

ÉCOLE NATIONALE DES
PONTS
ET **CHAUSSÉES**



IP PARIS

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

2024-2025

PROJET DE FIN D'ÉTUDES
Département Ville, Environnement, Transport

Clara ROCH
Élève ingénieure

Master Économie de l'Environnement, de l'Énergie et des Transports
Parcours Modélisation Prospective

Impact des droits de douane sur les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole

Projet réalisé au sein de l'unité Paris-Saclay Applied Economics de l'INRAE
22, place de l'Agronomie
91120 Palaiseau
du 1^{er} mars au 31 août 2025.

Tuteur organisme : Christophe GOUEL
Tuteur École : Franck LECOCQ

Résumé

L'agriculture, responsable d'environ un quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), est influencée par les politiques commerciales, qui modifient les échanges, la spécialisation et la localisation des activités. Les droits de douane, en protégeant certaines filières ou en limitant les importations, ont des effets indirects et parfois contre-intuitifs sur les émissions, en altérant les équilibres de marché et les choix de production et de consommation. Ce mémoire présente un modèle de commerce agricole en équilibre partiel, prenant en compte les consommations intermédiaires, l'usage d'intrants intensifs, mais pas la variation des surfaces agricoles totales. Les données utilisées proviennent du projet FABIO pour les flux de production et de commerce, FAOSTAT pour les prix, MAcMap pour les droits de douane, et GTAP pour les émissions et l'usage d'intrants. Le modèle est calibré sur l'année 2017 et couvre 14 régions et 30 biens agricoles, permettant une représentation fine des interactions entre les différents acteurs et produits. La simulation d'un monde sans droits de douane agricoles montrent une augmentation d'environ 6,1 % des émissions totales de GES, du secteur. Cette hausse s'explique principalement par une baisse des coûts de l'alimentation animale et des produits d'élevage, stimulant leur consommation et leur production, qui sont parmi les plus émetteurs. Une analyse désagrégée révèle des effets contrastés selon les régions et les produits : les pays importateurs nets de viande voient leurs émissions locales diminuer, tandis que les pays exportateurs connaissent une hausse de leurs émissions, reflétant une spécialisation accrue dans la production animale. La suppression des droits de douane sur des produits végétaux comme le riz conduit à des résultats plus nuancés, avec des réductions marginales des émissions dans certains cas, notamment lorsque ces produits se substituent à des aliments plus émetteurs dans l'alimentation humaine ou animale. En conclusion, les droits de douane apparaissent comme un levier ambivalent pour la réduction des émissions agricoles, dont les effets dépendent étroitement des contextes régionaux et sectoriels. Leur suppression, bien que souvent présentée comme bénéfique pour l'efficacité économique, pourrait, sans mesures complémentaires, aggraver la pression climatique du secteur agricole.

Mots clés : commerce international, agriculture, changement climatique, droits de douane, modélisation en équilibre partiel

Abstract

Agriculture, responsible for about a quarter of global greenhouse gas (GHG) emissions, is influenced by trade policies, which alter exchange patterns, specialization, and the location of agricultural activities. Tariffs, by protecting certain sectors or limiting imports, have indirect and sometimes counterintuitive effects on emissions by disrupting market equilibria and shaping production and consumption choices. This thesis presents a partial equilibrium model of agricultural trade, accounting for intermediate consumption and the intensive use of inputs, but not changes in total agricultural land area. The data used come from the FABIO project for production and trade flows, FAOSTAT for prices, MACMap for tariffs, and GTAP for emissions and input use. The model is calibrated for the year 2017 and covers 14 regions and 30 agricultural products, enabling a detailed representation of interactions among actors and products. Simulating a world without agricultural tariffs shows a 6.1 % increase in total sectoral GHG emissions. This rise is mainly due to lower costs for animal feed and livestock products, which stimulates their consumption and production—both of which are among the highest emitters. A disaggregated analysis reveals contrasting effects across regions and products : net meat-importing countries see a decrease in local emissions, while exporting countries experience an increase, reflecting greater specialization in livestock production. The removal of tariffs on plant-based products like rice yields more nuanced results, with marginal emission reductions in some cases, particularly when these products replace higher-emission foods in human or animal diets. In conclusion, tariffs emerge as an ambivalent lever for reducing agricultural emissions, with effects that depend heavily on regional and sectoral contexts. Their elimination, while often touted as economically beneficial, could—without complementary measures—exacerbate the climate impact of the agricultural sector.

Keywords : international trade, agriculture, climate change, tariffs, partial equilibrium modelisation

Table des matières

1	Introduction	1
2	Modèle réduit	3
3	Modèle	5
3.1	Setups	5
3.2	Modèle en niveau	6
3.2.1	Consommation	6
3.2.2	Commerce	6
3.2.3	Production	7
3.2.4	Équilibres de marché	10
3.3	Modèle en changement relatif	10
3.4	Limites du modèle	12
4	Implémentation	14
4.1	Données et traitements	14
4.1.1	Quantités - FABIO	14
4.1.2	Prix - FAOSTAT	15
4.1.3	Droits de douane - MAcMap	17
4.1.4	Usage d'énergie et usage d'intrants - GTAP	17
4.1.5	Émissions de GES - FAOSTAT	18
4.1.6	Dépense nationale brute - Banque mondiale	19
4.2	Paramètres de comportement	19
5	Résultats	21
5.1	Conséquence de la suppression des droits de douane	21
5.1.1	Suppression des droits de douane d'une région pour un bien	21
5.1.2	Suppression de droits de douane dans tous les pays sur un seul ou groupe de biens	22
5.1.3	Suppression de tous les droits de douane	25
5.2	Sensibilité du modèle aux paramètres	26
6	Conclusion	27
A	Annexes	31
A.1	Ouverture - effet d'une subvention sur les émissions des GES	31
A.2	Détails calculs - intuitions droits de douane	32
A.3	Variables	33
A.4	Répartition pays par régions	33
A.5	Liste des biens et procédés	35
A.6	Analyses des différents contrefactuels	38
A.6.1	Vues d'ensemble des échanges avant contrefactuels	38
A.6.2	Vues d'ensemble des consommations avant contrefactuels	38

Liste des tableaux

4.1	Biens et part dans la production totale en valeur	15
4.2	Allocation des émissions	18
4.3	Origine des paramètres	19
5.1	Conséquence de la suppression des droits de douane liés à chaque bien (transposée et ordonnée).	23
5.2	Influence de la modification des paramètres sur les émissions finales des différents scenarii.	26
A.1	Récapitulatif des notations utilisées dans le modèle	33
A.2	Répartition des pays par région	35
A.3	Répartition des aliments par biens	36
A.4	Usage et origine des biens	37

Table des figures

4.1	Diagramme de Sankey des échanges entre régions	16
4.2	Carte de chaleur des droits de douane	17
4.3	Carte de chaleur des émissions de GES des différentes productions	19
A.1	Diagrammes de Sankey des échanges entre régions	38
A.2	Répartition en valeur des consommations de biens non-animaux à destination de l'alimentation humaine (grand sous-rectangle), des processus agro-industriels (transfo) et métabolique (p_LAN)	39

1. Introduction

Ce mémoire n'est pas fini, il y a donc encore tout plein des fautes de Français :-)

L'alimentation et l'agriculture, malgré leur poids économique relativement modeste, représentent environ un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) CRIPPA et al. 2021, une problématique complexe où le commerce international joue un rôle central en générant des risques significatifs de fuites de carbone. La décarbonation de ce secteur se heurte à de multiples défis, notamment en raison de la diversité des sources d'émissions et des enjeux de sécurité alimentaire mondiale, nécessitant une approche multidimensionnelle combinant des changements dans les pratiques agricoles, des innovations technologiques et une évolution de la structure de la demande alimentaire. Dans ce contexte, les politiques agricoles actuelles, qu'elles soient tarifaires ou de soutien, exercent une influence cruciale, mais ambiguë : les droits de douane, par exemple, modifient les flux commerciaux et la spécialisation productive des pays, affectant ainsi la localisation et l'intensité des émissions de GES liées à l'agriculture, tandis que les subventions, qui représentent près de 70 % des revenus agricoles en France, ne sont pas véritablement alignées sur les objectifs climatiques. La mise en œuvre de mesures efficaces pour réduire les émissions se trouve complexifiée par des obstacles tant techniques que politiques, notamment en raison de l'économie politique du secteur qui entrave la réorientation des politiques de soutien vers des objectifs d'atténuation des émissions, rendant nécessaire une analyse approfondie pour comprendre l'impact réel de ces politiques sur les émissions globales.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les effets des droits de douane existants sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le secteur agricole. Pour ce faire, nous nous intéresserons à un modèle de commerce de denrées agricoles. Ce modèle est un modèle d'équilibre partiel, inspiré de celui présenté dans GOUEL et LABORDE 2021, et tirant parti des données issues de la base FABIO de BRUCKNER et al. 2019, ainsi que des données FAOSTAT, GTAP et MAcMap. Le modèle représente les biens agricoles issus des cultures, de l'élevage et des processus de transformation agro-industrielle, ainsi qu'un bien non-agricole. Ces trois types de biens agricoles sont régis par des équations de production différentes : les cultures suivent une fonction de rendement isoélastique et leur répartition sur l'espace agricole disponible est déterminée par une fonction d'entropie multilogit, tandis que les deux autres secteurs sont produits à partir des cultures via des fonctions de production de type Léontief. La demande dans ce modèle suit une fonction à élasticité de substitution constante (CES) qui dépend notamment du pays d'origine. Le commerce n'est soumis à aucun coût de transport supplémentaire ("iceberg"), mais à des droits de douane. Nous ne tenons pas compte des effets liés au changement d'usage des sols, malgré leur impact important sur les émissions de GES ; ainsi, la quantité de terres cultivées est absorbée par les prairies servant au pâturage des animaux.

Ce modèle permet d'évaluer les effets des droits de douane sur les émissions de GES dans le secteur agricole. La littérature existante propose diverses approches pour analyser ces impacts, que ce soit via des politiques tarifaires ou des mesures de soutien publiques. Par exemple, LABORDE et al. 2020 étudie l'impact des programmes de soutien, en se concentrant sur des dispositifs tels que les subventions à la production, les distorsions de prix aux frontières et les investissements technologiques visant à réduire les émissions de GES dans le secteur agricole. Dans une approche d'équilibre général, l'article de SHIN, GRANT et LEGRAND 2025 examine l'influence des régimes tarifaires en s'appuyant sur des équations de gravité régies par des fonctions CES d'Armington, similaires à celles utilisées dans notre modèle, mais

sans intégrer les usages de la terre ni les processus de transformation agricole. D'autres études se penchent sur le lien entre politiques tarifaires et émissions de GES dans des contextes différents. Ainsi, CARY 2020 évalue l'impact des politiques tarifaires — et pas uniquement dans le secteur agricole — sur les émissions aux États-Unis, concluant que les droits de douane tendent à réduire ces émissions. Enfin, ELOBEID et al. 2021 s'intéresse spécifiquement aux droits de douane imposés par la Chine sur le porc, le soja, le maïs et le blé américains. En couplant le modèle d'équilibre partiel de production agricole CARD avec le modèle entrées-sorties IMPLAN et en intégrant les effets des changements d'affectation des terres à l'échelle mondiale, cette étude conclut à une réduction potentielle des émissions de GES pouvant atteindre jusqu'à 83,7 Mt de CO₂ eq. Par ailleurs, HIMICS et al. 2018 montre que la libéralisation des échanges agricoles dans l'UE entraîne des effets négatifs sur les émissions en raison de fuites de carbone.

La littérature existante comprend également plusieurs modèles d'équilibre liant agriculture et commerce. Notre modèle s'inspire principalement de GOUEL et LABORDE 2021, qui quantifie le rôle du commerce dans l'adaptation aux changements d'avantages comparatifs induits par le changement climatique, à l'aide d'un modèle commercial d'équilibre général quantitatif. GOUEL, FÉMÉNIA et al. 2025 présente trois méthodes équivalentes pour modéliser l'allocation des surfaces agricoles : les CET, les distributions de Fréchet des rendements, et les fonctions logit multinomial permettant de régulariser l'entropie de la gestion des terres. D'autres études proposent des approches complémentaires : FARROKHI et H. S. PELLEGRINA 2023 examine les effets de l'adoption de technologies modernes dans l'agriculture et leur interaction avec le commerce, en analysant comment la réduction des barrières commerciales influence leur adoption et impacte la productivité agricole. Cette étude, basée sur un modèle d'équilibre général inspiré de COSTINOT, DONALDSON et SMITH 2016 et SOTELO 2020, détermine l'allocation des cultures en fonction des prix de marché. Enfin, le modèle d'équilibre général quantitatif de CORRÊA-DIAS, NORRIS et H. PELLEGRINA 2025 évalue les implications environnementales des changements de comportement des consommateurs vers des produits plus intensifs en émissions de GES, ainsi que l'adoption de technologies de production plus émettrices.

Pour réaliser cette étude, nous considérons les surfaces agricoles comme constantes. Autrement dit, nous ne prenons pas en compte les forêts ni la possibilité qu'elles changent de taille, et nous n'évaluons donc pas l'impact que l'agriculture peut avoir sur les couverts forestiers, ainsi que sur les émissions de GES liées à leur évolution.

Le reste du mémoire est organisé comme suit. Le chapitre 2 propose un modèle simple à deux pays et un produit, afin de comprendre comment les droits de douane affectent, par le biais des équilibres de marché, les émissions de GES. Ensuite, le chapitre 3 présente, quant à lui, le modèle d'équilibre partiel utilisé pour mener notre étude. Ce modèle s'appuie sur celui présenté dans GOUEL et LABORDE 2021 et GOUEL 2025, en substituant les fonctions de distribution de Fréchet par une fonction de gestion multilogit qui traduit l'augmentation des coûts associés à une spécialisation des cultures excessive ou insuffisante, et en recourant à une fonction isoélastique pour les rendements, conformément à CARPENTIER et LETORT 2013 et à l'équivalence avec une fonction de Fréchet introduite dans GOUEL, FÉMÉNIA et al. 2025. Le chapitre 4 décrit les données utilisées ainsi que leur traitement pour les intégrer au modèle. Enfin, le chapitre 5 présente les résultats, accompagnés d'une analyse rapide de la sensibilité du modèle aux choix des paramètres, et en déduit les conclusions sur l'impact des politiques agricoles sur les émissions de GES au travers du commerce en agriculture.

2. Modèle réduit

Cette section présente des premières intuitions sur comment les émissions de gaz à effet de serre (GES) réagissent à la mise en place de deux politiques agricole : les droits de douane et les subventions à la production.

Pour se faire considérons un marché à deux pays, avec un pays importateur H et un pays exportateur F .

Nous désignons les fonctions d'offre et de demande pour les deux pays, avec le pays $i \in \{H, F\}$, comme suit :

$$S_i = S_i^0 \left(1 + \eta_i \frac{P_i - P_i^0}{P_i^0} \right), \quad D_i = D_i^0 \left(1 + \varepsilon_i \frac{P_i - P_i^0}{P_i^0} \right), \quad (2.1)$$

où S_i et D_i représentent respectivement les quantités produites et demandées par le pays i , P_i est le prix dans le pays i , et η_i ainsi que ε_i sont les élasticités de l'offre et de la demande dans le pays i . Ici, X^0 désigne la valeur initiale de X .

Étant donné que les pays constituent l'entièreté de l'économie, la différence entre la demande et la production dans un pays est égale à l'opposée de celle de l'autre pays, ainsi :

$$D_H - S_H = S_F - D_F. \quad (2.2)$$

Pour simplifier la suite des calculs, nous introduisons les élasticités agrégées suivantes :

— élasticité de demande totale

$$\varepsilon = \frac{\partial D}{\partial P_F} \frac{P_F^0}{D^0} = \left(\varepsilon_H \frac{D_H^0}{P_H^0} + \varepsilon_F \frac{D_F^0}{P_F^0} \right) \frac{P_F^0}{D^0} < 0, \quad (2.3)$$

— élasticité d'offre totale

$$\eta = \frac{\partial S}{\partial P_F} \frac{P_F^0}{S^0} = \left(\eta_H \frac{S_H^0}{P_H^0} + \eta_F \frac{S_F^0}{P_F^0} \right) \frac{P_F^0}{S^0} > 0, \quad (2.4)$$

— élasticité de la demande d'importation domestique

$$\mu_H = \frac{\partial(D_H - S_H)}{\partial P_H} \frac{P_H^0}{M_H^0} = \frac{\varepsilon_H D_H^0 - \eta_H S_H^0}{M_H^0} < 0, \quad (2.5)$$

— élasticité de l'offre d'exportation

$$\chi_F = \frac{\partial(S_F - D_F)}{\partial P_F} \frac{P_F^0}{X_F^0} = \frac{\eta_F S_F^0 - \varepsilon_F D_F^0}{X_F^0} > 0. \quad (2.6)$$

On examine les effets d'une modification des droits de douane sur les émissions totales au travers de leur impact sur les prix internationaux (prix du pays F) et sur la production totale.

Considérons que le pays H ait un droit de douane à l'importation t . Cela implique les relations suivantes :

$$P_H = P_F + t. \quad (2.7)$$

Sous la politique douanière, les prix dans le pays exportateur deviennent

$$\frac{P_F}{P_F^0} = -\frac{\mu_H(1 - t/P_H^0) - \chi_F}{\eta - \varepsilon} \frac{X_F^0}{D^0}, \quad (2.8)$$

et varient négativement selon t :

$$\frac{\partial P_F}{\partial t} = \frac{\mu_H}{\eta - \varepsilon} \frac{X_F^0}{D^0} \frac{P_F^0}{P_H^0} < 0. \quad (2.9)$$

La production totale des deux pays est donnée par

$$Q = S_H^0 + S_F^0 + \frac{(P_H^0 - P_F^0 - t)(S_H^0 \eta_H \chi_F + S_F^0 \eta_F \mu_H)}{P_F^0 \mu_H - P_H^0 \chi_F}, \quad (2.10)$$

et varie selon

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{S_H^0 \eta_H \chi_F + S_F^0 \eta_F \mu_H}{P_F^0 \mu_H - P_H^0 \chi_F}. \quad (2.11)$$

Le signe de ce changement est déterminé par $S_H^0 \eta_H \chi_F + S_F^0 \eta_F \mu_H$. Il n'y a donc pas d'effet clair des droits de douane sur la production totale : un premier effet (direct) augmente la production dans le pays H , tandis qu'un second (indirect) réduit la production totale par la baisse des prix extérieurs.

Concernant les émissions totales E , si on considère que les émissions évoluent linéairement avec la production, on obtient :

$$E = E^0 + \frac{(P_H^0 - P_F^0 - t)(E_H^0 \eta_H \chi_F + E_F^0 \eta_F \mu_H)}{P_F^0 \mu_H - P_H^0 \chi_F}, \quad (2.12)$$

et donc

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{E_H^0 \eta_H \chi_F + E_F^0 \eta_F \mu_H}{P_H^0 \chi_F - P_F^0 \mu_H}. \quad (2.13)$$

Ici, le signe est le même que celui de $E_H^0 \eta_H \chi_F + E_F^0 \eta_F \mu_H$. Autrement dit, l'effet de l'augmentation des droits de douane sur les émissions totales est ambigu. On peut néanmoins dire que :

- des émissions nationales plus importantes E_H^0 augmentent la probabilité que l'augmentation des droits de douane augmente les émissions globales ;
- si l'élasticité d'offre du pays exportateur η_F est grande devant celle du pays importateur η_H , les émissions augmentent d'autant plus ;
- de même, en valeur absolue, si l'élasticité d'importation domestique μ_H est grand devant l'élasticité de l'offre à l'exportation χ_F .

Voir annexe A.2 pour le détail des calculs.

3. Modèle

Comme nous avons pu le voir dans la section précédente, pour connaître l'influence des droits de douane sur les émissions agricoles, nous avons besoin de capturer les élasticités d'offre, de demande, d'importation et d'exportation, ainsi que les intensités émissives, et cela, pour chaque région et biens. Il nous faut donc construire un modèle, qui nous permette d'inclure la variation des émissions entre la situation initiale et les contractuelles, ainsi que l'état des échanges. De plus, comme ne le montre pas le modèle réduit, le secteur agricole implique de nombreuses consommations intermédiaires, nous avons donc besoin de les représenter, si nous voulons correctement capturer les échanges du secteur et leurs émissions.

Cette section présente le modèle de commerce agricole en équilibre partiel utilisé pour analyser l'impact des politiques sur les émissions de GES. Nous considérons un modèle d'équilibre partiel du secteur agricole s'inspirant de celui de GOUEL et LABORDE 2021, en l'adaptant pour mieux prendre en compte les émissions de GES du secteur. D'abord, l'usage des sols n'est plus représenté par des fonctions de rendement de Fréchet, mais par des fonctions multilogit, comme présenté dans GOUEL, FÉMÉNIA et al. 2025. L'approche de Fréchet suppose une qualité des terrains hétérogène, entraînant des rendements suivant une distribution de Fréchet par rapport aux taux de spécialisation, l'approche multilogit considère les terrains comme homogènes, et une fonction de gestion — dans laquelle les coûts varient en fonction des différents niveaux de spécialisation — permet d'assurer la diversification des cultures. Ensuite, nous incluons les fertilisants, et donc les émissions associées. Et enfin, nous prenons en compte les transformations agro-industrielles et métaboliques, afin de pouvoir considérer non pas que les cultures, mais aussi les produits transformés et les produits d'élevages, qui constituent une part non négligeable du panier de consommation finale, et donc des émissions du secteur.

3.1 Setups

Les pays sont indexés par i et $j \in \mathcal{J}$, les biens par $k \in \mathcal{K}$, avec $k = 0$ le bien non-agricole jouant le rôle de numéraire, $k \in \mathcal{K}^l$ les produits de l'élevage, $k \in \mathcal{K}^c$ les cultures ($\mathcal{K}^c \subset \mathcal{K}$), et $k \in \mathcal{K}^{nc}$ les produits agricoles non issus de la culture, c'est-à-dire les produits résultants d'un processus agro-industriel ($\mathcal{K}^{nc} \subset \mathcal{K}$). On note $\mathcal{K}^a = \mathcal{K}^c \cup \mathcal{K}^{nc} \cup \mathcal{K}^l$ l'ensemble des biens agricoles, parmi ces derniers seuls l'herbe et les fourrages ne peuvent être exportés, ce bien composite n'est utilisé que pour l'alimentation locale animale. On définit les activités a , comme les processus permettant la création de bien, la première activité est donc celle de la culture — et permet la production à partir de travail, de terre et de fertilisants, de biens non-transformés — ensuite il y a les processus de production de bien secondaire issue directement d'une chaîne de valeur issue du végétal, et enfin nous considérons l'alimentation animale qui permet la production de produits d'origine animale.

Pour plus de clarté, les prix de production sont notés en minuscule, tandis que les prix de consommation le sont en majuscule. L'annexe A.3, référence tous les noms des variables et paramètres utilisés dans cette étude.

3.2 Modèle en niveau

3.2.1 Consommation

On considère que l'utilité des ménages dans le pays j U_j , suit une relation quasi-linéaire avec la consommation de bien non-agricole C_j^0

$$U_j = C_j^0 + \beta_j^{1/\varepsilon} \ln C_j, \quad (3.1)$$

avec $\varepsilon > 0$ l'opposé de l'élasticité de prix de demande pour le panier de biens agricoles, $\beta_j > 0$ est un paramètre caractérisant la demande pour les biens agricoles.

On y considère une demande pour les biens agricoles non-élastique aux revenus¹.

On note la consommation de l'ensemble du panier de biens agricoles dans le pays j , C_j , qui s'exprime comme une CES des différents biens agricoles,

$$C_j = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^a} (\beta_j^k)^{1/\kappa} (C_j^k)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]^{\kappa/(\kappa-1)}, \quad (3.2)$$

avec $\kappa > 0$ l'élasticité de substitution entre biens agricoles, C_j^k représente la consommation pour le produit k , et β_j^k est un paramètre exogène de préférence pour le bien k dans le pays j .

Étant donné l'utilité des ménages de l'équation 3.1, la maximisation de la demande implique la relation suivante

$$C_j = \beta_j (P_j)^{-\varepsilon}, \quad (3.3)$$

avec P_j le prix du panier de biens agricoles dans le pays j , tel que

$$P_j = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^a} \beta_j^k (P_j^k)^{1-\kappa} \right]^{1/(1-\kappa)}, \quad (3.4)$$

où P_j^k représente le prix du bien k dans le pays j .

Les équations 3.2 et 3.4 permettent d'exprimer la demande pour le bien agricole k

$$C_j^k = \beta_j^k \left(\frac{P_j^k}{P_j} \right)^{-\kappa} C_j. \quad (3.5)$$

La demande pour le bien non-agricole découle de l'ensemble des dépenses E_j , ce qui donne

$$P_j^0 C_j^0 = E_j - P_j C_j. \quad (3.6)$$

3.2.2 Commerce

Pour les échanges entre pays, on considère une hypothèse de différenciation par pays d'origine à la Armington, avec l'élasticité associée $\sigma^k > 0$ et $\neq 1$. Seuls les échanges inter-pays sont considérés, les transports sont supposés sans frictions à l'intérieur même des pays. On note les coûts iceberg du transport du bien k du pays i vers le pays j τ_{ij}^k et T_{ij}^k la puissance du droit de douane. Le prix dans le pays j du

1. Cf. COMIN, LASHKARI et MESTIERI 2021. La quantité de nourriture consommée est plafonnée par des besoins physiologiques, mais elle peut aussi être réduite significativement si les revenus sont trop faibles pour se procurer suffisamment de nourriture. Cette hypothèse est donc quelque peu hasardeuse dans les pays à bas revenus, dans ces pays une baisse des revenus peut conduire à une baisse notable de la consommation alimentaire, alors que dans les pays à plus haut revenus, ils resteront majoritairement suffisants pour couvrir les besoins alimentaires

bien k produit dans le pays i est alors $T_{ij}^k \tau_{ij}^k p_i^k$, et le prix total du bien k dans le j est données par une CES des prix d'importations

$$P_j^k = \left[\sum_{i \in \mathcal{I}} \beta_{ij}^k (T_{ij}^k \tau_{ij}^k p_i^k)^{1-\sigma^k} \right]^{1/(1-\sigma^k)}. \quad (3.7)$$

La quantité totale importée de biens k dans le pays j , $\sum_i X_{ij}^k = X_j^k$ est égale à la somme des consommations finales C_j^k et intermédiaires x_j^k de k dans le pays (par soucis de simplicité, on considère les consommations nationales dans les imports, i.e. si le pays est en autarcie, $C_j + x_j = X_j = X_{jj}$, ce qui signifie que pour $k = \text{herbe}$, $\sum_i X_{ij}^k = X_{jj}^k = x_j^k$)

$$X_j^k = C_j^k + x_j^k. \quad (3.8)$$

La quantité de bien importé depuis chaque pays i est donnée par

$$X_{ij}^k = \beta_{ij}^k \left(\frac{T_{ij}^k \tau_{ij}^k p_i^k}{P_j^k} \right)^{-\sigma} X_j^k. \quad (3.9)$$

L'ensemble des dépenses du pays étant égales à l'ensemble des revenus

$$E_j = W_j N_j + r_j L_j + \sum_{i,k} (T_{ij}^k - 1) \tau_{ij}^k p_i^k X_{ij}^k, \quad (3.10)$$

avec W_j les salaires, N_j la quantité de travailleurs, r_j le loyer des terres agricoles, L_j la quantité totale de celles-ci. Étant donné que le modèle est à équilibre partiel, nous ne considérons pas la balance commerciale, le bien extérieur l'équilibre automatiquement.

3.2.3 Production

On considère séparément le bien non-agricole, les productions issues du sol, i.e. les cultures, de ceux issus de l'élevage ou de transformation, i.e. les produits animaliers et les produits transformés d'origine végétale. Seules les cultures utilisent de la terre, l'espace utilisé par l'élevage est compté au travers de l'alimentation des animaux.

Bien extérieur

Le bien extérieur n'utilise donc pas de terres, et n'utilisant pas de biens agricoles nous considérons qu'il est produit uniquement à partir de travail, et ce, avec toujours le même rendement, que nous notons A_i^0 , ce qui donne $Q_i^0 = A_i^0 N_i^0$, et donc que le salaire vaut $W_i = A_i^0 p_i^0$, étant donné que le bien extérieur est numéraire on écrit $W_i = A_i^0$.

Cultures

Nous considérons dans chaque pays un seul champ, de qualité homogène et de surface constante, avec des cultures différentes. Pour chaque culture, on représente les rendements Y_i^k par une fonction isoélastique qui dépend de la quantité d'intrants apportée

$$Y_i^k = y_i^k \left(\frac{F_i^k}{s_i^k L_i} \right)^{\zeta_i^k / (1+\zeta_i^k)}, \quad (3.11)$$

avec $\zeta_i^k > 0$ l'élasticité de rendement, et y_i^k un paramètre de niveau de rendements.

Parallèlement, pour représenter l'hétérogénéité des cultures et éviter une spécialisation totale, nous utilisons une fonction de coût de production multilogit f permettant de traduire les coûts provenant d'une

trop faible ou trop importante spécialisation (risque de perte d'une culture qui représente l'ensemble des revenus, travail de trop de terres concentré sur un moment trop court nécessitant un nombre élevé d'ouvriers agricoles et de machines, ou à l'inverse trop de cultures différentes avec leurs particularités et leur calendrier différent), en affectant le profit par hectare d'un coût de gestion en plus de celui des entrants F_i^k , par condition de zéro-profit ce profit par hectare est égal au loyer par hectare r_i^k

$$r_i^k = \sum_{k \in \mathcal{K}^c} [p_i^k Y_i^k - p_i^0 F_i^k / (s_i^k L_i)] s_i^k - W_i f(s_i^k), \quad (3.12)$$

avec $f(s_i^k) = \sum_{k \in \mathcal{K}^c} c_i^k s_i^k + a_i^{-1} \sum_{k \in \mathcal{K}} s_i^k \ln s_i^k$, où c_i^k est un paramètre qui permet de reproduire la répartition initiale des cultures s_i^k , et $a_i > 0$ est un paramètre de comportement qui régit l'élasticité des surfaces cultivées.

On obtient ensuite l'expression des s_i^k , en maximisant 3.12 sous condition de $\sum_{k \in \mathcal{K}^c} s_i^k = 1$

$$s_i^k = \frac{\exp(a_i \pi_i^k)}{\sum_{l \in \mathcal{K}^c} \exp(a_i \pi_i^l)}, \quad (3.13)$$

avec $\pi_i^k = [p_i^k Y_i^k - p_i^0 F_i^k / (s_i^k L_i) - W_i c_i^k] / W_i$.

En posant $\phi_i = \log \sum_{k \in \mathcal{K}^c} \exp(a_i \pi_i^k)$, on peut simplifier 3.13 en

$$s_i^k = \exp(a_i \pi_i^k - \phi_i). \quad (3.14)$$

On obtient la demande totale en intrant, en maximisant les profits, ce qui donne

$$F_i^k = s_i^k L_i \left(\frac{\varsigma_i^k}{1 + \varsigma_i^k} \right)^{1 + \varsigma_i^k} \left(\frac{p_i^k y_i^k}{p_i^0} \right)^{1 + \varsigma_i^k}, \quad (3.15)$$

et nous permet de réécrire l'expression du profit réel π_i^k , comme

$$\pi_i^k = \frac{(\varsigma_i^k)^{\varsigma_i^k}}{(p_i^0)^{\varsigma_i^k} W_i} \left(\frac{p_i^k y_i^k}{1 + \varsigma_i^k} \right)^{1 + \varsigma_i^k} - c_i^k. \quad (3.16)$$

Étant donné que a_i caractérise en partie l'élasticité des surfaces cultivées, et que l'on a ς_i^k l'élasticité de rendement, l'élasticité d'offre d'une culture est donnée par

$$\frac{\partial \ln Q_i^k}{\partial \ln p_i^k} = a_i \frac{p_i^k Y_i^k}{W_i} (1 - s_i^k) + \varsigma_i^k.$$

Parallèlement, on peut réécrire π_i^k comme étant égal à $(\ln s_i^k + \phi_i) / a_i$, ce qui donne en remplaçant dans la première expression de π_i^k , l'expression du paramètre c_i^k

$$c_i^k = (p_i^k Y_i^k - p_i^0 F_i^k / (s_i^k L_i)) / W_i - a_i^{-1} (\log s_i^k + \phi_i).$$

Produits transformés

Dans cette section, nous n'abordons que les biens issus exclusivement d'un processus métabolique ou agro-industriel². Plusieurs secteurs d'activité peuvent produire un même bien, ainsi la production totale d'un bien est la somme de ses productions dans chaque activité a

$$Q_i^k = \sum_{a|k \in \mathcal{O}(a)} Q_i^{ak}, \quad (3.17)$$

2. Exemple de processus : la fabrication d'huile nécessite en entrée des oléagineux, et conduit à la production d'huile et de tourteaux ; le processus métabolique de l'élevage consiste à donner à manger aux bestiaux et à récupérer en sortie des produits animaliers. Pour plus d'exemple l'annexe A.5 donne les différents processus que nous considérons, ainsi que les entrées et les sorties de ces derniers. Ainsi si on regroupe tous les tourteaux ensembles, on aboutit sur la production d'huile de palme et la production d'huile d'olive qui donnent toutes deux des tourteaux.

avec $\mathcal{O}(a)$ l'ensemble des biens produits par l'activité a . Naturellement un bien issu d'un processus animal ne peut être aussi issu d'un processus végétal. Pour simplifier les notations, nous posons $k \in \mathcal{I}(a)$ correspond à l'input et $l \in \mathcal{O}(a)$ aux outputs, ainsi que dans la section suivante $a = \text{livestock}$, et dans la suivante $a \in \text{veg-transfo}$.

Produits d'origine animale La production de produits issus de l'élevage est régie par une fonction Léontief, du travail nécessaire N_i^a , de son efficacité A_i^a et de la quantité de nourriture nécessaire pour l'alimentation des animaux x_i^{feed} et d'un paramètre d'assimilation par les organismes (i.e. le nombre d'unités de nourriture nécessaire pour produire une unité du bien k), μ_i^{feed}

$$Q_i^a = \min \left(\frac{x_i^{\text{feed}}}{\mu_i^{\text{feed}}}, \frac{N_i^a}{A_i^a} \right) = \max \left(\left\{ \frac{Q_i^{al}}{\nu_i^{al}} \right\}_{l \in \mathcal{O}(a)} \right), \quad (3.18)$$

où Q_i^a correspond au niveau d'activité du procédé, ν_i^{al} correspond au taux d'efficacité, x_i^{feed} est composé comme une CES des produits que les animaux peuvent manger, comme suit

$$x_i^{\text{feed}} = \left[\sum_{k \in \mathcal{O}(\text{feed})} (\beta_i^{k, \text{feed}})^{1/\kappa_{\text{feed}}} (x_i^k)^{(\kappa_{\text{feed}}-1)/\kappa_{\text{feed}}} \right]^{\kappa_{\text{feed}}/(\kappa_{\text{feed}}-1)}, \quad (3.19)$$

avec κ_{feed} l'élasticité de substitution entre aliments, et $\beta_i^{k, \text{feed}}$ un paramètre technique.

Ce qui donne, en minimisant les coûts

$$p_i^{\text{livestock}} = A_i^a W_i + \mu_i^{\text{feed}} P_i^{\text{feed}}, \quad (3.20)$$

$$x_i^{\text{feed}, k} : x_i^{\text{feed}, k} = \beta_i^{k, \text{feed}} \left(\frac{P_i^k}{P_i^{\text{feed}}} \right)^{-\kappa_{\text{feed}}} \mu_i^{\text{feed}} Q_i^a, \quad (3.21)$$

$$P_i^{\text{feed}} : \mu_i^{\text{feed}} Q_i^a = x_i^{\text{feed}} = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^c} (\beta_i^{k, \text{feed}})^{1/\kappa_{\text{feed}}} (x_i^{\text{feed}, k})^{(\kappa_{\text{feed}}-1)/\kappa_{\text{feed}}} \right]^{\kappa_{\text{feed}}/(\kappa_{\text{feed}}-1)}, \quad (3.22)$$

$$P_i^{\text{feed}} = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^c} \beta_i^{k, \text{feed}} (P_i^k)^{1-\kappa_{\text{feed}}} \right]^{1/(1-\kappa_{\text{feed}})}, \quad (3.23)$$

avec P_i^{feed} le prix associé au panier de nourriture x_i^{feed} .

Produits d'origine végétale Similairement aux produits issus de l'élevage, le processus de transformation pour obtenir ces produits d'origine végétale est modélisé par une fonction Léontief. Cependant, ici l'assimilation est parfaite, et les processus ne prennent qu'un seul produit en entrée, nous gardons donc l'équation 3.18, mais avec en remplaçant μ_i^{feed} par 1, et l'agrégat d'inputs x^{feed} par l'unique input x^{ak} , ce qui nous donne

$$x_i^{ak} = Q_i^a, \quad (3.24)$$

$$Q_i^{al} = \nu_i^{al} Q_i^a, \quad (3.25)$$

$$N_i^a = A_i^a Q_i^a, \quad (3.26)$$

et la condition de zéro-profit conduit à

$$W_i N_i^a + P_i^k x_i^{ak} = \sum_{l \in \mathcal{O}(a)} p_i^l Q_i^{al}, \quad (3.27)$$

ce qui donne

$$Q_i^a : A_i^a W_i + P_i^k = \sum_{l \in \mathcal{O}(a)} \nu_i^{al} p_i^l. \quad (3.28)$$

Par convention, chaque activité est associée à un output principal tandis que les autres outputs sont secondaires (e.g. dans le cas du traitement des oléagineux, il s'agit de l'huile.). Les autres outputs (dans l'exemple, les tourteaux) sont déterminées à partir des conditions du premier ordre. En indexant par \mathbf{l} l'output principal, le processus est caractérisé par le système d'équations suivant :

$$A_i^a W_i + P_i^k = \sum_{l \in \mathcal{O}(a)} \nu_i^{al} p_i^l, \quad (3.29)$$

$$Q_i^{al} = (\nu_i^{al} / \nu_i^{a1}) Q_i^{a1}, \text{ for } l \neq 1, \quad (3.30)$$

$$N_i^a = A_i^a Q_i^{a1} / \nu_i^{a1}, \quad (3.31)$$

$$x_i^{ak} = Q_i^{a1} / \nu_i^{a1}. \quad (3.32)$$

3.2.4 Équilibres de marché

Équilibre marché des biens

Production Côté production, les quantités produites doivent éгалer l'ensemble des exports (en considérant toujours que si le pays i est en autarcie $C_i^k = Q_i^k = X_{ii}^k = X_i^k$) :

$$Q_i^k = \sum_{j \in \mathcal{J}} \tau_{ij}^k X_{ij}^k, \text{ for } k \neq 0. \quad (3.33)$$

Pour le bien extérieur, on a

$$\sum_{i \in \mathcal{J}} Q_i^0 = \sum_{i \in \mathcal{J}} \left(C_i^0 + \sum_{k \in \mathcal{K}^c} F_i^k \right). \quad (3.34)$$

Consommation Côté consommation, l'ensemble des imports correspond à l'ensemble des consommations finales et intermédiaires

$$X_i^k = C_i^k + x_i^{\text{feed},k} + \sum_{a|k \in \mathcal{I}(a)} x_i^{ak}. \quad (3.35)$$

Équilibre marché du travail

La somme de besoin en travail ne doit pas excéder ce que le pays est capable de fournir, et par simplification, on considère que le taux d'emploi ne change pas, ce qui donne

$$N_i = \sum_a N_i^a. \quad (3.36)$$

3.3 Modèle en changement relatif

Nous adoptons le système d'équation précédent en changement relatif, en posant $\hat{x} = x'/x$, le changement relatif de la variable x entre son état à l'équilibre de référence x , et celui dans le scénario contractuel x' . Considérer les changements relatifs plutôt que les valeurs en niveau permet de se débarrasser de nombreux paramètres compliqués à paramétrer, ainsi nous n'avons pas besoin de calibrer des paramètres comme ceux de préférences β , car les préférences sont considérées identiques entre les situations de référence et contractuelles. L'implication directe d'une calibration en variation, est que si $x = 0$, alors $x' = 0$.

En posant $\alpha_j^{C,k} = (P_j^k C_j^k) / (P_j C_j)$, $\alpha_j^{\text{feed},k} = (P_j^k x_j^{\text{feed},k}) / (P_j^{\text{feed}} x_j^{\text{feed}})$ et $\alpha_{ij}^{\text{Trade},k} = (\tau_{ij}^k p_i^k X_{ij}^k) / (P_j^k X_j^k)$, et en transformant les équations 3.3-3.11, 3.14-3.17, 3.21-3.22, 3.24-3.26, 3.28-3.36, on obtient le système d'équation suivant.

Condition de zéro-profit

$$\hat{C}_j : \hat{P}_j = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^a} \alpha_j^{C,k} \left(\hat{P}_j^k \right)^{1-\kappa} \right]^{1/(1-\kappa)}, \quad (3.37)$$

$$\hat{Q}_i^0 : \hat{p}_i^0 = \hat{W}_i, \quad (3.38)$$

$$\hat{Q}_i^{al} : W_i \hat{W}_i N_i^a \hat{N}_i^a + P_i^k \hat{P}_i^k x_i^{ak} \hat{x}_i^{ak} = \sum_{l \in \mathcal{O}(a)} p_i^l \hat{p}_i^l Q_i^{al} \hat{Q}_i^{al}, \text{ pour } l \notin \{0, \mathcal{K}^c\} \quad (3.39)$$

$$\hat{Q}_i^k : \pi_i^k \iota = \left(\frac{y_i^k}{1 + \varsigma_i^k} \right)^{1+\varsigma_i^k} \varsigma_i^{k\varsigma_i^k} \frac{(p_i^k \iota)^{1+\varsigma_i^k}}{W_i (P_i^0)^{\varsigma_i^k}} - c_i^k, \text{ pour } k \in \mathcal{K}^c \quad (3.40)$$

$$\hat{X}_j^k : \hat{P}_j^k = \left[\sum_{i \in \mathcal{J}} \alpha_{ij}^{\text{Trade},k} \left(\hat{T}_{ij}^k \hat{P}_i^k \right)^{1-\sigma} \right]^{1/(1-\sigma)}, \quad (3.41)$$

$$\hat{x}_j^{\text{feed}} : \hat{P}_j^{\text{feed}} = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^c} \alpha_j^{\text{feed},k} \left(\hat{P}_j^k \right)^{1-\kappa_{\text{feed}}} \right]^{1/(1-\kappa_{\text{feed}})}. \quad (3.42)$$

Condition d'équilibre de marchés

$$\hat{P}_j : \hat{C}_j = \hat{P}_j^{-\varepsilon}, \quad (3.43)$$

$$\hat{p}_i^k : Q_i^k \hat{Q}_i^k = \sum_{j \in \mathcal{J}} \tau_{ij}^k X_{ij}^k \hat{X}_{ij}^k, \text{ for } k \neq 0, \quad (3.44)$$

$$** \hat{p}_i^0 : \sum_{i \in \mathcal{J}} \hat{Q}_i^0 Q_i^0 = \sum_{i \in \mathcal{J}} \left(\hat{C}_j^0 C_j^0 + \sum_{k \in \mathcal{K}^c} \hat{F}_i^k F_i^k \right), \quad (3.45)$$

$$\hat{P}_j^k : X_j^k (\hat{X}_j^k) = C_j^k \hat{C}_j^k + x_j^{\text{feed},k} \hat{x}_j^{\text{feed},k} + \sum_{a|k \in \mathcal{I}(a)} x_i^{ak} \hat{x}_i^{ak}, \quad (3.46)$$

$$\hat{P}_j^{\text{feed}} : \hat{x}_i^{\text{feed}} = \hat{Q}_i^{\text{livestock},1}, \quad (3.47)$$

$$** \hat{W}_i : N_i = \sum_a N_i^a \hat{N}_i^a. \quad (3.48)$$

Condition du premier ordre

$$** \hat{C}_j^0 : P_j^0 C_j^0 \hat{C}_j^0 = E_j \hat{E}_j - P_j C_j (\hat{P}_j)^{1-\varepsilon}, \quad (3.49)$$

$$\hat{C}_j^k : \hat{C}_j^k = (\hat{P}_j^k)^{-\kappa} (\hat{P}_j)^{\kappa-\varepsilon}, \quad (3.50)$$

$$\hat{Q}_i^{al} : \hat{Q}_i^{al} = \hat{Q}_i^{a1}, \text{ pour } l \neq 1, \quad (3.51)$$

$$\hat{N}_i^a : \hat{N}_i^a = \begin{cases} \hat{Q}_i^{a1}, & \text{si } a \notin \text{crops} \\ \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^c} s_i^k \iota (c_i^k + a_i^{-1} \ln s_i^k \iota) \right] L_i / N_i^{\text{crops}}, & \text{si } a \in \text{crops}, \end{cases} \quad (3.52)$$

$$\hat{x}_i^{ak} : \hat{x}_i^{ak} = \hat{Q}_i^{a1}, \text{ pour } k \neq \text{livestock}, \quad (3.53)$$

$$\hat{x}_j^{\text{feed},k} : \hat{x}_j^{\text{feed},k} = \left(\hat{P}_j^k / \hat{P}_j^{\text{feed}} \right)^{-\kappa_{\text{feed}}} \hat{x}_j^{\text{feed}}, \quad (3.54)$$

$$\hat{X}_{ij}^k : \hat{X}_{ij}^k = (\hat{T}_{ij}^k \hat{P}_i^k / \hat{P}_j^k)^{-\sigma} \hat{X}_{ij}^k \text{ (équation de gravité)}, \quad (3.55)$$

$$\hat{s}_i^k : \hat{s}_i^k s_i^k = \exp(a_i \pi_i^k \iota - \phi_i \iota), \quad (3.56)$$

$$\phi_i \iota : \phi_i \iota = \ln \sum_{k \in \mathcal{K}^c} \exp(a_i \pi_i^k \iota), \quad (3.57)$$

$$\hat{Y}_i^k : \hat{Y}_i^k = \left(\hat{F}_i^k / \hat{s}_i^k \right)^{\varsigma_i^k / (1+\varsigma_i^k)}, \quad (3.58)$$

$$\hat{F}_i^k : \hat{F}_i^k = \hat{Q}_i^k (\hat{s}_i^k)^{-1/(1+\varsigma_i^k)}, \quad (3.60)$$

$$\pi_i^k : \hat{Q}_i^k = \hat{s}_i^k (\hat{p}_i^k)^{\varsigma_i^k}, \text{ for } k \in \mathcal{K}^c. \quad (3.61)$$

Équation de compatibilité

$$** \hat{E}_j : E_j \hat{E}_j = W_j \hat{W}_j N_j + r_j \hat{r}_j L_j + \sum_{i,k} \left(T_{ij}^{k'} - 1 \right) \tau_{ij}^k p_i^k \hat{p}_i^k X_{ij}^k \hat{X}_{ij}^k, \quad (3.62)$$

$$** \hat{r}_i : r_i \hat{r}_i = W_i \sum_k s_i^k \left(\pi_i^k - a_i^{-1} \ln s_i^k \right), \quad (3.63)$$

$$\hat{Q}_i^k : Q_i^k \hat{Q}_i^k = \sum_{a|k \in \mathcal{O}(a)} Q_i^a \hat{Q}_i^a. \quad (3.64)$$

** En pratique, étant donné que l'on a posé le bien extérieur comme numéraire, le modèle est un modèle d'équilibre partiel, ce qui fait que nous fixons les équations déterminant C_j^0, E_j, W_i, r_i , on pose également $\hat{p}_i^0 = \hat{W}_i = 1$.

3.4 Limites du modèle

Changement d'usage des terres Nous avons posé dans ce modèle L_i , la surface totale de terre cultivable dans ce modèle, comme étant fixe, or dans les faits, les surfaces des terres agricoles varient, l'impact de l'utilisation des terres, leur changement et les forêts (LULUCF) représente 51 % des émissions du secteur agriculture-forêt et changement d'usage des sols (AFOLU), sur la période 1990-2019³. De plus, la méta-analyse de HUANG et al. 2023 montre que les émissions de GES ont une relation quadratique avec le changement d'usage des terres. Une amélioration possible du modèle, serait donc de permettre l'augmentation ou la diminution des terres, tout en prenant en compte la qualité moindre de ces terres jusqu'alors non utilisées et l'impossibilité d'utiliser certaines terres. Cette question est prise en compte dans les articles de FARROKHI et H. S. PELLEGRINA 2023 dans un modèle d'équilibre général dynamique de commerce, ou de COSTINOT, DONALDSON et SMITH 2016.

Rotation intra-annuelle des cultures Certaines cultures combinées à d'autres peuvent occuper une même surface dans une même année, par exemple il est possible de planter un couvert de plantes fourragères avant de cultiver du maïs, ou bien cultiver ensemble sur une même surface plusieurs plantes en même temps, le modèle ne permet pas de représenter l'usage d'une même terre au cours d'une même année par plusieurs cultures. Cependant, étant donné que le modèle est en variation, ce phénomène continuera d'exister, mais ne changera pas en pourcentage. Nous n'avons pas trouvé de modèle illustrant correctement ce phénomène d'intrication des cultures.

Élasticité différenciée entre les cultures Une autre limite du modèle en l'état est la substituabilité des produits agricoles entre eux, vis-à-vis de la consommation (κ et κ_{feed}), mais aussi de la production (ς_i^k). Actuellement, le modèle considère, par exemple que la substitution entre une aubergine et une tomate est la même pour les consommateurs que celles entre une tomate et un œuf. De même, quant à l'usage des terres, le modèle, ne prend pas en compte les qualités des terres qui sont plus à même de produire tel ou tel bien, dans la réalité, il faut un sol et un climat différent pour produire du blé ou du riz. Pour représenter ces substitutions différenciées entre les produits, il est possible d'utiliser des fonctions CES imbriquées, comme dans CORRÊA-DIAS, NORRIS et H. PELLEGRINA 2025 ou VALIN, HENDERSON et LANKOSKI 2023, mais également aussi de considérer plusieurs champs par pays, et non un seul comme ici, et d'associer à ces derniers des caractéristiques différentes conduisant à des rendements différents pour chaque culture ou élevage, comme dans GOUEL et LABORDE 2021, avec l'utilisation de la base de données du projet GAEZ (mené par IIASA et la FAO). Cependant, augmenter le niveau d'imbrication des CES, signifie également qu'il faut plus d'élasticités, qui ne sont pas nécessairement facile à estimer.

3. Cf. figure 7.3. *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change : Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 2023. La déforestation compte pour 17 % des émissions globales de GES, la majorité est due à l'agriculture.

Modélisation des produits animaliers En l'état actuel, nous considérons que tous les produits d'origine animale sont issus du même processus, il faudrait désagréger ce méta-processus par type d'animaux, et ainsi relier production de lait avec la viande rouge, mais pas avec le secteur des volailles ou des porcs. Nous aurions ainsi, un output commun à chacun de ces secteurs qui serait les abats, les peaux et autres.

Prise en compte des émissions liées aux déplacements des marchandises En l'état, avec le prix iceberg égal à l'unité, le modèle ne reflète pas les émissions de GES dues aux transports des marchandises. Avec un prix iceberg supérieur à l'unité et augmentant avec les distances à parcourir, le modèle pourrait indirectement prendre en compte les émissions dues aux déplacements, par les émissions associées à la quantité perdue dans le prix iceberg (i.e. $(1 - \pi_{ij}) \cdot X_{ij}$), cependant, elles sont ainsi proportionnelles aux valeurs et non aux volumes, le mieux serait d'ajouter une équation liant les potentiels émissifs des transports des différents biens, aux quantités déplacées et des distances parcourues^{4 5}. L'article de SHIN, GRANT et LEGRAND 2025 prend en compte les différentes intensités carbone des différents modes de transport de biens agricoles.

4. À noter que le transport maritime représentait en 2007 un dixième des prix des produits importés KORINEK et SOURDIN 2010, d'après OECD Maritime Transport Costs database

5. Les émissions liées au commerce international comptaient pour 9 % des émissions du secteur des transports — secteur émettant moins d'émissions de GES que le secteur agricole — sur la période 1990-2019 (*Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change : Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 2023), et pour encore un dixième en valeur — on peut donc s'attendre à une part plus importante en volumes, donc également pour les émissions en émissions — des échanges de biens (ROSAL 2023), on peut donc se dire que l'évolution des émissions liée à la variation du fret international agricole sont négligeables. Si on se dit qu'au maximum le fret international correspond à quelques pourcents des émissions du secteur.

4. Implémentation

4.1 Données et traitements

Le modèle est calibré sur des données de 2017, dernière année disponible dans les données GTAP. Comme souligné dans GOUEL et LABORDE 2021, il est important qu'un modèle recouvre le plus de biens agricoles possibles, afin que l'élasticité ε corresponde réellement à l'inverse de l'élasticité de la demande pour lesdits biens, qui est estimée dans des articles tels que COMIN, LASHKARI et MESTIERI 2021 et non pas seulement à une partie d'entre eux. Nous avons donc choisi de représenter l'ensemble (ou presque) des biens disponibles dans FABIO, en les agrégeant en trente-et-un groupes, qui représentent des éléments uniques ou bien des ensembles. Les biens uniques ont été choisis de telle sorte qu'ils représentent chacun plus d'un pour cent de la production mondiale totale¹, les autres étant regroupés par catégories. Quant aux pays, nous avons choisi de les rassembler en quatorze régions, correspondant au regroupement des pays par sous-continent, en évitant d'avoir une région « reste du monde », qui, bien qu'elle apparaisse dans les données FABIO², et dans GTAP³, n'a pas de sens géographique ou politique⁴.

4.1.1 Quantités - FABIO

Les données relatives aux quantités produites, consommées et échangées proviennent du modèle FABIO. Les données brutes⁵ étaient sous la forme d'une matrice de production x , d'une demande finale y et d'une matrice d'échanges z . Nous avons retiré certains secteurs qui ne nous intéressaient pas (alcools et éthanol) représentant 3,12 % de la production totale, la production de *Sweeteners*, *Other* représentant de 0,01 %, ainsi que la production d'huile et de tourteaux provenant de céréales représentant moins de 0,01 %. Pour éviter d'avoir une région *reste du monde* inconsistante, nous l'avons retirée (pour 0,01 %).

Nous avons ensuite converti ces valeurs en quantités avec les prix issus du traitement de la section 4.1.2. Afin d'éviter tout problème d'équilibre, dû à une incohérence des prix, nous avons réévalué, pays par pays, les prix des outputs de certains processus à la hausse pour permettre un équilibre entre les coûts des inputs et la valeur des outputs produits. Pour éviter toute perturbation entre des processus consécutifs sur une même chaîne de valeur, nous avons effectué ce traitement dans l'ordre de ces chaînes.

En parallèle, nous avons créé une table de correspondance des processus à partir des processus existants dans la matrice z , privée de l'autoconsommation correspondant à des pertes ou à un usage pour la production de semences (ayant fait le choix de ne pas prendre en compte ces possibilités dans les équations du modèle)⁶. Cette matrice référence tous les processus existants réellement dans les données. Nous nous sommes basés sur les processus proposés dans FABIO, en considérant néanmoins tous les laits comme étant issus du même processus. Cette table nous permet de créer ensuite deux matrices d'usage et de

1. Cf. table 2 de GOUEL et LABORDE 2021

2. Modèle basé sur les données de FAOSTAT, représentant les échanges entre pays, les productions et les usages finaux, regroupant 186 pays et 127 biens agricoles, recouvrant ?? de la production mondiale BRUCKNER et al. 2019

3. Base de données GTAP, représentant l'économie mondiale, en se basant sur des données de comptabilité nationale, de commerce, de production, etc., répartie en vingt-et-une catégories de biens, et en 160 régions.

4. L'annexe A.4 donne l'attribution des pays aux régions.

5. Cf. annexe de BRUCKNER et al. 2019, pour voir des représentations graphiques des matrices.

6. D'après BRUCKNER et al. 2019, les quantités utilisées pour la production de semences représentent 1,4 % de la consommation des biens issus de culture

production, telles que *use* (dimensions) représente l'ensemble des flux de biens vers des processus, et *make* (dimensions) représente l'ensemble des productions issues de chaque processus. Ces matrices fournissent ainsi plus d'informations, une fois les pays et les biens agrégés, que les matrices agrégées x et z ⁷.

Nous avons ensuite agrégé les matrices selon notre choix de régions et de biens agricoles, tout en veillant à conserver des valeurs positives dans chaque processus et en empêchant les illusions de pertes et de semences engendrées par l'agrégation.

Pour certaines régions, même après agrégation, certains processus étaient incomplets, c'est-à-dire qu'un processus produisait des outputs sans consommer d'inputs, ou bien créait un seul output parmi les multiples nécessaires. Nous avons donc fait le choix d'exclure de nos matrices la production et la consommation des éléments intervenant dans ces processus (représentant 0,01 % en valeur de la production totale).

Finalement, nous avons, à partir de nos matrices agrégées *use*, *make* et *y*, obtenu l'ensemble des données nécessaires pour le modèle, vis-à-vis des consommations C , des productions Q , et des usages intermédiaires x , X . FABIO fournissant également des données relatives aux surfaces, nous disposons aussi des informations relatives à s , L et y . Ces données sont en valeurs ; cependant, étant donné que nous étudions les variations, l'ensemble des prix est fixé à 1, ce qui nous permet également d'obtenir les informations sur les prix P .

Le tableau 4.1 montre la production en valeurs des différents biens retenus. L'annexe A.5 présente la composition des biens, ainsi que leur origine et usage dans les différents procédés.

TABLE 4.1 – Biens et part dans la production totale en valeur

Biens	Part (%)	Biens	Part (%)
Blé	4.51	Autres cultures	3.61
Riz	7.29	Graines de coton	0.3
Maïs	4.63	Peluches de coton	1.11
Autres céréales	1.27	Huile de palme	1.2
Pommes de terres	2.19	Cœur de palmiers	0.21
Autres racines et tubercules	2.27	Sucres	3.47
Cultures sucrières	1.48	Huiles végétales	4.55
Tomates	2.63	Tourteux	2.78
Agrumes	1.43	Œufs	2.66
Bananes	1.12	Produits laitiers	8.97
Autres fruits et légumes	23.83	Viande rouge	1.91
Soja	3.47	Viande de porcs	0.43
Fruits de palmiers	1.11	Viande de volailles	5.42
Autres oléagineux	2.55	Autres produits issus de l'élevage	2.64
Coton	0.97		

Les figures 4.1 montrent des diagrammes de Sankey échanges commerciaux entre pays. Nous voyons ainsi avec la figure 4.1a que dans chaque région la majorité du commerce est intérieur, puis avec 4.1b que les régions extérieures avec lesquelles il y a le plus d'échanges, sont les régions géographiquement les plus proches. On peut également remarquer quelles sont les régions qui sont nettement plus importatrices (la Chine, Moyen-Orient, Afrique du Nord) et celles plus exportatrices (Asie du SE, Amérique du Sud, Amérique du Nord, Océanie).

4.1.2 Prix - FAOSTAT

Afin de convertir nos données de volumes en données de valeurs, nous avons récupéré les prix de FAOSTAT. Nous avons besoin des données de prix producteurs ; cependant, les données FAOSTAT sur ces

7. Nous n'avons pas utilisé les matrices *make* et *use* de FABIO, car celles-ci n'étaient pas équilibrées avec les autres matrices x , y et z

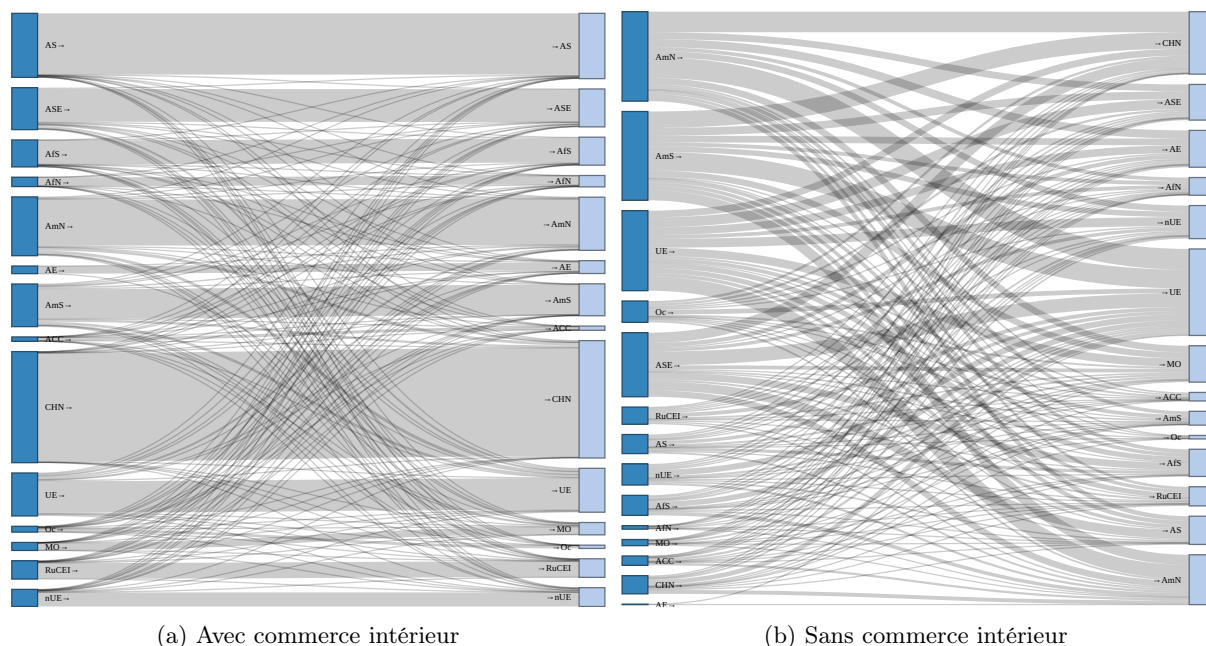


FIGURE 4.1 – Diagramme de Sankey des échanges entre régions

derniers ne correspondaient pas entièrement aux biens présents dans les tables FABIO, il nous fallut donc les compléter avec des données de prix issues des tables de commerce⁸.

Certaines données de prix étaient incohérentes et entraînaient un déséquilibre des chaînes de valeur une fois l'agrégation réalisée avec les données FABIO ; il a donc fallu les traiter afin de ne conserver que des prix pertinents. Tout d'abord, nous avons calculé, pour chaque bien à l'échelle FAOSTAT, une valeur moyenne en divisant la valeur totale échangée par la quantité totale échangée. Nous nous assurons ensuite que les prix issus des données FAOSTAT (tant producteurs que commerciales) dans chaque pays ne s'écartent pas trop de cette valeur. La procédure de conservation des prix est la suivante :

- utiliser les 80 % des prix d'*item*, les plus proches du prix moyen mondial trouvé, pour calculer une moyenne et un écart-type correspondant à une répartition plus resserrée des prix ;
- calculer, pour l'ensemble des prix (et non uniquement les 80 % les plus proches), l'écart par rapport à la moyenne en nombre d'écarts-types ;
- calculer, pour chaque pays, l'écart-type moyen, afin de déterminer si le pays présente des prix habituellement élevés par rapport au prix mondial ;
- ne conserver que les prix s'écartant de moins de deux fois l'écart-type moyen spécifique à chaque pays par rapport au prix mondial.

Nous effectuons ce tri sur les données brutes de FAOSTAT, puis sur celles obtenues après agrégation des données conservées lors de ce premier tri, au niveau FABIO. Cette fois-ci, nous nous assurons qu'après agrégation, les prix sont toujours suffisamment proches de la moyenne calculée pour ce niveau, en prenant en compte l'ensemble des valeurs et des quantités échangées.

Finalement, ces deux étapes de traitement des prix conduisent à un taux de prix manquants de 63%. Nous reconstruisons donc les prix à l'aide d'un multiplicateur calculé par pays et par groupe de produits (tel que défini dans la colonne de gauche de l'annexe A.5). Ce multiplicateur sera plus élevé pour un pays ayant, en moyenne, des prix plus élevés, et également pour les biens dont le prix est supérieur à la moyenne. Ainsi, le multiplicateur le plus élevé correspond au bœuf au Japon. Nous reconstruisons ensuite les prix manquants à l'échelle FABIO en récupérant le premier prix non nul obtenu en multipliant notre

8. Table *Producer Prices et Crops and livestock products*

multiplicateur par le prix moyen présent dans nos données du bien à l'échelle FABIO, puis par le prix moyen à l'échelle du bien de notre modèle et enfin par le prix moyen mondial de ce bien à l'échelle du modèle. Par exemple pour le bœuf japonais la reconstitution du prix, se fait dans l'ordre suivant : utiliser le prix moyen du bœuf, puis le prix moyen de la viande bovine, puis enfin utiliser le prix obtenu à partir des données de commerce à l'échelle monde sur le prix moyen de la viande rouge, dans la multiplication avec notre multiplicateur de prix.

4.1.3 Droits de douane - MacMap

Nous avons récupéré les données relatives aux droits de douane mises à dispositions par GUIMBARD et al. 2012, via la base de données MacMap-HS6 (pour Market Access Map, selon la classification SH6) les données ne concernent cependant pas l'année 2017, nous avons donc pris les données de l'année 2016. Cette base rend compte des droits de douane bilatéraux d'environ 190 pays importateurs et 220 exportateurs, sur 5000 produits. Le traitement a donc consisté en une agrégation selon nos régions et nos biens, en pondérant les droits de douane par les quantités échangées. Pour les valeurs manquantes dans certains pays, nous les avons émouées en considérant que ces pays échangeaient dans les mêmes proportions que le monde entier. Ce traitement nous permet donc d'accéder aux valeurs de T dans notre modèle. Les figures 4.2⁹ montre les valeurs de droits de douane moyens entre les régions et par produits.

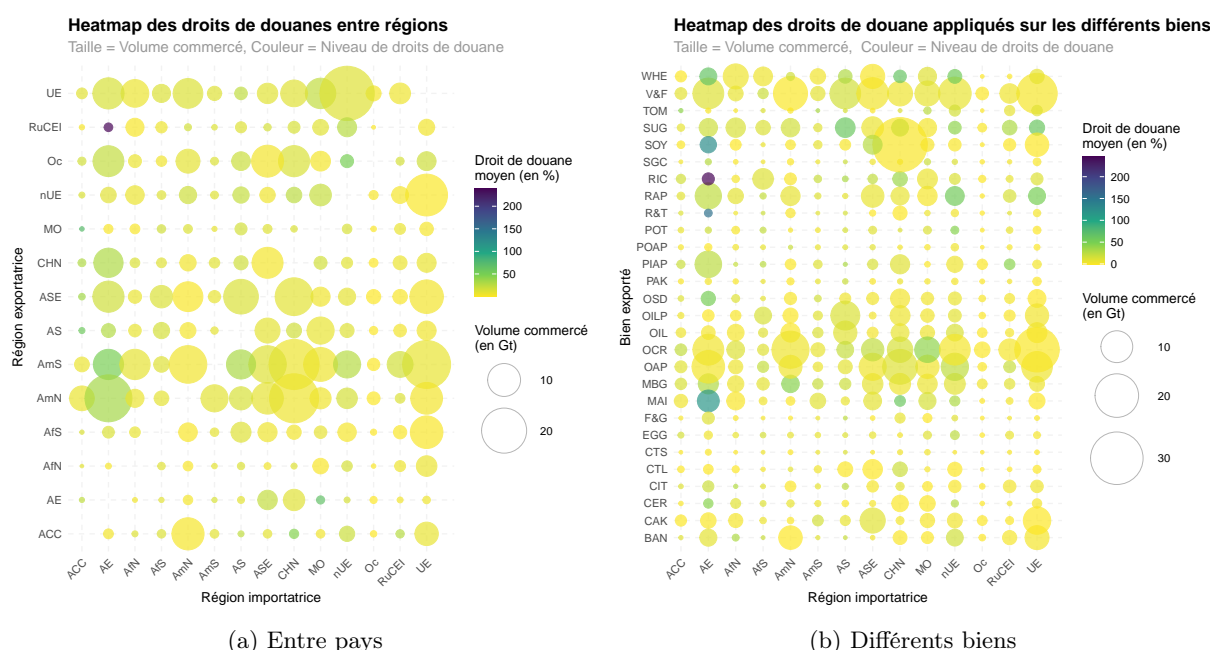


FIGURE 4.2 – Carte de chaleur des droits de douane

4.1.4 Usage d'énergie et usage d'intrants - GTAP

Nous avons récupéré de la base de donnée GTAP 11¹⁰, les informations concernant le coût de la terre, l'usage de fertilisants (nous avons réalloué ceux alloués au bétail, au fourrage, étant donné que dans notre modèle, les animaux, n'occupent que l'espace de production de leur alimentation), ainsi que l'utilisation d'énergie à la ferme (que nous utilisons ensuite dans le traitement des émissions). Ce traitement nous permet donc d'avoir les informations relatives au prix de la terre et à l'usage d'intrants, soient r et F dans notre modèle.

9. Les abréviations des régions et des biens sont disponibles en annexes.

10. AGUIAR et al. 2022.

4.1.5 Émissions de GES - FAOSTAT

Les données GTAP, nous permettent de traiter les informations relatives aux émissions. Nous avons suivi l'allocation des émissions proposée dans VALIN, HENDERSON et LANKOSKI 2023. Le tableau 4.2, représente cette allocation, et le pourcentage sur les émissions totales. Pour suivre cette allocation, nous avons dû réallouer une partie des émissions. En effet, GTAP (par le biais des données sur l'usage d'énergie) ou FABIO allouent des émissions que nous associons à l'usage de terre à des biens qui dans notre modèle n'en utilisent pas (animaux, produits transformés). Nous avons alors réattribué les émissions à un des biens en amont de la chaîne de valeur permettant de produire ce premier bien, et qui utilise de la terre. Cependant, par soucis de simplicité, nous avons réalloué au pâturage l'ensemble des émissions lié à l'usage de terre par les animaux, sauf qu'étant donné notre fonction de production pour les produits animaliers (panier d'aliments pour les animaux qui dépend du prix des inputs et varie selon l'élasticité prix choisie, et non un seul input comme pour les autres produits transformés), il se peut que notre modèle ne témoigne pas de la bonne variation d'émission pour les animaux (vue qu'elles dépendront alors de l'espace attribué aux cultures fourragères et non pas à toutes celles utilisées pour leur alimentation). Pour ce qui est des émissions liées à l'usage d'énergie, nous avons réattribué au fourrage, les émissions liées aux animaux vivants, mais nous avons alloué aux quantités produites pour les produits issus d'une transformation. De cette manière les émissions liées à la transformation agro-industrielle des produits transformés est prise en compte. Ainsi, nous considérons deux usages d'énergie, une à la ferme qui est allouée à la surface en terre et une autre à la transformation que l'on alloue à la quantité produite.

TABLE 4.2 – Allocation des émissions

Catégorie	Gaz	Allocation	Part des émissions ^a (en %)
Fermentation entérique	CH ₄	Taille du cheptel	30.5
Fumier sur pature	N ₂ O	Taille du cheptel	8.7
Gestion des fumiers	CH ₄ , N ₂ O	Taille du cheptel	4.4
Épandage de fumier sur culture	N ₂ O	Taille du cheptel	1.4
Usage d'énergie à la ferme	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Surface	10.9
Sols organiques drainés	N ₂ O, CO ₂	Surface	10.4
Culture du riz	CH ₄	Surface (riz)	7.5
Émissions des fertilisant	N ₂ O	Fertilisants	13.2
Usage d'énergie pour la transformation	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Quantités produites	10.3
Résidus de cultures	N ₂ O	Quantités produites	2.2
Brulage de résidus de cultures	N ₂ O, CH ₄	Quantités produites	0.4

^a En utilisant les potentiels de réchauffements présentés dans le rapport AR6 du GIEC, i.e. 27 pour CH₄ et 273 pour N₂O. Les pourcentages ne somment pas à 100 à cause des arrondis.

Parallèlement, la figure suivante 4.3 représente les émissions à la production par régions et par bien. Nous pouvons observons que le potentiel émissif des pâtures et cultures fourrages (F&G) est supérieur à celui d'autres nourritures animales telles que les oléagineux, le maïs ou les *autres céréales* (OSD, MAI et CER). Cela est dû à notre réallocation des émissions associées aux animaux et aux surfaces, uniquement vers les plantes fourragères et pâtures, et non pas vers l'ensemble des cultures contribuant à leur alimentation. Les émissions réelles de ce secteur, sont donc inférieures à celles que nous avons dans notre modèle. En bout de chaîne, une évolution de la taille du cheptel, par son implication sur l'évolution du panier de nourriture, conduira bien à une augmentation des émissions totales, par l'augmentation de la surface allouée à la nourriture animale, donc en particulier des cultures fourragères.

On constate également, que ce qui explique majoritairement le potentiel émissif d'un bien n'est pas son origine, mais bien sa nature.

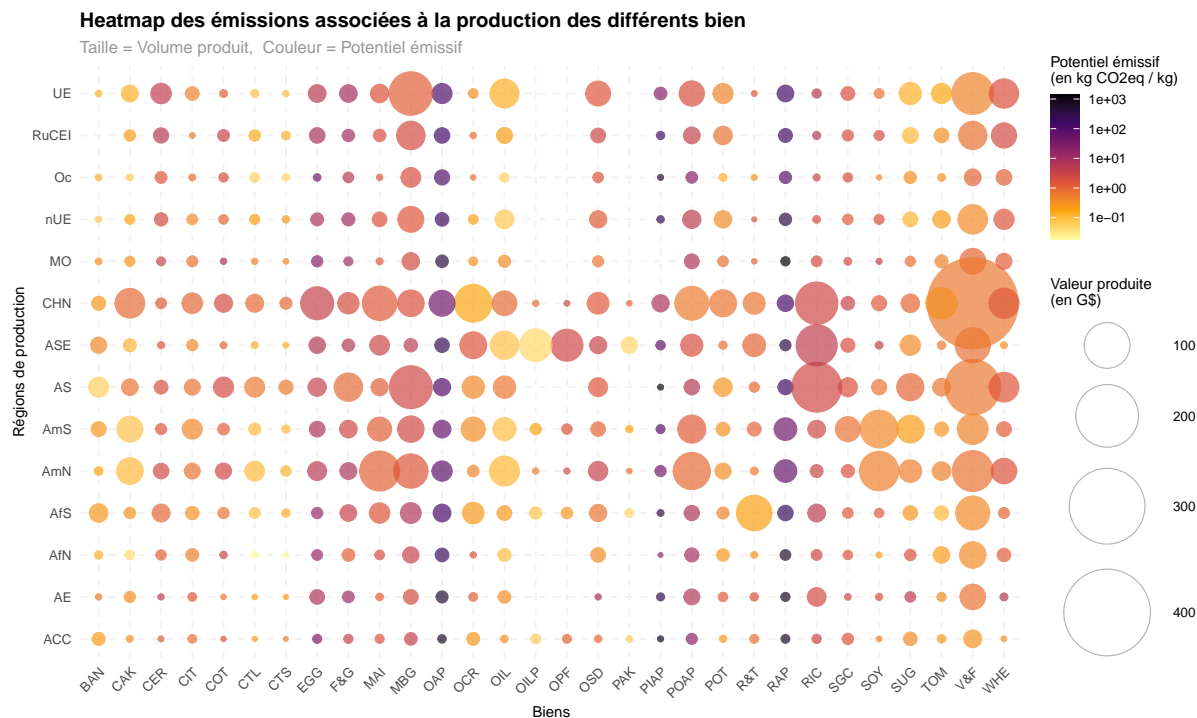


FIGURE 4.3 – Carte de chaleur des émissions de GES des différentes productions

4.1.6 Dépense nationale brute - Banque mondiale

Ici nous avons simplement récupéré les données de la banque mondiale relative aux dépenses de consommation finale en dollars constants¹¹. Ce qui nous permet de donner une valeur à E dans notre modèle.

4.2 Paramètres de comportement

Nous faisons les mêmes choix sur le paramétrage que dans GOUEL 2025. Le tableau 4.3 résume les valeurs choisies pour les élasticités, ainsi que l'origine de ces choix.

TABLE 4.3 – Origine des paramètres

Élasticité	Description	Origine
$\varepsilon = 0,5$	opposé de prix de la demande pour le panier de biens agricoles	COMIN, LASHKARI et MESTIERI 2021
$\kappa = 0,6$	de substitution à la consommation	Valeur usuelle dans la littérature
$\kappa_{\text{feed}} = 0,9$	de substitution dans l'alimentation animale	RUDE et MEILKE 2000
$\zeta_i^k = 0,25$	prix rendement des cultures	KEENEY et HERTEL 2009
$\sigma^k \in [2,6, 10]$	de substitution d'Armington	GTAP AGUIAR et al. 2022

Nous pouvons remarquer que l'élasticité de substitution entre les biens pour l'alimentation animale est plus élevée que celle pour l'alimentation humaine, cela témoigne de deux choses, d'abord que l'alimentation animale est constituée d'un panel d'aliments moins diversifiés (les animaux mangent principalement des céréales et des tourteaux), ensuite que les humains veulent manger tel ou tel aliment, et non pas uniquement pour son apport calorique. Le choix de l'élasticité ζ repose sur une moyenne des valeurs issues de l'étude GTAP MILLER 2009 portant sur les biocarburants. Idéalement, cette valeur devrait être différenciée selon les cultures et les pays afin de refléter les variations de rigidités.

11. référencées NE.CON.TOTL.CD par la banque mondiale

Les valeurs des élasticités de substitution d'Armington proviennent de la base de données GTAP¹². Pour les produits animaliers non disponibles, nous avons retenu une valeur de 5,65 pour les animaux vivants, et celle de 5,4 pour les produits transformés d'origine végétale, en nous appuyant sur la moyenne calculée pour les dix cultures les plus représentées dans COSTINOT, DONALDSON et SMITH 2016.

12. AGUIAR et al. 2022.

5. Résultats

5.1 Conséquence de la suppression des droits de douane

Pour comprendre l'effet des droits de douane sur les émissions de GES du secteur, nous partons de la situation actuelle. Nous changeons ensuite de cet équilibre initial les valeurs des droits de douane pour les annuler, le second équilibre atteint, nous pouvons constater les émissions finales dans cette situation contrefactuelle et déduire l'impact des droits de douane.

La suppression des droits de douane dans notre modèle, avec le paramétrage présenté, augmente les émissions totales d'environ 6,1 %.

Cherchons à décomposer les différents effets en jeu ici. Dans notre modèle réduit du chapitre 2 nous concluons que les émissions variaient avec les droits de douane selon 2.13¹, c'est-à-dire qu'elles augmentent avec l'introduction d'un droit de douane si les émissions du pays exportateurs sont suffisamment basses par rapport à celles du pays mettant le droit de douane en place. Cherchons à montrer ce phénomène, en décomposant notre suppression de droits de douane.

5.1.1 Suppression des droits de douane d'une région pour un bien

Choisissons de retirer les droits de douane d'une région et d'un bien vers d'autres pays moins émettrice sur ce bien (quantité \times potentiel), idéalement ces droits de douane sont élevés. Nous choisissons l'Asie de l'Est comme région importatrice et les deux Amériques et l'Union européenne comme régions exportatrices, car toutes quatre sont respectivement importatrice et exportatrices nettes (cf. figure 4.1b). On constate également que l'Asie de l'Est importe en valeur beaucoup de produits animaliers². Nous choisissons donc de faire une première décomposition, en retirant les droits de douane des produits issus de l'élevage à l'import en Asie de l'Est.

L'équilibre atteint après avoir changé les droits de douane conduit à une faible réduction de 0,34 % des émissions à l'échelle mondiale. En regardant le détail par régions, on constate en effet que les émissions de notre région importatrice ont été réduites de 5,6 %, celles de nos trois régions exportatrices ont elles similairement augmenté de 0,6 %.

Concernant les productions, on constate une diminution en Asie de l'Est, des produits animaliers (tous de -5,7 %³), ainsi que les biens utilisés pour l'alimentation animale (tourteaux -7,2 %, fourrage -1,7 %). En parallèle, on observe une réduction de l'import de biens servant (directement ou non) à l'alimentation animale, de 8,2 % pour le soja, de 7,7 % pour les tourteaux et de 5,5 % pour le maïs. Cette réduction est, de plus, plus importante pour les aliments venant des trois régions concernées par la suppression des droits de douane. On observe également une très forte augmentation de l'import de produits animaliers venant des trois régions, allant de $\times 9$ (pour les produits laitiers d'Amérique du Sud) à +10 % (pour la volaille sud-américain), et même une réduction des importations de porc sud-américain de 44 %, de la

1. $(\partial E) / (\partial t) = (E_H^0 \eta_H \chi_F + E_F^0 \eta_F \mu_H) / (P_F^0 \mu_H - P_H^0 \chi_F)$.

2. Cf. figure détaillée des échanges de produits animaux A.1a.

3. Les biens sont, dans notre modèle, tous issus du même processus, leurs productions évoluent donc conjointement.

viande rouge sud-américaine de 19 % et européenne de 3,5 % (ces valeurs négatives s'expliquent par le processus commun de production de tous les produits d'origine animale).

Parallèlement, on observe en Asie de l'Est, une diminution des prix à la consommation allant jusqu'à 17 % pour ces biens, et de moins d'un pourcent pour tous les autres biens. Mais étant donné que la consommation alimentaire totale ne varie que faiblement (+0,5 %), on observe une légère diminution de la consommation des autres biens. À l'inverse, la consommation totale de produits agricoles diminue dans nos trois autres régions, et ce, très légèrement, en parallèle d'une augmentation de moins d'un pourcent des prix à la consommation, des biens de la chaîne de valeur animale. Ces variations sont similaires pour les prix producteurs.

Finalement, on observe un comportement similaire à celui de notre modèle réduit, malgré l'influence du reste du monde qui n'était pas considéré dans notre mini-modèle.

5.1.2 Suppression de droits de douane dans tous les pays sur un seul ou groupe de biens

Bien individuel non animal

Ici nous supprimons alternativement les droits de douane pour un bien à la fois, afin de se donner une intuition de ce qui se passe lorsque l'on retire tous les droits de douane à la fois.

Intuitivement deux choses peuvent se passer : ou bien le bien est utilisé dans l'alimentation animale ou bien il ne l'est pas. S'il ne l'est pas, ce bien substituera d'autres aliments, dont ceux d'origine animale dans l'alimentation humaine, si au contraire il l'est suffisamment, la suppression des droits de douane conduira à une diminution du prix de l'alimentation animale et donc en bout de chaîne des produits animaliers, qui conduira à une augmentation de leur consommation. Si la consommation de produit animalier augmente, on s'attend à ce que les émissions totales augmentent. Parallèlement, pour un bien qui est utilisé majoritairement dans l'alimentation animale, uniquement dans une partie des pays, la suppression des droits de douane, risque d'augmenter le prix de l'alimentation animale uniquement dans ces pays, car les prix nationaux pour ce bien les pays l'exportant vont augmenter. Cet effet pourrait même aller jusqu'à réduire les émissions de GES dans certains pays.

Le tableau 5.1 montre l'impact sur les émissions globales de la suppression, des droits de douane lui correspondant. Intuitivement, une autre chose peu se passer, si le bien n'est pas significativement utilisé dans la consommation animale, mais qu'il a un potentiel émissif supérieur à d'autres biens, l'augmentation des émissions due à celle de sa consommation risque de ne pas recouvrir la diminution des émissions du secteur animal suite à la baisse de sa consommation.

On observe plusieurs choses :

- globalement la suppression des droits de douane conduit à l'augmentation des émissions totales ;
- les biens qui sont utilisés presque exclusivement pour la consommation humaine (tomates, bananes, agrumes, huiles, sucres) ou dans une chaîne de valeur ne permettant pas l'alimentation animale (cultures sucrières, les différents états du coton, cœur de palmier), conduisent à une faible réduction totale des émissions ;
- la diminution des prix de l'alimentation animale dans des pays concorde avec l'augmentation dans d'autres, conduisant à une augmentation des émissions dans une partie uniquement des pays ;
- pour les biens majoritaires dans tous les pays pour l'alimentation animale (maïs, tourteaux et soja), on observe une certaine complémentarité entre les régions, ou le prix de l'alimentation animale est réduite et les émissions du pays augmente ou bien c'est l'inverse ;
- les biens servant aussi bien à l'alimentation animale qu'humaine, conduisent à une augmentation totale des émissions, tout en augmentant dans de nombreux pays le prix de l'alimentation animale.

Regardons plus en détail ce qui se passe lorsque l'on supprime les droits de douane sur le maïs, le riz. Parallèlement, regardons le cas des oléagineux, qui semblent aller à l'envers des intuitions. L'annexe

TABLE 5.1 – Conséquence de la suppression des droits de douane liés à chaque bien (transposée et ordonnée).

Bien	Δ des émissions totales	Δ de la valeur moyenne de P_{feed}	Espace des ΔP_{feed}	Nbr de régions avec $\Delta E > 0$	Nbr de régions avec $\Delta P_{\text{feed}} > 0$
Maïs	+1,4	-0,05	[-21 ; +3,3]	5	11
Riz	+0,41	+0,9	[-2,3 ; +4]	11	12
Blé	+0,19	+0,7	[-3,8 ; +5]	8	10
Tourteaux	+0,127	-0,04	[-1,7 ; +0,3]	7	8
Autres céréales	+0,047	+0,01	[-1,2 ; +1,3]	9	9
Soja	+0,045	+0,18	[-4,9 ; +4,1]	4	12
Fruits et légumes	+0,036	-0,03	[-0,7 ; +0,47]	8	6
Racines et tuberc.	+0,025	+0,08	[-1,1 ; +0,6]	12	9
Pommes de terres	+0,024	-0,03	[-0,5 ; +0,04]	6	3
Tomates	0 ⁺	-0,02	[-0,18 ; 0 ⁺]	3	1
Cultures sucrières	0 ⁺	0	~ 0	4	4
Huile de palme	0 ⁺	0 ⁺	~ 0	6	13
Bananes	0 ⁻	0 ⁺	~ 0	3	8
Agrumes	0 ⁻	0 ⁻	~ 0	3	4
Graines de coton	0 ⁻	0 ⁺	[0 ; +0,3]	0	13
Cœur de palmiers	0 ⁻	0 ⁺	~ 0	1	1
Coton	0 ⁻	0	0	0	0
Fruits de palmiers	0 ⁻	0	0	0	0
Peluches de coton	0 ⁻	0	0	0	0
Huiles végétales	-0,008	+0,01	~ 0	9	4
Autres cultures	-0,017	+0,01	~ 0	0	9
Sucres	-0,09	+0,09	[-0,3 ; +1,7]	3	11
Oléagineux	-0,111	+0,15	[-1,5 ; +0,2]	10	11

Les lignes sont classées par ordre décroissant selon leur impact sur les émissions totales.

A.6.1 représente des graphes de Sankey des commerces extérieurs des différents biens que nous analysons ci-dessous.

La libération des échanges de maïs entraîne une diminution prix à la consommation du maïs, en Asie de l'Est, Moyen-Orient, Asie du SE, Chine et Afrique Sud Saharienne, cependant cette diminution implique une baisse du coût moyen de la nourriture animale uniquement en Asie de l'Est, Moyen-Orient et Chine ; on remarque que les deux régions pour lesquelles la baisse du prix du maïs n'entraîne pas une baisse du prix de l'alimentation animale sont des régions pour lesquelles l'augmentation du reste des prix de l'alimentation animale ne permet pas de baisser le panier moyen, en effet ces deux régions consomment désormais plus de céréales, de riz et des tubercules (parmi d'autres), hors les prix de ces denrées ont également augmenté. Concernant les autres régions, tous les prix constituant le panier d'aliments pour l'élevage, il est tout naturel que le prix de l'alimentation augmente. Cela conduit à une diminution du prix moyen des bien agricole uniquement pour l'Asie de l'Est (-4%), le Moyen-Orient et la Chine (0⁻), la plus grande augmentation est ressentie en Amérique du Sud (+0,8 %). Cependant, seule les cinq régions qui ont ressentie une baisse des prix à la consommation des prix du maïs observent une augmentation totale des émissions ; les variations d'émissions s'étalent de -1,6 % pour l'Amérique du Sud, jusqu'à +2,1 % pour l'Asie de l'Est. A l'échelle monde, l'augmentation des émissions est surtout allouée aux maïs (+3,6 %) dont la demande en fertilisant augmente dans toutes les régions ayant vu le prix du maïs augmenter (jusqu'à +50 % dans en Russie et Communautés des États indépendants, ou encore +22 % en Amérique du Sud). Les émissions allouées aux cheptels augmentent également, mais ne sont pas dues à une augmentation de l'usage d'intrants sur les pâtures (qui augmentent au maximum de 1 % en AmS), mais bien à l'augmentation de la production qui augmentent dans nos cinq régions (plus également légèrement

l'Océanie), jusqu'à +22 % en Asie de l'Est. À l'opposé la réduction maximale de production de viande n'est que de 2 % en Amérique du Sud.

Pour le riz, qui a comparativement un potentiel émissif plutôt élevé, on observe une diminution des prix à la consommation très forte en Asie de l'Est (-63 %), puis plus modérée de 8 à 2 % en Amérique centrale, dans toute l'Europe et la Chine, les prix augmentent de plus de 10 % en Océanie, Asie du Sud et du SE et Amérique du Nord. L'Asie du Sud et du SE sont les deux plus grandes régions exportatrices de riz. L'Océanie et l'Amérique du Nord, sont quant à elles deux régions ne consommant pas beaucoup de riz, cette augmentation n'est donc pas significative. Pour contrecarrer, ces augmentations de prix à la consommation, toutes les régions à l'exception de l'Asie de l'Est (-22 %) et de l'Amérique centrale (-4 %) augmentent la surface allouée à la culture du riz, de +5 % en Asie du SE, et +15 % en Asie du Sud, à +70 % et +207 % en Amérique du Nord et Océanie. Parallèlement on observe une augmentation allant dans le même sens, mais un peu plus forte de l'utilisation des intrants (i.e. augmentation de l'usage de fertilisants pour une même surface cultivée). Étant donné que les émissions du riz sont avant tout liées à l'usage du sol et de fertilisants (cf. 4), on explique facilement l'augmentation de +20 % des émissions de GES liées au riz dans le monde. Parallèlement, on observe une légère augmentation des émissions de GES (de moins de 1 %) des substituts au riz dans l'alimentation humaine (blé, pommes de terre, céréales, etc.), notamment due à l'augmentation de l'usage d'intrants, permettant de palier à la perte de terre en faveur du riz, mais aussi une diminution des émissions de l'élevage. En effet, on observe une légère augmentation de moins d'un pourcent, des prix de l'alimentation animale dans toutes les régions, sauf en Asie de l'Est (-3 %), en Amérique centrale (0⁻), en Asie du Sud et SE (+4 %), qui entraîne une diminution de la production animale, allant jusqu'à 4 % en Asie du SE, et donc des émissions qui leur sont allouées.

En retirant les droits de douane de toutes les régions sur les oléagineux et étant donné qu'ils permettent la production de tourteaux, on s'attendrait intuitivement à observer une substitution dans les échanges entre les deux, en faveur des oléagineux. De plus, notons que les tourteaux sont produits avec nos biens à partir de graines de coton, d'oléagineux et de coeurs de palmier ; et étant donné la libéralisation des prix oléagineux. L'Amérique du Nord, qui est la plus grande région exportatrice d'oléagineux et également la seconde pour les tourteaux, comme les prix d'importation ont été réduits, on observe une augmentation de 10 % de leur import depuis l'Amérique du Sud et l'UE, au total le prix à la production des tourteaux y diminue de 0,2 %. Comme l'UE, n'exporte pas de tourteaux, mais uniquement des oléagineux, Les prix à la consommation des oléagineux augmentent, mais les prix des tourteaux diminuent, dû à la diminution du prix de production en Amérique du Nord (qui leur importe la moitié de leurs tourteaux), en Amérique du Sud à l'inverse (plus grande région exportatrice de tourteaux, mais non-exportatrice d'oléagineux) les prix à la consommation des oléagineux et des tourteaux diminuent. On observe ensuite une réduction des prix à la consommation des tourteaux s'accompagnant d'une augmentation de leur utilisation dans l'alimentation animale, d'une diminution du coût de celle-ci, et donc d'une augmentation de la production animale et des émissions totales de la région pour deux tiers des régions. Cependant, la plus grande baisse de production en Asie de l'Est (-1,6 % d'émissions) couvrent les la faible augmentation dans les autres régions. Finalement, l'effet de la libéralisation des oléagineux est différent de celle des tourteaux.

De l'ensemble des biens non-animalier

Si on somme, l'ensemble des effets individuels de chacune des politiques de la section précédente, on obtient +2,1 % d'émissions en plus. Cependant, le retrait de l'ensemble des droits de douane conduit en réalité à une augmentation plus importante des émissions de +3,3 %.

Produits transformés d'origine animale

Ici, nous opérons une libération totale des droits de douane sur les produits animaliers, ce qui correspond à une extension du cas vu dans la sous-section 5.1.1. Contrairement au cas Asie de l'Est, on observe une augmentation émissions totales de 3,4 %, on observe une diminution des émissions dans les régions Europe hors-UE, Asie de l'Est, Amérique centrale, toute l'Afrique et la Chine, ces régions sont toutes six des régions importatrices de produits finis d'origine animale, et diminuent de ce fait leur production nationale, leur demande de travail et d'intrants pour l'élevage. Le prix de l'alimentation animale y varie de -4 à +1,5 %, mais la production y diminue bien (de -27 à -3 %). Parallèlement, étant donné que ces régions

consomment plus de viande, lait et œufs (jusqu'à +14 % pour la viande rouge en Europe hors-UE), elle en importe plus (+34 % pour Europe hors-UE), et importent moins de biens à destination de l'alimentation animale (-30 % toujours en nUE). Ces réductions sont accompagnées d'une augmentation de l'élevage dans toutes les autres régions (jusqu'à +67 % en Océanie, ou +9 et +7 % dans l'UE et en Amérique du Sud, deux grandes régions exportatrices de produits d'origine animale). Leurs imports de tourteaux augmentent, et ce, principalement depuis les six régions qui bénéficient de cette libéralisation. On observe également, que les régions exportatrices de viande et autres, n'augmentent ni la production pour les plantes fourragères, ni l'usage d'intrants. On observe donc une re-répartition des spécialisations, les régions exportatrices de viande se focalisent sur leur production, en important des régions importatrice de viande les biens servant à l'alimentation animale. Finalement, on observe également de faibles diminutions des émissions liées à l'ensemble des biens majoritairement utilisés pour l'alimentation humaine, comme les huiles, les fruits et légumes, ces diminutions témoignent de leur remplacement dans l'alimentation humaine en défaveur des produits d'origine animale.

D'un seul produit issu de l'élevage relativement peu émetteur

Nous supprimons d'abord l'ensemble des droits de douane des produits laitiers, ils sont consommés en quantités importantes dans toutes les régions. L'augmentation résultante est moins importante qu'après la suppression des droits de douane de tout le secteur, mais reste significativement importante (+2,2 %). Pour ne pas tout re-détailler, nous observons dans les grosses lignes les mêmes effets que lors de la suppression sur tous les produits animaliers. Mais surtout, on observe du fait de notre choix de modélisation des produits issus de l'élevage, que la production augmente de la même manière pour l'ensemble des produits du secteur, chacun étant produit conjointement par une fonction de production Léontief. Ainsi, pour compenser l'augmentation forcée des autres prix animaliers, on observe une diminution des prix à la consommation des autres denrées issus de l'élevage.

À l'inverse lorsque nous retirons les droits de douane sur les œufs, nous observons une réduction de 0,2 % des émissions de GES. Les réductions, des émissions sont dues cette fois-ci à une réduction plus importante de la production dans certaines régions d'une augmentation d'en d'autres. Les prix des œufs ayant diminué, la consommation est transférée d'autre produits animaliers, vers ces premiers et demande donc une plus faible production pour les autres produits animaliers. Ainsi, malgré la fonction de production conjointe entre les différents produits issus de l'élevage, il est quand même possible d'observer une diminution, quoique faible.

5.1.3 Suppression de tous les droits de douane

Comme on a pu le voir précédemment la suppression des droits de douane, quelqu'ils soient, semble conduire à une diminution du prix de l'alimentation animale ou bien directement des produits animaliers, ce qui conduit à une augmentation de leur consommation, donc à une augmentation des émissions totales. Similairement à ce que nous avons pu noter au sein des produits non-animalier dans la section 5.1.2, les effets de la suppression des droits de douane de tous les secteurs hors élevage, avec le secteur élevage, ne s'additionner pas parfaitement. La somme de leurs effets est de +6,7 %, tandis que l'effet d'une libéralisation totale implique une augmentation — légèrement inférieure — de +6,1 %.

Les résultats montrent une augmentation du prix moyen de l'alimentation animale supérieur à celle observée lorsque seuls les produits d'origine animale voient leur droit de douane retiré, on constate de plus une variation plus grande. Le prix moyen augmente de 5 % (contre 2,6 dans l'autre contrefactuel), avec une augmentation allant jusqu'à 33 % en Océanie (contre +29). Ce retrait total des droits de douane conduit à une augmentation des consommations finales des différents biens allant jusqu'à +5,7 % pour le soja, à - 7,8 % pour les cultures sucrières. Mais surtout on observe que la quantité totale de produits d'origine animale diminue de 1,8 %, alors même que les émissions du secteur augmentent pour tous les biens (de +1,6 % pour les produits laitiers à +9 % pour les volailles). Les émissions du secteur sont portées majoritairement par l'Océanie (+63 %), l'Asie de l'Est (+47 %), l'Asie du SE (+20 %) et le Moyen-Orient (+10 %), cette augmentation est due à une augmentation des productions des mêmes pourcentages. À l'inverse toutes les autres régions voient leur production d'élevage et leurs émissions associées diminuer. Ce faisant les émissions du secteur s'équilibrent. Au total, la région qui voit le plus ces émissions diminuer

dans ce scénario est la Chine, avec - 2,7 %, et cette baisse n'est pas due à un déplacement des émissions vers l'import, mais bien à une réduction de la consommation de 1,2 % et à de forte émissions initiales.

5.2 Sensibilité du modèle aux paramètres

Dans cette sous-section, nous analysons l'impact du choix des paramètres de comportement sur les conséquences en terme d'émissions de GES dans nos différents scenarii contrefactuels, en faisant varier leur valeur un à un. Le tableau 5.2 expose la variation d'émissions de GES dans quatre scenarii, avec les changements de paramètres choisis.

TABLE 5.2 – Influence de la modification des paramètres sur les émissions finales des différents scenarii.

Paramètre changé	Maïs	Tout hors-élevage	Élevage	Libéralisation totale
\emptyset	+1,4	+3,3	+3,4	+6,1
$\kappa = 0.1$	+0,9	+3,4	+1,8	+4,9
$\kappa = 2$	+1,6	+1,8	+5,8	+6,4
$\kappa_{\text{feed}} = 0.1$	+0,8	+1,9	+2,3	+4,3
$\kappa_{\text{feed}} = 2$	+1,8	+3,9	+3,1	+7,1
$\sigma^k = 10$	+2,4	+5	+7	+13
$\varsigma = 1$	+1,6	+4,2	+3,1	+7,3

Les paramètres initiaux étaient : $\kappa = 0,6$, $\kappa_{\text{feed}} = 0,9$, $\sigma^k \in [2,6, 10,1]$ et $\varsigma = 0,25$.

Nous constatons d'abord que le changement de paramétrage, ne change pas la nature des résultats : le retrait de droits de douane entraîne l'augmentation des émissions de GES. Comme on pouvait s'y attendre, lorsque les élasticités de substitution κ et κ_{feed} diminuent la variation absolue des émissions est réduite, puisque plus elles sont faibles moins les consommateur·ice·s / éleveur·euse·s voudront changer leur panier de biens, ce qui conduit à réduire les variations de productions. Ensuite, les élasticités d'Armington σ^k lorsqu'elle augmente témoigne d'une plus grande indifférence entre la provenance des biens, son augmentation conduit donc à réaction plus importante aux politiques commerciales mondiales.

6. Conclusion

Ce mémoire estime que l'impact de la suppression des droits de douane dans le secteur agricole pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur de plus de 6 %. Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle d'équilibre partiel de commerce agricole à quatorze régions —recouvrant l'ensemble des pays — trente biens agricoles — n'excluant que les alcools et les stimulants — et un bien extérieur. Il prend en compte les usages intermédiaires des différents biens, en utilisant des tables d'usage et de production des différents biens à travers des processus agro-industriels et métaboliques. Il utilise également une représentation de l'usage de la terre avec une fonction de gestion multilogit et l'usage d'intrants intensifs. Nous avons également évalué que le retrait des droits de douane sur les seuls produits issus de l'élevage conduisait à une augmentation totale des émissions du secteur de plus de 3 %. Les différentes simulations nous permettent de dire que les droits de douane affectent les émissions de GES du secteur par plusieurs canaux, d'abord la mise en place de droit de douane peut conduire à une augmentation des coûts de l'alimentation animale, ce qui résulte directement en une augmentation des prix de production, puis à la consommation, conduisant ensuite à une réduction de leur consommation donc de leur production, qui a pour effet de réduire les émissions de GES, ces biens étant les plus émetteurs du secteur. Ensuite, les droits de douane peuvent conduire à directement augmenter les prix à la consommation de ces mêmes biens, ce qui a le même effet. À l'inverse les droits de douane peuvent relativement augmenter le prix d'autres aliments sans significativement réduire le coût de l'alimentation animale et/ou celui des biens issus de l'élevage, cette baisse relative du prix des biens issus de l'élevage, conduira alors à une augmentation des émissions du secteur. Parallèlement, nous avons vu que toutes les régions ne réagissent pas de la même manière à une suppression des droits de douane, les régions importatrices de viande voient leurs émissions locales diminuer, en échange d'une augmentation dans les régions exportatrices. Les régions importatrices voient également leur prix à la consommation diminuer, tandis que les régions exportatrices voient leur prix augmenter. Finalement, les émissions de la consommation des régions importatrices ne diminuent que si les régions vers lesquelles elles exportent la production des biens qu'elles consomment les produisent avec une intensité carbone suffisamment faible pour compenser l'augmentation des consommations.

Ce travail en appelle d'autres, d'abord, nous pourrions constater si la magnitude des effets observés serait similaire en désagrégeant plus encore les régions, ainsi que les processus de production de bien issus de l'élevage, dans notre modèle. Nous pouvons également penser à ajouter les émissions des transports internationaux. Nous pouvons également nous pencher sur l'effet de la prise en compte de la variation des surfaces allouées à l'agriculture dans le modèle. Parallèlement, nous pourrions chercher à trouver quel niveau de droits de douane serait optimal pour réduire les émissions du secteur, sans conduire à une augmentation trop drastique des prix de l'alimentation dans une région. Nous pouvons également chercher à évaluer l'impact des politiques actuelles sur les droits de douane.

Le cœur de notre modèle, nous permet également de regarder l'effet d'autres politiques commerciales, un prochain axe d'étude serait donc de voir l'impact de subventions à la production¹ et de la mise en place d'une taxe carbone aux frontières — qui n'est en réalité qu'une sorte de droit de douane amélioré. Dans notre modèle, parmi les émissions liées aux cultures environ un tiers est dû à l'usage de fertilisants, l'autre à l'usage d'énergie et le reste est moins contrôlable. En l'état, notre modèle pourrait faire jouer sur la quantité de fertilisants pour réduire l'intensité carbone des cultures. Les émissions du cheptel étant majoritairement dû aux fonctions métaboliques des animaux, il n'est pas possible de jouer sur son intensité

1. L'annexe A.1 expose à la manière du chapitre 2 l'effet d'une politique de subvention à la production.

carbone. La mise en place d'une taxe carbone aux frontières devrait donc dans notre modèle en l'état conduire à une diminution de l'usage des entrants, et de l'export de biens issus du secteur de l'élevage, en faveur d'une augmentation des échanges de biens servant à leur alimentation. L'article de LABORDE et al. 2020 évalue l'impact de ces deux politiques à l'aide du modèle d'équilibre général MIRAGRODEO de l'IFPRI.

Bibliographie

- AGUIAR, Angel et al. (déc. 2022). “The Global Trade Analysis Project (GTAP) Data Base : Version 11”. In : *Journal of Global Economic Analysis* 7.2, p. 1-37. DOI : [10.21642/jgea.070201af](https://doi.org/10.21642/jgea.070201af).
- BRUCKNER, Martin et al. (sept. 2019). “FABIO—The Construction of the Food and Agriculture Biomass Input–Output Model”. In : *Environmental Science & Technology* 53.19, p. 11302-11312. ISSN : 1520-5851. DOI : [10.1021/acs.est.9b03554](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03554).
- CARPENTIER, Alain et Elodie LETORT (déc. 2013). “Multicrop Production Models with Multinomial Logit Acreage Shares”. In : *Environmental and Resource Economics* 59.4, p. 537-559. ISSN : 1573-1502. DOI : [10.1007/s10640-013-9748-6](https://doi.org/10.1007/s10640-013-9748-6).
- CARY, Michael (avr. 2020). “Molecules of inefficiency : How tariffs impact carbon intensities, carbon dioxide emissions, and the environment”. In : *Science of The Total Environment* 713, p. 136531. ISSN : 0048-9697. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2020.136531](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136531).
- Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change : Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (juill. 2023). Cambridge University Press. ISBN : 9781009157926. DOI : [10.1017/9781009157926](https://doi.org/10.1017/9781009157926).
- COMIN, Diego, Danial LASHKARI et Martí MESTIERI (2021). “Structural Change With Long-Run Income and Price Effects”. In : *Econometrica* 89.1, p. 311-374. ISSN : 0012-9682. DOI : [10.3982/ecta16317](https://doi.org/10.3982/ecta16317).
- CORRÊA-DIAS, Lucas, Jordan J NORRIS et Heitor PELLEGRINA (fév. 2025). “Diet, Economic Development and Climate Change”. In : DOI : [10.31219/osf.io/3dv4z_v3](https://doi.org/10.31219/osf.io/3dv4z_v3).
- COSTINOT, Arnaud, Dave DONALDSON et Cory SMITH (fév. 2016). “Evolving Comparative Advantage and the Impact of Climate Change in Agricultural Markets : Evidence from 1.7 Million Fields around the World”. In : *Journal of Political Economy* 124.1, p. 205-248. ISSN : 1537-534X. DOI : [10.1086/684719](https://doi.org/10.1086/684719).
- CRIPPA, M. et al. (mars 2021). “Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions”. In : *Nature Food* 2.3, p. 198-209. ISSN : 2662-1355. DOI : [10.1038/s43016-021-00225-9](https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9).
- ELOBEID, Amani et al. (mai 2021). “China-U.S. trade dispute and its impact on global agricultural markets, the U.S. economy, and greenhouse gas emissions”. In : *Journal of Agricultural Economics* 72.3, p. 647-672. ISSN : 1477-9552. DOI : [10.1111/1477-9552.12430](https://doi.org/10.1111/1477-9552.12430).
- FARROKHI, Farid et Heitor S. PELLEGRINA (sept. 2023). “Trade, Technology, and Agricultural Productivity”. In : *Journal of Political Economy* 131.9, p. 2509-2555. ISSN : 1537-534X. DOI : [10.1086/724319](https://doi.org/10.1086/724319).
- GOUEL, Christophe (jan. 2025). “Measuring Climate Change Impacts on Agriculture : An Equilibrium Perspective on Supply-Side Approaches”. In : *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 12.1, p. 181-220. ISSN : 2333-5963. DOI : [10.1086/730591](https://doi.org/10.1086/730591).
- GOUEL, Christophe, Fabienne FÉMÉNIA et al. (2025). “Acreage Choice in Equilibrium Models : A Comparative Analysis”. In :
- GOUEL, Christophe et David LABORDE (mars 2021). “The crucial role of domestic and international market-mediated adaptation to climate change”. In : *Journal of Environmental Economics and Management* 106, p. 102408. ISSN : 0095-0696. DOI : [10.1016/j.jeem.2020.102408](https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102408).
- GUIMBARD, Houssein et al. (fév. 2012). “MAcMap-HS6 2007, An exhaustive and consistent measure of applied protection in 2007”. In : *International Economics* 130, p. 99-121. ISSN : 2110-7017. DOI : [10.1016/s2110-7017\(13\)60046-3](https://doi.org/10.1016/s2110-7017(13)60046-3).
- HIMICS, Mihaly et al. (avr. 2018). “Does the current trade liberalization agenda contribute to greenhouse gas emission mitigation in agriculture?” In : *Food Policy* 76, p. 120-129. ISSN : 0306-9192. DOI : [10.1016/j.foodpol.2018.01.011](https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.01.011).

- HUANG, Shansong et al. (juin 2023). "Contribution of agricultural land conversion to global GHG emissions : A meta-analysis". In : *Science of The Total Environment* 876, p. 162269. ISSN : 0048-9697. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2023.162269](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162269).
- KEENEY, Roman et Thomas W. HERTEL (nov. 2009). "The Indirect Land Use Impacts of United States Biofuel Policies : The Importance of Acreage, Yield, and Bilateral Trade Responses". In : *American Journal of Agricultural Economics* 91.4, p. 895-909. ISSN : 1467-8276. DOI : [10.1111/j.1467-8276.2009.01308.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2009.01308.x).
- KORINEK, Jane et Patricia SOURDIN (sept. 2010). "Clarifying Trade Costs : Maritime Transport and Its Effect on Agricultural Trade". In : *Applied Economic Perspectives and Policy* 32.3, p. 417-435. ISSN : 2040-5804. DOI : [10.1093/aep/32.3.417](https://doi.org/10.1093/aep/32.3.417).
- LABORDE, David et al. (mai 2020). *Modeling the Impacts of Agricultural Support Policies on Emissions from Agriculture*. DOI : [10.3386/w27202](https://doi.org/10.3386/w27202).
- MILLER, Ronald E. (2009). *Input-output analysis. Foundations and extensions*. Sous la dir. de Peter D. BLAIR. 2nd ed. Includes bibliographical references and indexes. Cambridge : Cambridge University Press. 1750 p. ISBN : 9780511626982.
- ROSAL, Ignacio del (mai 2023). "Maritime connectivity and agricultural trade". In : *Journal of Agricultural Economics* 75.1, p. 153-168. ISSN : 1477-9552. DOI : [10.1111/1477-9552.12548](https://doi.org/10.1111/1477-9552.12548).
- RUDE, James et Karl MEILKE (déc. 2000). "Implications of CAP Reform for the European Union's Feed Sector". In : *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie* 48.4, p. 411-420. ISSN : 1744-7976. DOI : [10.1111/j.1744-7976.2000.tb00396.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2000.tb00396.x).
- SHIN, Kiseok, Jason GRANT et Nicolas LEGRAND (2025). *Tariffs in Agriculture : Have Trade Agreements Contributed to Agricultural Sustainability ?* en. DOI : [10.22004/AG.ECON.361037](https://doi.org/10.22004/AG.ECON.361037).
- SOTELO, Sebastian (juill. 2020). "Domestic Trade Frictions and Agriculture". In : *Journal of Political Economy* 128.7, p. 2690-2738. ISSN : 1537-534X. DOI : [10.1086/706859](https://doi.org/10.1086/706859).
- VALIN, Hugo, Ben HENDERSON et Jussi LANKOSKI (2023). "Reorienting Budgetary Support to Agriculture for Climate Change Mitigation : A Modelling Analysis". In : *OECD publishing*.

A. Annexes

A.1 Ouverture - effet d'une subvention sur les émissions des GES

Dans cette annexe, on considère l'introduction d'une subvention à la production dans le pays H . Cela change nos fonctions d'offre, comme suit :

$$S_F = S_F^0 \left(1 + \eta_F \frac{P_F - P_F^0}{P_F^0} \right),$$

et avec la subvention s ,

$$S_H = S_H^0 \left(1 + \eta_H \frac{P_H + s - P_H^0}{P_H^0} \right).$$

Pour simplifier, on assume $P_H = P_F = P$.

Introduire une subvention conduit aux fonctions de prix et à leur dérivée suivante :

$$\begin{aligned} \frac{P}{P^0} &= 1 + \frac{\eta_H}{\mu_H - \chi_F} \frac{s S_H^0}{P^0 X_F^0}, \\ \frac{\partial P}{\partial s} &= \frac{\eta_H}{\mu_H - \chi_F} \frac{S_H^0}{X_F^0} < 0. \end{aligned}$$

Nous pouvons donc dire que l'introduction d'une aide à la production dans le pays domestique réduira les prix dans l'ensemble des pays faisant partis du marché. La production totale devient :

$$S = S^0 + \eta_H \frac{s S_H^0}{P^0} \left[1 - \frac{\eta}{\chi_F - \mu_H} \frac{S^0}{X_F^0} \right],$$

et sa dérivée

$$\frac{\partial S}{\partial s} = \frac{\eta_H S_H^0}{P^0} \left[1 - \frac{\eta}{\chi_F - \mu_H} \frac{S^0}{X_F^0} \right].$$

Étant donné que $X_F^0(\chi_F - \mu_H) = \eta S^0 - \varepsilon D^0$ et $\varepsilon < 0$, on a

$$1 > \frac{\eta}{\chi_F - \mu_H} \frac{S^0}{X_F^0},$$

ce qui implique qu'une subvention augmentera la production totale.

En maintenant notre hypothèse de linéarité entre les émissions et la production, on a :

$$E = E^0 + \eta_H \frac{s}{P^0} \left[E_H^0 - \frac{\eta_H E_H^0 + \eta_F E_F^0}{\chi_F - \mu_H} \frac{S_H^0}{X_F^0} \right],$$

et donc

$$\frac{\partial E}{\partial s} = \frac{\eta_H}{P^0} \left[E_H^0 - \frac{\eta_H E_H^0 + \eta_F E_F^0}{\chi_F - \mu_H} \frac{S_H^0}{X_F^0} \right].$$

Dans ce cas, le signe de la dérivée est ambigu ; il dépend de la relation entre $(\eta - \varepsilon)E_H^0 S^0$ et $(\eta_H E_H^0 + \eta_F E_F^0)S_H^0$, si le premier est plus grand que le second, alors la subvention augmentera les émissions totales.

A.2 Détails calculs - intuitions droits de douane

First, we express P_F as a function of t and the elasticities.

Starting from the equation

$$D_H - S_H = S_F - D_F,$$

and using the definitions of demand and supply, we obtain :

$$D_H^0 \left(1 + \varepsilon_H \frac{P_H - P_H^0}{P_H^0} \right) - S_H^0 \left(1 + \eta_H \frac{P_H - P_H^0}{P_H^0} \right) = S_F^0 \left(1 + \eta_F \frac{P_F - P_F^0}{P_F^0} \right) - D_F^0 \left(1 + \varepsilon_F \frac{P_F - P_F^0}{P_F^0} \right).$$

We then factorize by $\frac{P_i - P_i^0}{P_i^0}$ for $i = H, F$:

$$\frac{P_H - P_H^0}{P_H^0} [D_H^0 \varepsilon_H - S_H^0 \eta_H] + D_H^0 - S_H^0 = \frac{P_F - P_F^0}{P_F^0} [S_F^0 \eta_F - D_F^0 \varepsilon_F] + S_F^0 - D_F^0.$$

Noting that $D_H^0 - S_H^0 = S_F^0 - D_F^0$, we obtain :

$$\frac{P_H - P_H^0}{P_H^0} [D_H^0 \varepsilon_H - S_H^0 \eta_H] = \frac{P_F - P_F^0}{P_F^0} [S_F^0 \eta_F - D_F^0 \varepsilon_F].$$

Using the aggregated elasticities defined in Chapter 2, we have

$$\frac{P_F}{P_F^0} = - \frac{\mu_H (1 - t/P_H^0) - \chi_F}{\eta - \varepsilon} \frac{X_F^0}{D^0}.$$

Multiplying both sides by P_F^0 , a straightforward derivation yields :

$$\frac{\partial P_F}{\partial t} = \frac{\mu_H}{\eta - \varepsilon} \frac{X_F^0}{D^0} \frac{P_F^0}{P_H^0} < 0.$$

Assuming an initial tariff of zero, i.e. $P_F^0 = P_H^0$, we have :

$$\frac{P_F}{P_F^0} = - \frac{(1 - t/P_H^0) \mu_H - \chi_F}{\chi_F - \mu_H} = 1 + \frac{\mu_H}{\chi_F - \mu_H} \frac{t}{P_H^0}.$$

Assuming an initial tariff of zero and uniform elasticities across countries, the price and its derivative are given by :

$$P_F = P_F^0 + t \frac{\mu_H}{\eta_i - \varepsilon_i} \frac{X_F^0}{D^0},$$

$$\frac{\partial P_F}{\partial t} = \frac{\mu_H}{\eta_i - \varepsilon_i} \frac{X_F^0}{D^0} < 0.$$

Regarding total production Q , with an initial tariff of zero we have :

$$Q = Q^0 + \frac{-\frac{t}{P_H^0} \eta_i (S_H^0 \chi_F + S_F^0 \mu_H)}{\mu_H - \chi_F},$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \eta_i \frac{S_H^0 \chi_F + S_F^0 \mu_H}{\chi_F - \mu_H} \frac{1}{P_H^0}.$$

For emissions, using $E_i = e_i S_i$, we obtain the results presented in Chapter 2. In addition, assuming an initial tariff of zero and equal elasticities (i.e., $\eta_H = \eta_F = \eta_i$ and $\varepsilon_H = \varepsilon_F = \varepsilon_i$), we have :

$$E = E^0 + \frac{\frac{t}{P_H^0} \eta_i (E_H^0 \chi_F + E_F^0 \mu_H)}{\chi_F - \mu_H},$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \eta_i \frac{E_H^0 \chi_F + E_F^0 \mu_H}{\chi_F - \mu_H} \frac{1}{P_H^0}.$$

A.3 Variables

One can find here a list of the Variables used in the model from chapter 3, for more clarity.

TABLE A.1 – Récapitulatif des notations utilisées dans le modèle

Name	Description	Type
$\beta_*^* \geq 0$	preference parameter (exogenous)	Paramètre
$\kappa > 0 \neq 1$	elasticity of substitution between agr product	Paramètre
$\kappa_{\text{feed}} > 0$	elasticity of substitution between various feed crops	Paramètre
$\sigma^k > 0 \neq 1$	Armington elasticity of substitution	Paramètre
$\varepsilon > 0$	opposite of price elasticity of demand for the agricultural bundle	Paramètre
p_j^k and P_j^k	producer and consumer price	Variables
$\tau_{ij}^k \geq 1$	iceberg cost from i to j for k , here = 1	Paramètre
C_j^0	consumption of non-agr product, $P_j^0 = 1$	Variable
C_j^k	consumption	Variable
$x_j^{ak}, x_j^{\text{feed}^k}$	intermediate consumption of k by activity a	Variable
$x_j^k = x_j^{ak} + x_j^{\text{feed}^k}$	total intermediate consumption of k	Variable
μ_i^{feed}	conversion ratio	Paramètre
$A_i^0 > 0$	labor productivity (in money), equal to wages $A_i^0 = w_i$	Paramètre
N_i^*	labor demand i	Variable
r_i^k	per hectare land rents	Variables
s_i^k	share of field in country i allocated to k	Variable
Q_i^k	production	Variable
Q_i^a	level of activity of a	Variable
$Q_i^{al} Q_i^a$	production of output l , or main output through a	Variable
$\nu_i^{al} = Q_i^{al} / Q_i^a$	mass proportion of output l in the process a	Paramètre
y_i^k	yield parameter	Paramètre
Y_i^k	yield level	Variable
$\varsigma_i^k > 0$	yield elasticity	Paramètre
F_i^k	quantity of land-intensifying inputs	Variables
$a_i > 0$	behavioral Paramètre that governs the acreage elasticity	Paramètre
X_{ij}^k	volume of bilateral export between i and j for good k	Variable
E_i	expenditures	Variable
W_i	Wages	Variable
π_i^k	Real-profit per hectare (excluding the entropy term)	Variable
ϕ_i	Log-sum-exp of real profit	Variable

A.4 Répartition pays par régions

Régions	Pays
Central Americ and Carabians states - ACC	Antigua and Barbuda, Bahamas, Barbados, Belize, Costa Rica, Cuba, Dominica, Dominican Republic, El Salvador, Grenada, Guatemala, Haiti, Honduras, Jamaica, Netherlands Antilles, Nicaragua, Panama, Puerto Rico, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, Saint Vincent and the Grenadines, Trinidad and Tobago
China - CHN	China, mainland
East Asia - AE	China, Hong Kong SAR, China, Macao SAR, China, Taiwan Province of, Democratic People's Republic of Korea, Japan, Mongolia, Republic of Korea
Middel East - MO	Bahrain, Iran (Islamic Republic of), Iraq, Israel, Jordan, Kuwait, Lebanon, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Syrian Arab Republic, United Arab Emirates, Yemen
NA - NA	RoW
Non-UE European country - nUE	Albania, Bosnia and Herzegovina, Iceland, Montenegro, North Macedonia, Norway, Serbia, Switzerland, Turkey, Ukraine, United Kingdom
North America - AmN	Canada, Mexico, United States of America
North Sahara Africa - AfN	Algeria, Egypt, Libya, Morocco, Sudan, Tunisia
Oceania - Oc	Australia, Fiji, French Polynesia, Kiribati, New Caledonia, New Zealand, Samoa, Vanuatu
Russia and Independant States Community - RuCEI	Armenia, Azerbaijan, Belarus, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Republic of Moldova, Russian Federation, Tajikistan, Turkmenistan, Uzbekistan
South America - AmS	Argentina, Bolivia (Plurinational State of), Brazil, Chile, Colombia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Peru, Suriname, Uruguay, Venezuela (Bolivarian Republic of)
South Asia - AS	Afghanistan, Bangladesh, India, Maldives, Nepal, Pakistan, Sri Lanka
South Sahara Africa - AfS	Angola, Benin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Cabo Verde, Cameroon, Central African Republic, Chad, Congo, Côte d'Ivoire, Democratic Republic of the Congo, Djibouti, Eritrea, Eswatini, Ethiopia, Gabon, Gambia, Ghana, Guinea, Guinea-Bissau, Kenya, Lesotho, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mauritania, Mauritius, Mozambique, Namibia, Niger, Nigeria, Rwanda, Sao Tome and Principe, Senegal, Sierra Leone, Somalia, South Africa, South Sudan, Togo, Uganda, United Republic of Tanzania, Zambia, Zimbabwe
South-East Asia - ASE	Brunei Darussalam, Cambodia, Indonesia, Lao People's Democratic Republic, Malaysia, Myanmar, Papua New Guinea, Philippines, Singapore, Solomon Islands, Thailand, Timor-Leste, Viet Nam

UE - UE	Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden
---------	---

TABLE A.2 – Répartition des pays par région

A.5 Liste des biens et procédés

Catégories	Constituants
Rice - RIC	Rice and products
Wheat - WHE	Wheat and products
Cereals - CER	Barley and products, Rye and products, Oats, Millet and products, Sorghum and products, Cereals, Other
Maize - MAI	Maize and products
Potatoes and products - POT	Potatoes and products
Roots and tubers - R&T	Cassava and products, Sweet potatoes, Roots, Other, Yams
Sugar crops - SGC	Sugar cane, Sugar beet
Vegetables and fruits - V&F	Beans, Peas, Pulses, Other and products, Nuts and products, Onions, Vegetables, Other, Grapefruit and products, Apples and products, Pineapples and products, Dates, Grapes and products (excl wine), Fruits, Other, Hops, Pepper, Pimento, Cloves, Spices, Other
Soybeans - SOY	Soyabeans
Oil crops - OSD	Groundnuts, Sunflower seed, Rape and Mustardseed, Coconuts - Incl Copra, Sesame seed, Olives (including preserved), Oilcrops, Other
Cotton - COT	Seed cotton
Oil, palm fruit - OPF	Oil, palm fruit
Tomatoes and products - TOM	Tomatoes and products
Citrus fruits - CIT	Oranges, Mandarines, Lemons, Limes and products, Citrus, Other
Bananas - BAN	Bananas, Plantains
Crops, nec - OCR	Coffee and products, Cocoa Beans and products, Tea (including mate), Jute, Jute-Like Fibres, Soft-Fibres, Other, Sisal, Abaca, Hard Fibres, Other, Tobacco, Rubber

Fodder and grazing - F&G	Fodder crops, Grazing
Cottonseed - CTS	Cottonseed
Palm kernels - PAK	Palm kernels
Sugar and sweeteners - SUG	Sugar non-centrifugal, Sugar (Raw Equivalent), Sweeteners, Other
Vegetable oils - OIL	Soyabean Oil, Groundnut Oil, Sunflowerseed Oil, Rape and Mustard Oil, Cottonseed Oil, Coconut Oil, Sesameseed Oil, Olive Oil, Ricebran Oil, Maize Germ Oil, Oilcrops Oil, Other
Vegetable oils (palm) - OILP	Palmkernel Oil, Palm Oil
Oil cakes - CAK	Soyabean Cake, Groundnut Cake, Sunflowerseed Cake, Rape and Mustard Cake, Cottonseed Cake, Palmkernel Cake, Copra Cake, Sesameseed Cake, Oilseed Cakes, Other
Sectors to reclassify - Reclassify	Wine, Beer, Beverages, Fermented, Beverages, Alcoholic, Alcohol, Non-Food
Cotton lint - CTL	Cotton lint
Milk products, incl better and ghee - MBG	Milk - Excluding Butter, Butter, Ghee
Eggs - EGG	Eggs
Other animal products - OAP	Wool (Clean Eq.), Mutton & Goat Meat, Meat, Other, Offals, Edible, Fats, Animals, Raw, Hides and skins
Bovine meat - RAP	Bovine Meat
Pigmeat - PIAP	Pigmeat
Poultrymeat - POAP	Poultry Meat
To drop - DRO	Honey, Silk, Fish, Seafood

TABLE A.3 – Répartition des aliments par biens

Bien	Produit par	Utilisé dans
Bananas	Cultivation	Husbandry
Cereals	Cultivation	Husbandry
Citrus fruits	Cultivation	Husbandry
Cotton	Cultivation	Whole cotton plant process
Crops, nec	Cultivation	Husbandry
Maize	Cultivation	Husbandry
Oil crops	Cultivation	Oil production, Husbandry

Oil, palm fruit	Cultivation	Palm oil production
Potatoes and products	Cultivation	Husbandry
Rice	Cultivation	Husbandry
Roots and tubers	Cultivation	Husbandry
Soybeans	Cultivation	Husbandry, Soy oil production
Sugar crops	Cultivation	Sugar production, Husbandry
Tomatoes and products	Cultivation	Husbandry
Vegetables and fruits	Cultivation	Husbandry
Wheat	Cultivation	Husbandry
Bovine meat	Husbandry	Husbandry
Eggs	Husbandry	Husbandry
Milk products, incl better and ghee	Husbandry	Husbandry
Other animal products	Husbandry	Husbandry
Pigmeat	Husbandry	
Poultrymeat	Husbandry	
Vegetable oils	Oil production, Cotton seed oil and cake production, Soy oil production	Husbandry
Oil cakes	Oil production, Cotton seed oil and cake production, Soy oil production, Palmcake oil production	Husbandry
Palm kernels	Palm oil production	Palmcake oil production, Husbandry
Vegetable oils (palm)	Palmcake oil production, Palm oil production	Husbandry
Sugar and sweeteners	Sugar production	Husbandry
Cotton lint	Whole cotton plant process	
Cottonseed	Whole cotton plant process	Cotton seed oil and cake production, Husbandry

TABLE A.4 – Usage et origine des biens

A.6 Analyses des différents contrefactuels

A.6.1 Vues d'ensemble des échanges avant contrefactuels

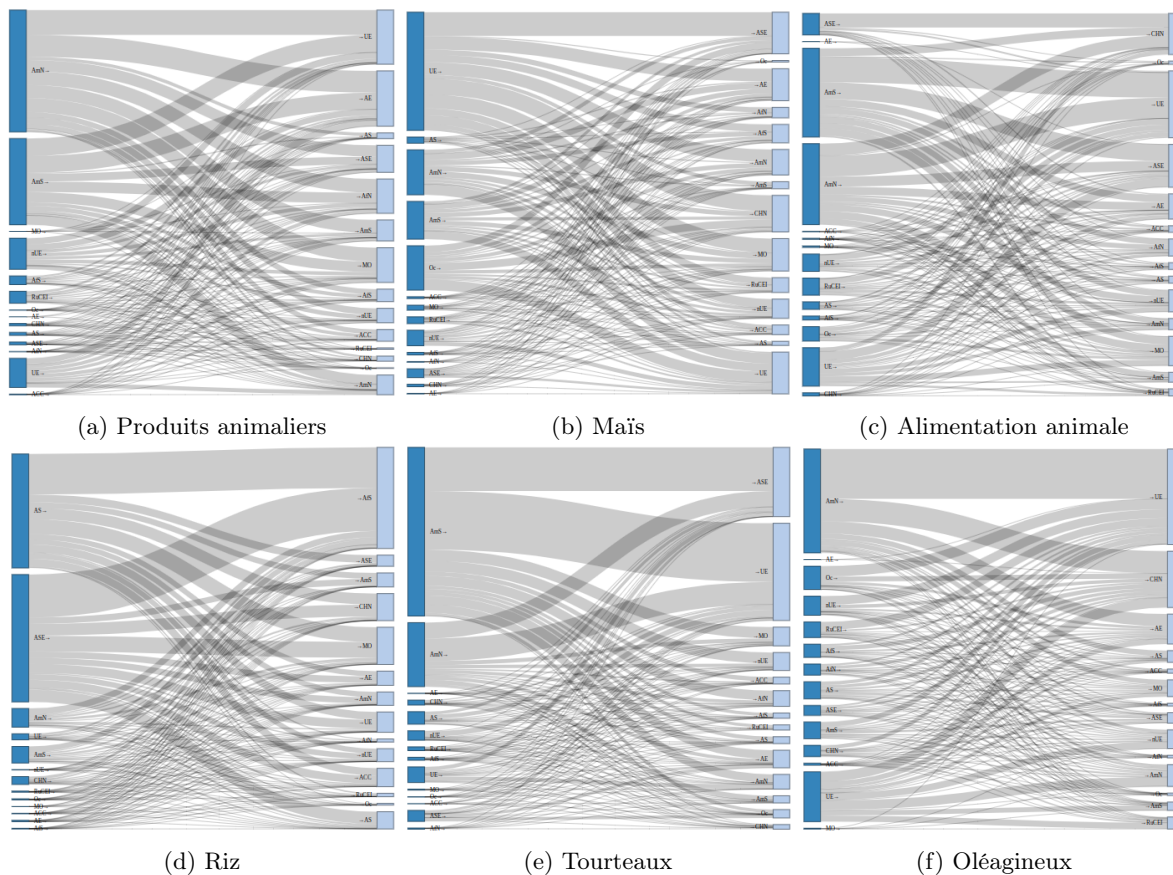


FIGURE A.1 – Diagrammes de Sankey des échanges entre régions

A.6.2 Vues d'ensemble des consommations avant contrefactuels

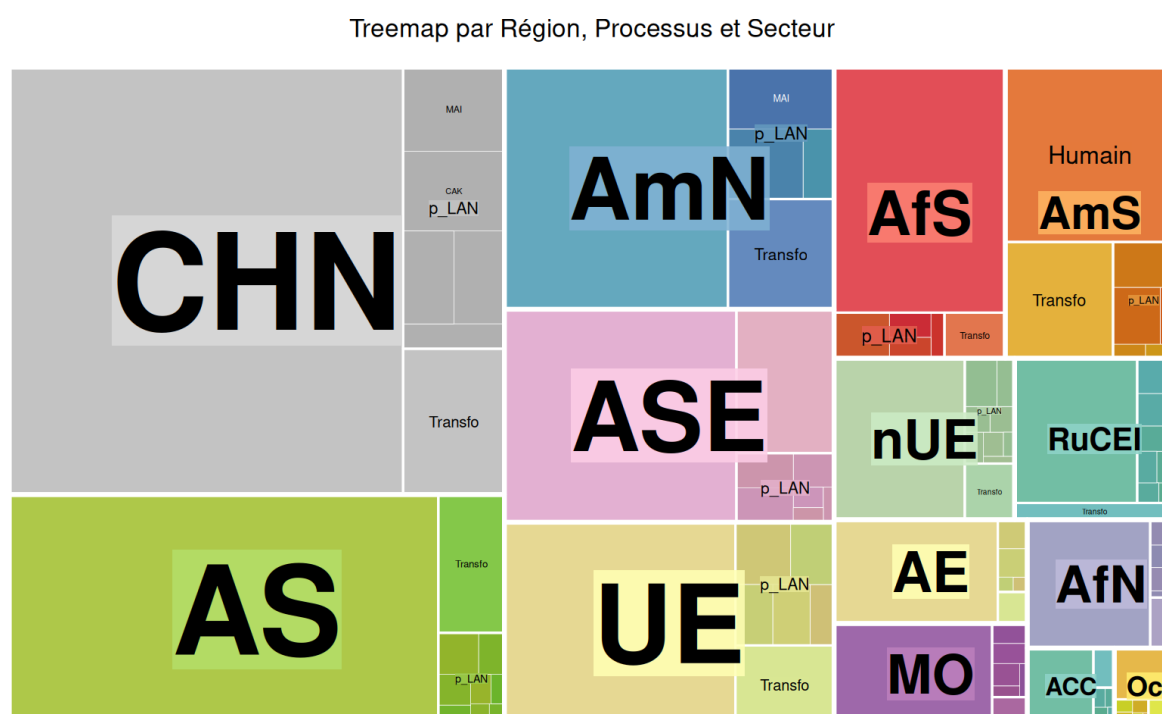


FIGURE A.2 – Répartition en valeur des consommations de biens non-animals à destination de l'alimentation humaine (grand sous-rectangle), des processus agro-industriels (transfo) et métabolique (p_LAN)