



ÉCOLE NATIONALE DES
PONTS
ET **CHAUSSÉES**



IP PARIS

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

2024-2025

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

Clara ROCH

Élève ingénieure

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

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

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

Tuteur organisme : Christophe GOUEL
Tuteur École : Franck LECOCQ

Table des matières

1	Introduction	1
2	Modèle réduit	3
3	Modèle	5
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
4	Implémentation	13
4.1	Données et traitements	13
4.1.1	Quantités - FABIO	13
4.1.2	Prix - FAOSTAT – à reprendre	15
4.1.3	Droits de douanes - 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
5	Résultats	20
5.1	Conséquence de la suppression des droits de douanes	20
5.1.1	Suppression des droits de douane d'un pays pour un bien	20
5.2	Sensibilité du modèle	20
5.2.1	Sensibilité aux paramètres	20
5.2.2	Sensibilité à la vitesse de convergence	20
6	Conclusion	22
A	Annexes	24
A.1	Ouverture - effet d'une subvention sur les émissions des GES	24
A.2	Détails calculs - intuitions droits de douanes	25
A.3	Variables	26
A.4	Répartition pays par régions	26
A.5	Liste des biens et procédés	28

Liste des tableaux

4.1	Biens et production	14
4.2	Allocation des émissions	17
4.3	Origine des paramètres	18
A.1	Récapitulatif des notations utilisées dans le modèle	26
A.2	Répartition des pays par région	28
A.3	Répartition des aliments par biens	29
A.4	Usage et origine des biens	30

Table des figures

4.1	Diagramme de Sankey des échanges entre régions	15
4.2	Carte de chaleur des droits de douanes	16
4.3	Carte de chaleur des émissions de GES des différentes productions	18

Chapitre 1

Introduction

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. **Plus de blabla.**

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 douanes sur les émissions de GES. D'autres papiers comme **balabla biblio papiers qui parlent de ges et droits de douanes**

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.

Chapitre 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 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 :

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

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

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

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

On examine ses effets 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 douanes augmente les émissions globales.

Voir annexe A.2 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 ??, 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'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

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, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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, $C_j + x_j = X_j = X_{jj}$)

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

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

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

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

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

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

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, 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'intrants apportée

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ce qui donne, en minimisant les coûts 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^{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

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

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

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

et la condition de non-profit conduit à

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

ce qui donne

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

Par convention, chaque activité est associée à un output principal tandis que les autres 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 :

$$Q_i^{a1} : A_i^a W_i + P_i^k = \sum_{l \in \mathcal{O}(a)} \nu_i^{al} p_i^l, \quad (3.29)$$

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

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

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

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 $C_i^k = Q_i^k = X_{ii}^k = X_i^k$) :

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

Pour le bien extérieur, on a

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

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

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

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

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

3.3 Modèle en changement relatif

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

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

Condition de non-profit

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

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

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

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

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

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

Condition d'équilibre de marchés

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

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

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

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

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

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

Condition du premier ordre

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Équation de compatibilité

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

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

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

** 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 (**CITER DES GENS QUI L'ONT DIT**), l'impact 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 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 **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 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. **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.]

Modélisation des produits animaliers [En l'état actuel on 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 considère pas qu'on a des produits primaires et secondaires.]

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

4.1.1 Quantités - FABIO

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

1. cf. table 2 de GOUËL 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.

du modèle)⁶. Cette matrice référence tous les processus existants réellement dans les données. Nous nous sommes basé-e-s 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 production, telles que *use* (dimensions) représente l'ensemble des flux de biens vers des processus, et *make* (dimensions) représente l'ensemble des productions issues de chaque processus. Ces matrices fournissent ainsi plus d'informations, une fois les pays et les biens agrégés, que les matrices agrégées x et z ⁷.

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

Pour certaines régions, même après agrégation, certains processus étaient incomplets, c'est-à-dire qu'un processus produisait des outputs sans consommer d'inputs, ou bien créait un seul output parmi les multiples nécessaires. Nous avons donc fait le choix 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.

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		

TABLE 4.1 – Biens et production

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).

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

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

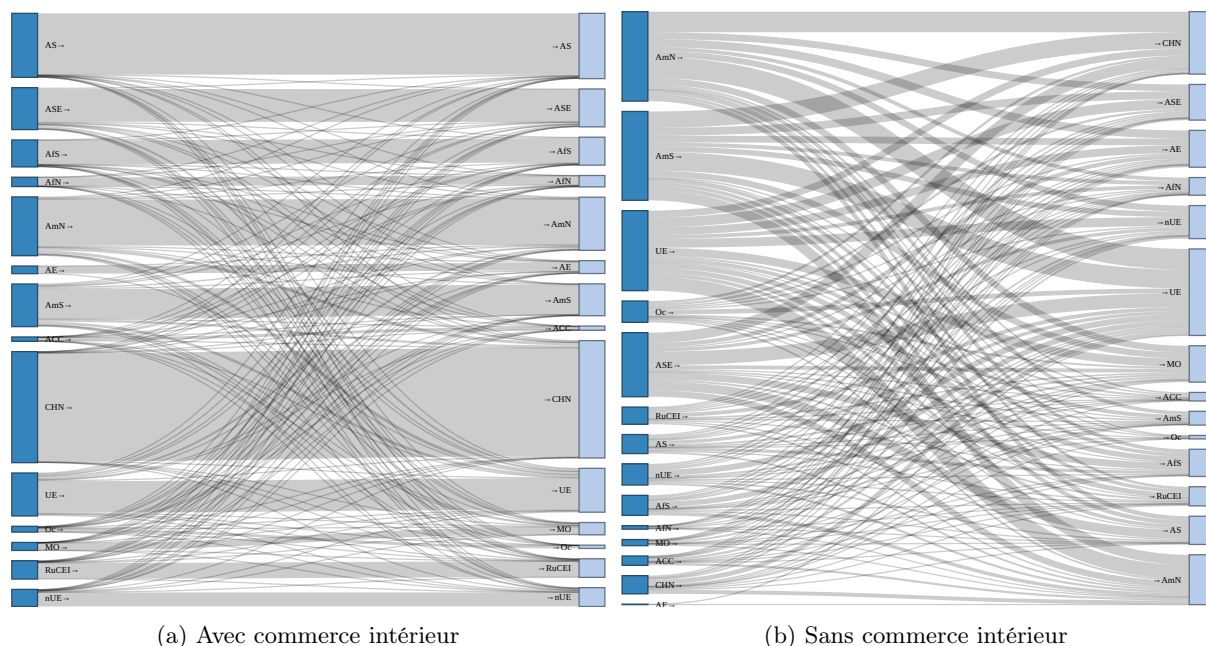


FIGURE 4.1 – Diagramme de Sankey des échanges entre régions

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 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 ⁸.

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

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

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

Finalement, ces deux étapes de traitement des prix conduisent à un taux de prix manquants de 63 %. Nous reconstruisons donc les prix à l'aide d'un multiplicateur calculé par pays et par groupe de produits (tel que défini dans la colonne de gauche de l'annexe A.5). Ce multiplicateur sera plus élevé pour un

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

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 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 douanes - MAcMap

Nous avons récupéré les données relatives aux droits de douanes 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 douanes 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 douanes 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 4.2⁹ montre les valeurs de droits de douanes moyens entre les régions et par produits.

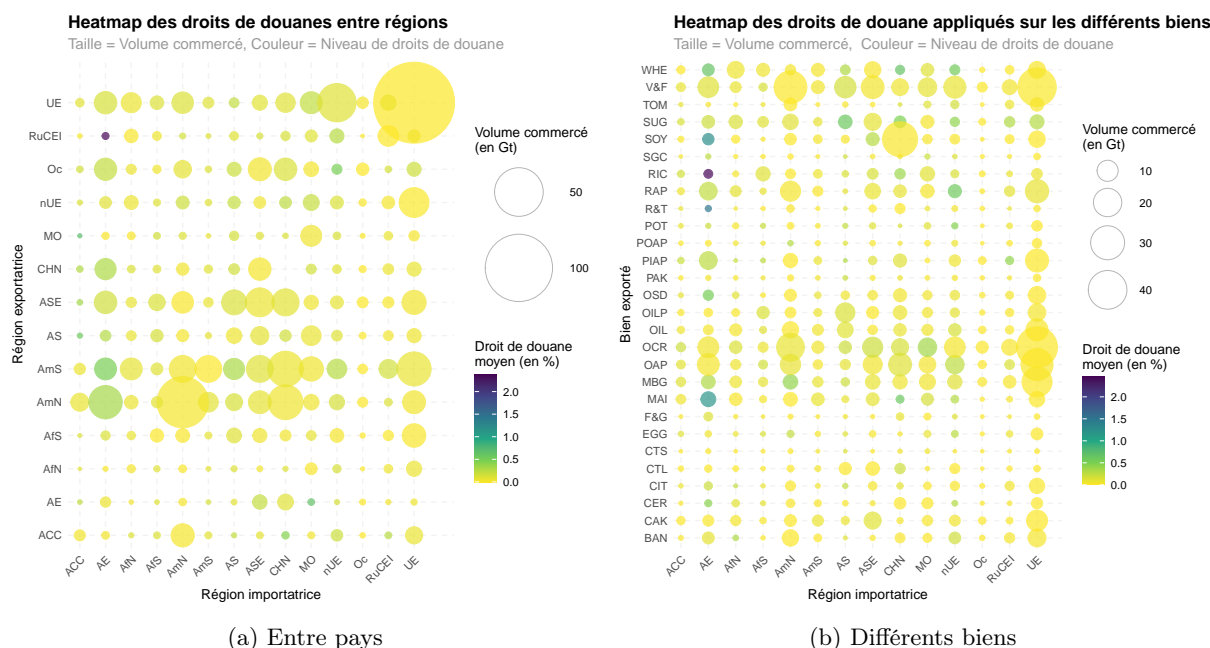


FIGURE 4.2 – Carte de chaleur des droits de douanes

Comme on peut le voir sur la sous-figure de gauche 4.2a, il y a des droits de douanes 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 11¹⁰, 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.

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

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

TABLE 4.2 – Allocation des émissions

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 nature¹¹.

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

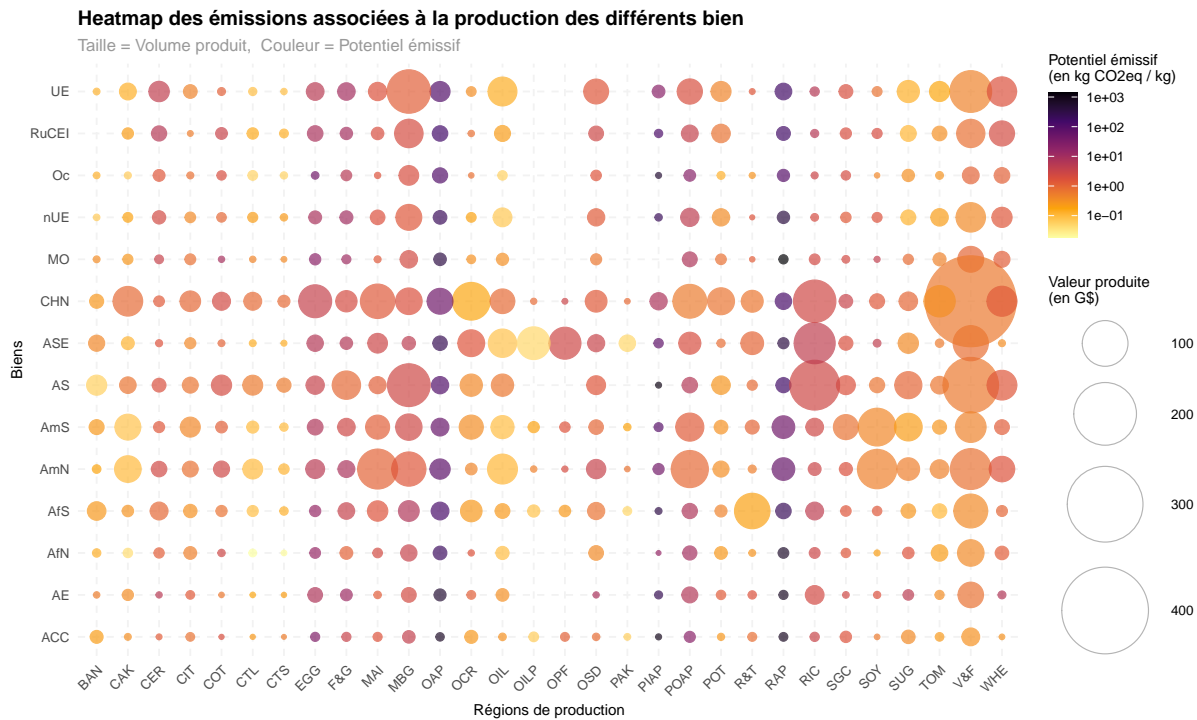


FIGURE 4.3 – Carte de chaleur des émissions de GES des différentes productions

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 constants¹². 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.

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

TABLE 4.3 – Origine des paramètres

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 pour son apport calorique. Le choix de l'élasticité ς repose sur une moyenne des valeurs issues de l'étude

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

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 GTAP¹³. 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.

Chapitre 5

Résultats

5.1 Conséquence de la suppression des droits de douanes

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 douanes pour les annuler, le second équilibre atteint, nous pouvons constater les émissions finales dans cette situation contrefactuelle et déduire de l'impacte des droits de douanes.

La suppression des droits de douanes dans notre modèle, avec le paramétrage présenté, augmente les droits de douanes de l'ensemble du secteur d'environ 6,5 %¹.

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 2.13², 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 * 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 douanes à l'import de produits issus de l'élevage en Asie de l'Est. L'équilibre atteint après avoir changé les droits de douanes conduit à une faible réduction de 0,33 % des émissions à l'échelle monde. **en train de reprendre les attributins des émissions**

5.2 Sensibilité du modèle

5.2.1 Sensibilité aux paramètres

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

1. cf. 5.2.2

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

l'équilibre final correspondant à une absence de droits de douane directement à partir de l'équilibre initial, le solveur (*mcp* ou *cns* de GAMS³) 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

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

Chapitre 6

Conclusion

blablabla

+6-7 % d'émissions en supprimant les droits de douanes. 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.

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).
- 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.jeeem.2020.102408](https://doi.org/10.1016/j.jeeem.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).
- 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).
- 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](https://doi.org/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*.

Annexe 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 douanes

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

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

A.4 Répartition pays par régions

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

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

TABLE A.2 – Répartition des pays par région

A.5 Liste des biens et procédés

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

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

TABLE A.3 – Répartition des aliments par biens

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

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

TABLE A.4 – Usage et origine des biens