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

Contents

List of Tables

List of Figures

Chapter 1

Introduction

[Amorce]

Dans ce mémoire, nous allons étudier les effets de politiques publiques agricoles sur les émissions de gaz à effet de serres du secteur. Pour se faire nous nous intéresserons à un modèle de commerce de denrées agricoles. Les politiques que nous étudions sont celles des droits de douane.

[politique taxe carbone aux frontières, et généralement pourquoi regarder droit de douanes et émissions de GES]

[Biblio]

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 gaz à effet de serre liées à leur évolution.

Le reste du mémoire est organisé comme suit. Le chapitre **??** 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 gaz à effet de serre. Ensuite le chapitre suivant **??** 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 Galichon 2016. Le chapitre **??** décrit les données utilisées ainsi que leurs traitements pour intégration au modèle. Enfin, le chapitre **??** présente les résultats et donc les conclusions sur l'impact des politiques agricoles sur les émissions de gaz à effet de serre au travers du commerce en agriculture.

Chapter 2

Intuition

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.

2.1 Introduction d'un droit de douane dans le pays domestique

Considérons une première politique, où 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.

2.2 Introduction d'une subvention à la production dans le pays importateur

Dans cette section, 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 dérivé suivantes :

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

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 total 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.

Voir annexe **??** pour plus de détails.

Chapter 3

Model

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 et al. (202?). 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 or $j \in \mathcal{J}$, les biens par $k \in \mathcal{K}$, avec $k = 0$ le bien non-agricol jouant le rôle de numéraire, $k = livestock$ les produits de l'élevage, $k = g$ l'herbe, $k \in \mathcal{K}^c$ les cultures ($\mathcal{K}^c \in \mathcal{K}$), et $k_n c \in \mathcal{K}^{nc}$ 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 $\mathcal{K}^a = \mathcal{K}^c \cup \mathcal{K}^{nc} \cup livestock$ l'ensemble représentant 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.

Pour plus de clarté, l'annexe **??**, référence tous les noms des variables et paramètres utilisés dans cette étude.

Nous considérons un modèle en volume et non en valeur.

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 et al., 2021). La quantité de nourriture consommée étant plafonnée par des besoins physiologiques, mais elle peut aussi être réduite significativement si les revenus ne sont trop faible pour se procurer suffisamment de nourriture.

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 **??**, 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 **??** et **??** 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 Échange

Pour les échanges entre pays, on considère une hypothèse de préférences des biens locaux d'Armington, avec l'élasticité associée $\sigma > 0$ et $\neq$. 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, ainsi le prix dans le pays j du bien k produit dans le pays i est $tau_{ij}^k P_i^k$, et le prix total du bien k dans le j est données par une CES des prix d'importations

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

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

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

Cette hypothèse est donc quelque peu hasardeuse dans les pays à bas revenus, dans ces pays une baisse des revenus peut conduire à une baisse de la consommation alimentaire, alors que dans les pays à plus haut revenus, les revenus 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

$$E_j : E_j = w_j N_j + r_j L_j + \sum_{k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{J}} \left(\hat{X}_{ij}^k X_{ij}^k - \hat{X}_{ji}^k X_{ji}^k \right), \tag{3.10}$$

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, les cultures, de l'agriculture, les produits animaliers et d'autres processus agro-industriels, 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 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, toujours avec 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 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 d'éviter une spécialisation totale, nous utilisons une fonction de coût de production multilogit f permet 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 **??** 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 **??** 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

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

Produits transformés

Dans cette section, nous n'abordons que les biens issus exclusivement d'un processus ou 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 $\mathcal{O}(a)$ désigne l'ensemble des biens produits par l'activité a.

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

$$Q_i^{\text{livestock}} = \min\left(\frac{x_i^{\text{feed}}}{\mu_i^{\text{feed}}}, \frac{N_i^{\text{livestock}}}{A_i^{\text{livestock}}}\right), \tag{3.18}$$

x_i^{feed} est composé comme une CES des produits que les animaux peuvent manger, comme suit

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

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

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

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

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

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

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 nous considérons qu'un processus peut produire plusieurs produits différents (e.g. le processus d'extraction d'huile, produit de l'huile et du tourteau), on considère par contre que ces processus ne prennent qu'un seul produit en entrée

$$Q_i^a = \min\left(\frac{N_i^a}{A_i^a}, x_i^{ak}\right) = \max\left(\left\{\frac{Q_i^{al}}{\nu_i^{al}}\right\}_{l|l\in\mathcal{O}(a)}\right), \tag{3.24}$$

où Q_i^a correspond au niveau d'activité du procédé, ν_i^{al} correspond au taux d'efficacité, $k \in \mathcal{I}(a)$ correspond à l'input et $l \in \mathcal{O}(a)$ aux outputs.

On obtient

$$x_i^{ak} : x_i^{ak} = Q_i^a, \tag{3.25}$$

$$Q_i^{al} : Q_i^{al} = \nu_i^{al} Q_i^a, \tag{3.26}$$

$$N_i^a : N_i^a = A_i^a Q_i^a, \tag{3.27}$$

et la condition de non-profit conduit à

$$W_i N_i^a + P_i^k x_i^{ak} = \sum_{l|l\in\mathcal{O}(a)} p_i^l Q_i^{al}, \tag{3.28}$$

ce qui donne

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

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 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 :

$$Q_i^{a\mathbf{l}} : A_i^a W_i + P_i^k = \sum_{l\in\mathcal{O}(a)} \nu_i^{al} p_i^l, \tag{3.30}$$

$$Q_i^{al} : Q_i^{al} = \left(\nu_i^{al}/\nu_i^{a\mathbf{l}}\right) Q_i^{a\mathbf{l}}, \text{ for } l \neq \mathbf{l}, \tag{3.31}$$

$$N_i^a : N_i^a = A_i^a Q_i^{a\mathbf{l}}/\nu_i^{a\mathbf{l}}, \tag{3.32}$$

$$x_i^{ak} : x_i^{ak} = Q_i^{a\mathbf{l}}/\nu_i^{a\mathbf{l}}. \tag{3.33}$$

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

$$p_i^k : Q_i^k = \sum_{j\in\mathcal{J}} \tau_{ij}^k X_{ij}^k, \text{ for } k \neq 0. \tag{3.34}$$

Pour le bien extérieur, on a

$$p_i^0 : \sum_{i\in\mathcal{J}} Q_i^0 = \sum_{i\in\mathcal{J}} \left(C_i^0 + \sum_{k\in\mathcal{K}^c} F_i^k\right). \tag{3.35}$$

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

$$P_i^k : X_i^k = C_i^k + x_i^{\text{feed},k} + \sum_{a|k\in\mathcal{I}(a)} x_i^{ak}. \tag{3.36}$$

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

$$W_i : N_i = \sum_a N_i^a. \tag{3.37}$$

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 $\alpha_j^{\mathrm{C},k} = (P_j^k C_j^k)/(P_j C_j)$, $\alpha_j^{\mathrm{feed},k} = (P_j^k x_j^{\mathrm{feed},k})/(P_j^{\mathrm{feed}} x_j^{\mathrm{feed}})$ et $\alpha_{ij}^{\mathrm{Trade},k} = (\tau_{ij}^k p_i^k X_{ij}^k)/(P_j^k X_j^k)$, et en transformant les équations **??**-**??**,**??**-**??**, **??**-**??**, **??**-**??**, **??**-**??**, on obtient le système d'équation suivant.

Condition de non-profit

$$\hat{C}_j : \hat{P}_j = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^a} \alpha_j^{\mathrm{C},k} \left(\hat{P}_j^k \right)^{1-\kappa} \right]^{1/(1-\kappa)}, \tag{3.38}$$

$$\hat{Q}_i^0 : \hat{p}_i^0 = \hat{W}_i, \tag{3.39}$$

$$\hat{Q}_i^{a\mathbf{l}} : W_i \hat{W}_i N_i^a \hat{N}_i^a + P_i^k \hat{P}_i^k x_i^{ak} \hat{x}_i^{ak} = \sum_{l \in \mathcal{O}(a)} p_i^l \hat{p}_i^l Q_i^{al} \hat{Q}_i^{al}, \text{ pour } \mathbf{l} \notin \{0, \mathcal{K}^c\} \tag{3.40}$$

$$\hat{Q}_i^k : \pi_i^k\prime = \left(\frac{y_i^k}{1 + \varsigma_i^k} \right)^{1+\varsigma_i^k} \varsigma_i^{k\,\varsigma_i^k} \frac{(p_i^k\prime)^{1+\varsigma_i^k}}{W_i (P_i^0)^{\varsigma_i^k}} - c_i^k, \text{ pour } k \in \mathcal{K}^c \tag{3.41}$$

$$\hat{X}_j^k : \hat{P}_j^k = \left[\sum_{i \in \mathcal{J}} \alpha_{ij}^{\mathrm{Trade},k} \left(\hat{p}_i^k \right)^{1-\sigma} \right]^{1/(1-\sigma)}, \tag{3.42}$$

$$\hat{x}_j^{\mathrm{feed}} : \hat{P}_j^{\mathrm{feed}} = \left[\sum_{k \in \mathcal{K}^c} \alpha_j^{\mathrm{feed},k} \left(\hat{P}_j^k \right)^{1-\kappa_{\mathrm{feed}}} \right]^{1/(1-\kappa_{\mathrm{feed}})}. \tag{3.43}$$

Condition d'équilibre de marchés

$$\hat{P}_j : \hat{C}_j = \hat{P}_j^{-\epsilon}, \tag{3.44}$$

$$\hat{p}_i^k : Q_i^k \hat{Q}_i^k = \sum_{j \in \mathcal{J}} \tau_{ij}^k X_{ij}^k \hat{X}_{ij}^k, \text{ for } k \neq 0, \tag{3.45}$$

$$** \hat{p}_i^0 : \sum_{i \in \mathcal{J}} \hat{Q}_i^0 Q_i^0 = \sum_{i \in \mathcal{J}} \left(\hat{C}_j^0 C_j^0 + \sum_{k \in \mathcal{K}^c} \hat{F}_i^k F_i^k \right), \tag{3.46}$$

$$\hat{P}_j^k : X_j^k (\hat{X}_j^k) = C_j^k \hat{C}_j^k + x_j^{\mathrm{feed},k} \hat{x}_j^{\mathrm{feed},k} + \sum_{a | k \in \mathcal{I}(a)} x_i^{ak} \hat{x}_i^{ak}, \tag{3.47}$$

$$\hat{P}_j^{\mathrm{feed}} : \hat{x}_i^{\mathrm{feed}} = \hat{Q}_i^{\mathrm{livestock}}, \tag{3.48}$$

$$** \hat{W}_i : N_i = \sum_a N_i^a \hat{N}_i^a. \tag{3.49}$$

Condition du premier ordre

$$
\begin{aligned}
**\hat{C}_j^0 &: P_j^0 C_j^0 \hat{C}_j^0 = E_j \hat{E}_j - P_j C_j (\hat{P}_j)^{1-\epsilon}, && (3.50)\\
\hat{C}_j^k &: \hat{C}_j^k = (\hat{P}_j^k)^{-\kappa} (\hat{P}_j)^{\kappa-\epsilon}, && (3.51)\\
\hat{Q}_i^{al} &: \hat{Q}_i^{al} = \hat{Q}_i^{a\mathbf{1}}, \text{ pour } l \neq \mathbf{1}, && (3.52)\\
\hat{N}_i^a &: \hat{N}_i^a = \begin{cases} \hat{Q}_i^{a\mathbf{1}}, \text{ si } a \notin \text{crops} \\ \left[\sum_{k\in\mathcal{K}^c} s_i^k\prime \left(c_i^k + a_i^{-1} \ln s_i^k\prime\right)\right] L_i / N_i^{\text{crops}}, \text{ si } a \in \text{crops}, \end{cases} && (3.53)\\
\hat{x}_i^{ak} &: \hat{x}_i^{ak} = \hat{Q}_i^{a\mathbf{1}}, \text{ pour } k \neq \text{livestock}, && (3.54)\\
\hat{x}_j^{\text{feed},k} &: \hat{x}_j^{\text{feed},k} = \left(\hat{P}_j^k / \hat{P}_j^{\text{feed}}\right)^{-\kappa_{\text{feed}}} \hat{x}_j^{\text{feed}}, && (3.55)\\
\hat{X}_{ij}^k &: \hat{X}_{ij}^k = (\hat{p}_i^k / \hat{P}_j^k)^{-\sigma} \hat{X}_j^k \text{ (équation de gravité)}, && (3.56)\\
\hat{s}_i^k &: \hat{s}_i^k s_i^k = \exp\left(a_i \pi_i^k\prime - \phi_i\prime\right), && (3.57)\\
\phi_i\prime &: \phi_i\prime = \ln \sum_{k\in\mathcal{K}^c} \exp(a_i \pi_i^k\prime), && (3.58)\\
\hat{F}_i^k &: \hat{F}_i^k = \hat{Q}_i^k (\hat{s}_i^k)^{-1/(1+\varsigma_i^k)}, && (3.59)\\
\pi_i^k\prime &: \hat{Q}_i^k = \hat{s}_i^k \left(\hat{p}_i^k\right)^{\varsigma_i^k}, \text{ for } k \in \mathcal{K}^c. && (3.60)
\end{aligned}
$$

Équation de compatibilité

$$
\begin{aligned}
**\hat{E}_i &: E_i \hat{E}_i = W_i \hat{W}_i N_i + r_i \hat{r}_i L_i + \sum_{k\in\mathcal{K}, j\in\mathcal{J}} \left(\hat{X}_{ji}^k X_{ji}^k - \hat{X}_{ij}^k X_{ij}^k\right), && (3.61)\\
**\hat{r}_i &: r_i \hat{r}_i = W_i\prime \sum_k s_i^k\prime \left(\pi_i^k\prime - a_i^{-1} \ln s_i^k\prime\right), && (3.62)\\
\hat{Q}_i^k &: Q_i^k \hat{Q}_i^k = \sum_{a|k\in\mathcal{O}(a)} Q_i^{ak} \hat{Q}_i^{ak}. && (3.63)
\end{aligned}
$$

** 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 n'avons pas besoin des équations d'équilibre général, soit des équations déterminant C_j^0, E_j, W_i, r_i, et on pose $\hat{p}_i^0 = \hat{W}_i = 1$.

[rajouter le comment on trouve a$_i, etc, etreprendrepourqueyaitbienl'équationdeY àlafinaussi$]

Chapter 4

Implémentation

- tidy_faostat (récupération données, agrégation + nettoyage)

- tidy_fabio (agrégation, nettoyage des losses, et process)

- valeur arbitraire choisit en fonction des autres papiers ou de la plouf (du coup la plouf pour le share cost labor et land)

4.1 Modèle à trois régions

Afin de simplifier le modèle, nous considérons, trois régions principales : la Chine, les États-Unis (EUA) et le reste du monde (RoW) ; les valeurs de productions et de consommation de la Chine et des EUA sont suffisamment significatives pour être comparées à celles du reste du monde (entre zéro et deux ordres de grandeurs en moins, e.g. la consommation de céréales dans le reste du monde est de 4.01e11, tandis que celles de la Chine et des EUA 1.35e11 et 4.28e10 ; pour le sucre on a dans le même ordre 1.17e11, 3.72e10, et 6.99e9), ce qui nous permet de considérer ces trois régions en parallèle.

Pour les cultures, nous les agrégeons par grandes catégories selon les catégories suivantes lorsque c'est possible : fruits et légumes, céréales, tubercules, culture à sucre, à huile, non-alimentaires. Les animaux vivants sont retirés, car ils ne sont qu'un intermédiaire entre leur nourriture et les produits issus de l'élevage, que nous considérons tous sous la même catégorie. Les tourteaux et les huiles sont considérés séparément.

4.2 Données

4.2.1 Paramètres de comportement

Nous faisons les mêmes choix sur le paramétrage que dans Gouel (2025).

4.2.2 Données et traitement pour l'équilibre initial

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

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 (??).

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*.

[expliquer ces affaires de exports imports]

4.2.3 Données pour les scenarii contrefactuels

Chapter 5

Résultats

Chapter 6

Conclusion

Appendix A

Intuition

A.1 Tariff

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:

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

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

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

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

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

Using the aggregated elasticities defined in Chapter **??**, we have

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

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

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

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:

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

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 Section **??**. In addition, assuming an initial tariff of zero and equal elasticities (i.e., $\eta_H = \eta_F = \eta_i$ and $\epsilon_H = \epsilon_F = \epsilon_i$), 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.2 Subvention

By rewriting the equilibrium equation with the new supply functions,

$$D_H^0\left(1 + \epsilon_H\frac{P - P^0}{P^0}\right) - S_H^0\left(1 + \eta_H\frac{P + s - P^0}{P^0}\right) = S_F^0\left(1 + \eta_F\frac{P - P^0}{P^0}\right) - D_F^0\left(1 + \epsilon_F\frac{P - P^0}{P^0}\right),$$

we obtain the price and its derivative as presented in Section **??**.

When elasticities are uniform across countries, so that $\epsilon_i = \epsilon$ and $\eta_i = \eta$, we have:

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

With regard to supply, we have:

$$S = S_F + S_H = S^0 + S^0\eta\frac{P - P^0}{P^0} + S_H\eta_H\frac{s}{P^0},$$

which yields the results in Section **??**.

For emissions, using again $E = e_HS_H + e_FS_F$, in the case of uniform elasticities the introduction of the subsidy results in higher emissions only if

$$\frac{E_H^0}{\eta S_H^0} > \frac{E^0}{(\eta - \epsilon)S^0}.$$

Appendix B

Intuition

One can find here a list of the variables used in the model from chapter **??**, for more clarity.

Name	Description	Type
$\beta^k_{..} \geq 0$	preference parameter	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^k_j and P^k_j	producer and composite price of imports of good k in country j	variables
$\tau^k_{ij} \geq 1$	iceberg cost from i to j for k, here $= 1$	param
C^0_j	final consumption of non-agr product, $P^0_j = 1$	variable
C^k_j	final consumption of product k in j	variable
${x^\lambda}^k_j$	content of k in process λ or livestock feed in country j	variable
${\mu^\lambda}^k_i$	conversion ratio of k in process λ or of livestock feed	param
ν^k_i	unit of labor required per unit of land	param
$A^0_i > 0$	labor productivity (in money), equal to wages $A^0_i = w_i$	param
N^0_i	labor demand for no-agr good in country i	param
L^k_i	surface of field dedicated to k in country $i = s^k_i L_i$	variable
r^k_i and R^k_i	per hectare and total land rents ($R^k_i = r^k_i L^k_i$)	variables
s^k_i	share of field in country i allocated to k	variable
Q^k_i	total output of k in i ($Q^k_i = s^k_i L^k_i Y^k_i$)	variable
$Q^{l_\lambda}_i$	qtt of output l in the process λ	variable
$Q^\lambda_i = \sum Q^{l_\lambda}_i$	total qtt of output in the process λ	variable
${\upsilon^\lambda}^{l_\lambda}_i = Q^{l_\lambda}_i / Q^\lambda_i$	mass proportion of output l_λ in the process λ	parameter
${m^\lambda}^{k_\lambda}_i = {x^\lambda}^{k_\lambda}_i / x^\lambda_i$	mass proportion of input k_λ in process λ	parameter
y^k_i and Y^k_i	average and total yields of k in i	param, variable
$\varsigma^k_i > 0$	yield elasticity	param
X^k_i	quantity of inputs that intensify land	variables
P^X_i	price of X in country i	param
P^Z_i	price of non-land-intensifying input	param
$\alpha_i > 0$	behavioral parameter that governs the acreage elasticity	param
$X^k_{v,ij}$	volume of bilateral export between i and j for good k	variable
B_i	trade balance/deficits of country i	variable
E_i	expenditures	variable