Ces flux peuvent être classés en deux catégories : l'énergie directe et l'énergie indirecte.

L'énergie directe désigne ici l'énergie qui a été consommée sur le lieu de culture (carburant des machines agricoles, irrigation et énergie consommée dans les serres).

La quantité d'énergie dans le carburant consommé dans les machines agricoles par les agriculteurs a été calculée à partir de la consommation de carburant (en L/ha/an) pour les 6 différentes tâches agricoles (préparation du sol, labour, semis, traitement, récolte, autre) en tenant compte de la matière première cultivée (Vigier et al., 2012). Les consommations annuelles totales de carburant étant calculées et connaissant les surfaces des cultures et prairies, il reste à déterminer le PCI¹¹ (Pouvoir Calorifique Inférieur) moyen du carburant utilisé dans les machines agricoles. Le fioul domestique et le gazole non routier (GNR) étant les deux principaux types de carburant utilisés dans les machines agricoles (respectivement 88 % et 9 % d'après une étude du Commissariat Général au Développement Durable (2014)), le PCI moyen a été calculé au prorata de l'utilisation de ces deux combustibles et de leurs PCI respectifs (36,216 MJ/L et 38,08 MJ/L).

L'énergie consommée pour irriguer les cultures a été calculée proportionnellement à l'eau consommée. L'apport moyen d'eau pour les cultures irriguées et le pourcentage des surfaces irriguées pour chaque type de culture sont donnés respectivement en mm/an et en % pour l'année 2017 (SSP - Agreste, 2017). D'après Harchaoui (2019), la quantité d'énergie (en J/an) consommée pour irriguer une culture peut être estimée en multipliant l'apport moyen d'eau (en m/an), la surface irriguée (en m²), la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³), la constante de la pesanteur (9.81 m/s²) et l'élévation d'eau moyenne (17 m) puis en divisant le tout par l'efficacité de la pompe (10 %).

Aucune source de données n'a été recherchée concernant la consommation d'énergie dans les serres car l'exemple d'application étant la filière Blé tendre, ce n'était pas nécessaire puisque le blé tendre n'est pas cultivé sous serre.

Par opposition avec l'énergie directe, l'énergie indirecte désigne ici l'énergie consommée hors du lieu de culture, en l'occurrence l'énergie qui a été consommée pour fabriquer un produit utilisé par l'agriculteur (fabrication d'engrais industriel, fabrication de pesticides et fabrication des machines agricoles) : on l'appelle aussi énergie grise.

L'énergie consommée pour fabriquer les engrais a été estimée à partir des consommations des cultures et prairies en engrais (en kg/(ha.an), pour l'année 2017 (SSP - Agreste, 2017)) sous trois différentes formes : N minéral, P₂O₅ et K₂O. Les quantités totales étant déterminées grâce aux surfaces, celles-ci ont été multipliées par l'énergie moyenne consommée par les fabricants d'engrais (en GJ/t) pour chaque type d'engrais (Harchaoui, 2019).

De manière analogue, l'énergie consommée pour fabriquer les pesticides a été déterminée à partir des consommations des cultures en pesticides (en t/an, pour l'année 2015 (OFB, 2021)) pour 4 différentes catégories : fongicides, herbicides, insecticides et autres pesticides. Cependant, les données étant globalisées pour toutes les cultures appartenant à la famille des « Grandes cultures », il a fallu estimer la part de cette consommation effectivement consommée par la filière étudiée (Blé tendre dans notre exemple). Pour cela, ont été utilisées les parts de chaque filière, parmi les filières appartenant aux « Grandes cultures », en termes d'IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement, (SSP - Agreste, 2017)), indicateur qui a été considéré comme représentatif de la quantité de pesticides utilisés. Comme pour la fabrication des engrais, les quantités de pesticides consommées ont ensuite été multipliées par l'énergie grise de fabrication des pesticides (200 GJ/t, d'après Harchaoui (2019)).

¹¹ Le PCI représente la quantité d'énergie libérée sous forme de chaleur lors de la combustion complète d'une unité de combustible (l'énergie contenue dans la vapeur d'eau n'étant pas récupérée) (Wikipedia contributors, 2021).

d'approvisionnement est de seulement 1 % pour la filière Blé tendre (invisible à l'œil nu sur la Figure 15).

Pour fonctionner, la chaîne d'approvisionnement consomme de l'énergie également pour transformer les produits et les transporter (c'est d'ailleurs son rôle dans la filière). Il faut donc estimer ces consommations.

L'énergie consommée par les acteurs de la filière pour transformer les produits a été tirée du rapport final du projet CECAM (CIRED et al., 2018), pour chaque acteur de transformation. Ces données étant fournies sans différencier par matière première la quantité d'énergie qui a été consommée (ex : la quantité d'énergie consommée dans les meuneries ne différencie pas celle qui l'a été pour la transformation du blé tendre ou du blé dur). Il a donc été fait le choix d'allouer l'énergie consommée proportionnellement à la part de la matière première de la filière étudiée étant transformée par l'acteur par rapport à la quantité totale (en masse de matière sèche) de matières premières transformées par l'acteur. Ces quantités de matières transformées par les acteurs sont des données directement tirées des AFM.

Remarque¹⁵ : cette méthode fonctionne très bien et alloue de manière pertinente les consommations d'énergie des acteurs seulement si les AFM de toutes les filières dont les acteurs de transformation font partie ont été réalisées. Ce n'est pas exactement le cas, une vingtaine de filières ont été faites, mais comme ce sont les principales en termes de quantités de matières mises en jeu, cela ne faussera pas de beaucoup les résultats. Un autre point sur le même principe, un peu plus dérangeant cette fois mais simplement causé par l'état d'avancement du stage, est que les AFM de toutes les filières n'ont pas encore été traitées (seulement Blé tendre, Viande et Lait de vache) et donc que les quantités de matières premières transformées mises en jeu dans les autres filières ne sont pas encore intégrées au classeur. Par conséquent, les valeurs d'allocation valent pour l'instant 100 % et donc les quantités d'énergie calculées sont actuellement surestimées. Par chance, la filière Blé tendre qui a été faite est très importante par ses quantités de matière échangées, ce qui minimise l'erreur de négligence des autres filières – les quantités d'énergie sont donc seulement un peu surestimées pour cette filière.

L'énergie consommée pour transporter les produits échangés sur le territoire a été déterminée à partir des données de 2015 extraites de la base de données SITRAM (Système d'Information sur les TRAnsports de Marchandises). Cette base gérée par le SDES (Service des Données et Etudes Statistiques, du ministère de la transition écologique et solidaire) recense les flux de marchandises selon le mode de transport, la nature des marchandises, l'origine et la destination et le conditionnement. Les données disponibles recensent le transport national et international pour les modes terrestres (route, rail, voies navigables intérieures), et le transport international des marchandises faisant l'objet du commerce extérieur français, quel que soit le mode (terrestre, aérien, maritime). Les données sont déjà disponibles en ktonnes.kms/an pour le transport intérieur tandis qu'elles sont seulement renseignées en ktonnes/an avec les pays d'origine et de destination pour le transport extérieur. Il a donc fallu multiplier ces quantités transportées par leur distance moyenne parcourue¹⁶ selon le mode de transport et le pays (ou continent) d'origine ou de destination des produits.

Ces données de transport étant fournies par différentes catégories de produit (ex : « Farines, semoule, gruaux de céréales » étant une catégorie), il a également fallu allouer les quantités transportées pour ces catégories à chaque produit présent dans les AFM des filières. Enfin, pour estimer la quantité d'énergie qui a été consommée pour transporter ces produits, il faut multiplier ces données par l'intensité énergétique (en MJ/(tonnes.kms)) de chaque mode de transport utilisé : 1,4 ; 0,3 et 0,4 respectivement

¹⁵ Cette remarque s'applique également au choix d'allocation qui a été fait pour le transport.

¹⁶ Ces distances avaient déjà été estimées par Jean-Yves pour ses précédents travaux : données qui ont été reprises telles quelles pour ce stage.

pour les poids lourds, trains de marchandises et bateaux de marchandises (Allianz pro Schiene, 2022) – aucun produit de la filière Blé tendre n'est transporté par avion.

Secteur « Consommateur »

Enfin, les consommateurs consomment l'énergie contenue dans leurs aliments pour subvenir à leurs besoins (ces flux ont déjà été calculés dans la partie *b*) *Contenu azote et énergie des matières des AFM*). Ces produits comestibles sont ensuite digérés puis évacués par les humains : ce qui permet de quantifier la quantité d'énergie perdue après consommation (exemple pour la filière Blé tendre sur la Figure 16).

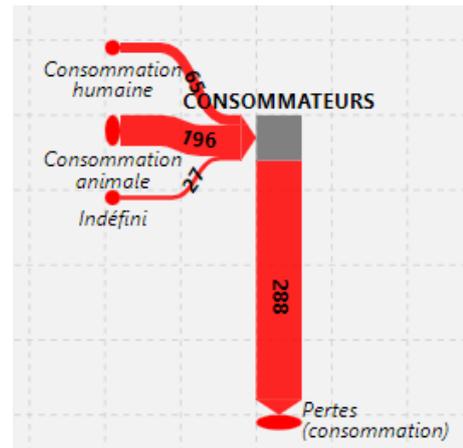


Figure 16 : Focus sur le secteur "Consommateurs" de l'AFE Blé tendre de 2015

Remarque : ces pertes n'ont pas été différenciées alors qu'elles sont de différentes formes (ex : énergie sous forme chimique contenue dans les aliments gaspillés et dans les excréments, énergie sous forme de chaleur perdue à cause du métabolisme des consommateurs, énergie sous forme mécanique utilisée pour effectuer un travail). Ceci serait pertinent pour permettre d'expliquer pourquoi ont lieu ces pertes et d'identifier celles qui seraient potentiellement valorisables : cela fera l'objet d'une amélioration à apporter aux AFE.

A noter que les déplacements des consommateurs vers les lieux de distribution ainsi que les consommations d'énergie au domicile avant de consommer les aliments (réfrigération, cuisson) sont en dehors du périmètre de l'étude.

3) Mise en forme des résultats

A. Traitement des données

a) *Structure du classeur Excel*

Le traitement des données, dont les sources ont été présentées dans la partie précédente (2) *Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées*), a été effectué à l'aide d'un classeur Excel. Celui-ci a deux rôles majeurs : calculer les valeurs de tous les flux d'azote et d'énergie à partir de toutes les données brutes¹⁷ et, ensuite, mettre ces valeurs dans le formalisme requis pour utiliser l'outil informatique de traçage des diagrammes développé par TerriFlux.

L'objectif de cette partie est de présenter rapidement comment a été pensé le classeur et quelles fonctionnalités il offre ainsi à son utilisateur. L'organisation de ce classeur a été modifiée une dizaine de fois depuis le début du stage et, même encore actuellement, les filières végétales et animales n'ont pas été traitées tout à fait de la même manière. C'est pourquoi seulement les principaux points à retenir seront décrits ci-dessous.

Nous avons fait le choix de réaliser les AFN et AFE de toutes les filières dans un seul fichier (contrairement aux AFM qui ont été faites par TerriFlux avec un fichier pour chaque filière). Cela permet principalement deux choses : permettre les relations entre les filières, pratique lorsque la valeur d'un flux dépend de celui d'une autre filière (par exemple les choix d'allocation discutés précédemment), et éviter d'avoir à importer plusieurs fois les mêmes données (par exemple si une source de données renseigne sous forme de tableau les engrais utilisés par chaque filière végétale, il suffit alors d'importer ce tableau dans le classeur et toutes les filières sont directement réalisables au lieu d'importer ce tableau dans chaque fichier de chaque filière).

¹⁷ Par données brutes sont entendues les données n'ayant subi aucune modification (tirées telles quelles des sources de données).

Pour donner une idée de sa taille, ce classeur est actuellement composé d'une soixantaine de feuilles, dont les fonctions principales sont les suivantes :

Pour la filière Blé tendre

- Des feuilles de données brutes (dont les données de l'AFM) : une feuille par source de données lorsqu'elles fournissent ces données pour plusieurs filières et le reste des données (paramètres ou données pour une seule filière) est rassemblé dans une autre feuille.
- Des feuilles de valeurs calculées : une feuille par empreinte. Ces feuilles comportent un tableau construit notamment de manière à : calculer les valeurs des flux (d'azote ou d'énergie), et permettre à l'utilisateur de visualiser facilement tout le cheminement de ces calculs depuis les données brutes, et leur périmètre d'étude¹⁸, jusqu'aux valeurs des flux, visualiser les différents niveaux d'agrégation entre les flux (présentés dans la partie *B. Traçage des diagrammes de Sankey*), identifier la fiabilité des valeurs depuis les données utilisées pour les calculer ou encore permettre de comparer plusieurs sources de données différentes pour une même donnée (et ainsi s'assurer que l'ordre de grandeur est bien le même pour toutes, un exemple sera montré dans la partie suivante *b) Comparaison de plusieurs sources de données*).
- Une feuille de prétraitement des données brutes de l'AFM : principalement utilisée pour convertir tous les flux de matières de l'AFM en énergie et en azote.
- Des feuilles de prétraitement des valeurs calculées afin de « convertir » le formalisme utilisé dans les tableaux de valeurs dans le formalisme requis pour tracer les diagrammes avec l'outil développé par TerriFlux.
- Trois feuilles recensant toutes les informations nécessaires pour tracer les diagrammes (niveaux d'agrégation entre les flux ; origine, destination et valeur de tous les flux et filtres¹⁹ à utiliser (si besoin).

Pour les filières Viande et Lait de vache

- Des feuilles de données brutes (même utilisation que pour la filière Blé tendre).
- Des feuilles de valeurs calculées : une feuille par filière et par empreinte également. Cependant, celles-ci contiennent un tableau plus simple où figurent uniquement les valeurs finales des flux (et pas tout le cheminement pour les atteindre) avec leurs niveaux d'agrégations respectifs.
- Des feuilles de prétraitement des données brutes : deux (une par filière) ont la même utilité que celle de la filière Blé tendre et d'autres permettent de passer des données brutes aux valeurs des flux (c'est-à-dire tous les calculs intermédiaires qui étaient dans le tableau avec les valeurs calculées pour la filière Blé tendre).

Au-delà de la manière d'effectuer les calculs intermédiaires pour partir des données brutes et arriver jusqu'aux valeurs calculées, la différence notable entre la filière Blé tendre et les filières animales est qu'il n'y a pas de feuilles permettant de tracer les flux pour les filières animales. En effet, l'outil informatique développé par TerriFlux pour tracer les diagrammes de Sankey est conçu pour pouvoir être utilisé de deux manières : soit renseigner à minima les noms, les origines, les destinations et les valeurs des flux en respectant un certain formalisme²⁰ dans un classeur Excel, puis charger ce classeur sur le site permettant de visualiser les graphiques, soit rentrer manuellement toutes ces informations directement sur le site. Une fois les données renseignées (par l'une ou l'autre des méthodes), il faut mettre en forme le graphique sur le site manuellement (étape qui sera présentée dans la partie *B. Traçage des diagrammes*

¹⁸ Périmètre qui correspond rarement parfaitement à celui qui est étudié lors de ce stage (ex : utilisation de données concernant les céréales ou de 2017 pour calculer des flux caractérisant la filière Blé tendre de 2015).

¹⁹ Les filtres permettent de rapidement masquer ou non certains flux lors de la représentation graphique : très utile pour offrir différentes visions des diagrammes à leur utilisateur.

²⁰ Ce format ne sera pas décrit dans ce rapport car cela prendrait plusieurs pages et n'apporterait rien au lecteur qui ne compte pas utiliser cet outil mais il faut garder à l'esprit que l'appropriation de cet outil a fait partie intégrante de mon stage.

de Sankey). Par conséquent, la première méthode a été utilisée pour la filière Blé tendre alors que la seconde a été utilisée pour les filières animales.

Remarque : ces deux manières de traiter les données ont été utilisées pour plusieurs raisons, qui sont plus liées à l'ordre chronologique dans lequel les filières ont été étudiées qu'aux filières elles-mêmes. Tout d'abord, je souhaitais que la méthode utilisée pour calculer chaque valeur soit facilement repérable sans explications annexes au classeur, ce qui a été fait dans les tableaux pour le Blé tendre. De plus, cela permettait d'utiliser facilement plusieurs sources de données en parallèle pour calculer une même valeur et comparer leurs fiabilités. Ceci a abouti à un tableau d'une centaine de lignes pour l'azote et d'environ 700 lignes pour l'énergie, ce qui était la taille limite pour se repérer dans le tableau – même avec toutes les astuces utilisées pour repérer les éléments du tableau (ex : couleurs, polices, retraits, filtres, etc.) –, et pour le temps passé à sa réalisation. Ainsi, la filière Viande pouvant être vue comme une agrégation de plusieurs filières (ex : Viande de bovins, Viande de porcins, Viande d'ovins, Viande de caprins, etc.), est de plus grande taille que la filière Blé tendre et elle demande beaucoup de calculs répétitifs. De plus, le fait que les méthodes de calculs utilisées soient visibles pour chaque valeur n'était peut-être pas si important, une explication globale telle que celle qui est faite dans la partie 2) *Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées* étant suffisante. De plus, il n'a pas été jugé pertinent de comparer systématiquement différentes sources de données pour chaque filière effectuée car le rapport du temps passé aux conclusions tirées n'est pas en sa faveur (comme nous le verrons dans la partie suivante : b) *Comparaison de plusieurs sources de données*) : ce fût un travail intéressant à faire une fois mais pas plus. C'est pourquoi, le premier format de tableau n'a pas été utilisé pour les filières animales.

Concernant la méthode utilisée pour renseigner les données sur le site de visualisation des digrammes (via le fichier Excel pour le Blé tendre et manuellement pour les filières animales), cela est uniquement dû au gain de temps, à ce moment-là, de renseigner les données manuellement pour les filières animales. En effet, un changement du formalisme pour renseigner les données sur Excel étant prévu par TerriFlux, il était inutile d'organiser les valeurs des flux sous le formalisme actuel pour ensuite le refaire sous le nouveau formalisme.

Plus globalement, la structure générale du classeur (feuilles de données brutes, séparées des tableaux de valeurs calculées, séparés des feuilles pour tracer les flux) a été pensée afin de le rendre évolutif. En effet, elle permet d'ajouter autant de dimensions (filière agricole, empreinte, échelle géographique, année, etc.) que l'on souhaite à ce qui est étudié. Ce qui est entendu par « dimension » est illustré sur la Figure 17 et détermine finalement le périmètre d'étude. Ainsi, chaque tableau

de valeur du classeur Excel est représenté sur la figure ci-contre par un petit cube car il recense les valeurs pour une valeur de chaque dimension²¹ (ex : tableau des flux d'azote de la filière Blé tendre

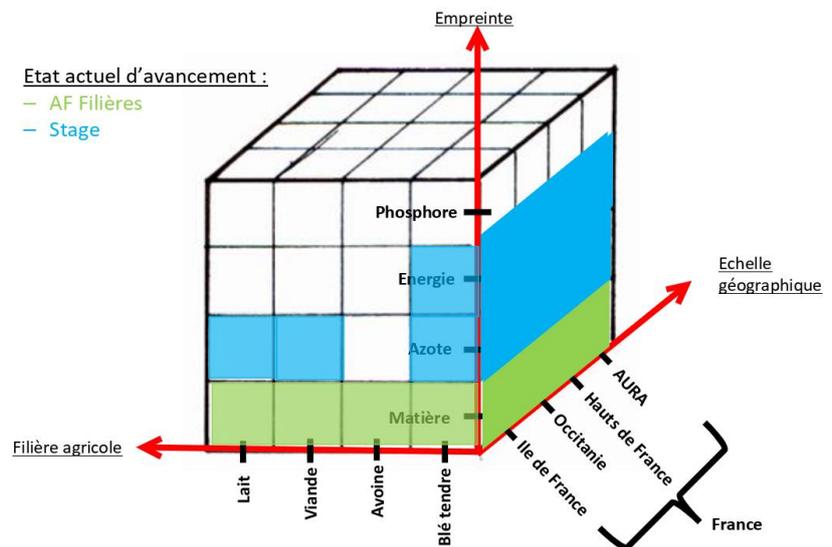


Figure 17 : Représentation graphique des dimensions pouvant être différenciées et illustration de l'état d'avancement des études

²¹ L'année (2015 dans le cadre des études réalisées) représente également une autre dimension mais la représentation d'une 4^{ème} dimension sur la Figure 17 aurait rendu sa lecture plus complexe.

française). Chaque dimension peut également être étudiée à un niveau plus ou moins agrégé (exemple avec l'étude au niveau national qui peut être également régionalisée, ce que TerriFlux a d'ailleurs fait pour certaines filières concernant les flux de matières). Enfin, la somme de tous les petits cubes (= tableaux) donne un grand cube (= classeur) qui représente l'étendue des travaux effectués. La représentation graphique de la Figure 17 permet ainsi de situer les études réalisées lors de ce stage dans le travail plus large dans lequel elles s'inscrivent.

b) Comparaison de plusieurs sources de données

L'objectif de cette partie est uniquement de présenter quelques-unes des comparaisons de sources de données qui ont pu être faites et les conclusions qui en ont été tirées.

Sur les figures ci-contre, les données effectivement utilisées pour calculer les flux représentés sur les diagrammes de Sankey sont celles de gauche en bleu foncé (dont les sources ont été présentées dans la partie 2) *Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées*). Les autres sources de données sont tirées de la base de données ACV et du rapport d'une étude de l'association française spécialisée dans l'agriculture Solagro (SOLAGRO, 2010) pour les principales et proviennent d'autres sources diverses pour les données restantes. Cependant, il faut garder à l'esprit que toutes ces données ne s'adressent presque jamais exactement au même périmètre (dépendant de l'étude réalisée par la source), ce qui explique une partie des différences observées. Par exemple, les données tirées de la base ACV viennent d'un cas d'étude sur 11 fermes (censées être représentatives au niveau français) sur la période 2008-2012 et les données tirées de Solagro sont une moyenne de toutes les cultures de céréales et oléo protéagineux (blé, maïs grain, tournesol, pois, soja, ...), sans les cultures industrielles (betteraves, pommes de terre, ...), en 2010.

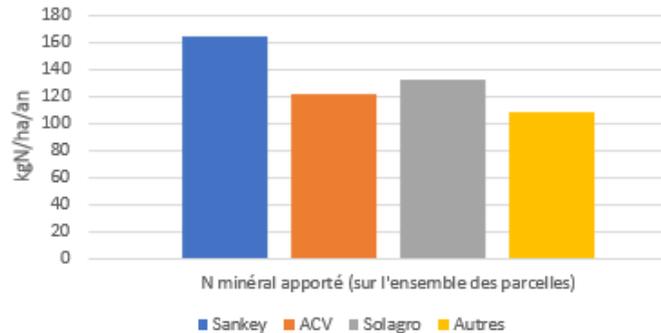


Figure 19 : Comparaison de différentes sources pour une même donnée (exemple pour l'azote)

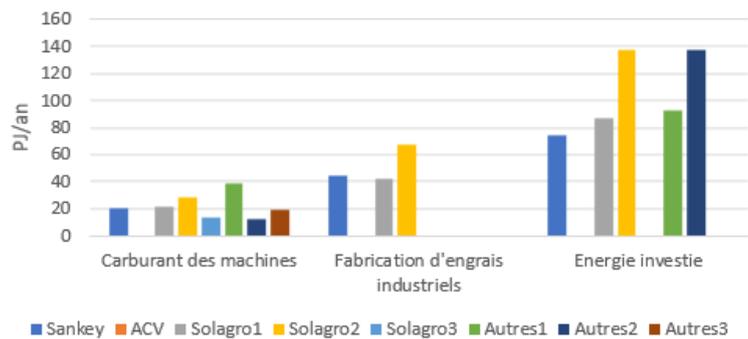


Figure 18 : Comparaison de différentes sources pour une même donnée (exemple pour l'énergie)

Ces deux graphiques (Figure 19 et Figure 18) nous permettent de valider l'ordre de grandeur des données utilisées, comparées dans ces graphiques, pour réaliser les AFN et AFE. En effet, l'écart entre les données ne dépasse pas le double ou la moitié des données utilisées, quelles que soient les données comparées sur ces graphiques.

B. Traçage des diagrammes de Sankey

Une fois tous les flux d'azote et d'énergie calculés et renseignés sur le site de visualisation des diagrammes, il faut, pour chaque AFN et AFE, représenter graphiquement tous ces flux de manière qu'ils décrivent le métabolisme de la filière considérée (des parties de ces représentations ont déjà servi à illustrer la partie 2) *Description du métabolisme des filières et sources de données utilisées*). Les choix de représentation ont été pensés pour rendre la lecture des diagrammes intuitive et apporter un maximum d'informations sans compromettre pour autant la compréhension du métabolisme de la filière.

Le site se présente sous la forme illustrée par la Figure 20 avec, dans la partie centrale du site, le diagramme tracé²² (ce diagramme est présent sans coupures et en plus grande taille en Annexe 8). Une convention utilisée a été de représenter les flux d'azote ou d'énergie qui étaient contenus dans les matières premières, produits et co-produits (présents dans les AFM) dans le sens horizontal du diagramme et tous les autres flux dans le sens vertical. Ainsi, les flux entrant dans les secteurs entrent soit par la gauche, soit par le haut et les flux sortant des secteurs sortent soit par la droite, soit par le bas. Cette convention permet déjà de repérer rapidement sous quelle forme sont les flux d'azote et d'énergie.

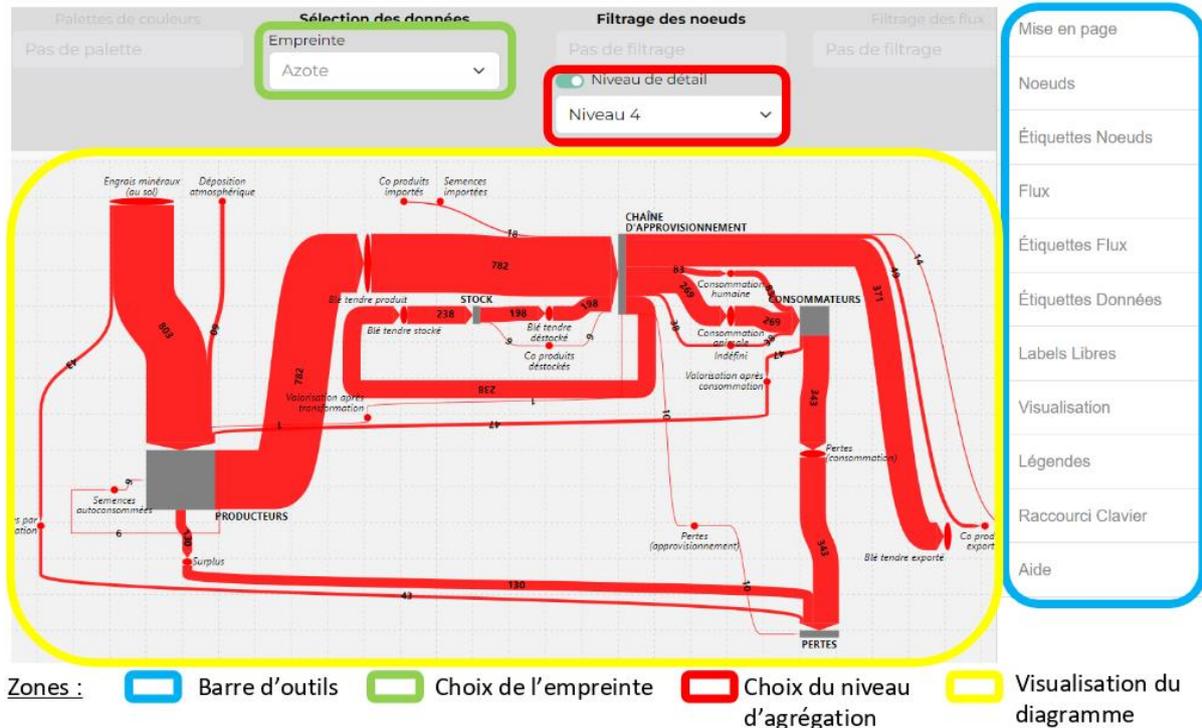


Figure 20 : Interface du site développé par TerriFlux pour tracer les diagrammes de Sankey (avec, pour exemple, le métabolisme azoté de la filière Blé tendre au niveau le plus détaillé)

Les valeurs indiquées sur les flux sont exprimées en ktN (pour l'azote) et en PJ (pour l'énergie). Ces unités ont été choisies car elles permettent de s'affranchir des puissances de 10 (pas idéales pour le cerveau humain afin de retenir ou comparer les valeurs) sans travailler avec des nombres trop longs (en dessous du millier pour la filière Blé tendre).

Il est également possible d'afficher sur le site une liste déroulante afin de permettre à l'utilisateur de rapidement passer d'une représentation à une autre. Comme illustré sur la Figure 20, une liste déroulante permet par exemple le choix de l'empreinte visualisée (il y a seulement deux choix ici : azote et énergie). Une autre liste sert à choisir le niveau d'agrégation de représentation de la filière. En effet, comme cela a été expliqué dans la remarque de la partie b) *Filières animales / Secteur « Producteur »*, la facilité de lecture d'un diagramme est inversement proportionnelle au nombre de flux représentés sur ce diagramme : moins il y a de flux, plus c'est facile et rapide – mais il y a aussi moins d'informations. D'où l'intérêt d'utiliser des niveaux d'agrégation et des filtres afin de retirer les informations non nécessaires pour l'utilisateur (sorte de zoom sur son centre d'intérêt en retirant tout ce qui pourrait parasiter la visualisation de ce qui l'intéresse).

Par conséquent, ces niveaux d'agrégation ont été utilisés afin de représenter le métabolisme des filières (azote et énergie) d'une manière plus ou moins complexe, c'est-à-dire avec plus ou moins de flux et qui sont eux-mêmes plus ou moins détaillés (le niveau 1 représentant le niveau le plus simple). Ceci a pour objectif principal de permettre à des non-initiés de la filière visualisée de comprendre son

²² Un secteur « Pertes » a été ajouté, permettant de rassembler toutes les pertes d'azote de la filière.

métabolisme pas à pas, en partant d'une représentation simplifiée vers la représentation la plus détaillée qu'il a été possible de construire.

Voici un exemple (Figure 21) sur le flux d'azote représentant les fertilisants permettant aux végétaux de se développer :

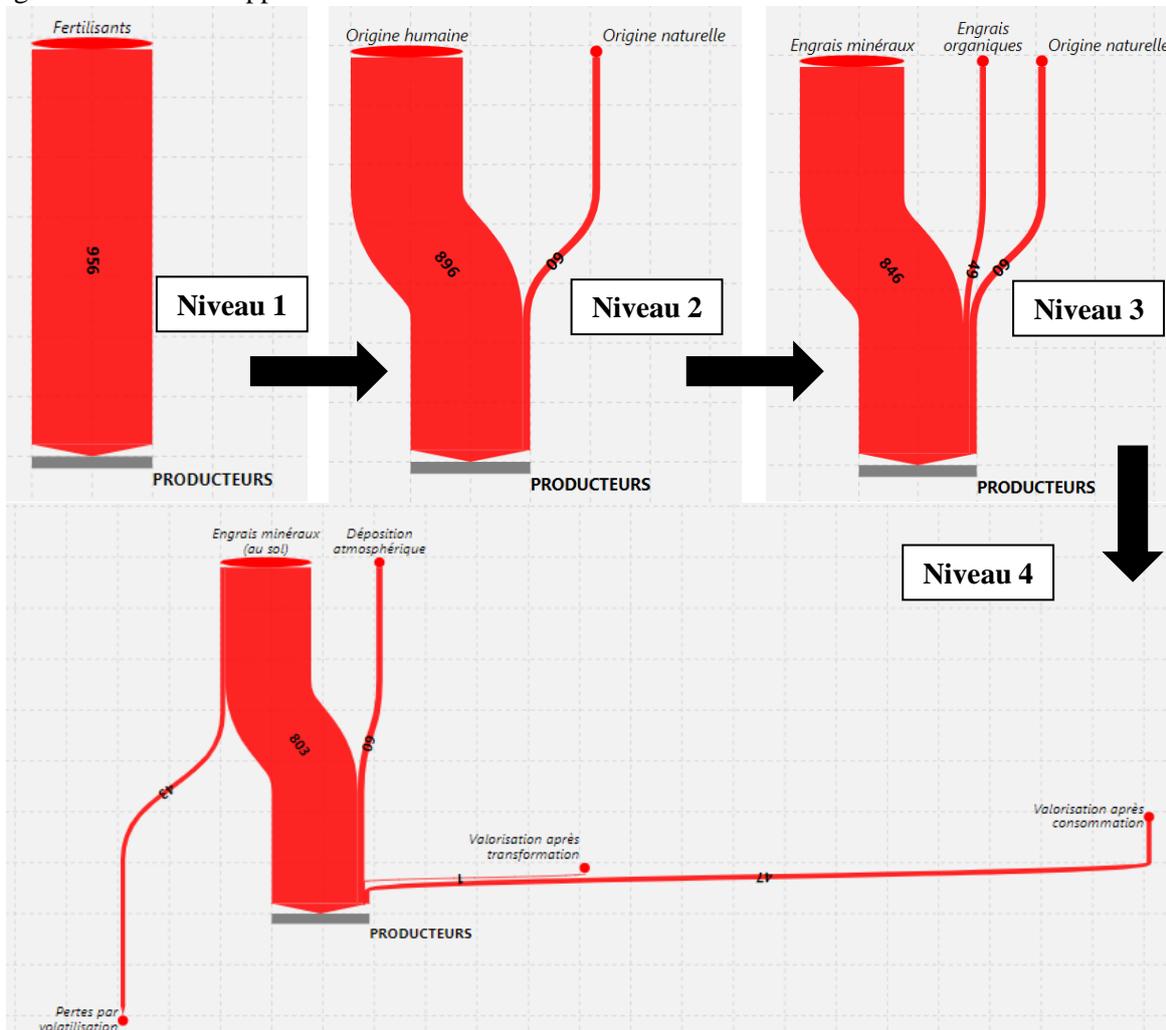


Figure 21 : Focus sur la désagrégation du flux des fertilisants azotés pour la filière Blé tendre, France, 2015

- au premier niveau d'agrégation, l'utilisateur peut constater que la culture de blé tendre consomme une certaine quantité de fertilisants (on ne peut pas faire plus simple...) ;
- au second niveau, l'utilisateur comprend qu'une partie de ces fertilisants dépend de l'intervention de l'espèce humaine tandis que l'autre est apportée naturellement par l'environnement de la culture ;
- au niveau suivant, l'utilisateur apprend que les fertilisants apportés par les humains le sont sous deux formes : minérale et organique ;
- enfin, au dernier niveau, l'utilisateur visualise tous les flux de fertilisants azotés : les fertilisants naturels qui sont uniquement représentés par la déposition atmosphérique pour le blé tendre, les engrais minéraux dont une partie est perdue par volatilisation et les engrais organiques qui viennent de la valorisation des déchets de la chaîne de transformation et des consommateurs (voir partie B. Métabolisme azoté des filières agricoles).

Cette représentation du métabolisme de la filière en plusieurs niveaux permet également d'afficher les valeurs agrégées des flux (l'utilisateur n'a pas à les calculer). Par exemple, si l'utilisateur souhaite uniquement connaître la quantité d'engrais organiques – peu importe l'origine – apportés au blé tendre en France et en 2015, il lui suffit d'afficher le diagramme au niveau 3 au lieu d'avoir à sommer les flux

du niveau 4 – ici, l'exemple est simple donc ce n'est pas difficile de sommer deux flux mais dans des cas avec une multitude de flux ayants diverses origines, cela peut s'avérer plus complexe de retrouver par le calcul la valeur du flux agrégé.

Remarque : les représentations des niveaux simplifiés (avant le dernier niveau) ne sont généralement pas tout à fait rigoureuses puisque la provenance et/ou la destination des flux n'est pas toujours la vraie. Sur l'exemple précédent, au niveau 3, les engrais organiques sont représentés comme venant de l'extérieur de la filière tandis qu'en réalité ils sont issus de la chaîne de transformation et des consommateurs (voir niveau 4) et sont donc des flux internes au périmètre de la filière. Ceci est un parti pris afin de simplifier la réalité tout en gardant à l'esprit que les provenances et destinations des flux sur les niveaux simplifiés ne sont pas toujours les bonnes (mais dans ça l'est pour la majorité des flux).

Cependant, nous avons pris soin de vérifier les bilans de matières et d'énergie sur les secteurs quels que soient les niveaux d'agrégation affichés. Par exemple sur la Figure 21, on peut voir qu'au niveau 1 la culture de blé tendre consomme 956 ktN de fertilisants, au niveau 2 aussi ($896 + 60 = 956$ ktN), au niveau 3 aussi ($846 + 49 + 60 = 955^{23}$ ktN) et au niveau 4 aussi ($43^{24} + 803 + 60 + 1 + 47 = 954^{23}$ ktN).

La même méthode de représentation en flux plus ou moins agrégés par niveau a été utilisée pour tous les autres flux des filières étudiées. Afin de voir l'impact de l'utilisation de ces niveaux d'agrégation sur la représentation des filières à l'échelle d'une filière entière, les quatre diagrammes complets (un pour chaque niveau d'agrégation) des AFN pour la filière Blé tendre française de 2015 sont présents en Annexe 5, Annexe 6, Annexe 7 et Annexe 8.

Si les diagrammes de Sankey réalisés au cours de ce stage permettent une visualisation claire et ludique du fonctionnement des filières étudiées et sont très pertinents lorsqu'il s'agit de décrire tous les flux échangés dans ces filières, nous allons voir dans la partie suivante que le recours à des indicateurs peut s'avérer complémentaire pour analyser les performances de ces filières.

C. Indicateurs

Bien que le travail principal au cours de ce stage ait été de construire des diagrammes de Sankey des flux d'azote et d'énergie structurant les filières agricoles, une petite partie de ce stage a été consacrée à l'exploration des indicateurs pouvant être pertinents pour caractériser ces filières et à leur application aux filières qui ont été étudiées.

L'utilisation d'indicateurs pour analyser les filières agricoles possède deux principaux avantages par rapport aux diagrammes de Sankey tels qu'ils ont été réalisés lors de ce stage. Le premier est que l'information est plus compacte (un seul nombre par indicateur) et peut donc être partagée ou communiquée plus facilement et permettre l'utilisation de statistiques pour suivre, par exemple, l'évolution de ces indicateurs dans le temps. Le second est qu'il peut permettre de comparer deux valeurs des dimensions des diagrammes de Sankey plus facilement. Par exemple, si l'on souhaite comparer le métabolisme de deux pays distincts ou alors le métabolisme de deux filières agricoles distinctes ou encore le métabolisme d'une même filière pour deux années distinctes, il sera plus difficile de les comparer avec deux diagrammes de Sankey côte à côte plutôt qu'en comparant deux nombres quantifiant leurs performances (et encore plus si l'on souhaite comparer 3 pays, 4 pays, 5 pays, etc.).

²³ Les légères différences dans les totaux sont uniquement dues aux arrondis à l'unité lors de l'affichage des valeurs des flux sur le diagramme.

²⁴ Le flux des pertes par volatilisation peut être considéré comme consommé par la culture de blé tendre puisqu'il est directement causé par sa consommation en engrais minéraux même si ce flux d'azote n'entre pas véritablement dans la culture de blé tendre (puisque'il est perdu avant d'entrer dans le sol).

Les diagrammes de Sankey représentant les flux d'azote et d'énergie des filières agricoles et les indicateurs caractérisant les métabolismes azotés et énergétiques de ces filières permettent d'analyser, par deux outils différents mais complémentaires, le même système. Par conséquent, les indicateurs qui sont présentés dans cette partie découlent directement des AFN et AFE qui ont été réalisés au cours de ce stage : les valeurs utilisées pour les calculer sont celles des flux qui ont été quantifiés précédemment.

Le Tableau 1 ci-dessous recense les types d'indicateurs pouvant servir à caractériser le métabolisme des filières agricoles et leur utilité (principalement tirés de Harchaoui (2019)).

Tableau 1 : Synthèse des différents types d'indicateurs permettant de caractériser le métabolisme des filières agricoles

	ABSOLUS		RELATIFS		
Sous-dimensions	Entrées	Sorties	Ancrage (spatial, écologique)	Efficacité	Autosuffisance
Caractérisation	Dépendance de la filière	Empreinte de la filière	Importance pour la filière	Gestion des flux	Degré de dépendance aux sources externes
Exemples	Intrants, énergie grise	Production, pertes, pollution	Part de ressources locales, renouvelables	EROI, NUEtot, NUEcultures, NCE	Autosuffisance en énergie ou azote

Ces types d'indicateurs ont donc été mis en application sur la filière Blé tendre française de 2015, dont les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Exemples d'indicateurs appliqués à la filière Blé tendre, France, 2015

Empreinte	Type d'indicateur	Sous-dimension	Indicateur	Valeur	Unité	Périmètre
Azote	ABSOLU	<u>Entrées</u>	Consommation d'engrais minéraux	847,0	ktN/an	Producteurs + chaîne d'approvisionnement + consommateurs
		<u>Sorties</u>	Pertes culture	174,2	ktN/an	Producteurs
			Production	792,4	ktN/an	Producteurs
	RELATIF	<u>Ancrage</u>	Part de ressources renouvelables	12,4	%	Producteurs + chaîne d'approvisionnement + consommateurs
			Part de ressources locales	12,4	%	Producteurs + chaîne d'approvisionnement + consommateurs
		<u>Efficacité</u>	NUE_{culture}	0,8	-	Producteurs
		<u>Autosuffisance</u>	N_{autosuffisance}	0,1	-	Producteurs
Energie	ABSOLU	<u>Entrées</u>	Consommation d'énergie directe	127,4	PJ/an	Producteurs + chaîne d'approvisionnement
			Consommation d'énergie grise	53,4	PJ/an	Producteurs
		<u>Sorties</u>	Pertes (sans service rendu)	8,1	PJ/an	Producteurs + chaîne d'approvisionnement
			Production	715,4	PJ/an	Producteurs
	RELATIF	<u>Ancrage</u>	Part de ressources renouvelables	0,9	%	Producteurs + chaîne d'approvisionnement
			Part de ressources locales	0,9	%	Producteurs + chaîne d'approvisionnement
		<u>Efficacité</u>	EROI	9,5	-	Producteurs
				3,8	-	Producteurs + chaîne d'approvisionnement
		<u>Autosuffisance</u>	E_{autosuffisance}	0,1	-	Producteurs
				0,1	-	Producteurs + chaîne d'approvisionnement

L'objectif de cette partie n'étant pas d'expliquer dans le détail comment ont été calculés ces indicateurs (leurs noms sont suffisamment explicites pour la plupart²⁵), nous n'allons pas nous arrêter sur chacun de ces indicateurs listés dans le Tableau 2 mais plutôt faire ressortir les principaux enseignements de ces indicateurs.

Tout d'abord, les ressources locales ou renouvelables (identiques d'ailleurs dans le cas de cette filière) représentent une faible (voire très faible) part des consommations d'azote et d'énergie de la filière Blé tendre. Cela implique que la majeure partie de la production de blé tendre est possible grâce à la consommation de ressources fossiles et externes à la filière. Ceci explique la forte dépendance de cette filière (source de vulnérabilités), aussi bien du point de vue de l'azote que de l'énergie, décrite par des indicateurs d'autosuffisance faibles ($N_{\text{autosuffisance}}$ et $E_{\text{autosuffisance}}$ pour l'autosuffisance respectivement en azote et en énergie).

Enfin, un type d'indicateur très complémentaire avec les diagrammes de Sankey réalisés est l'indicateur caractérisant l'efficacité de la filière. En effet, il est plus difficile de quantifier l'efficacité d'une filière à la simple vue des flux sur les diagrammes que via le calcul de ce type d'indicateur.

L'indicateur caractérisant l'efficacité d'utilisation de l'azote par la culture de blé tendre (NUE_{culture}) nous indique une efficacité d'environ 80 %, c'est-à-dire que 80 % de l'azote qui est entré pour fertiliser la culture a effectivement été utilisé par le blé tendre (et se retrouve dans ce blé tendre) et que le reste – 20 % – n'a pas été utile. Ces 20 % de fertilisants sous forme d'azote ont donc été apportés en surplus à la culture et sont source de pollution (comme expliqué précédemment dans la partie *B. Métabolisme azoté des filières agricoles*).

L'indicateur d'efficacité utilisé pour l'énergie est le retour sur investissement énergétique (EROI) qui indique la quantité d'énergie qui a été investie pour obtenir une unité d'énergie en sortie. On peut remarquer que cet indicateur a été calculé deux fois, avec deux périmètres différents. En effet, le périmètre utilisé pour calculer un indicateur influence souvent son résultat, plus ou moins selon l'importance du ou des flux considéré(s) comme faisant partie ou non de ce périmètre d'étude. Par conséquent, il est possible de constater une grande différence entre l'EROI de la culture de blé tendre seule, c'est-à-dire l'énergie qui a été consommée pour produire le blé tendre²⁶ par rapport à son contenu énergétique total après la récolte, et l'EROI en comptant aussi la chaîne d'approvisionnement. En effet, l'EROI avec la chaîne d'approvisionnement est logiquement plus faible car l'énergie consommée pour transformer le blé tendre en ses produits et co-produits ainsi que celle pour les transporter du producteur au consommateur en passant par le transformateur est également comptabilisée, tandis que la production après la chaîne de transformation en termes d'énergie contenue dans la matière ne change pas (voire même diminue un peu à cause des quelques pertes de matières lors de l'étape de transformation).

4) Pistes de poursuite

Tous les travaux effectués durant ce stage ayant été présentés, il s'agit maintenant de donner quelques pistes d'amélioration de ces travaux (plusieurs ont déjà été mentionnées précédemment lors de la description de l'avancement des travaux actuels).

Tout d'abord, d'ici la fin de ce stage (il reste environ un mois), seront corrigés les différents bugs d'affichage des diagrammes de Sankey qui ont été remarqués lors de leur présentation. De plus, les empreintes énergétiques des filières Viande et Lait de vache seront finalisées.

Ensuite afin d'améliorer les travaux déjà effectués, il pourrait être envisagé de trouver d'autres sources de données plus fiables afin de remplacer certaines données qui le sont peu actuellement. Dans

²⁵ Les indicateurs absolus ne sont ni plus ni moins que les valeurs (ou sommes de valeurs) des flux représentés sur les diagrammes de Sankey.

²⁶ Sans compter la photosynthèse comme une énergie consommée par l'Homme pour obtenir sa production végétale (sinon les EROI seraient nécessairement inférieurs à 1, à l'image de la NUE_{culture}).

la même logique, il serait intéressant d'évaluer l'incertitude finale sur les flux calculés en partant des incertitudes des données brutes et en évaluant la propagation de ces incertitudes (à l'image ce qui est fait actuellement par l'autre outil informatique développé par TerriFlux, lors de l'étape de réconciliation des AFM).

Les représentations de certains flux (noms, positionnement) pourraient également être ajustées (ex : le flux des semences, les pertes (les regrouper ou non)). Certains flux pourraient encore être détaillés (ex : différencier sous quelle forme ont lieu les pertes d'azote et d'énergie).

Des informations pourraient être ajoutées sur les diagrammes (ex : via l'utilisation de couleurs différentes). Des filtres pourraient aussi être utilisés pour permettre à l'utilisateur de choisir plus précisément ce qu'il souhaite voir de la filière (ex : ajouter une liste déroulante pour afficher ou masquer l'amont ou l'aval de la filière).

Enfin, de manière plus générale, il serait possible d'étudier d'autres filières agricoles (ex : maïs, soja) et à d'autres échelles géographiques (ex : régions, cantons).

5) Planning du stage

Type de tâche	Travail effectué											
	Semaine 1 07/Jan	Semaine 2 14/Jan	Semaine 3 21/Jan	Semaine 4 28/Jan	Semaine 5 04/Fev	Semaine 6 11/Fev	Semaine 7 18/Fev	Semaine 8 25/Fev	Semaine 9 03/Mar	Semaine 10 10/Mar	Semaine 11 17/Mar	Semaine 12 24/Mar
Recherche bibliographique	Etudes caractérisant le métabolisme azoté de l'élevage											
Définition de la méthodologie	Etudes sur les métabolismes agricoles											
Recherche de sources de données	Adaptation de certains indicateurs au périmètre des AFN et AFE réalisés											
Traitement des données	Calculs jusqu'aux bornes brutes utilisées en forme de tableau											
Traçage des résultats	Réalisation de la structure du tableau afin d'automatiser (dans la mesure du possible) la mise en forme en vue du rapport											
Réunions SCALABLE (1 demi-journée dans la semaine)	Mise en forme des dernières versions des AFN et AFE pour le Blé tendre											
Elaboration des rendus pour l'école Comgès	Copi du projet; petit résumé sur les indicateurs											

Figure 22 : Planning de stage (1^{ère} partie)

Type de tâche	Travail à réaliser											
	Semaine 14 07/Mar	Semaine 15 14/Mar	Semaine 16 21/Mar	Semaine 17 28/Mar	Semaine 18 04/Avr	Semaine 19 11/Avr	Semaine 20 18/Avr	Semaine 21 25/Avr	Semaine 22 02/Mai	Semaine 23 09/Mai	Semaine 24 16/Mai	Semaine 25 23/Mai
Recherche bibliographique	Etudes caractérisant le métabolisme énergétique de l'élevage											
Définition de la méthodologie	Adaptation de certains indicateurs au périmètre des AFN et AFE réalisés											
Recherche de sources de données	Calculs jusqu'aux bornes brutes utilisées en forme de tableau											
Traitement des données	Réalisation de la structure du tableau afin d'automatiser (dans la mesure du possible) le traitement des données											
Traçage des résultats	Présentation des indicateurs envisagés pour caractériser les filières											
Réunions SCALABLE (1 demi-journée dans la semaine)	Présentation des objectifs du stage et des premiers résultats											
Elaboration des rendus pour l'école Comgès	Présentation des indicateurs envisagés pour caractériser les filières											

Figure 23 : Planning de stage (2^{ème} partie)

De plus, ce stage a été rythmé par deux réunions hebdomadaires :

- Une pour faire un point sur l'état d'avancement de mon stage et se donner les directives de poursuite, avec mes encadrants (Jean-Yves et Julien) et Yazid.
- L'autre étant une réunion de l'équipe STEEP (souvent axe AST et parfois avec l'axe RSG aussi) afin d'échanger autour de sujets d'actualité ou en lien avec les activités de l'équipe.

IV. Conclusion

D'un point de vue personnel, ce stage m'a permis d'apprendre à mener un travail de type recherche, d'une part, par l'environnement dans lequel s'est déroulé ce stage et les personnes avec lesquelles j'ai été amené à travailler (équipe de recherche STEEP et projet de recherche SCALABLE) et d'autre part, par la méthode de travail qui a été appliquée tout au long du stage (définition des objectifs, cadrage du périmètre étudié, recherche bibliographique, recherche de sources de données, exploitation des données jusqu'aux résultats, regard critique sur les résultats et amélioration en conséquence, réponse aux objectifs fixés et vulgarisation du travail).

De plus, par le sujet traité, j'ai pu acquérir des connaissances plus techniques en agronomie, discipline malheureusement peu étudiée lors de mon cursus scolaire (rapidement via la méthanisation et étudiée seulement du point de vue énergétique) par rapport aux mécanismes qu'elle permet de comprendre. Aussi, le cas d'étude étant les filières agricoles, il a été très enrichissant d'apprendre comment sont structurées ces filières, d'où viennent les produits que l'on consomme dans notre quotidien et par quelles étapes de transformation ils doivent passer.

Concernant le travail effectué durant ce stage, ont été réalisées les analyses de flux d'azote et d'énergie de la filière Blé tendre et les analyses de flux d'azote des filières Viande et Lait de vache, à l'échelle nationale seulement. Ces flux ont ensuite été représentés à l'aide de diagrammes de Sankey de manière à offrir une vue d'ensemble des filières agricoles étudiées. L'organisation des flux sur ces diagrammes a été pensée de façon à ce que le métabolisme de la filière représentée soit facile à comprendre tout en étant complet.

Ce travail a permis de confirmer la faisabilité de coupler des AFM à leurs flux d'azote et d'énergie ainsi que d'affiner la méthode. Ces études appliquées à des cas concrets ont ainsi permis d'identifier les principales difficultés à la mise en place d'une telle méthode (sources de données difficiles à trouver, quantité de données importante à traiter, élaboration d'un périmètre d'étude précis).

Les représentations graphiques ainsi réalisées seront un outil d'aide à la décision supplémentaire non négligeable pour les acteurs des territoires et filières étudiés. En effet, inscrit dans le projet SCALABLE, ce travail participera à l'évaluation des vulnérabilités des territoires à travers les filières de biomasse d'origine agricoles qui s'y trouvent. Décrivant le métabolisme complet de ces filières, il permettra ainsi des prises de décisions éclairées en faisant ressortir les conséquences de ces prises de décisions, dans l'optique qu'elles soient positives pour ces territoires, ces filières et leur environnement.

Enfin, d'autres regards pourraient encore être portés sur ces filières : également biophysiques (ex : phosphore, potassium, carbone) ou sociaux (ex : temps de travail) ou plus traditionnellement économiques (ex : flux monétaires).

Bibliographie

- ADEME. (2022). *Base Carbone* [Base de données]. <https://bilans-ges.ademe.fr/>
- Agreste - *Statistique agricole annuelle (SAA)*. (2000–2020). [Base de données].
- Allianz pro Schiene. (2022, 13 juin). *Energieverbrauch : Die Bahn fährt mit Strom und das hocheffizient*. Consulté le 21 juin 2022, à l'adresse <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/energieverbrauch/>
- Anglade, J., Billen, G., Garnier, J., Makridis, T., Puech, T., & Tittel, C. (2015). Nitrogen soil surface balance of organic vs conventional cash crop farming in the Seine watershed. *Agricultural Systems*, 139, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.006>
- Bevione, M. (2021). L'analyse des interactions entre flux et acteurs pour la compréhension des enjeux socio-écologiques à l'échelle d'un territoire : application à la production du fromage AOP Beaufort dans la vallée de la Maurienne. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.
- CHAPTER 2: *METHODS OF FOOD ANALYSIS*. (s. d.). FAO. Consulté le 19 juin 2022, à l'adresse <https://www.fao.org/3/Y5022E/y5022e03.htm#bm3.1>
- CIREN, Solagro, EDF, IDDRI, CNRS, FIRE, & LAET. (2018, mai). *Programme de recherche CECAM : Contenu énergétique et carbone de l'alimentation des ménages en France*.
- Commissariat Général au Développement Durable. (2014, mai). *En matière d'énergie, les exploitations agricoles consomment majoritairement des produits pétroliers* (No 517).
- Commissariat général au développement durable & Service de l'observation et des statistiques. (2013, septembre). *NOPOLU-Agri : Outil de spatialisation des pressions de l'agriculture, Méthodologie et résultats pour les surplus d'azote et les émissions des gaz à effet de serre, Campagne 2010–2011* (Document de travail n° 14). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>
- de Molina, M. G., Toledo, V. M., & de Molina, M. G. (2014). *The Social Metabolism*. Springer Publishing.
- Fischer-Kowalski, M., & Haberl, H. (1998). Sustainable development: socio-economic metabolism and colonization of nature. *International Social Science Journal*, 50(158), 573-587. <https://doi.org/10.1111/1468-2451.00169>
- Freshwater boundary exceeds safe limits*. (2022, 26 avril). Stockholm Resilience Centre. Consulté le 17 juin 2022, à l'adresse <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2022-04-26-freshwater-boundary-exceeds-safe-limits.html>
- Gabriel, A. W., Madelrieux, S., & Lescoat, P. (2020). A review of socio-economic metabolism representations and their links to action: Cases in agri-food studies. *Ecological Economics*, 178, 106765. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106765>
- Grillot, M., Madelrieux, S., & Sardat, J. (s. d.). *SCALABLE - Projet de recherche sur les flux des biomasses d'origine agricole*. AURA-EE. Consulté le 16 juin 2022, à l'adresse <https://www.auvergnerhonealpes-ee.fr/projets/projet/scalable-projet-de-recherche-sur-les-flux-des-biomasses-dorigine-agricole> (*Figure définissant les BOA*)
- Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., & Krausmann, F. (2016). *Social Ecology: Society-Nature Relations across Time and Space*. Springer.

Harchaoui, S. Modélisation des transitions en agriculture : énergie, azote, et capacité nourricière de la France dans la longue durée (1882-2016) et prémices pour une généralisation à l'échelle mondiale. Géographie. Université de Paris, 2019. Français. (NNT : 2019UNIP7003). (tel-02940384)

INRAE, CIRAD, & AFZ. (2018). *Tables de composition et de valeur nutritionnelle des aliments pour animaux INRA CIRAD AFZ*. Feed Tables. Consulté le 19 juin 2022, à l'adresse <https://feedtables.com/fr>

Le Noë, J. Biogeochemical functioning and trajectories of French territorial agricultural systems: carbon, nitrogen and phosphorus fluxes (1852-2014). Biodiversity and Ecology. Sorbonne Université, 2018. English. NNT : 2018SORUS159 . tel-02355318

Le Noë, J., Billen, G., & Garnier, J. (2017). How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: The generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Science of The Total Environment*, 586, 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.040> (*Supplementary material*)

METAYER N., BOCHU J-L., BORDET A-C., TREVISIOL A. . Références PLANETE 2010, Fiche 3- Production « Grandes cultures strict ». Toulouse : SOLAGRO, 2010, 33 p.

OFB. (2021). *Banque nationale des données de ventes* [Substances actives vendues par famille de produits phytopharmaceutiques].

Pauliuk, S., & Hertwich, E. G. (2015). Socioeconomic metabolism as paradigm for studying the biophysical basis of human societies. *Ecological Economics*, 119, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.08.012>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, S., Chapin, F. S. I., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., . . . Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://doi.org/10.5751/es-03180-140232>

SAILLEY, M., CORDIER, C., COURTONNE, J. Y., DUFLOT, B., CADUDAL, F., PERROT, C., BRION, A., & BAUMONT, R. (2022). Quantifier et segmenter les flux de matières premières utilisées en France par l'alimentation animale. *INRAE Productions Animales*, 34(4), 273-292. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.4.5396>

SDES. (2015). *SitraM* [Flux de marchandises].

SSP - Agreste. (2017). *Enquête Pratiques culturales en grandes cultures*.

USDA. (2022). *FoodData Central*. Consulté le 19 juin 2022, à l'adresse <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/>

Vigier, F., Lacour, S., Benzäi, S., & Dieudé-Fauvel, M. (2012). Comment déterminer la consommation des automoteurs agricoles ? *Sciences Eaux & Territoires*, Numéro 7(2), 46-53. <https://doi.org/10.3917/set.007.0046>

Wikipedia contributors. (2021, 1 décembre). *Pouvoir calorifique inférieur*. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique_inf%C3%A9rieur

Wikipedia contributors. (2022, 16 mai). *Analyse du cycle de vie*. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie

Liste des abréviations

- **ACV** : Analyse de Cycle de Vie
- **ADEME** : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
- **AFE** : Analyse des Flux d'Énergie
- **AF Filières** : Analyse de Flux des Filières
- **AFM** : Analyse de Flux de Matières
- **AFN** : Analyse de Flux d'azote
- **AGRESTE** : Service statistique du ministère de l'Agriculture et de la Pêche
- **ANSES** : Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'Environnement et du travail
- **AST** : Alternatives SocioTechniques
- **AURA-EE** : AUvergne-Rhône-Alpes Énergie Environnement
- **BOA** : Biomasses d'Origine Agricole
- **BOAT** : Biomasses d'Origine Agricole à l'échelle de Territoires
- **EROI** : Retour sur investissement énergétique (en anglais : « Energy Return On Investment »)
- **FAB** : Fabrication d'Aliments du Bétail
- **GES** : Gaz à Effet de Serre
- **GNR** : Gazole Non Routier
- **IAA et alim hum** : Industrie Agro-Alimentaire et alimentation humaine
- **IFT** : Indicateur de Fréquence de Traitement
- **INRAE** : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
- **INRIA** : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
- **MS** : Matière Sèche
- **N** : Azote (en anglais : « Nitrogen »)
- **NUE** : Efficacité d'utilisation de l'azote (en anglais : « Nitrogen Use Efficiency »)
- **OS** : Organisme Stockeur
- **PAiT** : Plan Alimentaire interTerritorial « région alpine »
- **PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur
- **RSG** : Risques Systémiques Globaux
- **SAA** : Statistique Agricole Annuelle
- **SDES** : Service des Données et Etudes Statistiques, du ministère de la transition écologique et solidaire
- **SITRAM** : Système d'Information sur le TRANsport de Marchandises
- **STEEP** : Soutenabilité, Transition, Environnement, Économie biophysique et Politiques locales

Table des figures

Figure 1 : Schéma présentant le contexte global du stage avec ses principaux acteurs	6
Figure 2 : Zoom sur le secteur de transformation « Meunerie » de l'AFM de la filière Blé tendre	9
Figure 3 : Zoom sur la partie haute de l'AFM de la filière Blé tendre (où sont représentées les importations)	10
Figure 4 : Zoom sur la partie basse de l'AFM de la filière Blé tendre (où sont représentées les exportations).....	11
Figure 5 : Biomasses d'origine agricole dans BOAT (Grillot et al., s. d.).....	12
Figure 6 : Plan du PAiT de la grande région grenobloise	13
Figure 7 : Exemple simplifié de liens directs entre les filières végétales et animales (les valeurs ne correspondent à rien de réel et ont été inventées pour l'exemple)	18
Figure 8 : Focus sur le secteur "Producteurs" de l'AFN Blé tendre de 2015.....	22
Figure 9 : Focus sur les secteurs "Chaîne d'approvisionnement" et "Stock" de l'AFN Blé tendre de 2015	23
Figure 10 : Focus sur le secteur "Consommateurs" de l'AFN Blé tendre de 2015	24
Figure 11 : Focus sur le secteur "Producteurs" simplifié de l'AFN Viande de 2015.....	25
Figure 12 : Focus sur le secteur "Chaîne d'approvisionnement" simplifié de l'AFN Viande de 2015 ..	26
Figure 13 : Focus sur le secteur "Consommateurs" simplifié de l'AFN Viande de 2015.....	27
Figure 14 : Focus sur le secteur "Producteurs" de l'AFE Blé tendre de 2015	27
Figure 15 : Focus sur les secteurs "Chaîne d'approvisionnement" et "Stock" de l'AFE Blé tendre de 2015	29
Figure 16 : Focus sur le secteur "Consommateurs" de l'AFE Blé tendre de 2015	31
Figure 17 : Représentation graphique des dimensions pouvant être différenciées et illustration de l'état d'avancement des études.....	33
Figure 18 : Comparaison de différentes sources pour une même donnée (exemple pour l'énergie)	34
Figure 19 : Comparaison de différentes sources pour une même donnée (exemple pour l'azote).....	34
Figure 20 : Interface du site développé par TerriFlux pour tracer les diagrammes de Sankey (avec, pour exemple, le métabolisme azoté de la filière Blé tendre au niveau le plus détaillé)	35
Figure 21 : Focus sur la désagrégation du flux des fertilisants azotés pour la filière Blé tendre, France, 2015.....	36
Figure 22 : Planning de stage (1 ^{ère} partie)	41
Figure 23 : Planning de stage (2 ^{ème} partie)	41

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des différents types d'indicateurs permettant de caractériser le métabolisme des filières agricoles	38
Tableau 2 : Exemples d'indicateurs appliqués à la filière Blé tendre, France, 2015	38

Table des annexes

Annexe 1 : AFM complète de la filière Blé tendre en France et en 2015	49
Annexe 2 : Légende de l'AFM de la filière présente en Annexe 1 (valable pour toutes les filières qui ont été étudiées dans le cadre du projet AF Filières).....	50
Annexe 3 : Comparaison du niveau de complexité entre la première version (en haut) et la dernière version (en bas) du diagramme de Sankey représentant l'AFE de la filière Blé tendre en France et en 2015.....	50
Annexe 4 : Liste hiérarchisée des catégories d'animaux pour lesquelles les déjections ont été différenciées	51
Annexe 5 : Diagramme de Sankey au niveau 1 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015	53
Annexe 6 : Diagramme de Sankey au niveau 2 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015.....	53
Annexe 7 : Diagramme de Sankey au niveau 3 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015.....	54
Annexe 8 : Diagramme de Sankey au niveau 4 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015.....	54

Annexe 2 : Légende de l'AFM de la filière présente en Annexe 1 (valable pour toutes les filières qui ont été étudiées dans le cadre du projet AF Filières)

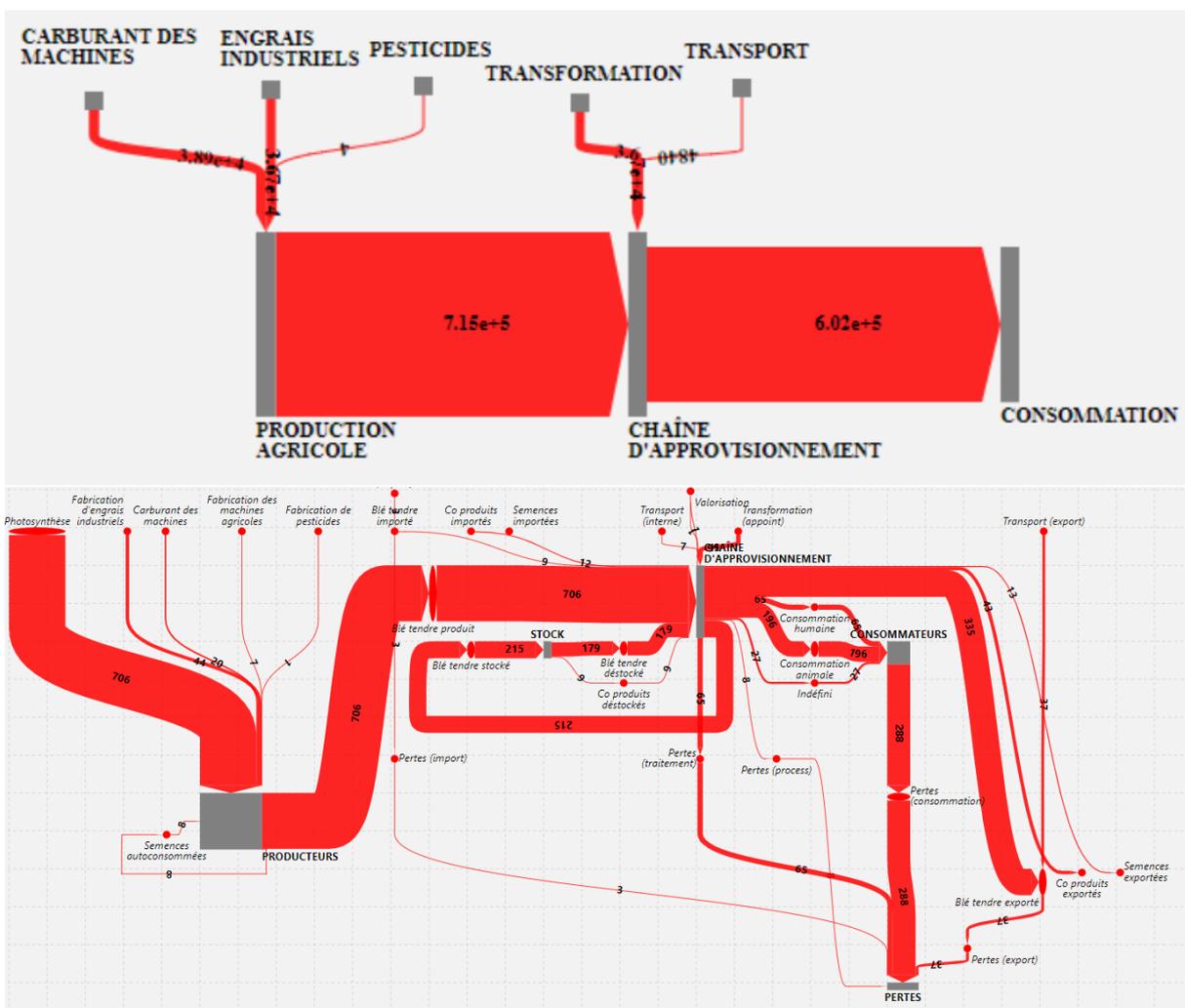
Légende

Flux de matières des filières agro-alimentaires françaises

Période : 2015



Annexe 3 : Comparaison du niveau de complexité entre la première version (en haut) et la dernière version (en bas) du diagramme de Sankey représentant l'AFE de la filière Blé tendre en France et en 2015

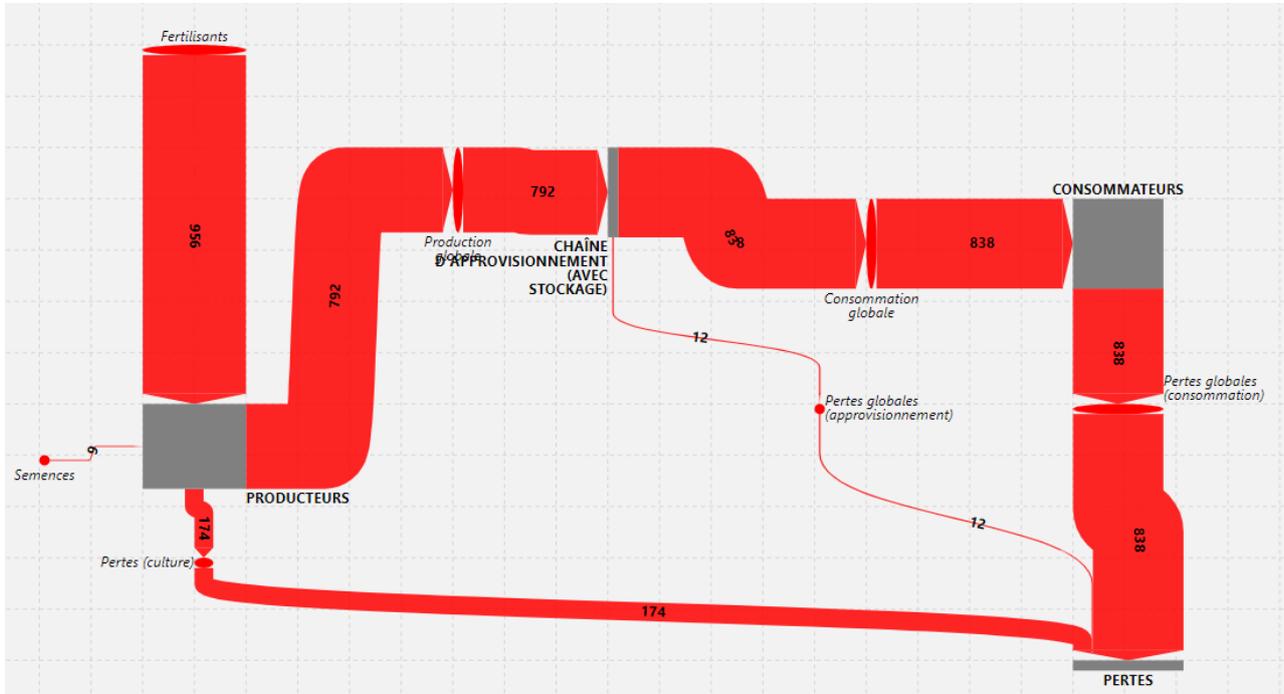


Annexe 4 : Liste hiérarchisée des catégories d'animaux pour lesquelles les déjections ont été différenciées

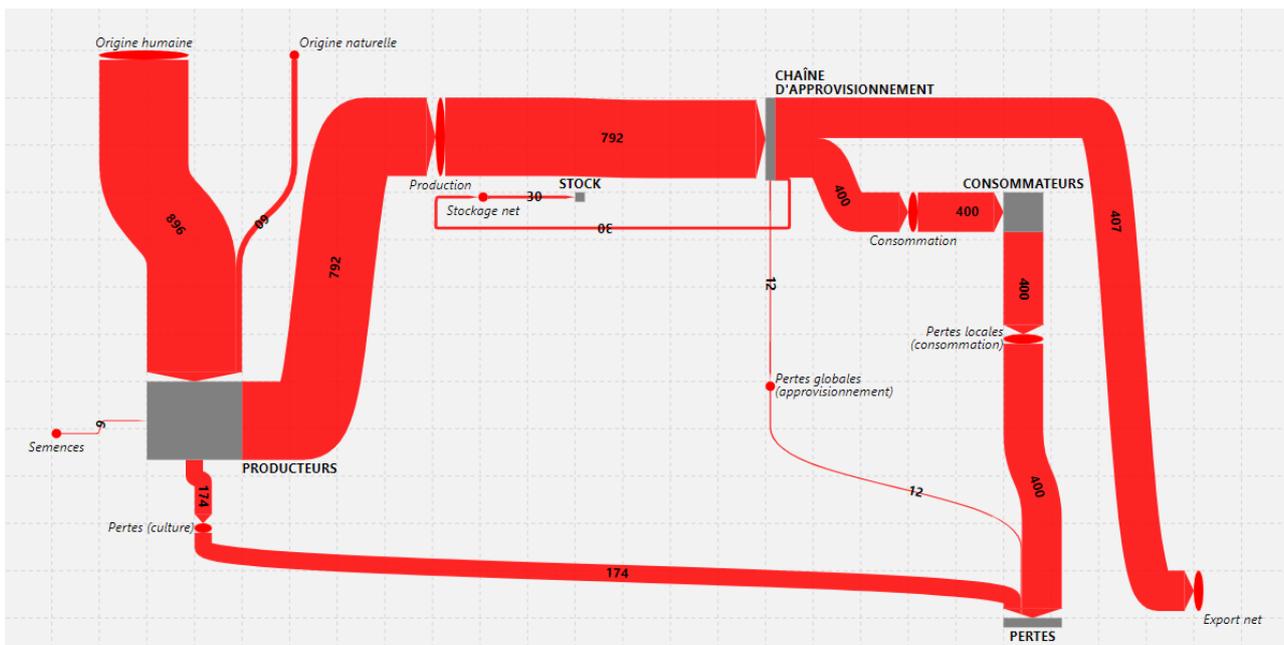
Catégories d'animaux
Bétail
Gros bétail
<i>Bovins</i>
<i>Vaches</i>
<i>Vaches laitières</i>
<i>Vaches nourrices</i>
<i>Bovins de plus de 2 ans</i>
<i>Génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans</i>
<i>Génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans</i>
<i>Génisses de boucherie de plus de 2 ans</i>
<i>Mâles de type laitier de plus de 2 ans</i>
<i>Mâles de type viande de plus de 2 ans</i>
<i>Bovins de 1 à 2 ans</i>
<i>Génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans</i>
<i>Génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans</i>
<i>Génisses de boucherie de 1 à 2 ans</i>
<i>Mâles de type laitier de 1 à 2 ans</i>
<i>Mâles de type viande de 1 à 2 ans</i>
<i>Bovins de moins de 1 an</i>
<i>Veaux de boucherie</i>
<i>Autres femelles de moins de 1 an</i>
<i>Autres mâles de moins de 1 an</i>
<i>Equidés</i>
<i>Chevaux</i>
<i>Chevaux de selle, sport, loisirs et course</i>
<i>Chevaux lourds</i>
<i>Anes, mulets et bardots</i>
<i>Anes, mulets, bardots</i>
Petit bétail
<i>Ovins</i>
<i>Agnelles</i>
<i>Brebis-mères (y compris réforme, hors brebis-mères laitières)</i>
<i>Brebis-mères laitières</i>
<i>Autres ovins (y compris béliers)</i>
<i>Caprins</i>
<i>Chevrettes</i>
<i>Chèvres (femelles ayant mis bas)</i>
<i>Autres caprins (y compris boucs)</i>
<i>Porcins</i>
<i>Porcelets</i>

<i>Jeunes porcs de 20 à 50 kg</i>
<i>Truies de 50 kg et plus</i>
<i>Verrats de 50 kg et plus</i>
<i>Porcs à l'engrais de 50 kg et plus</i>
<i>Volailles et lapins</i>
<i>Volailles</i>
<i>Ensemble gallus</i>
<i>Poules pondeuses d'œufs à couvrir</i>
<i>Poules pondeuses d'œufs de consommation</i>
<i>Poulettes</i>
<i>Poulets de chair (y compris coqs et coquelets)</i>
<i>Canards</i>
<i>Canards à gaver</i>
<i>Canards à rôtir</i>
<i>Autres volailles</i>
<i>Dindes et dindons</i>
<i>Oies</i>
<i>Pintades</i>
<i>Cailles d'élevage</i>
<i>Lapins</i>
<i>Lapines reproductrices</i>

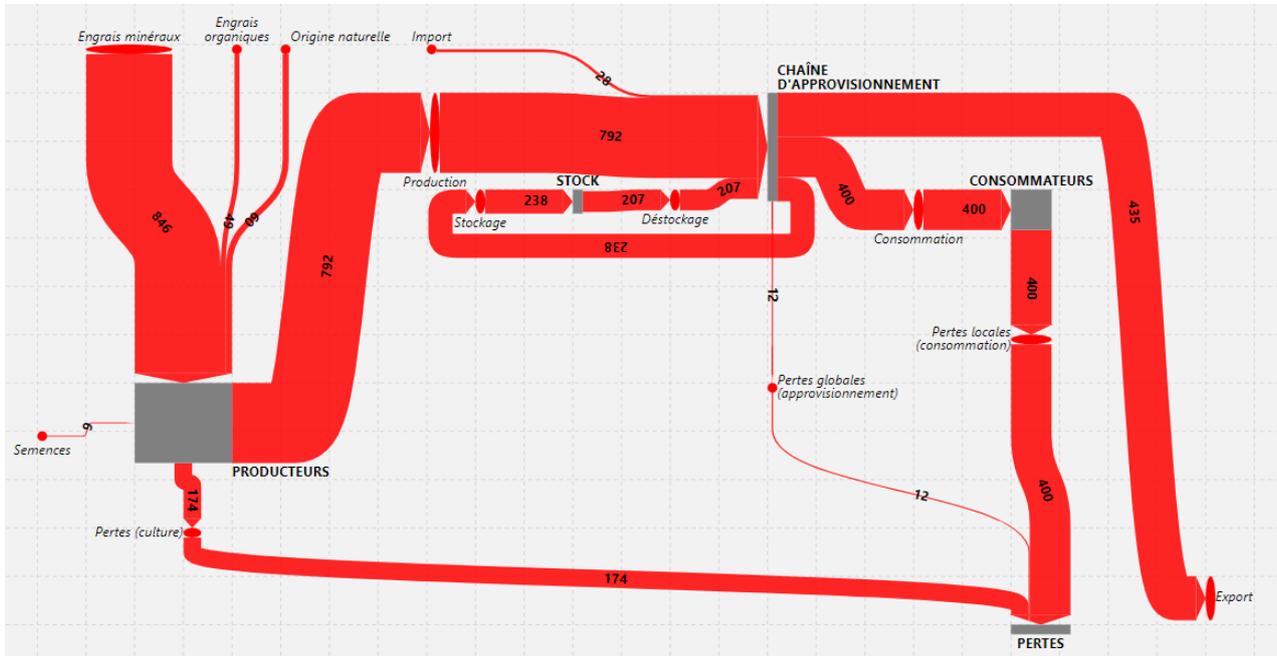
Annexe 5 : Diagramme de Sankey au niveau 1 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015



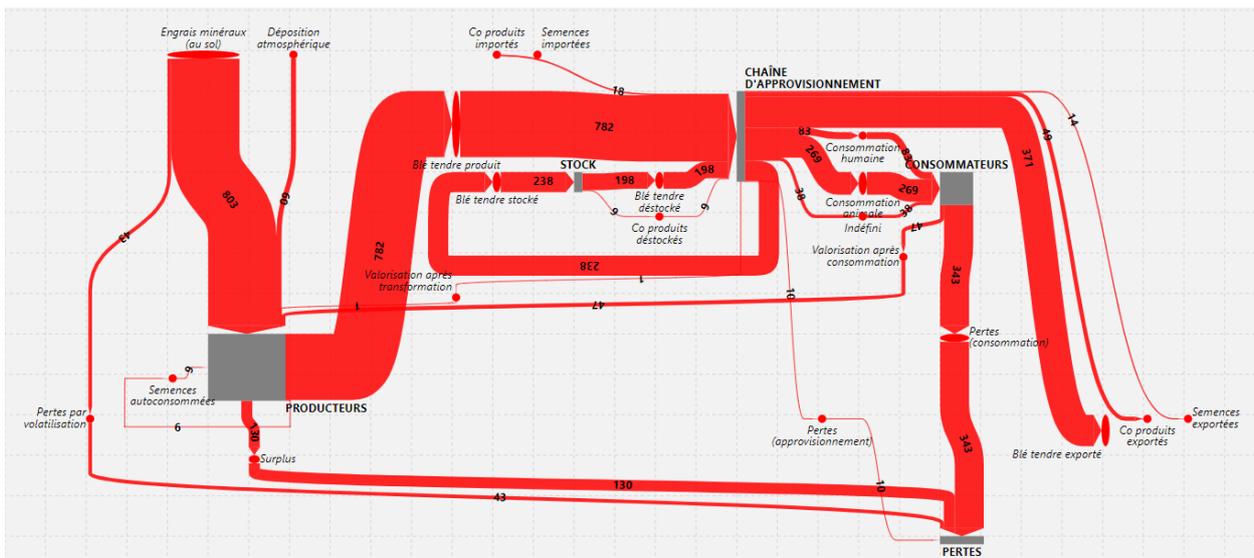
Annexe 6 : Diagramme de Sankey au niveau 2 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015



Annexe 7 : Diagramme de Sankey au niveau 3 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015



Annexe 8 : Diagramme de Sankey au niveau 4 des flux d'azote pour la filière Blé tendre en France et en 2015



Résumé

Ce stage s'inclut dans le projet de recherche financé par l'ADEME intitulé SCALABLE. Ce projet s'appuie sur les deux constats suivants : d'une part, les systèmes agro-alimentaires qui produisent et transforment les biomasses d'origines agricoles (viande, céréales, produits laitiers, légumes, ...) sont de plus en plus globalisés et d'autre part, ces mêmes systèmes sont exposés à des perturbations et stress croissants (économiques, géopolitiques, sanitaires, climatiques). Il apparaît donc nécessaire d'être en mesure d'évaluer les vulnérabilités des territoires en termes de dépendance à d'autres territoires, d'empreinte écologique ou encore de concurrences d'usage pour toutes les filières de biomasses d'origine agricole.

Dans ce cadre, ce stage a pour objectif d'évaluer les empreintes énergie (indissociable de toute activité humaine) et azote (nutriment indispensable aux végétaux et animaux) des filières agricoles. Ce rapport présente la méthodologie utilisée pour réaliser les analyses de flux d'énergie et d'azote et les représentations graphiques qui ont été construites pour visualiser les résultats. Ces représentations graphiques, sous forme de diagrammes de Sankey, serviront d'outil d'aide à la décision pour les acteurs des territoires et des filières concernés.

Abstract

This internship is part of the research project funded by ADEME entitled SCALABLE. This project is based on the following two observations: on the one hand, the agri-food systems that produce and transform biomass of agricultural origin (meat, cereals, dairy products, vegetables, etc.) are increasingly globalized and on the other hand, these same systems are exposed to growing disturbances and stresses (economic, geopolitical, health, climatic). It therefore appears necessary to be able to assess the vulnerabilities of territories in terms of dependence on other territories, ecological footprint or competition in use for all biomass sectors of agricultural origin.

In this context, this internship aims to assess the energy (inseparable from any human activity) and nitrogen (essential nutrient for plants and animals) footprints of agricultural sectors. This report presents the methodology used to perform the energy and nitrogen flux analyzes and the graphical representations that were built to visualize the results. These graphical representations, in Sankey diagrams' form, will serve as a decision-making tool for the actors of the concerned territories and sectors.