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 1er mars au 31 août 2025.

Tuteur organisme : Christophe GOUEL

Tuteur École : Franck LECOCQ

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Chapitre 1

Introduction

L'objectif de ce mémoire, et d'étudier les effets des droits de douane existants sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le secteur agricole. Pour se faire nous nous intéresserons à un modèle de commerce de denrées agricoles. Ce modèle est un modèle d'équilibre partiel, basé sur le modèle présenté dans Gouel et Laborde 2021, et utilisant les traitements de données permis par la base de données 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 régits par des équations de productions différentes : les cultures suivant une fonction de rendement isoélastique et tandis que leur répartition sur l'espace agricole disponible est régi par une fonction d'entropie multilogit, les deux autres secteurs sont produits à partir des cultures, selon des fonctions de production Léontief. La demande dans ce modèle suit une fonction à élasticité de substitution constante (CES), dépendant entre autre du pays d'origine. Le commerce n'est soumis à aucun pris iceberg, mais à des droits de douane. Nous ne prenons pas en compte les effets de changement d'usage des sols, malgré son impact important sur les émissions de GES, la quantité de terres cultivées est donc absorbée par les prairies qui servent de pâture aux animaux.

Ce modèle permet donc de voir les effets des droits de douanes sur les émissions de GES. D'autres papiers comme **balabla lit sur les autres papiers qui parlent de ges et droits de douanes**

La littérature existante témoigne aussi de modèle d'équilibre liant agricultures et commerce.

Pour réaliser cette étude, nous considérons les surfaces agricoles constantes, i.e. nous ne considérons pas les forêts, et la possibilité qu'elles changent de taille ici, c'est-à-dire que nous n'évaluons pas l'impact que l'agriculture peut avoir sur les couverts forestiers et donc 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 l'implémentation de politiques agricoles affecte, par le biais des équilibres de marché, les émissions de GES. Ensuite le chapitre suivant 3 présente quant à lui le modèle d'équilibre partiel utilisé pour mener notre étude, ce modèle inclus de nombreux pays et secteurs. Il se base sur celui présenté dans les papiers de Gouel et Laborde 2021 et Gouel 2025, en utilisant, à la place de fonctions de distribution de Fréchet pour capturer l'effet de l'hétérogénéité des cultures sur les rendements, et une fonction de gestion multilogit qui témoigne de l'augmentation des coûts associée à une trop forte ou trop faible spécialisation des cultures, et une fonction isoélastique pour les rendements suivant Carpentier et Letort 2013. Le chapitre 4 décrit les données utilisées ainsi que leurs traitements pour intégration au modèle. Enfin, le chapitre 5 présente les résultats et donc les conclusions sur l'impact des politiques agricoles sur les émissions de GES au travers du commerce en agriculture.

Chapitre 2

Intuitions

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 douanes 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 :

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

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

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

$$D_H - S_H = S_F - D_F.$$

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

— élasticité de demande totale

$$\epsilon = \frac{\partial D}{\partial P_F} \frac{P_F^0}{D^0} = \left(\epsilon_H \frac{D_H^0}{P_H^0} + \epsilon_F \frac{D_F^0}{P_F^0}\right) \frac{P_F^0}{D^0} < 0,$$

— élasticité d'offre totale

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

— élasticité de la demande d'importation domestique

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

— élasticité de l'offre à l'exportation étrangère

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

Pour chaque politique on examine ses effets sur les émissions totales à travers leur impact sur les prix internationaux (prix du pays F) et sur la production totale.

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

$$P_H = P_F + t.$$

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

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

et varient négativement selon t :

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

La production totale des deux pays est donnée par

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

et varie selon

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

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 :

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

et donc

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

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 douanes augmente les émissions globales.

Voir annexe **??** pour le détail des calculs et pour des cas particuliers.

Chapitre 3

Modèle

Cette section présente le modèle de commerce agricole en équilibre partiel utilisé pour analyser l'impact des politiques sur les émissions de GES. Le modèle est basé sur Gouel et Laborde 2021, avec des fonctions multilogit remplaçant les fonctions de rendement de Fréchet initialement employées, comme décrit dans Gouel, Féménia et al. 2025. Alors que 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. À la place, une fonction de gestion — dans laquelle les coûts varient en fonction des différents niveaux de spécialisation — permet d'incorporer l'hétérogénéité.

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. Nous considérons un modèle en volume et non en valeur.

Pour plus de clarté, l'annexe A.2,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

$$U_j = C_j^0 + \beta_j^{1/\epsilon} \ln C_j, \tag{3.1}$$

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

Considérons une demande pour les biens agricoles non-élastique aux revenus [1].

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

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,

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

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

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

$$P_j : C_j = \beta_j (P_j)^{-\epsilon}, \tag{3.3}$$

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

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

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

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

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

La demande pour le bien extérieur découle de l'ensemble des consommations E_j, ce qui donne

$$C_j^0 : P_j^0 C_j^0 = E_j - P_j C_j. \tag{3.6}$$

3.2.2 Commerce

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

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

La quantité totale importée de biens k dans le pays j, X_j^k est donc 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 que les consommations nationales dans les imports, i.e. si le pays est en autarcie, $C_j + x_j = X_j = X_{jj}$)

$$P_j^k : X_j^k = C_j^k + x_j^k. \tag{3.8}$$

La condition de zéro profit permet d'exprimer la quantité de bien importé depuis chaque pays i

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

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

Les imports sont néanmoins contraints par la capacité à payer ces imports, l'ensemble des dépenses du pays étant égales à l'ensemble des revenus

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

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, et B_j la balance commerciale.

3.2.3 Production

On considère séparément 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 dépend de la surface allouée $s_i^k L_i$ et de la quantité d'entrant apportée

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

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 importants 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

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

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 dérivant 3.12 sous condition de $\sum_{k \in \mathcal{K}^c} s_i^k = 1$

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

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

$$s_i^k : s_i^k = \exp(a_i \pi_i^k - \phi_i). \tag{3.14}$$

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

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

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

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

Étant donné que a_i caractérise en partie l'élasticité des surfaces cultivées, et que l'on a ς_i^k l'élasticité de rendement, a_i vérifie

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

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

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

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

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

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 issus 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 $a =$ livestock, et dans la suivante $a \in$ veg-transfo.

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

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

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

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

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

Ce qui donne, en minimisant les coûts de nourriture

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

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

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

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

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

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

$$x_i^{ak} : x_i^{ak} = Q_i^a, \tag{3.24}$$

$$Q_i^{al} : Q_i^{al} = \nu_i^{al} Q_i^a, \tag{3.25}$$

$$N_i^a : N_i^a = A_i^a Q_i^a, \tag{3.26}$$

et la condition de non-profit conduit à

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

ce qui donne

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

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 $\mathbf{l}$ l'output principal, le processus est caractérisé par le système d'équations suivant :

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

$$Q_i^{al} : Q_i^{al} = \left(\nu_i^{al} / \nu_i^{a\mathbf{l}} \right) Q_i^{a\mathbf{l}}, \text{ for } l \neq \mathbf{l}, \tag{3.30}$$

$$N_i^a : N_i^a = A_i^a Q_i^{a\mathbf{l}} / \nu_i^{a\mathbf{l}}, \tag{3.31}$$

$$x_i^{ak} : x_i^{ak} = Q_i^{a\mathbf{l}} / \nu_i^{a\mathbf{l}}. \tag{3.32}$$

3.2.4 Équilibres de marché

Équilibre des biens

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

$$p_i^k : Q_i^k = \sum_{j \in \mathcal{J}} \tau_{ij}^k X_{ij}^k, \text{ for } k \neq 0. \tag{3.33}$$

Pour le bien extérieur, on a

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

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

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

Équilibre 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

$$W_i : N_i = \sum_a N_i^a. \tag{3.36}$$

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 paramétrés, ainsi nous n'avons pas besoin de calibrer des paramètres comme ceux de préférences β, car les préférences sont considérées identiques entre les situations de référence et contractuelles. L'implication directe d'une calibration en variation, et que si $x = 0$, alors $x' = 0$.

En posant $\alpha_j^{\text{C},k} = (P_j^k C_j^k)/(P_j C_j)$, $\alpha_j^{\text{feed},k} = (P_j^k x_j^{\text{feed},k})/(P_j^{\text{feed}} x_j^{\text{feed}})$ 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

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

$$\hat{Q}_i^0 : \hat{p}_i^0 = \hat{W}_i, \tag{3.38}$$

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

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

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

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

Condition d'équilibre de marchés

$$\hat{P}_j : \hat{C}_j = \hat{P}_j^{-\epsilon}, \tag{3.43}$$

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

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

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

$$\hat{P}_j^{\text{feed}} : \hat{x}_i^{\text{feed}} = \hat{Q}_i^{\text{livestock},\mathbf{l}}, \tag{3.47}$$

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

Condition du premier ordre

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

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

$$\hat{Q}_i^{al} : \hat{Q}_i^{al} = \hat{Q}_i^{a\mathbf{l}}, \text{ pour } l \neq \mathbf{l}, \tag{3.51}$$

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

$$\hat{x}_i^{ak} : \hat{x}_i^{ak} = \hat{Q}_i^{a\mathbf{l}}, \text{ pour } k \neq \text{livestock}, \tag{3.53}$$

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

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

$$\hat{s}_i^k : \hat{s}_i^k s_i^k = \exp\left(a_i \pi_i^k\prime - \phi_i\prime\right), \tag{3.56}$$

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

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

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

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

Équation de compatibilité

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

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

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

** 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 (**CITER DES GENS QUI L'ONT DIT**), l'impacte de ce changement d'usage des terres compte pour environ 1/3 des émissions totales du secteur (**CITER DES GENS**). 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 avec **blabla**. [Scott 2014 aussi]

Rotation intra-annuelle des cultures Certaines cultures combiné 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 **vérifier**, 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 (κ et κ_{feed}), mais aussi de la production (ς_i^k). Actuellement, le modèle considère, par exemple que la substitution entre une aubergine et une tomate est la même pour les consommateurices 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 différents conduisant à des rendements différents pour chaque culture ou élevage, comme dans Gouel et Laborde 2021. **vérifier que bien ce papier, ou bien un des papiers vus en cours** 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.**

Chapitre 4

Implémentation

4.1 Données et traitement

Le modèle est calibré sur des données de 2017, dernière année disponible dans les données GTAP.

4.1.1 Quantités et valeurs

Les données sont disponibles à l'échelle *cbs*, qui correspond à une agrégation partielle, qui est celle de la colonne de gauche de l'annexe (? ?).

4.1.2 Prix

Nous avons utilisé les données de prix issus des bases FAOSTAT sur les prix producteur et sur les quantités totales et en valeurs échangées, pour chaque culture et chaque pays en désagrégé. Les prix donnés par FAOSTAT sont à un niveau de désagrégation inférieur à celui des données disponibles avec FABIO, pour simplifier l'exposé nous nommerons ce niveau *item*. Une table de passage nous permet de passer de ces ? ? *item* à ? ? *cbs*.

L'utilisation de ces deux bases permet de recouvrir le plus de prix possible. Afin de s'assurer de la cohérence des prix, nous utilisons les données de production totale en quantité et en valeur des *items*, agrégées au niveau monde, ainsi nous récupérons un prix moyen pour chaque culture correspondant à la valeur totale produite sur la quantité totale produite, et nous assurons que les prix issus des données producteurs et des données de commerce, dans chaque pays ne sont pas trop éloignés 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 ;
— calculer la moyenne et l'écart type de la répartition de ces prix ;
— calculer pour l'ensemble des prix (pas uniquement les 80 % des prix les plus proches), l'écart à la moyenne en nombre d'écart-type ;
— calculer pour chaque pays l'écart-type moyen pour chaque pays, afin de déterminer si le pays a des prix habituellement élevés par rapport au prix mondiaux ;
— ne conserver que les prix ne s'éloignant pas de plus de deux écart-types en plus de leur écart moyen, calculé à l'étape précédente, des prix mondiaux.

On applique également ce tri, sur les prix agrégés au niveau supérieur des *cbs*. Ensuite, on agrège les prix restant au niveau des *cbs*.

4.2 Paramètres de comportement

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

Élasticité	**Description**	**Origine**
$\epsilon = 0.5$	opposé de prix de la demande pour le panier de bens 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
$\varsigma = 0.25$	prix rendement des cultures	KEENEY et HERTEL 2009
$\sigma_k \in [2.6, 10]$	de substitution d'Armington	GTAP AGUIAR et al. 2022

TABLE 4.1 – Origine des paramètres

Nous pouvons remarquer que l'élasticité de substitution entre les biens pour l'alimentation animal 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 pour son apport calorique.

Le choix de l'élasticité ς vient d'une moyenne des valeurs de l'étude GTAP MILLER 2009 qui porte sur les bio-carburants, idéalement la valeur aurait dû être différenciée entre les différentes cultures dans les différents pays pour exprimer les différentes rigidités dans chaque pays.

Les valeurs des élasticités de substitutions d'Armington, viennent quant à elles de la base de données GTAP [1].

1. AGUIAR et al. 2022.

Chapitre 5

Résultats

Chapitre 6

Conclusion

blablabla

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 Agriculturefor Climate Change Mitigation : A Modelling Analysis”. In : *OECD publishing*.

Annexe A

Annexes

A.1 Ouverture - effet d'une subventon 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 :

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

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 $X_F^0(\chi_F - \mu_H) = \eta S^0 - \epsilon D^0$ et $\epsilon < 0$, 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 $(\eta - \epsilon)E_H^0 S^0$ 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 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)	param
$\kappa > 0 \neq 1$	elasticity of substitution between agr product	param
$\kappa_{\text{feed}} > 0$	elasticity of substitution between various feed crops	param
$\sigma > 0 \neq 1$	Armington elasticity of substitution	param
$\epsilon > 0$	opposite of price elasticity of demand for the agricultural bundle	param
p_j^k and P_j^k	producer and consummer price	variables
$\tau_{ij}^k \geq 1$	iceberg cost from i to j for k, here $= 1$	param
C_j^0	consumption of non-agr product, $P_j^0 = 1$	variable
C_j^k	consumption	variable
${x^a}_j^k, {x^{\text{feed}}}_j^k$	intermediate consumption of k by activity a	variable
$x_j^k = {x^a}_j^k + {x^{\text{feed}}}_j^k$	total intermediate consumption of k	variable
μ_i^{feed}	conversion ratio	param
$A_i^0 > 0$	labor productivity (in money), equal to wages $A_i^0 = w_i$	param
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 throught a	variable
$\nu_i^{al} = Q_i^{al}/Q_i^a$	mass proportion of output l in the process a	parameter
y_i^k	yield parameter	param
Y_i^k	yield level	variable
$\varsigma_i^k > 0$	yield elasticity	param
F_i^k	quantity of land-intensifying inputs	variables
$a_i > 0$	behavioral parameter that governs the acreage elasticity	param
X_{ij}^k	volume of bilateral export between i and j for good k	variable
E_i	expenditures	variable
W_i	Wages	variable

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