



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<sup>er</sup> mars au 31 août 2025.

Tuteur organisme : Christophe GOUEL  
Tuteur École : Franck LECOCQ

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modèle réduit</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modèle</b>	<b>5</b>
3.1	Setups . . . . .	5
3.2	Modèle en niveau . . . . .	5
3.2.1	Consommation . . . . .	5
3.2.2	Commerce . . . . .	6
3.2.3	Production . . . . .	7
3.2.4	Équilibres de marché . . . . .	9
3.3	Modèle en changement relatif . . . . .	10
3.4	Limites du modèle . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Implémentation</b>	<b>13</b>
4.1	Données et traitements . . . . .	13
4.1.1	Quantités - FABIO . . . . .	13
4.1.2	Prix - FAOSTAT – <b>à reprendre</b> . . . . .	14
4.1.3	Droits de douane - MAcMap . . . . .	16
4.1.4	Usage d'énergie et usage d'entrants - GTAP . . . . .	16
4.1.5	Émissions de GES - FAOSTAT . . . . .	17
4.1.6	Dépense nationale brute - Banque mondiale . . . . .	18
4.2	Paramètres de comportement . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Résultats</b>	<b>20</b>
5.1	Conséquence de la suppression des droits de douane . . . . .	20
5.1.1	Suppression des droits de douane d'un pays pour un bien . . . . .	20
5.1.2	Suppression de droits de douane dans tous les pays sur un seul ou groupe de biens . . . . .	21
5.1.3	Suppression de tous les droits de douane . . . . .	23
5.2	Sensibilité du modèle . . . . .	24
5.2.1	Sensibilité aux paramètres . . . . .	24
5.2.2	Sensibilité à la vitesse de convergence . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>25</b>
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>28</b>
A.1	Ouverture - effet d'une subvention sur les émissions des GES . . . . .	28
A.2	Détails calculs - intuitions droits de douane . . . . .	29
A.3	Variables . . . . .	30
A.4	Répartition pays par régions . . . . .	30
A.5	Liste des biens et procédés . . . . .	32
A.6	Analyses des différents contrefactuels . . . . .	35
A.6.1	Vues d'ensemble des échanges avant contrefactuels . . . . .	35
A.6.2	Effets de la libéralisation des échanges sur les produits animaliers en Asie de l'Est . . . . .	35

# Liste des tableaux

4.1	Biens et production . . . . .	14
4.2	Allocation des émissions . . . . .	17
4.3	Origine des paramètres . . . . .	18
5.1	Conséquence de la suppression des droits de douane liés à chaque bien. . . . .	21
5.2	Influence de la modification des paramètre sur les résultats finaux. . . . .	24
A.1	Récapitulatif des notations utilisées dans le modèle . . . . .	30
A.2	Répartition des pays par région . . . . .	32
A.3	Répartition des aliments par biens . . . . .	33
A.4	Usage et origine des biens . . . . .	34
A.5	Changement de la production à destination de l'AE, pour les biens de la chaîne de valeur des produits animaliers. . . . .	36

# Table des figures

4.1	Diagramme de Sankey des échanges entre régions . . . . .	15
4.2	Carte de chaleur des droits de douane . . . . .	16
4.3	Carte de chaleur des émissions de GES des différentes productions . . . . .	18
A.1	Diagramme de Sankey des échanges entre régions . . . . .	35

# 1. Introduction

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

Les politiques tarifaires appliquées aux produits agricoles modifient les flux commerciaux, la spécialisation productive, la localisation et l'intensité des émissions de gaz à effet de serre liées à l'agriculture. En protégeant certaines filières ou en restreignant les importations, les droits de douane peuvent avoir des effets indirects sur les émissions qui ne sont pas toujours intuitifs.

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, basé sur 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 et GTAP. 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 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 de pâture aux animaux.

Ce modèle permet donc de voir les effets des droits de douane sur les émissions de GES. D'autres papiers étudient les impacts de politiques publiques et commerciales sur les émissions de GES du secteur agricole. LABORDE et al. 2020 étudie l'impact des programmes de soutien, tels que les subventions à la production, les distorsions de prix aux frontières ou encore les investissements dans les technologies visant à réduire les émissions de GES du secteur. CARTER et STEINBACH 2020 analyse les effets à court terme des droits de douane de rétorsion sur les exportations agricoles et alimentaires des États-Unis, la conclusion de ce papier est que e

La littérature existante témoigne aussi de modèle d'équilibre liant agriculture et commerce. **biblio modèle commerce et ag**

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 l'implémentation 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  $\eta_i$  ainsi que  $\varepsilon_i$  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 tarifs douaniers 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 tarifs douaniers sur les émissions totales est ambigu ; des émissions nationales plus importantes  $E_H^0$  augmentent la probabilité que l'augmentation des droits de douane augmente les émissions globales.

Voir annexe A.2 pour le détail des calculs et pour des cas particuliers.

## 3. Modèle

[Bon faut que j'explique pourquoi on utilise un modèle aussi gros pour répondre à la question, #tristitude. "Un peu de discussion sur les choix de modélisation et leur importance serait bienvenue (dedans ou à l'oral). Un autre point qui manque encore est de clarifier la question à laquelle vous souhaitez répondre, et qui justifie pourquoi vous vous embêtez à construire cet énorme modèle, et qui éclaire aussi les choix de modélisation que vous avez faits."]

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 secteurs.

### 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,  $k = g$  l'herbe,  $k_c \in \mathcal{K}^c$  les cultures ( $\mathcal{K}^c \in \mathcal{K}$ ), et  $k_{nc} \in \mathcal{K}^{nc}$  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 qui peuvent être exportés, l'herbe n'étant pas exportable, elle ne fait pas partie de cet ensemble, elle n'est utilisée que pour l'alimentation de l'élevage. Les prix de production sont notés en minuscule, tandis que les prix de consommation le sont en majuscule. **s'occuper de la cohérence kc, et grasse et export, et blablabla**

Pour plus de clarté, 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.

*Considérons une demande pour les biens agricoles non-élastique aux revenus*<sup>1</sup>.

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  $\beta_j^k$  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  $j$   $\tau_{ij}^k$  et  $T_{ij}^k$  la puissance du droit de douane. Le prix dans le pays  $j$  du 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  $j$ ,  $X_j^k$  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,  $C_j + x_j = X_j = X_{jj}$ )

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

---

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

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,  $L_i$  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 et 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 de la quantité d'intrants apportée

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

avec  $\varsigma_i^k > 0$  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

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

et nous permet de réécrire l'expression du profit réel  $\pi_i^k$ , comme

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

Étant donné que  $a_i$  caractérise en partie l'élasticité des surfaces cultivées, et que l'on a  $\varsigma_i^k$  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  $\pi_i^k$  comme étant égal à  $(\ln s_i^k + \phi_i) / a_i$ , ce qui donne en remplaçant dans la première expression de  $\pi_i^k$ , 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-industriel. 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  $a$

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

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  $x_i^{\text{feed}}$  et d'un paramètre d'assimilation par les organismes (i.e. le nombre d'unités de nourriture nécessaire pour produire une unité du bien  $k$ ),  $\mu_i^{\text{feed}}$

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

où  $Q_i^a$  correspond au niveau d'activité du procédé,  $\nu_i^{al}$  correspond au taux d'efficacité,  $x_i^{\text{feed}}$  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  $\kappa_{\text{feed}}$  l'élasticité de substitution entre aliments, et  $\beta_i^{k,\text{feed}}$  un paramètre technique.

Ce qui donne, en minimisant les coûts de nourriture

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

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

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

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

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

**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  $\mu_i^{\text{feed}}$  par 1, et l'agrégat d'inputs  $x^{\text{feed}}$  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 non-profit conduit à

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

ce qui donne

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

Par convention, chaque activité est associée à un output principal tandis que les autres sorties sont secondaires (e.g. dans le cas du traitement des oléagineux, il s'agit de l'huile.). Les autres sorties (dans l'exemple, les tourteaux) sont déterminées à partir des conditions du premier ordre. En indexant par **1** 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 évaluer l'ensemble des imports (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

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

**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  $\beta$ , 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 non-profit

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

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

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

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

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

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

#### Condition d'équilibre de marchés

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

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

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

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

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

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

### Condition du premier ordre

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\hat{F}_i^k : \hat{F}_i^k = \hat{Q}_i^k (\hat{s}_i^k)^{-1/(1+\varsigma_i^k)}, \quad (3.59)$$

$$\pi_i^k t : \hat{Q}_i^k = \hat{s}_i^k (\hat{p}_i^k)^{\varsigma_i^k}, \text{ for } k \in \mathcal{K}^c. \quad (3.60)$$

### Équation de compatibilité

$$**\hat{E}_i : E_i \hat{E}_i = W_i \hat{W}_i N_i + r_i \hat{r}_i L_i + \sum_{k \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{J}} \left( \hat{X}_{ji}^k X_{ji}^k - \hat{X}_{ij}^k X_{ij}^k \right), \quad (3.61)$$

$$**\hat{r}_i : r_i \hat{r}_i = W_i t \sum_k s_i^k t (\pi_i^k t - a_i^{-1} \ln s_i^k t), \quad (3.62)$$

$$\hat{Q}_i^k : Q_i^k \hat{Q}_i^k = \sum_{a|k \in \mathcal{O}(a)} Q_i^{ak} \hat{Q}_i^{ak}. \quad (3.63)$$

\*\* 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 1990-2019<sup>2</sup>. 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 de 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 ( $\kappa$  et  $\kappa_{\text{feed}}$ ), mais aussi de la production ( $\zeta_i^k$ ). Actuellement, le modèle considère, par exemple que la substitution entre une aubergine et une tomate est la même pour les consommateur-ice-s 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.

**Changement de méthode de culture** [Je sais pas quoi écrire encore dessus, mais voilà on est là.]

**Modélisation des produits animaliers** [En l'état actuel on ne prend pas en compte que la prod de viande ou œufs et laits inclus une qtt minimale de production d'abats, peaux et autres. On ne considère pas qu'on a des produits primaires et secondaires.]

**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<sup>3</sup>. **J'ai pas trouvé de papier sur, nullll, quelle part des émissions de l'agr incombent aux transports inter des transports. j'ai 10 % en tête sur tous les transports hors ferme, mais j'ai rien trouvé, bouhh**

---

2. 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.

3. 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

## 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, afin que l'élasticité  $\varepsilon$  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 totale<sup>1</sup>, 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 FABIO<sup>2</sup>, et dans GTAP<sup>3</sup>, n'a pas de sens géographique ou politique<sup>4</sup>.

#### 4.1.1 Quantités - FABIO

Les données relatives aux quantités produites, consommées et échangées proviennent du modèle FABIO. Les données brutes<sup>5</sup> 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 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 inconsistance 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)<sup>6</sup>. 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  $z$ <sup>7</sup>.

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 de soustraire 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 production

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 – à reprendre

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  $z$

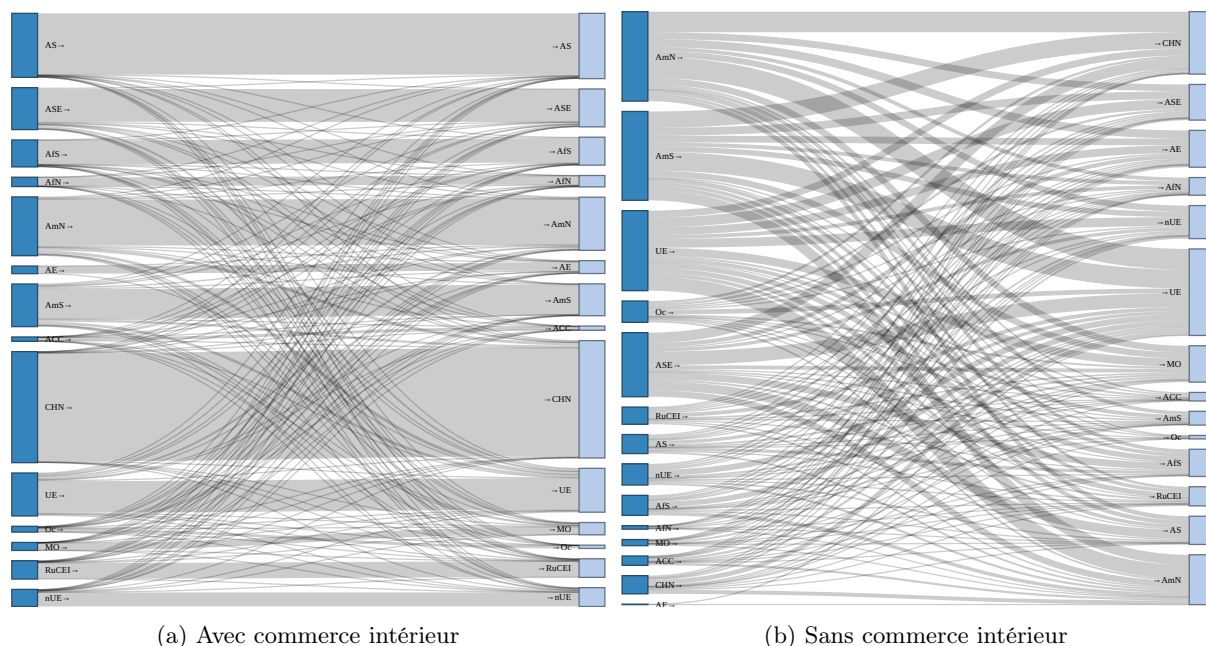


FIGURE 4.1 – Diagramme de Sankey des échanges entre régions

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 commerce<sup>8</sup>.

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'écart-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 multiplicateur par le prix moyen présent dans nos données du bien à l'échelle FABIO, puis par le prix

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

moyen à l'échelle du bien de notre modèle et enfin par le prix moyen mondial de ce bien à l'échelle du modèle. **Revenir sur ce paragraphe qui est sûrement incompréhensible...**

### 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 émoullées en considérant que ces pays échangés dans les mêmes proportions que le monde entier. Ce traitement nous permet donc d'accéder aux valeurs de  $T$  dans notre modèle. Les figures 4.2<sup>9</sup> montre les valeurs de droits de douane moyens entre les régions et par produits.

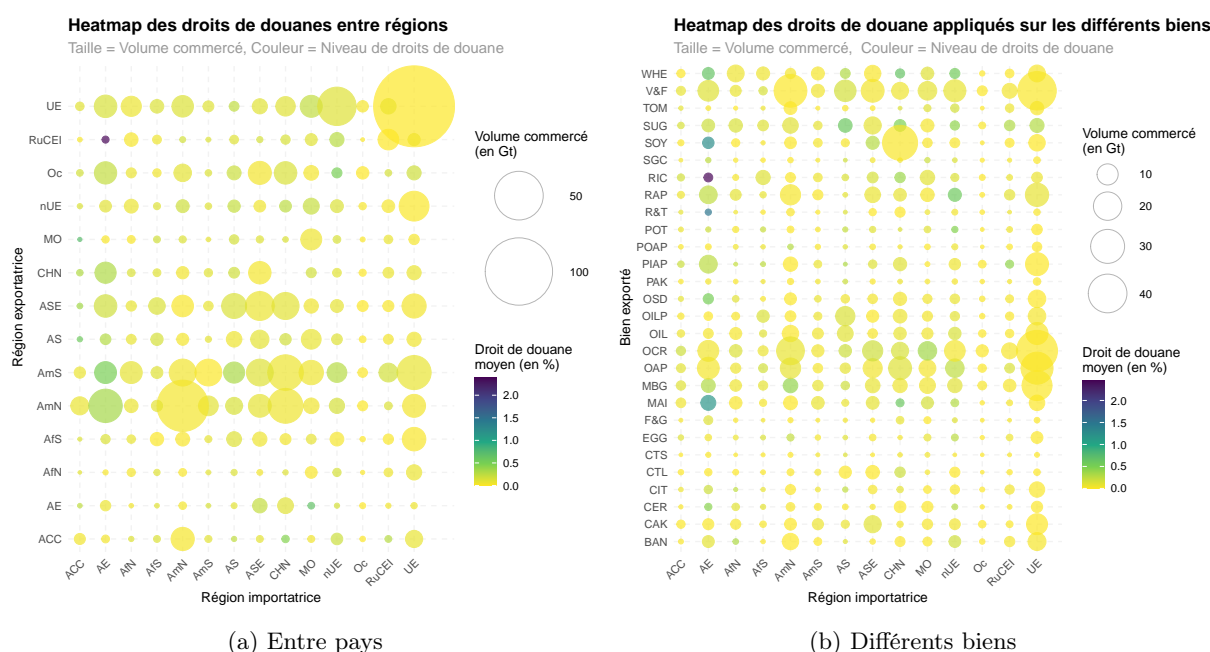


FIGURE 4.2 – Carte de chaleur des droits de douane

Comme on peut le voir sur la sous-figure de gauche 4.2a, il y a des droits de douane et des quantités importées au sein même de nos régions, cela est dû au fait que nos régions sont des agrégats, ainsi ici seule la Chine (CHN) qui est notre seule région-pays, n'a pas de droits de douane en elle. Dans le modèle, nous ajustons donc avant tout calcul ces valeurs à zéro.

### 4.1.4 Usage d'énergie et usage d'entrants - GTAP

Nous avons récupéré de la base de donnée GTAP 11<sup>10</sup>, les informations concernant le coût de la terre, l'usage de fertilisants (nous avons réalloué ceux alloués aux bêtes, au fourrage, étant donné que dans notre modèle, les animaux, n'occupent de l'espace que par ce qu'ils mangent), 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 à prix de la terre et à l'usage d'entrants, 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 transformations 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 <sup>a</sup> (en %)
Fermentation entérique	CH <sub>4</sub>	Taille du cheptel	30.5
Fumier sur pature	N <sub>2</sub> O	Taille du cheptel	8.7
Gestion des fumiers	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Taille du cheptel	4.4
Épandage de fumier sur culture	N <sub>2</sub> O	Taille du cheptel	1.4
Usage d'énergie à la ferme	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Surface	10.9
Sols organiques drainés	N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>	Surface	10.4
Culture du riz	CH <sub>4</sub>	Surface (riz)	7.5
Émissions des fertilisant	N <sub>2</sub> O	Fertilisants	13.2
Usage d'énergie pour la transformation	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Quantités produites	10.3
Résidus de cultures	N <sub>2</sub> O	Quantités produites	2.2
Brulage de résidus de cultures	N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>	Quantités produites	0.4

<sup>a</sup> En utilisant les potentiels de réchauffements présentés dans le rapport AR6 du GIEC, i.e. 27 pour CH<sub>4</sub> et 273 pour N<sub>2</sub>O. Les pourcentages ne somment pas à 100 à cause des arrondis.

Parallèlement, la figure suivante 4.3 suivant 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<sup>11</sup>.

11. *Pour en témoigner nous avons représenté cette même figure côté consommation en annexe ??*

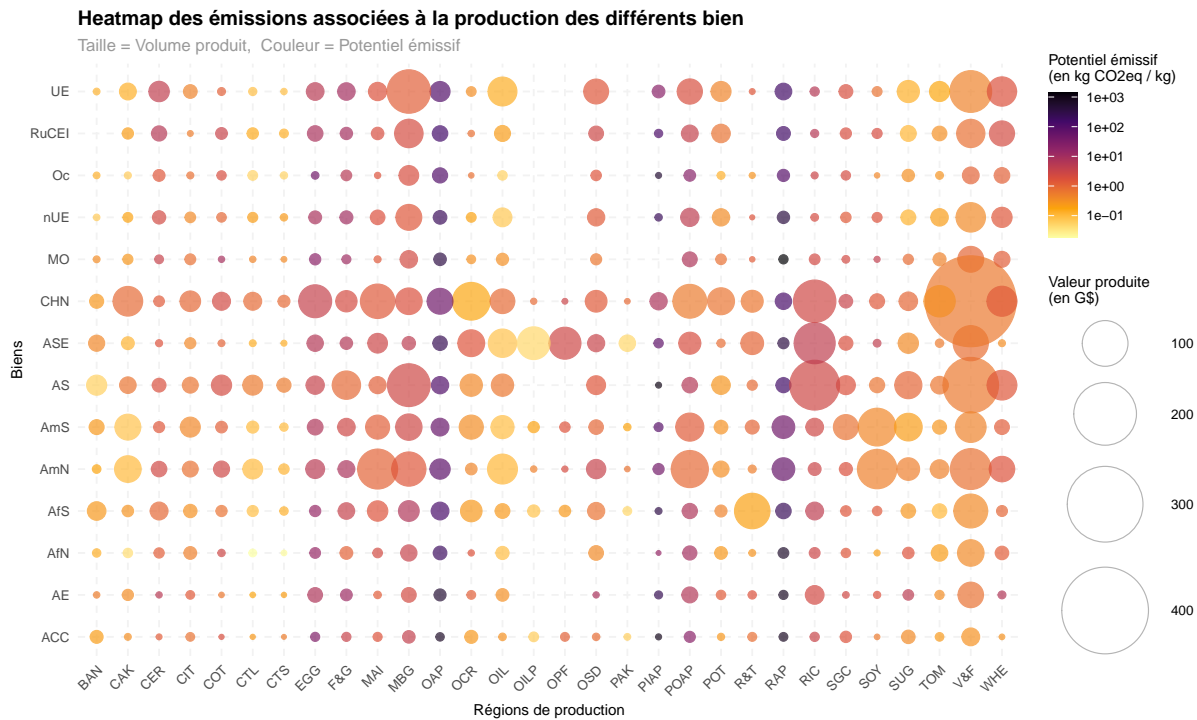


FIGURE 4.3 – Carte de chaleur des émissions de GES des différentes productions

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 constants<sup>12</sup>. 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 RUDE et MEILKE 2000
$\kappa_{\text{feed}} = 0,9$	de substitution dans l'alimentation animale	RUDE et MEILKE 2000
$\varsigma_i^k = 0,25$	prix rendement des cultures	KEENEY et HERTEL 2009
$\sigma^k \in [2,6, 10]$	de substitution d'Armington	GTAP AGUIAR et al. 2022, COSTINOT, DONALDSON et SMITH 2016

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 deux choses, d'abord que l'alimentation animale est constitués 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 que

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

pour son apport calorique. Le choix de l'élasticité  $\varsigma$  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.

Les valeurs des élasticités de substitution d'Armington proviennent de la base de données GTAP<sup>13</sup>. 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.

---

13. 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 files dans cette situation contrefactuelle et déduire de l'impacte des droits de douane.

La suppression des droits de douane dans notre modèle, avec le paramétrage présenté, augmente les droits de douane de l'ensemble du secteur d'environ 6,1 %<sup>1</sup>.

Cherchons à décomposer les différents effets en jeu ici. Dans notre modèle réduit du chapitre 2 nous concluons que les émissions varient avec les droits de douane selon 2.13<sup>2</sup>, c'est-à-dire qu'elles augmentent avec l'introduction d'un droit de douane si les émissions du pays producteurs 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'un pays pour un bien

Choisissons de retirer les droits de douane, d'un pays et d'un bien vers un autre pays moins émetteur 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 animaliers. Nous choisissons donc de faire une première décomposition, en retirant les droits de douane à l'import de produits issus de l'élevage en Asie de l'Est.

L'équilibre atteint après avoir changé les droits de douane conduit à une faible réduction de 0,32 % 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 5,2 %, celles de nos trois régions exportatrices ont elles similairement augmenté de 0,5-0,6 %.

Concernant les productions, on constate<sup>3</sup> une diminution en Asie de l'Est, des produits animaliers (tous de -5,3 %<sup>4</sup>), ainsi que les biens utilisés pour l'alimentation animale (tourteaux -6,8 %, fourrage -1,6 %). En parallèle, on observe une réduction de l'import de biens servant (directement ou non) à l'alimentation animale, de 9 % pour le soja, de 8 % pour les tourteaux et de 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 réduction de l'import de produits animaliers venant des autres régions, allant pour les produits animaliers de 20 % (pour la viande rouge) à 62-66 % (pour le

---

1. Cf. 5.2.2

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

3. Cf. annexe A.6.2 pour tableau de résultats

4. Les biens sont, dans notre modèle, tous issus du même processus, ils évoluent donc conjointement.

porc) (on observe même une réduction de près de moitié pour le sud-américain), et allant de 10 à 4 % pour leur alimentation.

Parallèlement, on observe une diminution des prix à la consommation allant de 18 % à 7 % 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'est 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. 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 les animaliers 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.

TABLE 5.1 – Conséquence de la suppression des droits de douane liés à chaque bien.

	MAI	RIC	WHE	CAK	CER	SOY	V&F	R&T	POT
$\Delta$ des émissions totales	+1,4	+0,41	+0,19	+0,127	+0,047	+0,045	+0,036	+0,025	+0,024
$\Delta$ du prix de l'alimentation animale	[-21 ; +3,3]	[-2,3 ; +4]	[-3,8 ; +5]	[-1,7 ; +0,3]	[-1,2 ; +1,3]	[-4,9 ; +4,1]	[-0,7 ; +0,47]	[-1,1 ; +0,6]	[-0,5 ; +0,04]
Nbr de régions avec $\partial E / \partial t > 0$	5	11	8	7	9	4	8	12	6
Nbr de régions avec $\partial P_{\text{feed}} / \partial t > 0$	11	12	10	8	9	12	6	9	3

	OSD	SUG	OCR	OIL	BAN	CIT	CTS	PAK	COT	OPF	CTL	TOM	SGC	OILP
$\Delta$ des émissions totales	-0,111	-0,09	-0,017	-0,008	0 <sup>-</sup>	0 <sup>-</sup>	0 <sup>-</sup>	0 <sup>-</sup>	0 <sup>-</sup>	0 <sup>-</sup>	0 <sup>-</sup>	0 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>
$\Delta$ du prix de l'alimentation animale	[-1,5 ; +0,2]	[-0,3 ; +1,7]	~0	~0	~0	~0	[0 ; +0,3]	~0	0	0	0	[-0,18 ; 0 <sup>+</sup> ]	~0	~0
Nbr de régions avec $\partial E / \partial t > 0$	10	3	0	9	3	3	0	1	0	0	0	3	4	6
Nbr de régions avec $\partial P_{\text{feed}} / \partial t > 0$	11	11	9	4	8	4	13	1	0	0	0	1	4	13

Pour assurer la convergence de cette simulation, il a fallu d'abord libéraliser les importations n'allant pas en Asie de l'Est, puis réduire progressivement les droits de douane appliqués par la région.

Les colonnes sont classées selon leur impact sur les émissions totales.

Les valeurs telles quelles ne sont pas significatives, nous nous intéressons plutôt au signe.

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 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<sup>-</sup>), 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 lié à l'usage du sol et de fertilisants (cf. 4), on explique facilement l'augmentation de +20 % des émissions de GES lié 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<sup>-</sup>), 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 droits les droits de douane de tous les pays sur les oléagineux et étant donné qu'ils permettent la production de tourteaux, on s'attendrait à observer une substitution dans les échanges entre les deux, en faveur des oléagineux. **blabla**

### **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 utilisées 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 %. Intuitivement, le prix de la production et à la consommation des produits issus de l'élevage sont réduits, mais les autres aliments aussi et étant donné l'élasticité  $\kappa$ , l'alimentation humaine ne va pas autant être modifiée en faveur de la viande, il faut garder une diversification alimentaire.

Les résultats montrent bien une augmentation des

## 5.2 Sensibilité du modèle

### 5.2.1 Sensibilité aux paramètres

dis moi si tu pense que ça n'a aucun sens comme changement, plz

TABLE 5.2 – Influence de la modification des paramètre sur les résultats finaux.

Paramètre changé	Asie de l'Est et produit animalier ??	Maïs ??	Libéralisation totale
$\emptyset$			
$\kappa = 0.1$			
$\kappa = 2$			
$\kappa_{\text{feed}} = 0.1$			
$\kappa_{\text{feed}} = 2$			
$\sigma = 10$			
$\varsigma = 1$	(je sens y va rien se passer)		

### 5.2.2 Sensibilité à la vitesse de convergence

Pour faire converger le modèle vers une solution, nous opérons une suite d'équilibres intermédiaires représentant chacun un niveau de douane réduit. Nous ne pouvons, en effet actuellement pas atteindre l'équilibre fil correspondant à une absence de droits de douane directement à partir de l'équilibre initial, le solveur (*mcp* ou *cns* de GAMS<sup>5</sup>) ne trouve pas de solution. Une première solution consiste à succéder une suite de chocs de -1 % (ou de -0,5 %) de droits de douane. Ce résultat nous conduit à une augmentation totale des émissions de 6,7 %. À l'inverse, une évolution plus brusque de sept chocs de 10 % jusqu'à -70 %, puis de chocs de 4 % jusqu'à la suppression totale des droits de douane conduit à une augmentation de 6,27 %.

Cette observation témoigne en partie de l'importance du rythme d'application de politique dans leur impact. Ici, un changement plus brutal conduit à une moindre évolution de notre système. **Trouver des papiers qui parlent du rythme d'implantation, dans son impact.**

**Faire un graphe montrant en abscisse % de droits de douane en -, et en ordonnée % de GES en +, sauf que gams, et je sais pas comment stocker les valeurs intermédiaires d'une boucle. Demander à CG**

---

5. Allez voir si y a pas des trucs écrits dans le cours de CG. Ou dans doc GAMS...

## 6. Conclusion

blablabla

+6-7 % d'émissions en supprimant les droits de douane. Sans les boissons qui sont pas mauvaises non plus en terme d'émissions, mais bon elles représentaient 3 % des données de bases donc peut-être qu'on aurait vite fait 5 % de 6 pourcent d'émissions en plus, soi pas grand-chose.

**Autres politiques** Nous pouvons aussi nous intéresser aux effets d'autres politiques sur les émissions de GES du secteur. Par exemple, regardons l'effet des subventions à la production sur les émissions de GES. L'annexe A.1 expose à la manière du chapitre 2 l'effet d'une politique de subvention à la production.

Possibilité de mettre en place une taxe carbone aux frontières, qui est une sorte de droit de douane spécial carbone. 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 carbone. La mise en place d'une taxe carbone aux frontières devrait donc avec dans notre modèle en l'état conduire à une diminution de l'usage des entrants. **Article de Laborde et al 2020 sur les subventions à la prod et leurs impacts**

parler de l'article lu dans le cours de deCara sur les méthodes de prod et em Frank et al, je crois. + trouver article sur taxe carbone aux frontières (+ faire un mini modèle qui donne une intuition là-dessus)

écrire remarque sur les gens qui disent que le commerce c'est cool parce que ça permet d'optimiser les prod, de telle sorte que chaque pays produit ce qu'il fait de mieux, et avec un peu de chance, on vérifie bien que coûte moins cher = utilise moins d'entrant, et les entrants sont émissifs (énergie, fertilisants, qtt d'inputs), et donc là avec les droits de douane, on va plus produire chez soit donc on n'optimise pas sur ce point #rip

# 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).
- CARTER, Colin et Sandro STEINBACH (mai 2020). *The Impact of Retaliatory Tariffs on Agricultural and Food Trade*. DOI : [10.3386/w27147](https://doi.org/10.3386/w27147).
- 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).
- 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).
- 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/aepp/ppq007](https://doi.org/10.1093/aepp/ppq007).

- LABORDE, David et al. (mai 2020). *Modeling the Impacts of Agricultural Support Policies on Emissions from Agriculture*. DOI : [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.
- 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](#).
- 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.

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
$\mu_i^{\text{feed}}$	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
$\pi_i^k$	Real-profit per hectare (excluding the entropy term)	Variable
$\phi_i$	Log-sum-exp of real profit	Variable

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

### A.4 Répartition pays par régions

<b>Régions</b>	<b>Pays</b>
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

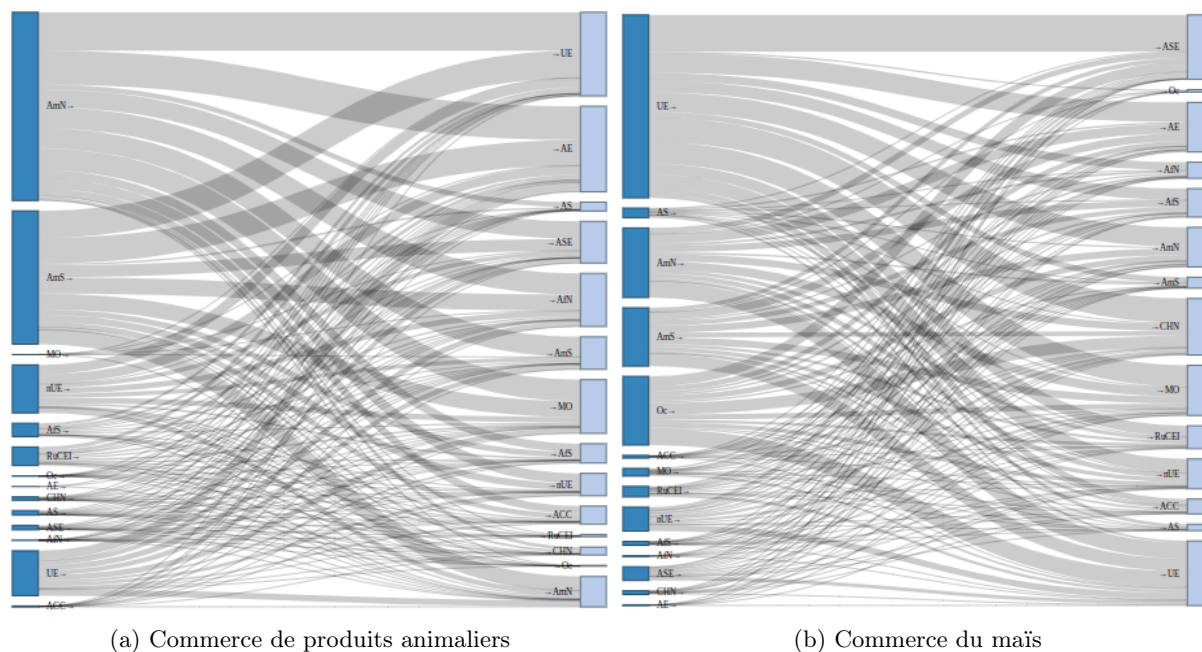


FIGURE A.1 – Diagramme de Sankey des échanges entre régions

### A.6.2 Effets de la libéralisation des échanges sur les produits animaliers en Asie de l'Est

Region productrice	EGG	MBG	OAP	PIAP	POAPRAP	CAK	F&G	MAI	PAK	SOY
<b>ACC</b>	9.7 (1.05)	-49.1 (18)	7.3 (4.64)	-65.2 (0.86)	7.6 (2.28)	-25.3 (35)	-8 (1.81)	-5.3 (13)	-7.4 (0)	
<b>AE</b>	-5.3 (5717)	-5.9 (5791)	-5.1 (2943)	-6.5 (594)	-5.3 (7302)	-5.7 (1072)	-6.8 (2358)	-1.7 (2803)	-0.8 (422)	-0.8 (325)
<b>AS</b>	11.5 (13)	-49.1 (4.79)	7.5 (28)	-62 (0.03)	6.4 (1.29)	-24.3 (306)	-7.9 (55)	-5.3 (55)		-8.3 (7.69)
<b>ASE</b>	11.1 (13)	-49.2 (6.72)	7.8 (38)	-62.8 (1.16)	6.7 (203)	-26.2 (15)	-8 (264)	-5.4 (51)	-7.4 (0)	-7.6 (0.09)
<b>AfN</b>	11.2 (1.36)	-49.2 (7.6)	7.8 (1.84)		6.8 (0.65)	-26.6 (0.16)	-8.1 (2.84)	-5.4 (1.55)		
<b>AfS</b>	10.8 (2.79)	-49.1 (19)	7.7 (8.39)	-64.7 (0.87)	7.8 (10)	-26.7 (20)	-7.7 (27)	-5.3 (143)	-7.3 (0)	-8.2 (7.08)
<b>AmN</b>	80.9 (35)	302 (128)	9.1 (294)	57 (120)	11.7 (982)	139.3 (443)	-8.2 (293)	-5.6 (1973)		-8.5 (1719)
<b>AmS</b>	178.8 (3.27)	790.1 (88)	10.4 (100)	-44.6 (35)	9.1 (730)	-18.7 (680)	-8.1 (773)	-5.6 (1500)		-8.4 (1439)
<b>CHN</b>	12 (18)	-49.2 (1.3)	7.8 (1.76)	-62.6 (7.36)	6.6 (67)	-26.5 (0.63)	-8.1 (22)	-5.4 (38)		-8.4 (1.09)
<b>MO</b>	8.9 (5.04)	-49 (80)	6.6 (1.97)	-65.3 (0.07)	7.6 (12)	-26.5 (2.79)	-8 (2.02)	-5.3 (0.22)		
<b>Oc</b>	7.7 (0.53)	-48.5 (457)	6.4 (158)	-65.6 (0.85)	3.5 (12)	-24.2 (429)	-7.1 (0.87)	-5.1 (3.61)		-7.6 (0.05)
<b>RuCEI</b>	10.8 (14)	-49 (72)	7.5 (21)	-63.8 (4.91)	7.2 (40)	-26.2 (35)	-7.9 (8.85)	-5.2 (184)		-8.3 (7.09)
<b>UE</b>	75.7 (218)	32 (1677)	8.6 (513)	47.5 (281)	9.8 (871)	-3.6 (573)	-8.3 (72)	-5.7 (525)		-9 (13)
<b>nUE</b>	9.1 (49)	-48.9 (128)	7.4 (42)	-64.8 (5.26)	7.1 (173)	-26.1 (34)	-8.2 (11)	-5 (519)		-8.2 (45)

TABLE A.5 – Changement de la production à destination de l'AE, pour les biens de la chaîne de valeur des produits animaliers.

Entre parenthèse, niveau de production avant contrefactuel en valeur, au-dessus variations en %.