

## UNIVERSITÉ DE LILLE

FACULTÉ DES SCIENCES ÉCONOMIQUES, SOCIALES ET DES TERRITOIRES

École doctorale SESAM – ED n° 73

Lille Économie Management (LEM) – UMR 9221

Discipline : Sciences Économiques

---

# Ressources, Changements climatiques et Transition énergétique Impacts économiques et Incidences des inégalités

---

THÈSE DE DOCTORAT

*Préparée par :*

Anderson CAMILLE

Soutenue publiquement le 3 avril 2025

En vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Economiques



### Direction de thèse

Etienne BILLETTE DE VILLEMEUR, Professeur des Universités, Université de Lille, *Directeur de thèse*

Claire NAIDITCH, Maîtresse de conférences, Université de Lille, *Co-directrice de thèse*

---

### Jury de thèse

Agnès TOMINI, Directrice de recherche, CNRS, Aix-Marseille Université, *Rapporteuse et Présidente*

Dorothee CHARLIER, Professeure des Universités, Université Savoie Mont-Blanc, *Rapporteuse*

Laurence DELATTRE, Maîtresse de conférences, Université de Lille, *Examineur*

Charles SEGUIN, Professeur, Université du Québec à Montréal, *Examineur*

Etienne BILLETTE DE VILLEMEUR, Professeur des Universités, Université de Lille, *Directeur de thèse*

Claire NAIDITCH, Maîtresse de conférences, Université de Lille, *Co-directrice de thèse*

UNIVERSITY OF LILLE

FACULTY OF ECONOMICS, SOCIAL SCIENCES, GEOGRAPHY AND PLANNING

Doctoral School SESAM – ED n° 73

Lille Economy Management (LEM) – UMR 9221

PhD Program : Economics

---

**Resources, Climate Change and Energy Transition**  
**Economic Impacts and Consequences of Inequalities**

---

DOCTORAL THESIS

*Presented and Defended by :*

**Anderson CAMILLE**

On **April 3rd, 2025**

In fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy



**Thesis Supervision**

Etienne BILLETTE DE VILLEMEUR, Professor, University of Lille, *Supervisor*

Claire NAIDITCH, Associate Professor - HDR, University of Lille, *Co-supervisor*

---

**Thesis Defense Committee**

Agnès TOMINI, Director of Research, CNRS, Aix-Marseille University, *Referee and President*

Dorothee CHARLIER, Professor, Université Savoie Mont-Blanc, *Referee*

Laurence DELATTRE, Associate Professor, University of Lille, *Examiner*

Charles SEGUIN, Professor, Université du Québec à Montréal, *Examiner*

Etienne BILLETTE DE VILLEMEUR, Professor, University of Lille, *Supervisor*

Claire NAIDITCH, Associate Professor - HDR, University of Lille, *Co-supervisor*



Cette thèse a été financée par l'I-SITE-ULNE<sup>1</sup> (devenue l'Initiative d'excellence de l'Université de Lille) sous le *Hub* « Science pour une planète en mutation » et dans le cadre du projet *RECABIO* (Ressources : Catalyses et Bioéconomie).

---

1. I-SITE ULNE :Initiative Science - Innovation - Territoires Economie, Université Lille Nord Europe

A MAËLIE

A KERLINE ET JACQUELINE

A NATHALIE

EN MÉMOIRE DE FRITZ ET DE MAGDALA

# Remerciements

Cette thèse marque l’aboutissement de plusieurs années de recherche au sein du laboratoire Lille Economie et Management (LEM). Au-delà de la destination finale, le chemin parcouru a été riche de rencontres et de soutiens inestimables que je souhaite remercier ici.

Avant tout, j’adresse mes remerciements les plus sincères à mes encadrants, Étienne Billette de Villemeur et Claire Naiditch. Leur disponibilité, leurs conseils avisés et leurs remarques constructives ont joué un rôle essentiel dans l’élaboration et la finalisation de ce travail. Je les remercie pour leur patience, leur rigueur scientifique et leurs encouragements qui m’ont permis d’avancer en toute confiance.

J’exprime également ma profonde gratitude à l’ensemble des membres de mon jury, Agnès Tomini, Dorothée Charlier, Laurence Delattre et Charles Seguin, pour l’intérêt porté à ce travail et pour les échanges qui, je l’espère, continueront d’enrichir cette recherche au-delà de la soutenance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour l’accueil chaleureux et le soutien indéfectible reçus durant mon séjour de recherche à Polytechnique Montréal, placé sous la direction inspirante de Sophie Bernard, avec qui j’ai co-écrit le deuxième chapitre de cette thèse. Je remercie tout particulièrement Joliann, Sarah, Ilrick ainsi que l’ensemble des doctorant-e-s rencontrés sur place pour leur bienveillance, la richesse de nos échanges et les moments conviviaux partagés. En évoquant ce séjour canadien, j’ai une pensée tout aussi reconnaissante pour Daïna Jean-Baptiste, Nicolas Fabus, Stallone Sylvester et Ralph Docteur. Ma gratitude va également à la famille Nòltès – Romain, Eudyne, Jayden et Rodeen – qui m’a accompagné et soutenu tout au long de cette période.

Au fil des ans, j’ai eu la chance d’échanger avec nombre de collègues et ami-e-s au sein du LEM. Je pense d’abord à Hancito, compagnon de parcours doctoral, dont le soutien a été précieux tant au plan professionnel que personnel. Merci de m’avoir accompagné dans les joies et les difficultés de ce projet. Je remercie aussi mes camarades de cohorte Nicolas, Ifodenet, Yoan, Djekna et Annis, pour leur présence et leur bonne humeur, ainsi que ceux qui nous ont accueillis à notre arrivée au laboratoire: Thomas, Raphaël, Valentine,

Stéphanie, Nicolas, Fahariat, Almonord, Maqsood, Hira, Anténord et Laura. J'ai beaucoup appris auprès de vous. J'adresse également mes remerciements à celles et ceux arrivés plus tard, qui ont continué d'apporter une dynamique nouvelle au LEM, à la Ruche : Élie, Muriel, Océane, Martin, Nur, Mikaël, Elina, Mamadou, Gero, Camille, Claire, Alicia, Audrey, Louis, Juliana, Antony, Thibault.

Mes pensées reconnaissantes vont à ma famille, et particulièrement à ma femme, Nathalie Edouard. Je lui suis infiniment reconnaissant pour sa patience et son courage, surtout quand je devais m'absenter. Je souhaite aussi remercier du fond du cœur ma petite fille de 2 ans, qui n'a jamais voulu me laisser travailler tranquillement depuis son arrivée, mais dont la présence et la joie de vivre m'ont apporté un soutien moral inestimable.

Je tiens à remercier Jeffky Joseph et la famille Honorat – Andersen, Fidline et Jayce – qui incarnent ma famille en France, ainsi qu'Edrice Anélus, Bénéaël Jean-Louis et Oniscar Laboche : leur sollicitude et leurs encouragements constants m'ont souvent redonné le sourire et aidé à garder le cap. Je remercie chaleureusement Ketsia Clergé et Hadson Albert pour leur précieuse aide dans la rédaction du résumé de la thèse en créole haïtien.

Enfin, je n'oublie pas ma famille restée en Haïti, qui m'a toujours encouragé malgré la distance : je pense à ma mère, Jacqueline Camille, ainsi qu'à Kerline Dorsena et Chimène Dérilus, dont les appels, les messages et la foi infaillible en mes capacités m'ont donné la force d'avancer. Vous êtes une source permanente de motivation et de persévérance pour achever cette thèse.

À tous et à toutes, merci infiniment. Cette thèse est le fruit d'un travail personnel, mais elle n'aurait jamais vu le jour sans votre soutien, vos conseils et vos encouragements.



## ABSTRACT

This thesis analyses the impact of the energy transition on income inequality, focusing on the economic and environmental mechanisms involved in this process. One of the main contributions of this work is demonstrating that the energy transition, which is essential for achieving climate objectives, can intensify economic disparities without adequate compensatory policies. Additionally, these same economic inequalities can undermine the implementation of the energy transition.

The first part proposes a general equilibrium model that establishes a link between energy production and available resources (capital, land and labor). The changes in the price structure of production factors brought about by the energy transition affect households differently depending on their income level. The fall in the price of capital mainly benefits high-income households, which are better placed to invest in manufactured goods and advanced technologies. On the other hand, the rise in the price of land, caused by the increased demand for first-generation biofuel production, leads to a rise in food prices, thus disproportionately affecting low-income households. Without compensatory measures, the energy transition will lead to greater inequality.

This model also highlights the opposite mechanism : inequality slows down the energy transition. Aside from questions of the social acceptability of climate reforms, a highly unequal income distribution complicates the implementation of policies needed to develop low-carbon technologies. Specifically, the critical threshold of the capital-land ratio at which the economy shifts towards producing first-generation biofuels decreases, delaying the adoption of renewable energies. Thus, socioeconomic inequalities and the energy transition nourish each other in a vicious circle : each worsening of the former further delays the latter, which accentuates existing inequalities.

Advanced biofuels, made mainly from waste oils and agricultural waste, allow us to relax the constraints on land use. They are not produced at the expense of food production, but rather as a way of recycling food waste. The second theoretical part focuses on the production of these advanced biofuels and their use in the aviation sector, where the impossibility of using electric power makes their usage, at least in the short term, essential to the transition. This part shows that the European ReFuelEU directive will help to reduce

emissions from the sector. However, it highlights the need for careful management of the minimum level of sustainable aviation fuel imposed on airlines. Excessively high quotas could lead to such high demand for these biofuels that their manufacture from food products could prove more profitable than selling them for their primary purpose. In so doing, these advanced biofuels would have consequences similar to those of first-generation biofuels.

Ultimately, this thesis makes a significant contribution to the analysis of the economic and social dynamics induced by the energy transition. It demonstrates that variations in the price of production factors - such as the fall in the cost of capital or the rise in land prices - have unequal repercussions depending on household income levels, thereby amplifying economic disparities. Furthermore, by examining the potential of advanced biofuels and considering the implications of the ReFuelEU Aviation directive, this thesis highlights that without an appropriate regulatory framework and suitable economic incentives, these policies could compromise both climate goals and food security. Therefore, it argues for the implementation of public policies that foster the energy transition while incorporating measures to reduce social inequalities and ensure the sustainability of socioeconomic systems.



## RÉSUMÉ

Cette thèse propose une analyse des impacts de la transition énergétique sur les inégalités de revenus, en se concentrant sur les mécanismes économiques et environnementaux impliqués dans ce processus. L'une des principales contributions de ce travail réside dans la démonstration que, d'une part, la transition énergétique, essentielle pour atteindre les objectifs climatiques, peut aggraver les disparités économiques sans politiques compensatoires adéquates et, d'autre part, que ces mêmes inégalités peuvent ralentir la mise en œuvre de la transition énergétique.

La première partie propose un modèle d'équilibre général qui établit un lien entre la production énergétique et les ressources (capital, terre et travail) disponibles. Les changements dans la structure du prix des facteurs de production, induits par la transition énergétique, affectent différemment les ménages en fonction de leur niveau de revenu. La baisse du prix du capital bénéficie principalement aux ménages à revenu élevé, mieux positionnés pour investir dans les biens manufacturés et les technologies avancées. En revanche, la hausse du prix de la terre, provoquée par la demande accrue pour la production de biocarburants de première génération, entraîne une augmentation des prix alimentaires, affectant ainsi de manière disproportionnée les ménages à faible revenu. Sans mesures compensatoires, la transition énergétique entraîne donc un renforcement des inégalités.

Ce modèle met également en évidence le mécanisme inverse : les inégalités freinent la transition énergétique. En dehors des questions d'acceptabilité sociale des réformes climatiques, une distribution des revenus fortement inégalitaire complique la mise en œuvre des politiques nécessaires au développement des technologies bas carbone. Concrètement, le seuil critique du ratio capital-terre à partir duquel l'économie s'oriente vers la production des biocarburants de première génération est déplacé vers des valeurs moins élevées ; l'adoption des énergies renouvelables s'en trouve retardée et alourdie. Inégalités socioéconomiques et transition énergétique se nourrissent ainsi l'une l'autre dans un cercle vicieux : chaque aggravation des premières retarde davantage la seconde, laquelle, à son tour, accentue les disparités existantes.

Les biocarburants avancés, fabriqués principalement à partir des huiles usagées et des déchets agricoles, permettent de relâcher la contrainte sur l'utilisation des sols. En effet, leur production ne se fait pas au dépend de la production alimentaire, mais se présente au contraire comme une valorisation de ses déchets. La seconde partie théorique se concentre sur la production de ces biocarburants avancés et leur usage dans le

secteur aéronautique, où l'impossibilité de recourir à l'énergie électrique rend leur usage, au moins à court terme, indispensable à la transition. Cette partie montre que la directive européenne ReFuelEU pourra aider à réduire les émissions du secteur. Cependant, il met en évidence la nécessité d'une gestion prudente du niveau minimum de carburant d'aviation durable imposé aux compagnies. En effet, des quotas trop élevés pourraient entraîner une demande telle pour ces biocarburants que leur fabrication à partir de produits alimentaires pourrait s'avérer plus rentable que la vente de ces derniers pour leur fin première. Ce faisant, ces biocarburants avancés auraient des conséquences similaires à celles induites par les biocarburants de première génération.

En somme, cette thèse contribue à l'analyse des dynamiques économiques et sociales induites par la transition énergétique. En démontrant que les variations des prix des facteurs de production, telles que la baisse du coût du capital ou la hausse des prix de la terre, génèrent des impacts différenciés sur les ménages selon leurs niveaux de revenu, elle met en exergue les risques d'amplification des disparités économiques. Par ailleurs, en explorant les potentialités des biocarburants avancés et en intégrant les implications de la directive ReFuelEU Aviation, ce travail montre que, sans un encadrement normatif et des incitations économiques adaptées, ces politiques risquent de compromettre simultanément les objectifs climatiques et la sécurité alimentaire. Elle invite donc à la mise en place de politiques publiques non seulement aptes à favoriser la transition énergétique mais également attentives à leurs conséquences sur les inégalités et la soutenabilité des systèmes socioéconomiques.



## REZIME

Tèz sa a pwopoze yon analiz sou ki jan tranzisyon enèjetik la afekte inegalite revni yo, avèk yon apwòch ki chita sou mekanis ekonomik ak anviwònmantral ki anndan pwosesis sa a. Youn nan prensipal kontribisyon travay sa a se montre malgre, yon bò, tranzisyon enèjetik esansyèl pou reyalize objektif klimatik yo, li kapab tou inegalite ekonomik yo si pa gen politik solid korije sa, epi yon lòt bò, gwo inegalite yo menm ka ralanti an.

Premye pati a prezante yon modèl ekilib jeneral ki konekte pwodiksyon enèji a ak resous ki disponib yo (kapital, tè ak travay). Chanjman ki fèt nan estrikti pri faktè pwodiksyon yo, ki soti nan tranzisyon enèjetik la, afekte fanmi yo selon nivo lajan yo rantre. Lè pri kapital la bese li plis nan avantaj fanmi ki gen pi gwo revni yo paske yo gen plis kapasite pou investi nan gwo teknoloji ak pwodui endistriyèl. Yon lòt bò, ogmantasyon pri tè yo paske demann nan vin pi plis pou pwodiksyon gaz-byo premye jenerasyon yo, lakòz pri manje yo monte, sa ki pi rèd pou fanmi ki gen revni fèb yo. Kidonk, san lòt mezi akonpayman, tranzisyon enèjetik la agrave inegalite sosyal yo.

Modèl sa revele tou yon mekanis ki mache nan sans opoze a : inegalite yo ralanti tranzisyon enèjetik la. San poze kesyon sou mizanplas akseptabilite sosyal refòm klimatik yo, lè revni yo mal pataje, li vin pi difisil pou mete an plas politik ki nesèsè pou devlope teknoloji ki pa bay anpil dechajman gaz kabonik. Pou di byen, nivo kritik rapò kapital-tè ki nesèsè pou ekonomi an kòmanse pwodui premye jenerasyon gaz-byo yo vin diminye, sa ki vin fè itilizasyon enèji renouvlab yo pran plis tan epi koute plis lajan. Se konsa inegalite sosyoekonomik ak tranzisyon enèjetik la kontinye ap ranfòse youn lòt nan yon sèk visye : chak fwa inegalite yo vin pi grav, sa plis ralanti tranzisyon an, ki li menm, ogmante dezekilib sosyal yo toujou plis.

Gaz-byo amelyore yo, ki fèt sitou ak lwil ki fin sèvi ak dechè agrikòl, pèmèt diminye presyon sou tè yo. Kidonk, pwodiksyon yo pa menase pwodiksyon manje, men pito, yo valorize dechè agrikòl yo. Dezyèm pati a konsantre sou pwodiksyon gaz-byo sa yo ak itilizasyon yo nan sektè avyasyon an, kote li enposib pou itilize enèji elektrik ; sa rann itilizasyon gaz-byo sa yo esansyèl pou tranzisyon an, omwen pandan yon tan ki pa twò long. Pati sa a montre direktiv ewopeyen ReFuelEU Aviation lan kapab ede diminye dechajman gaz kabonik ki fèt nan sektè avyasyon an. An menm tan, li mete aksan sou nesèsite pou jere avèk anpil prekosyon minimòm gaz avyasyon dirab y ap mande konpayi avyon yo itilize. Si yo mete kota twò wo, sa kapab lakoz gen twòp demann pou gaz-byo, sa ki vin fè li pi rantab pou yo itilize pwodui alimantè pou pwodui gaz-byo

sa yo, olye yo vann pwodui alimantè sa yo pou konsomasyon. Si sa rive, gaz-byo amelyore sa yo ap gen menm efè negatif ak sa yo te jwenn ak gaz-byo premye jenerasyon an.

An gwo, tèz sa a kontribye nan analize dinamik ekonomik ak sosyal tranzisyon enèjetik la pwodui. Kote li montre ki jan chanjman pri faktè pwodiksyon yo, tankou bese pri kapital oswa ogmantasyon pri tè yo, afekte fanmi yo nan yon fason oubyen yon lòt selon nivo revni yo, sa ki kapab ogmante inegalite yo. Yon lòt bò, li gade potansyèl gaz avanse yo epi li entegre enplikasyon direktiv ReFuelEU Aviation, travay sa a mete aksan sou risk pou objektif klimatik yo ak sekirite alimantè a pa abouti si pa gen yon regilasyon solid ak bon ankadreman ekonomik. Boutofen, tèz la lanse yon apèl pou mete an plas politik piblik ki pa sèlman sipòte tranzisyon enèjetik la, men ki pran an konsiderasyon efè li sou inegalite ak dirablite sistèm sosyoekonomik yo.



Le chapitre « Transition énergétique et biocarburants : impact des et sur les inégalités » a été coécrite avec Étienne Billette de Villemeur et Claire Naiditch.

Le chapitre « Impacts de la co-production d'énergie biosourcée et de carburants d'aviation durables » a été coécrite avec Étienne Billette de Villemeur et Sophie Bernard.

« L'université de Lille n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur. »

# Table des matières

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES ACRONYMES	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
I INTRODUCTION GÉNÉRALE	I
I.1 La transition énergétique : un impératif face aux défis climatiques et économiques . . . . .	2
I.1.1 Croissance économique et réchauffement climatique : vers une transition éner- gique incontournable . . . . .	2
I.1.2 Interdépendances entre économie, énergie et environnement : enjeux pour un dé- veloppement durable . . . . .	6
I.2 Les bioénergies comme levier de la transition énergétique . . . . .	9
I.2.1 Bioénergies : définitions, typologies et mesure . . . . .	9
I.2.2 Bioénergies : une solution environnementale efficace? Avantages et inconvénients .	20
I.2.3 Viabilité économique des bioénergies : opportunités et défis . . . . .	22
I.3 Les inégalités et la transition énergétique : un défi d'équité et de justice sociale . . . . .	24
I.3.1 Réchauffement climatique et inégalités, un lien à double sens . . . . .	25
I.3.2 Transition énergétique et inégalités : un défi à relever . . . . .	26
I.4 Contributions de la thèse . . . . .	29
I.4.1 Les biocarburants liquides : un choix stratégique pour la durabilité . . . . .	29
I.4.2 Inégalités de revenus : une dimension essentielle de l'analyse . . . . .	29
I.4.3 Les carburants d'aviation durables : un levier pour décarboner l'aviation . . . . .	31

1.4.4	Potentiel de production des biocarburants : défis et perspectives . . . . .	32
2	TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET BIOCARBURANTS :	
	IMPACT DES INÉGALITÉS ET SUR LES INÉGALITÉS	34
2.1	Introduction . . . . .	34
2.2	Description du modèle . . . . .	37
2.2.1	Vue d'ensemble : hypothèses globales . . . . .	38
2.2.2	La production . . . . .	38
2.2.3	La consommation . . . . .	43
2.2.4	Niveau de revenu . . . . .	44
2.2.5	Choix et limites du modèle . . . . .	47
2.3	Résultats obtenus . . . . .	48
2.3.1	Transition et mix énergétique . . . . .	50
2.3.2	Effets des inégalités sur la transition énergétique . . . . .	64
2.3.3	Effets de la transition énergétique sur les inégalités . . . . .	68
2.3.4	Analyse des résultats . . . . .	75
2.4	Prolongement du modèle . . . . .	77
2.4.1	Explorations additionnelles . . . . .	77
2.5	Conclusion . . . . .	80
3	IMPACTS DE LA CO-PRODUCTION D'ÉNERGIE BIOSOURCÉE ET DE CARBURANTS D'AVIATION	
	DURABLES	83
3.1	Introduction . . . . .	83
3.2	Marché de carburant d'aviation et émissions de GES du secteur . . . . .	88
3.2.1	Demande de carburant d'aviation . . . . .	88
3.2.2	Performance opérationnelle, prix et durabilité par rapport au kérosène (Jet-A) . . . . .	90
3.2.3	Emissions de GES de l'aviation civile . . . . .	91
3.3	Cadre réglementaire de l'initiative ReFuelEU Aviation . . . . .	94
3.3.1	Vue d'ensemble . . . . .	94
3.3.2	Effets attendus de l'initiative RefuelEU Aviation . . . . .	96
3.4	Revue de littérature . . . . .	98

3.5	Vue d'ensemble du modèle . . . . .	100
3.5.1	Présentation générale du modèle . . . . .	101
3.6	Résultats . . . . .	106
3.6.1	Situation initiale : réalité du marché et résultats avant l'application des mandats de mélange de CAD . . . . .	107
3.6.2	Impacts de l'imposition du quota $\theta$ . . . . .	112
3.6.3	Considérations sur le bien-être . . . . .	115
3.7	Conclusion . . . . .	118
4	CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	120
4.1	Perspectives de recherche . . . . .	120
4.1.1	Taxation optimal des émissions de GES pour une transition énergétique équitable . . . . .	120
4.1.2	Potentiel de développement de la production de CAD . . . . .	121
4.2	Conclusion . . . . .	128
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	132
	ANNEXE A ANNEXE DU CHAPITRE 2 . . . . .	II
A.1	Modèle avec égalité de revenu et de préférences ( $ME_{RE}P$ ) . . . . .	III
A.1.1	Résultats selon les conditions d'équilibre de marché . . . . .	IV
A.1.2	Résultats selon les conditions à l'optimum social . . . . .	VII
A.2	Modèle avec inégalité de revenu et de préférences $MI_{RI}P$ . . . . .	XV
A.2.1	Résultats selon les conditions d'équilibre de marché . . . . .	XVII
A.2.2	Résultats selon les conditions de l'optimum social . . . . .	XXIII
A.3	Effets des inégalités et sur les inégalités . . . . .	XXV
A.3.1	Effets de la transition énergétique sur les inégalités . . . . .	XXV
A.4	Autres considérations possibles et Prolongement du modèle . . . . .	XXVIII
A.4.1	Variation des parts et des quantités à l'optimum social par rapport à $a_G$ . . . . .	XXVIII
	ANNEXE B ANNEXE DU CHAPITRE 3 . . . . .	XXIX
B.1	Résultats de base . . . . .	XXIX
B.1.1	Production de nourriture et de résidus agricoles . . . . .	XXIX

B.1.2	Production de CAD à partir de résidus agricoles . . . . .	XXX
B.1.3	Équilibre sur le marché des résidus agricoles . . . . .	XXX
B.2	Application du quota $\theta$ et ses effets . . . . .	XXXI
B.2.1	Variation des prix . . . . .	XXXI
B.2.2	Variation de la demande totale de carburant aviation . . . . .	XXXI
B.2.3	Variation d'autres variables . . . . .	XXXII
B.3	Effets sur le bien-être $\mathcal{W}$ . . . . .	XXXII
B.3.1	Détermination de $\theta^*$ à partir de l'équation B.20 . . . . .	XXXIII

# Liste des acronymes

- ACV : Analyse du Cycle de Vie
- CAD : Carburant d'aviation durable (SAF : Sustainable Aviation Fuel)
- CCS : Capture et Séquestration du Carbone
- CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone
- ECA : European Court of Auditors
- EEA : European Environment Agency
- UE : Union Européenne
- EU ETS : European Union Emissions Trading Scheme
- GES : Gaz à effet de serre
- GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- HEFA : Hydro-traitement des Esters et des Acides Gras
- IEA : International Energy Agency
- IRENA : International Renewable Energy Agency
- ICAO : International Civil Aviation Organization
- LULUCF : Utilisation des terres, changement d'utilisation des terres et foresterie
- OPEP : Organisation des pays exportateurs de pétrole
- OECD : Organisation de coopération et de développement économiques
- ONU : Organisation des Nations Unies
- PIB : Produit Intérieur Brut
- PRG : Potentiel de réchauffement global
- PV : Photovoltaïque
- ENR : Énergies renouvelables
- RED II : Renewable Energy Directive II

— UCO : Huile de cuisson usagée



# Table des figures

1.1	Répartition des émissions de GES par secteur d'activité et par type dans le monde en 2020 . . . . .	3
1.2	Evolution de la production totale d'énergie par source dans le monde de 1990 à 2021 . . . . .	4
1.3	Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire par région . . . . .	5
1.4	Evolution de la consommation de biocarburants par type de 2010 à 2022 . . . . .	16
1.5	Evolution de la consommation de biocarburants par type dans le transport de 2016 à 2022 . . . . .	17
1.6	Evolution de l'investissement pour la production d'énergie selon le type de 2015 à 2021 . . . . .	19
2.1	Régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie (à l'équilibre) . . . . .	52
2.2	Transition énergétique selon le ratio capital-terre à l'équilibre de marché . . . . .	52
2.3	Régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie (à l'optimum) . . . . .	55
2.4	Transition énergétique selon le ratio capital-terre à l'optimum social . . . . .	55
2.5	Régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie (équilibre vs optimum) . . . . .	57
2.6	Transition énergétique selon le ratio capital-terre (équilibre vs optimum) . . . . .	58
2.7	Quantité d'énergie produite en fonction des ressources (équilibre vs optimum) . . . . .	59
2.8	Quantité de nourriture $X$ produite à l'équilibre et à l'optimum . . . . .	63
2.9	Quantité de biens manufacturés produite à l'équilibre et à l'optimum . . . . .	64
2.10	Régime de production d'énergie à l'équilibre de marché (avec et sans inégalités) . . . . .	65
2.11	Régime de production d'énergie à l'optimum social (avec et sans inégalités) . . . . .	66
2.12	Régime de production de l'énergie avec les inégalités (équilibre vs optimum) . . . . .	67
2.13	Evolution de la part des dépenses alimentaires selon le revenu . . . . .	71
2.14	Evolution du prix du capital selon le régime de production d'énergie . . . . .	73
2.15	Evolution du prix de la terre selon le régime de production d'énergie . . . . .	75
3.1	Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie par secteur dans l'UE . . . . .	88
3.2	Évolution mondiale de la consommation de produits pétroliers raffinés par type . . . . .	89
3.3	Émissions de CO <sub>2</sub> dans l'aviation dans le scénario net zéro, 2000-2030 . . . . .	92

3.4	Mandat d'incorporation minimale de CAD par année dans la zone UE . . . . .	94
3.5	Potentiel de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> dans le cadre de l'initiative ReFuelEU . . . . .	96
3.6	Demande de CAD pour satisfaire l'initiative ReFuelEU Aviation par année . . . . .	97
3.7	Evolution de la part de CAD selon le prix des résidus agricoles sur le marché . . . . .	110
3.8	Evolution de la part de CAD selon le prix du kérosène sur le marché . . . . .	111
4.1	Consommation de carburéacteur dans l'Union européenne de 1990 à 2022 . . . . .	123
4.2	Densité empirique de la consommation de carburant dans l'Union européenne . . . . .	124
4.3	Densité empirique de la consommation de carburant dans l'Union européenne . . . . .	125
4.4	Evolution de la production de CAD en Europe et dans le monde . . . . .	126
4.5	Estimation de la densité empirique de la production de CAD . . . . .	127

# Liste des tableaux

3.1	Filières de production de CAD certifiées . . . . .	95
A.1	Tableau de calibration des paramètres compte tenu de l'équation A.28 . . . . .	XV

# 1

## Introduction générale

La croissance économique qui a suivi la révolution industrielle s'est faite peu ou prou sur la base d'une utilisation sans frein des ressources naturelles. Ceci a conduit non seulement à un amenuisement des ressources disponibles pour les générations à venir, mais également à une perturbation majeure de l'équilibre des écosystèmes. Les changements climatiques n'en sont que la figure iconique.

Les énergies renouvelables, sources d'énergie se régénérant naturellement et inépuisables à l'échelle humaine, et en particulier la bioénergie, produite à partir de matières organiques renouvelables, sont souvent proposées comme une voie prometteuse pour réduire la dépendance envers les énergies fossiles. Cependant, surtout si la bioénergie est produite à grande échelle, elle n'est pas nécessairement, rentable du point de vue économique, ni « durable » du point de vue écologique. Qu'elles soient renouvelables ou non, l'utilisation des ressources énergétiques ne peut se faire aujourd'hui sans considérer l'ensemble du circuit de production et l'impact sur tous les écosystèmes, ensembles d'organismes vivants et leur environnement interagissant entre eux dans un équilibre dynamique, impliqués et impactés. Aussi, il convient de considérer la vie humaine – et les activités productives qui l'accompagnent – comme partie intégrante de l'écosystème global. C'est l'objet de l'économie

écologique.

Ce lien entre économie et écosystème(s) est à considérer dans deux directions. D'une part, toute activité économique a un impact sur le fonctionnement du ou des écosystèmes au sein desquels elle s'inscrit. D'autre part, l'écosystème et ses caractéristiques ont un impact sur la nature et la localisation des activités que les populations humaines mettent en place. Cette thèse vise à explorer ces deux directions pour ce qui a trait à la production de biomasse et des biocarburants.

## 1.1 LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : UN IMPÉRATIF FACE AUX DÉFIS CLIMATIQUES ET ÉCONOMIQUES

Propulsée par une consommation énergétique exponentielle principalement basée sur les combustibles fossiles, l'économie mondiale a connu une croissance sans précédent depuis la révolution industrielle. Si cette consommation énergétique a permis des avancées technologiques et une amélioration du niveau de vie, elle a également engendré une augmentation alarmante des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), conduisant au réchauffement climatique (Bessou et al., 2011). Ce phénomène soulève une question cruciale : comment concilier développement et durabilité ? Dans ce contexte, la transition énergétique émerge non seulement comme une nécessité environnementale pour atténuer les impacts du changement climatique, mais aussi comme une opportunité économique pour redéfinir les modèles de croissance future. Cette section se propose d'explorer les liens complexes entre l'économie, l'énergie et l'environnement, tout en examinant les perspectives offertes par la transition vers des sources d'énergie renouvelables.

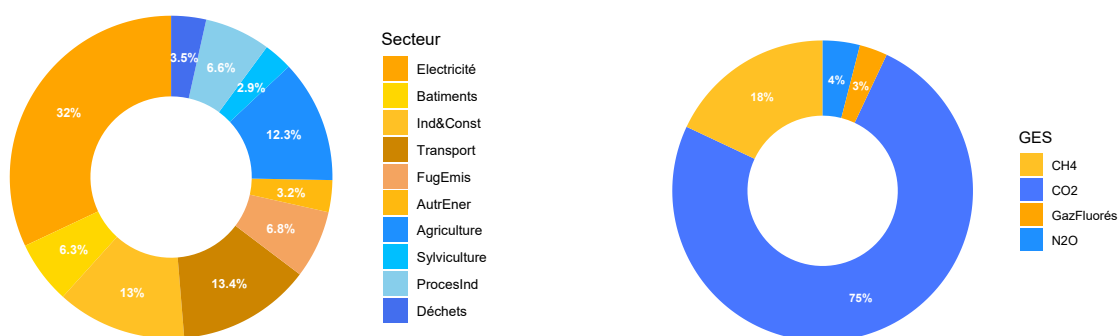
### 1.1.1 CROISSANCE ÉCONOMIQUE ET RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE : VERS UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE INCONTOURNABLE

La première révolution industrielle a marqué un tournant décisif dans l'histoire économique mondiale. Elle a été caractérisée par une transition significative vers des modes de production intensifs en énergie, principalement grâce à l'utilisation du charbon, et par la suite, du pétrole ou du gaz naturel. Certains économistes, notamment Kaldor (1966), ont mis en évidence que l'industrialisation, alimentée par l'accès à des sources d'énergie bon marché et abondantes, a été un moteur essentiel de la croissance économique. Pendant longtemps, la croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) a été fortement corrélée à l'augmentation de la consom-

mation d'énergie, dans les pays développés comme dans les pays en développement d'ailleurs. Dans cette même veine, les travaux de Nordhaus (2013) et Stern (2007), soulignent que cette dépendance aux combustibles et carburants fossiles a permis une expansion rapide de la production, mais a également engendré des conséquences environnementales néfastes.

Par ailleurs, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) soutient l'idée que le réchauffement climatique provient principalement de l'accumulation de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère. En effet, c'est l'augmentation de la concentration atmosphérique des GES due aux émissions anthropiques qui accroît le rayonnement de l'énergie vers le sol, entraînant un déséquilibre du bilan radiatif de la Terre et une augmentation de la température à la surface de la Terre. Ce phénomène est dénommé réchauffement ou changement climatique (IPCC, 2022a).

Les GES occupent entre 0,5% et 4,5% du volume atmosphérique, en tenant compte de la vapeur d'eau. En dehors de celle-ci, ils sont constitués du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), du méthane ( $CH_4$ ), d'oxyde nitreux ( $N_2O$ ) et des gaz fluorescents ( $HFC$ ,  $PFC$ ,  $SF_8$ ,  $NF_3$ ) et proviennent principalement des sources suivantes : combustion de carburants fossiles, processus industriels, déforestation tropicale, sites de décharges, agriculture, élevage, utilisation d'engrais, pulvérisations, réfrigération, fabrication de composants électroniques (EASAC, 2022). Toutes les activités humaines de production et de consommation de biens et de services, dans tous les secteurs d'activités (agriculture, industrie, logement, transport, etc), sont génératrices d'émissions de GES (IPCC, 2022a).



(a) Emissions par secteur

(b) Emissions par type

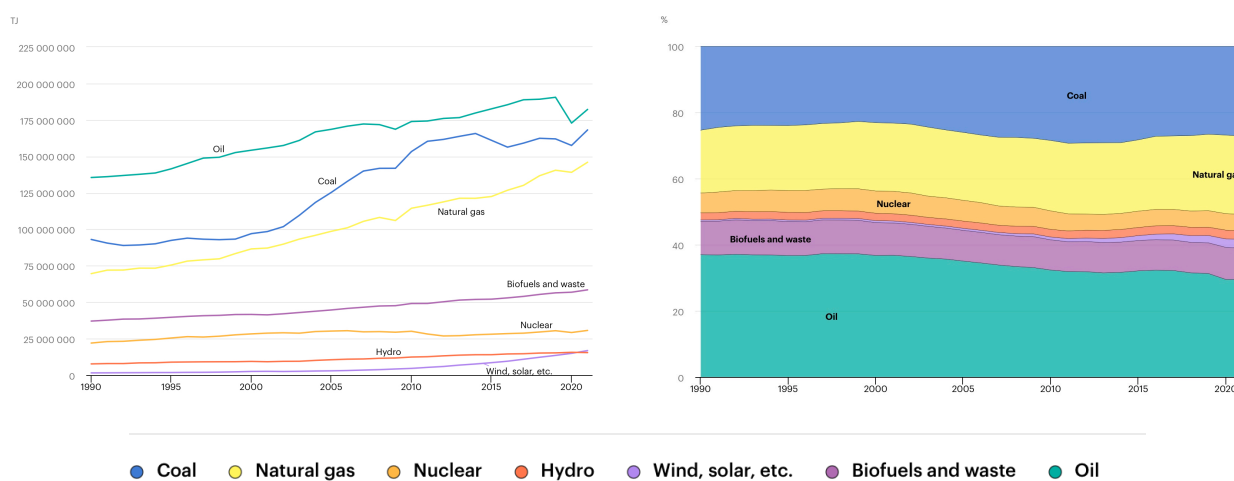
Source : IAE (2022) & ICCP (3rd Working Group, 2022).

**FIGURE 1.1 :** Répartition des émissions de GES par secteur d'activité et par type dans le monde en 2020

Le graphique 1.1 met en lumière que l'utilisation de l'électricité et de la chaleur, l'industrie et la construction,

l'agriculture et le transport représentent les principales sources d'émissions de GES, totalisant près de 80% du volume total émis. De plus, il est notable que le dioxyde de carbone contribue à hauteur de 75% des émissions de GES d'origine anthropique. C'est pourquoi, afin de permettre une comparaison des GES sur la base de leur potentiel de réchauffement global (PRG), ils sont convertis en quantités équivalentes de CO<sub>2</sub>.

Par ailleurs, les émissions liées à l'énergie représentent près de 75% des émissions de GES en 2020 (74.7% exactement), contre 68.42% en 2021<sup>1</sup>. L'énergie, produite majoritairement à partir des hydrocarbures et du charbon, fortement polluants, est utilisée dans tous les secteurs du quotidien humain sous différents aspects, la production et l'utilisation d'énergie constituent le principale responsable des émissions de GES.



Source : World energy outlook ( IAE, 2022)

**FIGURE 1.2 :** Evolution de la production totale d'énergie par source dans le monde de 1990 à 2021

Note : La production totale d'énergie (PTE) comprend toute l'énergie produite ou importée dans un pays, moins celle qui est exportée ou stockée.

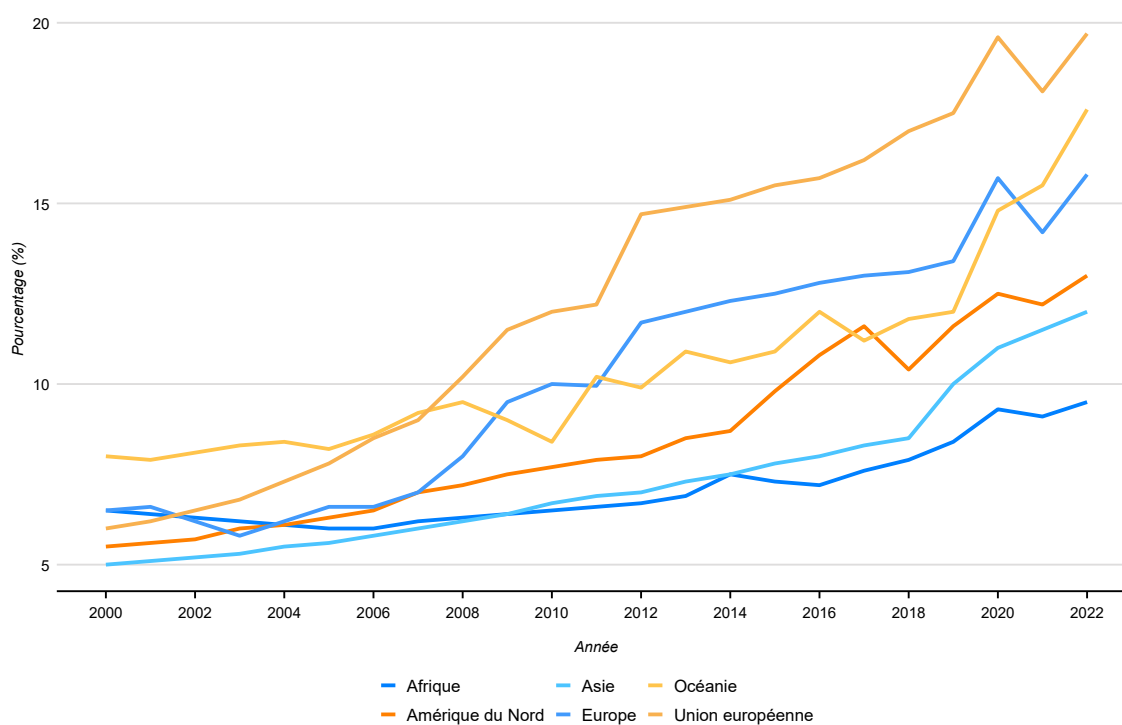
Effectivement, comme illustré dans la figure 1.2, la production mondiale d'énergie est largement dominée par les hydrocarbures (gaz naturel et pétrole) et le charbon, sources principales des énergies fossiles. Ces dernières ont représenté entre 80% et 70% de la production totale de 1990 à 2021 respectivement, alimentant les divers secteurs de la consommation intermédiaire et finale, notamment l'agriculture, l'industrie, les services, ainsi que les domaines du transport, de l'électricité et du chauffage.

Ainsi, face aux enjeux posés par le réchauffement climatique, la transition énergétique paraît être une solution incontournable. Cette transition se définit comme le passage d'un modèle énergétique basé sur les énergies fossiles à un modèle reposant sur des sources renouvelables. Les énergies renouvelables sont donc gé-

1. En 2021, les émissions provenant de la combustion d'énergie ont atteint 36800 Mt, tandis que les émissions mondiales de dioxyde de carbone s'élevaient à 53786,04 Mt, selon l'IEA (2023c).

néralement considérées comme une alternative renouvelable aux énergies fossiles, en ce sens qu'elles peuvent contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et aider à la limitation et à l'atténuation des effets du phénomène de réchauffement ou changement climatique (IEA, 2019).

Contrairement aux ressources fossiles, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse) sont caractérisées par leur disponibilité illimitée, puisqu'elles se régénèrent continuellement dans notre environnement. En accord avec les conclusions de l'Organisation des Nations Unies (ONU), la transition vers des sources d'énergie propre, y compris les biocarburants, s'avère être une stratégie efficace non seulement pour atténuer les changements climatiques, mais également pour réduire la pollution atmosphérique et promouvoir la santé publique. Au regard des données empiriques, au niveau mondial, au cours des trois dernières décennies, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire a progressé de trois points de pourcentage, passant de 16,1% en 1990 à 19,1% en 2020 (IEA, 2023b).



Source: Energy Institute - Statistical review of World Energy (2023)

**FIGURE 1.3 :** Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire par région

**Note :** L'énergie primaire comprend l'énergie dont l'utilisateur final a besoin, sous forme d'électricité, de transport et de chauffage, ainsi que les inefficacités et l'énergie perdue lors de la transformation des ressources brutes en une forme utilisable.

Au niveau régional, comme l'illustre la figure 1.3, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire connaît une nette progression dans toutes les régions. En particulier, l'Europe, et plus spécifiquement l'Union européenne, demeure la région affichant la plus forte proportion d'énergies renou-

velables dans sa consommation d'énergie primaire au cours de la dernière décennie. Elle est suivie de près par l'Océanie et l'Amérique du Nord. En revanche, bien que l'Asie et, plus encore, l'Afrique connaissent également une hausse de cette part, celle-ci demeure relativement faible par rapport aux autres régions, indiquant un écart de développement en matière de transition énergétique.

### 1.1.2 INTERDÉPENDANCES ENTRE ÉCONOMIE, ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT : ENJEUX POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE

La révolution industrielle a initié une consommation énergétique intensive, principalement à base de charbon, qui a alimenté une croissance économique sans précédent tout en engendrant des impacts environnementaux majeurs (Fouquet, 2009). Au XXe siècle, l'émergence du pétrole et du gaz a diversifié le mix énergétique mondial, mais elle a aussi amplifié la dégradation environnementale, notamment par l'augmentation des émissions de GES et la pollution des écosystèmes (Fouquet and Pearson, 1998 ; Fouquet, 2016). Ces défis environnementaux ont conduit à des réponses politiques globales, avec des cadres tels que le Protocole de Kyoto (1997) et surtout l'Accord de Paris (UNFCCC, 2015), qui a pour objectif de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C. Ces accords visent à réguler les émissions et à promouvoir des pratiques énergétiques durables (IPCC, 2014). Mais le rapport du IPCC (2022b) insiste sur la lenteur des ajustement et l'urgence d'accélérer la transition vers les énergies renouvelables et de réduire la dépendance aux énergies fossiles, si l'on veut éviter des effets irréversibles sur le climat mondial. La réduction des émissions de GES, couplée à des politiques économiques adaptées, est une nécessité pour assurer un avenir soutenable (IPCC, 2022b).

Le lien entre l'énergie, l'économie et l'environnement, connu sous le nom de lien énergie-économie-environnement (3E), est devenu central pour comprendre les interactions entre les politiques énergétiques, la croissance économique et la durabilité environnementale. La consommation énergétique est à la fois un moteur de développement économique et un facteur clé de la dégradation environnementale, comme l'illustrent les travaux de Omer (2008). Toutefois, ce lien se complexifie face aux réalités du changement climatique, où l'urgence de la transition énergétique impose des choix stratégiques, notamment dans la réduction des énergies fossiles et le développement des énergies renouvelables.

Un aspect crucial de cette transition est le développement des biocarburants. Les biocarburants de première

génération, issus de cultures agricoles, ont diversifié les sources d'énergie, mais avec des effets néfastes sur la sécurité alimentaire et l'usage des sols (Searchinger et al., 2008a). En revanche, les biocarburants avancés, produits à partir de déchets et résidus, promettent de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et d'atténuer les conflits d'usage des terres (Cherubini et al., 2011; IEA, 2022b). Ce cadre conceptuel du lien 3E permet d'évaluer comment les politiques énergétiques, technologiques et économiques peuvent être orientées vers un développement durable tout en tenant compte des impératifs environnementaux.

## RELATIONS ENTRE ÉCONOMIE ET RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES

L'énergie est un moteur essentiel de la croissance économique, et la consommation d'énergie, qu'elle soit fossile ou renouvelable, a des effets directs sur l'économie mondiale. D'après Stern (2007), la croissance économique historique repose sur une consommation accrue d'énergie, en particulier de combustibles fossiles, mais cela se fait au détriment de l'environnement. La relation entre l'économie et l'énergie est bien documentée dans les travaux de Omer (2008), qui montrent que les économies industrielles ont systématiquement utilisé plus d'énergie à mesure qu'elles se développaient, créant un lien indissociable entre énergie et PIB.

Cependant, l'efficacité énergétique, la transition vers les énergies renouvelables et l'innovation technologique offrent, entre autres, une possibilité de découpler cette relation. L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA, 2021b) démontre que les investissements dans les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne, ont atteint 300 milliards de dollars en 2020, créant des opportunités économiques tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles. En ce qui concerne les biocarburants, les biocarburants de première génération (issus de cultures alimentaires comme le maïs et la canne à sucre) et de seconde génération (issus de résidus agricoles et de déchets) diffèrent considérablement dans leurs impacts économiques. Searchinger et al. (2008a) montrent que la première génération de biocarburants, tout en soutenant certains secteurs agricoles, a généré des pressions sur les prix des denrées alimentaires et des conflits d'usage des terres, exacerbant les inégalités économiques. À l'inverse, Schnepf (2011) souligne que les biocarburants avancés offrent des perspectives économiques plus positives en réduisant ces conflits et en minimisant les risques de hausse des prix alimentaires.

Les travaux de Yang et al. (2021), Raud et al. (2019) et Khanna et al. (2021) confirment ces tendances en

analysant l'évolution des prix des denrées alimentaires et en soulignant que les politiques publiques doivent évoluer pour favoriser davantage les biocarburants avancés afin de minimiser les impacts socio-économiques négatifs.

Dans cette même lignée, les travaux de [Alizadeh et al. \(2020\)](#) et [Rial \(2024\)](#) apportent des données récentes en faveur des biocarburants de seconde génération, soulignant une réduction plus importante des conflits d'utilisation des sols et une baisse significative des coûts de production grâce à des progrès technologiques.

En outre, les effets des biocarburants de première et seconde génération sur l'emploi sont également contrastés. [Kojima et al. \(2007\)](#) montrent que les biocarburants de première génération ont stimulé l'emploi dans les secteurs agricoles, mais au prix de pressions inflationnistes sur les denrées alimentaires. Par contraste, l'Agence internationale pour les énergies renouvelables ([IRENA, 2021b](#)) estime que les biocarburants de seconde génération pourraient générer jusqu'à 10 millions d'emplois supplémentaires d'ici 2030, en particulier dans les zones rurales, sans compromettre la sécurité alimentaire.

## LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CHOIX ÉNERGÉTIQUES

Les émissions nettes de CO<sub>2</sub> ne sont pas les seuls impacts environnementaux à considérer dans l'analyse des impacts environnementaux des choix énergétiques. [Pimentel and Patzek \(2005\)](#) notent que la production de biocarburants de première génération est également extrêmement consommatrice de ressources, notamment en eau et en engrais, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur les écosystèmes locaux.

Les biocarburants de première génération, bien qu'ils réduisent les émissions directes de CO<sub>2</sub> par rapport aux combustibles fossiles, peuvent paradoxalement entraîner des émissions nettes plus élevées lorsqu'on tient compte des changements indirects d'utilisation des terres. [Fargione et al. \(2008\)](#) estiment que la conversion de forêts tropicales ou de prairies pour la culture de biocarburants peut libérer d'importantes quantités de carbone stocké, annulant les gains environnementaux espérés. De plus, [Reilly and Paltsev \(2009\)](#) montrent que l'intensification de la production agricole pour les biocarburants peut entraîner une déforestation accrue, augmentant ainsi les émissions de CO<sub>2</sub> liées au déboisement.

En revanche, les biocarburants avancés, issus de résidus ou de cultures non alimentaires, présentent un potentiel beaucoup plus élevé pour réduire les émissions de GES. [Cherubini et al. \(2011\)](#) montrent que ces

biocarburants peuvent réduire les émissions de 85 % par rapport aux carburants fossiles traditionnels. Dans le même sens, [Fischer et al. \(2010a\)](#) estiment que les biocarburants de seconde génération peuvent contribuer à une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> sans exercer de pression supplémentaire sur les ressources en eau et les sols. Les résultats récents de [Yang et al. \(2021\)](#) montrent que les biocarburants avancés produits à partir de déchets lignocellulosiques ont réduit de plus de 50 % l'empreinte hydrique par rapport aux biocarburants de première génération.

Les données récentes de l'Agence internationale de l'énergie et l'Agence internationale pour les énergies renouvelables ([IEA, 2022b](#); [IRENA, 2023b](#)) confirment ces résultats et montrent que les biocarburants avancés peuvent réduire les émissions de 65 à 85 %, tout en notant que les infrastructures de production doivent être largement améliorées pour atteindre ces objectifs.

En somme, la relation entre l'économie, l'énergie et l'environnement est marquée par des défis et des opportunités complexes. Si les biocarburants de première génération ont contribué à diversifier les sources d'énergie, leurs impacts économiques et environnementaux soulèvent de nombreuses questions, notamment en termes de sécurité alimentaire et d'émissions de GES. À l'inverse, les biocarburants avancés, bien que technologiquement plus complexes, offrent des perspectives plus prometteuses pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, minimiser l'impact sur les terres agricoles et améliorer la sécurité énergétique. Des investissements continus en recherche et développement, associés à des politiques publiques adaptées, seront essentiels pour maximiser ces opportunités et relever les défis à venir.

## 1.2 LES BIOÉNERGIES COMME LEVIER DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

### 1.2.1 BIOÉNERGIES : DÉFINITIONS, TYPOLOGIES ET MESURE

La biomasse est une matière première d'origine végétale, animale ou issue de déchets. Elle désigne un champ de matières très large : bois<sup>2</sup>, déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles (pailles, lisiers, etc), fraction fermentescible des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz de décharge ou encore produits de méthanisation (lisiers, boues d'épuration, décharges, etc). La biomasse comprend également les algues, les eaux usées et d'autres substances organiques qui peuvent être utilisées pour

---

2. Le bois est la plus grande source d'énergie de la biomasse selon [Eurostat](#)

produire de l'énergie par le biais de processus chimiques.

Représentant 55% des énergies renouvelables et plus de 6% de l'approvisionnement énergétique mondial, la bioénergie est définie comme l'énergie produite à partir de la biomasse et inclut toutes les formes d'énergie dérivées de matières organiques renouvelables. Elle est aujourd'hui la plus grande source d'énergie renouvelable au monde (IEA, 2023a). La bioénergie peut être produite à partir de cultures énergétiques spécifiques telles que le maïs, la canne à sucre, le colza, ou à partir des déchets agricoles, forestiers ou urbains, ainsi qu'à partir de la biomasse résiduelle et de la biomasse lignocellulosique. La bioénergie reste l'une des principales sources d'énergie pour une grande partie de la population mondiale qui vit dans l'extrême pauvreté et qui utilise cette énergie principalement pour cuisiner<sup>3</sup> ; parce que le bois de chauffage, le charbon de bois et les déjections animales continuent de fournir d'importantes sources d'énergie dans de nombreuses régions du monde (FAO, 2004).

Avec le développement et les innovations des dernières décennies, des technologies de conversion plus avancées et plus efficaces permettent actuellement d'obtenir des biocarburants - sous forme solide, liquide et gazeuse, ce qui favorise l'augmentation de la production de bioénergie. La bioénergie désigne donc le contenu énergétique des produits solides, liquides et gazeux dérivés de la biomasse IEA (2010). Elle inclut les biocarburants pour le transport, les produits destinés à produire de l'électricité et de la chaleur, ainsi que le biogaz produit à partir du traitement des matières biologiques provenant des déchets municipaux et industriels IEA (2003) ou encore de pellets de bois pour le chauffage domestique.

Selon la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, un biocarburant est défini comme un carburant liquide ou gazeux produit, directement ou indirectement, à partir de biomasse (EC, 2018). Cela inclut les biocarburants destinés à être utilisés dans les transports, qui sont dérivés de matières organiques renouvelables, telles que les plantes, les résidus agricoles, et d'autres matières biologiques.

---

3. FAO, The State of Food and Agriculture, Part I : Biofuels : Prospects, Risks and Opportunities (2008)

Les biocarburants se prêtent tout d'abord à une classification basée sur leur source et leur nature intrinsèque. Ensuite, on intègre l'analyse du cycle de vie qui, considérant attentivement l'impact environnemental de la biomasse utilisée à moyen et long terme, révèle des différences significatives dans la durabilité et l'efficacité environnementale de ces sources d'énergie renouvelable, ce qui oriente les décisions politiques et économiques vers des choix plus éclairés (Taheripour et al., 2010; Alizadeh et al., 2020; Antar et al., 2021; Capaz et al., 2021).

Une première distinction a lieu entre les biocarburants primaires, qui demeurent à l'état brut et non transformé, et les biocarburants secondaires, métamorphosés par des procédés de transformation :

1. Les *biocarburants primaires* désignent des combustibles issus de la biomasse, tels que le bois de chauffage et les granulés, utilisés dans leur forme naturelle par combustion pour le chauffage, la cuisson ou la production d'électricité.
2. Les *biocarburants secondaires* sont des combustibles produits à partir de biomasse qui ont été transformés chimiquement ou physiquement, et qui peuvent se présenter sous forme solide, liquide ou gazeuse. Ils sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment pour les transports et les procédés industriels nécessitant des températures élevées.

Les biocarburants revêtent diverses formes physiques.

1. Les *biocombustibles solides* englobent les matières organiques solides non fossiles d'origine biologique, communément appelées biomasse, qui peuvent être employées comme sources de combustibles pour la génération de chaleur ou d'électricité. Enregistrés dans les données énergétiques, les biocombustibles solides représentent un agrégat de produits incluant le charbon de bois, le bois de chauffage, les résidus et sous-produits de bois, la liqueur noire, la bagasse, les déchets animaux, ainsi que d'autres matières végétales, résidus et fractions renouvelables des déchets industriels.
2. Les *biocarburants liquides* comprennent tous les carburants liquides d'origine naturelle, tels que ceux dérivés de la biomasse et/ou de la fraction biodégradable des déchets, pouvant être mélangés ou substitués aux carburants liquides d'origine fossile. Dans les statistiques énergétiques, les biocarburants liquides sont un agrégat de produits égal à la somme de la biogazoline, des biodiesels, du biojet

kérosène et des autres biocarburants liquides (Bonatto et al., 2020; Bauen et al., 2009, 2020).

3. Le **biogaz**, un mélange essentiellement composé de méthane et de dioxyde de carbone, est issu de la décomposition anaérobie de la biomasse ou de processus thermiques utilisant la biomasse, notamment les déchets organiques. Dans les données énergétiques, le biogaz est catégorisé comme une agrégation de produits incluant le gaz de décharge, le gaz provenant des boues d'épuration, d'autres biogaz produits par la décomposition anaérobie, ainsi que les biogaz issus des procédés thermiques.

De plus, une distinction cruciale émerge entre différentes générations de biocarburants selon la technologie de production et l'analyse de leur cycle de vie.

1. Les biocarburants de **première génération** sont généralement fabriqués à partir de cultures alimentaires telles que le maïs, le blé, la canne à sucre, l'huile de palme, etc. Ces biocarburants sont produits à partir de la biomasse comestible ou facilement transformable en aliments. Les exemples incluent l'éthanol de maïs et le biodiesel à base d'huile de palme Aro (2016).
2. Les biocarburants de **deuxième génération** sont fabriqués à partir de matières premières non alimentaires ou de résidus agricoles, tels que les pailles, les tiges, les résidus de bois, les déchets agricoles, etc. Ces biocarburants utilisent des matières premières non compétitives avec l'industrie alimentaire, réduisant ainsi les conflits entre les cultures alimentaires et la production de biocarburants. Les exemples incluent le biodiesel à base de jatropha et l'éthanol cellulosique (Carriquiry et al., 2011).
3. Les biocarburants de **troisième génération** sont des biocarburants produits à partir de micro-organismes, d'algues ou de biomasse lignocellulosique. Ils sont souvent considérés comme plus durables et prometteurs que les biocarburants de première et deuxième génération en raison de leur potentiel de production élevé, de leur faible concurrence avec la production alimentaire et de leur capacité à être cultivés sur des terres non agricoles. Les exemples incluent le biodiesel à base d'algues et l'éthanol produit à partir de biomasse lignocellulosique (Costa et al., 2020).

Par ailleurs, les biocarburants avancés, également connus sous le nom de biocarburants de pointe, biocarburants avancés désignent des carburants produits à partir de matières premières non alimentaires, telles que les résidus agricoles, les déchets organiques ou les cultures énergétiques spécifiques, qui ne concurrencent pas la production alimentaire. Ils incluent des biocarburants de deuxième et troisième génération, comme le bioéthanol et le biodiesel dérivés de biomasse lignocellulosique, ainsi que des carburants synthétiques produits

par des procédés avancés (Costa et al., 2020; Lin and Lu, 2021a). Les biocarburants avancés sont conçus pour avoir des avantages environnementaux supérieurs, notamment une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants fossiles et une durabilité accrue en matière de ressources.

Dans ce contexte, les Carburants d'aviation durable (CAD) représentent une catégorie spécifique de biocarburants avancés, destinés à réduire l'empreinte carbone de l'aviation. Produits à partir de sources renouvelables, telles que les résidus agricoles, les déchets organiques, les huiles usées ou des cultures énergétiques spécifiques, les CAD incluent des biocarburants ainsi que des carburants synthétiques dérivés de l'hydrogène et du carbone capturé (Demirbas, 2009; Bauen et al., 2020; Cabrera and de Sousa, 2022a).

Les CAD sont produits à partir de plusieurs sources renouvelables, dont la plus utilisée est l'huile de cuisson usagée (UCO), qui représente environ 85% de la production mondiale de CAD. L'UCO est récupérée des restaurants et des industries alimentaires, ce qui permet de valoriser un déchet organique en une ressource précieuse. Cette huile est transformée en CAD via le procédé d'hydro-traitement des esters et des acides gras (HEFA), qui permet d'obtenir un carburant compatible avec les moteurs d'avion. Cependant, l'augmentation de la demande pour l'UCO dans la production de CAD a entraîné une hausse significative de son prix. En 2022, le coût de l'UCO a doublé par rapport aux années précédentes, atteignant jusqu'à 1,50€ par livre, ce qui représente un impact direct sur le coût de production du CAD. Cette hausse des prix a suscité des préoccupations quant à la durabilité de cette source, car elle pourrait entraîner une pression sur les autres secteurs utilisant également l'UCO, comme l'industrie alimentaire (Capaz et al., 2021; O'Connell et al., 2019; de Jong et al., 2018).

Outre l'UCO, les résidus agricoles et les déchets constituent une autre source importante de CAD. Ces matières premières, qui incluent les tiges de maïs, les pailles de blé et les sous-produits forestiers, sont principalement utilisées dans des procédés comme la gazéification suivie de la synthèse Fischer-Tropsch. Ce procédé permet de transformer ces déchets en un carburant liquide compatible avec les moteurs d'avion. Les résidus agricoles présentent l'avantage d'être une ressource abondante et facilement disponible, notamment dans les régions agricoles (Fischer et al., 2010b,a). Cependant, la conversion de ces matériaux en CAD nécessite des technologies avancées et des infrastructures adaptées, ce qui limite actuellement leur utilisation à grande échelle. Malgré ces défis, les résidus agricoles sont considérés comme une solution clé pour diversifier les

sources de CAD et améliorer la durabilité du secteur aérien à long terme (Emmerling and Tavoni, 2021; Emmanouilidou et al., 2023).

Enfin, les algues représentent une source émergente et prometteuse pour la production de CAD. Les algues peuvent produire des huiles riches en lipides qui, une fois extraites, sont transformées en carburant via des procédés similaires à ceux utilisés pour l'UCO. Bien que cette technologie soit encore en développement, elle offre un potentiel considérable en raison de la capacité des algues à se cultiver rapidement dans divers environnements, sans nécessiter de terres arables ou d'eau douce, contrairement aux cultures agricoles traditionnelles. Cependant, la production à grande échelle d'algues pour le CAD fait face à plusieurs obstacles, notamment la rentabilité et les défis liés à la culture, à la récolte et à l'extraction des huiles. Néanmoins, des progrès significatifs sont réalisés dans la recherche sur les algues, et des investissements supplémentaires pourraient permettre de surmonter ces défis, en faisant des algues une source clé de CAD dans les années à venir.

## ÉVOLUTION DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE DE BIOCARBURANTS DANS LE MONDE

Au cours des deux dernières décennies, l'offre et la demande de biocarburants ont connu une croissance significative à l'échelle mondiale. Cette évolution résulte de plusieurs facteurs convergents, notamment les préoccupations environnementales liées au réchauffement climatique, la volonté de diversifier les sources d'énergie et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles, ainsi que les politiques publiques incitatives mises en place par de nombreux pays.

### OFFRE DE BIOCARBURANTS

La production mondiale de biocarburants a augmenté de manière exponentielle depuis le début des années 2000. La production mondiale de biocarburants a atteint environ 164 milliards de litres en 2021, contre seulement 16 milliards de litres en 2000, soit une multiplication par dix en deux décennies (IEA, 2021b).

Cette croissance est principalement tirée par deux types de biocarburants :

Principalement produit à partir de cultures riches en sucres ou en amidon, comme la canne à sucre et le maïs, le bioéthanol représente environ 60% de la production mondiale de biocarburants. Les États-Unis et le Brésil sont les leaders mondiaux, représentant à eux seuls plus de 80% de la production mondiale de bioéthanol

(IRENA, 2021a).

Fabriqué à partir d'huiles végétales ou de graisses animales, le biodiesel constitue environ 40 % de la production mondiale de biocarburants. L'UE est le principal producteur de biodiesel, avec une production significative également en Indonésie, en Argentine et aux États-Unis (FAO, 2020).

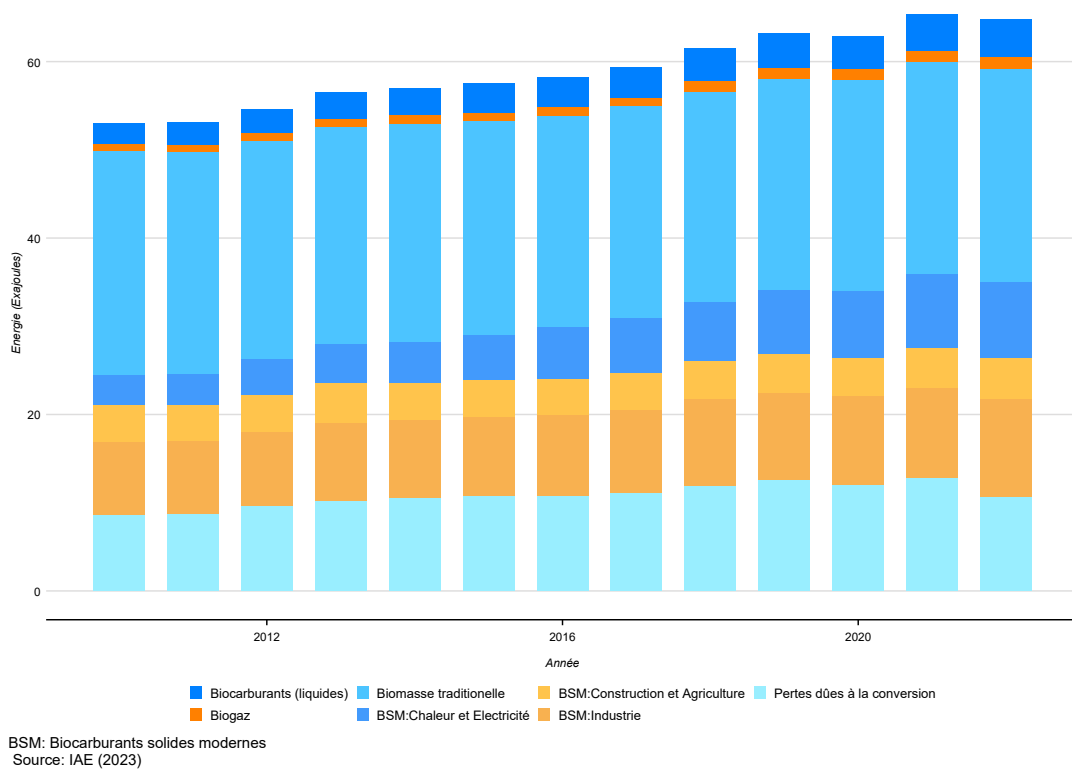
Les biocarburants avancés, produits à partir de matières premières non alimentaires telles que la biomasse lignocellulosique, les déchets agricoles et les cultures énergétiques pérennes, représentent une part croissante mais encore limitée du marché des biocarburants. En France, en 2023, ces biocarburants avancés constituaient 17 % de la consommation finale de biodiesel et 25 % de celle des bioessences (Eguienta et al.). À l'échelle mondiale, la production de biocarburants a atteint environ 2 000 milliers de barils équivalent pétrole par jour en 2022. Cependant, les biocarburants avancés ne représentent qu'une fraction de cette production totale. Par exemple, la production mondiale de biokérosène, un type de biocarburant avancé destiné à l'aviation, ne devrait représenter qu'entre 0.1 % et 0.3 % de la demande mondiale de carburant pour l'aviation entre 2021 et 2023 (IRENA, 2023a; IATA, 2023b).

## DEMANDE DE BIOCARBURANTS

La demande mondiale de biocarburants a été stimulée par plusieurs facteurs clés. La sécurité énergétique nationale ainsi que les préoccupations environnementales, comme la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre a conduit à une adoption accrue des biocarburants.

Avec des politiques gouvernementales incitatives de nombreux pays ont adopté des mandats d'incorporation de biocarburants dans les carburants fossiles pour les transports. Par exemple, l'UE, dans le cadre de la directive RED II, vise une part d'au moins 14 % d'énergies renouvelables dans le secteur des transports d'ici 2030 (EC, 2018). Aux États-Unis, le Renewable Fuel Standard (RFS) impose des volumes croissants de biocarburants à incorporer chaque année (EPA, 2021).

Entre 2012 et 2020, l'usage des bioénergies évolue significativement. Soutenus par leur adoption croissante, les biocarburants liquides ont progressé de 10 à 15 exajoules et le biogaz a atteint 5 exajoules en 2020. Les biocarburants solides modernes ont augmenté de 15 à plus de 20 exajoules, reflétant leur intégration accrue dans l'industrie et la production énergétique. En revanche, la biomasse traditionnelle a reculé de 20 à 15

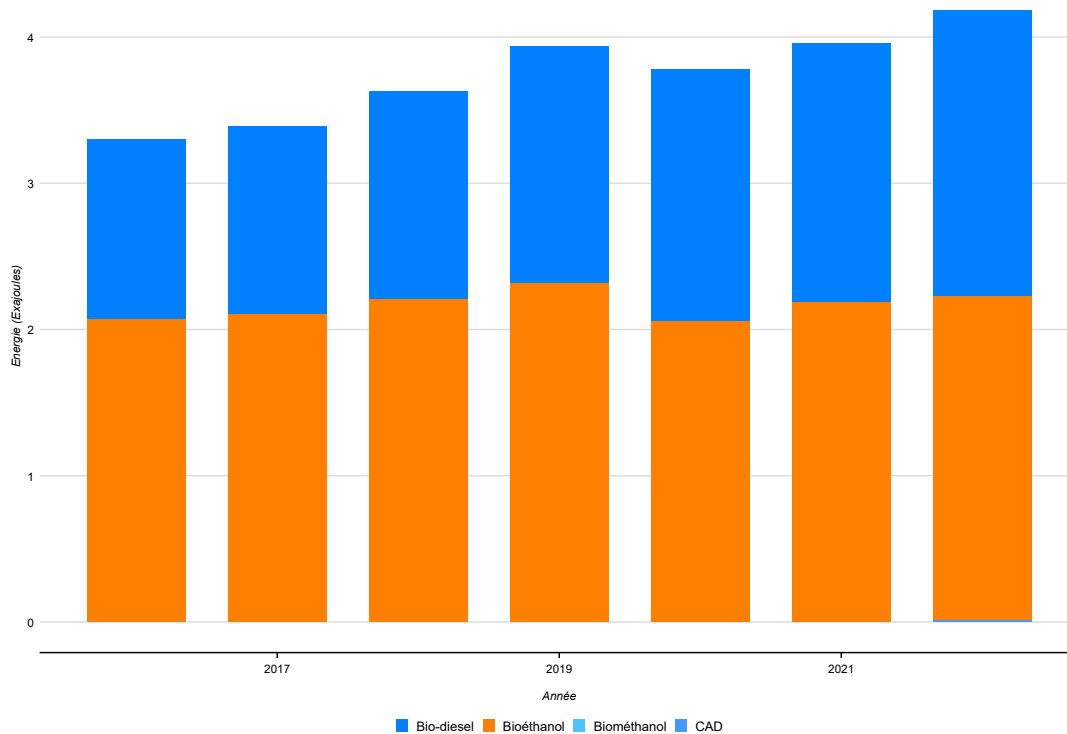


**FIGURE 1.4 :** *Evolution de la consommation de biocarburants par type de 2010 à 2022*

exajoules, marquant une transition vers des technologies modernes. Les pertes de conversion s'accroissent légèrement, passant de 5 à 7 exajoules, traduisant la complexité croissante des systèmes énergétiques.

Comme le montre la figure 1.5, entre 2017 et 2021, les biocarburants dans le transport sont constitués principalement et très largement du biodiesel et du bioéthanol. Le biodiesel reste un contributeur dominant, affichant une croissance modérée mais constante, soutenue par des politiques incitatives et le développement des infrastructures, il passe d'environ 37% des biocarburants utilisés dans le transport en 2016 à plus de 45% en 2022. Le bioéthanol occupe également une part significative, bien que sa trajectoire plus fluctuante reflète une sensibilité accrue aux dynamiques du marché. Les CAD, quant à eux, restent très faibles, mais ils enregistrent une certaine progression (0,005% à 0,01% de 2021 à 2022), bien qu'à partir d'un niveau initial faible, traduisant un intérêt croissant pour des solutions avancées à faible empreinte carbone, en particulier dans le secteur de l'aviation, en réponse aux objectifs internationaux de décarbonation.

Cependant, la croissance de la demande est confrontée à des défis. Les préoccupations concernant l'impact des biocarburants de première génération sur la sécurité alimentaire, la déforestation et les changements d'utilisation des sols ont conduit à une réévaluation des politiques et à un intérêt accru pour les biocarburants



Source: IEA (2023)

**FIGURE 1.5 :** Evolution de la consommation de biocarburants par type dans le transport de 2016 à 2022

avancés (Searchinger et al., 2008a; IEA, 2017, 2003, 2023e).

## TENDANCES RÉGIONALES

En Amérique du Nord, les États-Unis se positionnent comme le premier producteur et consommateur mondial de bioéthanol, bénéficiant d'une industrie bien établie soutenue par des politiques fédérales et étatiques favorables (USDA, 2020). Le Brésil, en Amérique du Sud, est un leader dans la production de bioéthanol à base de canne à sucre et dispose d'une flotte de véhicules flex-fuel largement répandue, ce qui facilite l'utilisation de ce biocarburant (ANP, 2021).

En Europe, l'Union européenne met l'accent sur la production de biodiesel à partir d'huile de colza et développe des biocarburants avancés pour respecter les critères de durabilité établis par la directive RED II (EC, 2020a). En Asie, des pays comme l'Indonésie et la Malaisie sont de grands producteurs de biodiesel, principalement à partir d'huile de palme, mais ils sont également confrontés à des critiques concernant la déforestation qui y est associée (WWF, 2019). Toutefois, la capacité installée de l'Afrique est encore loin de celle des autres régions, puisqu'elle ne représente que 1,7 % de la capacité installée mondiale (IEA, 2023c).

L'avenir des biocarburants dépendra largement des avancées technologiques, des incitations économiques, des réglementations juridiques et également des décisions politiques. [Banse et al. \(2008\)](#) soulignent que la compétitivité des biocarburants, en particulier ceux de seconde génération, est encore limitée par des coûts de production élevés. Cependant, les technologies de conversion des résidus et des déchets en biocarburants progressent rapidement. [Taheripour et al. \(2018\)](#) estiment que des investissements supplémentaires dans la recherche et le développement pourraient réduire les coûts de production de biocarburants avancés de 30 à 50% d'ici 2030, rendant ces carburants plus compétitifs par rapport aux énergies fossiles, en considérant le coût de production de ces derniers ainsi que leur niveau de taxation.

Les travaux récents de [Pang \(2019\)](#) et [Moustakas et al. \(2020\)](#) confirment que les innovations dans les procédés de conversion biomasse-énergie ont permis une baisse des coûts de 25% au cours des trois dernières années, ce qui renforce la compétitivité des biocarburants avancés ([Mungodla et al., 2019](#); [Rodionova et al., 2022](#)).

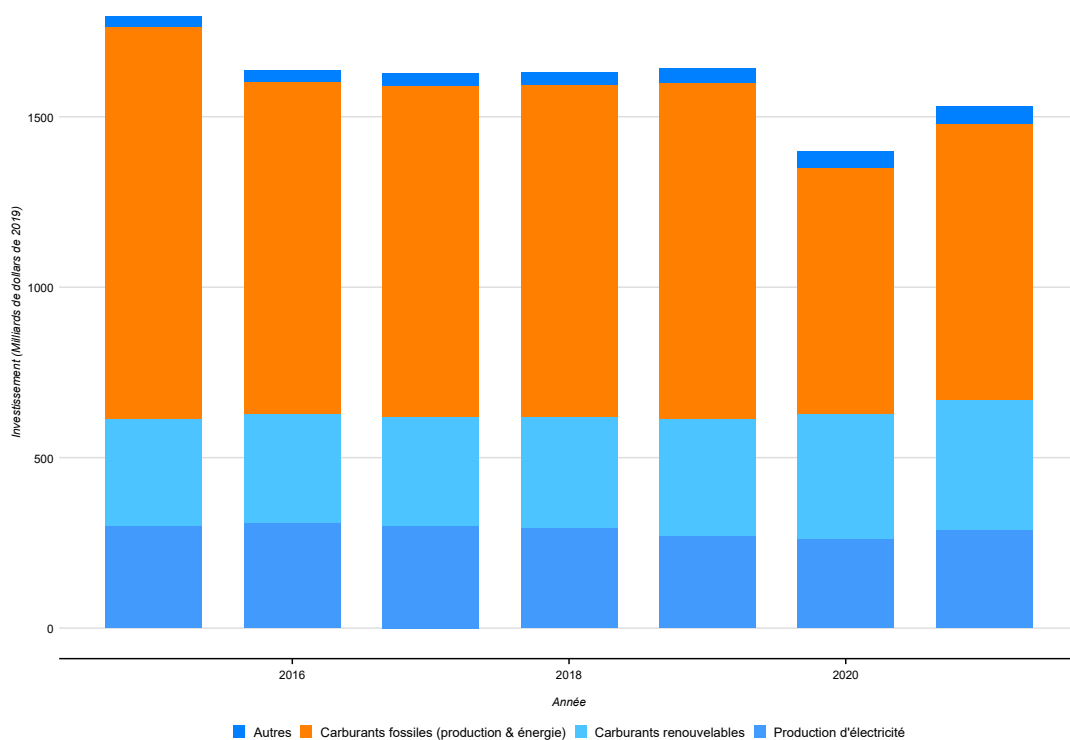
En outre, les politiques publiques jouent un rôle crucial dans le développement des biocarburants. [Schnepf \(2011\)](#) et [Timilsina and Shrestha \(2011\)](#) montrent que des subventions bien ciblées et des cadres réglementaires favorables sont essentiels pour encourager les investissements dans les biocarburants de seconde génération. Les récentes études de [IRENA \(2021b, 2023a\)](#) indiquent que les politiques axées sur la transition énergétique, notamment dans l'Union européenne et aux États-Unis, ont accéléré la production de biocarburants avancés, avec une augmentation de 20% des investissements entre 2020 et 2023.

Les projections indiquent que la production et la demande de biocarburants continueront de croître, mais à un rythme plus modéré. L'accent est de plus en plus mis sur le développement de biocarburants avancés et de CAD, en particulier dans le contexte de la décarbonation des secteurs difficiles à électrifier comme l'aviation et le transport maritime ([IEA, 2021a](#)).

Des réglementations, comme ReFuelEU Aviation dans l'UE, visent à accroître l'utilisation de CAD en établissant des objectifs d'incorporation pour les compagnies aériennes ([EC, 2023](#)). Ce type de politique devrait stimuler la demande de biocarburants avancés et encourager les investissements dans les technologies de pro-

duction correspondantes.

Par contre, en observant l'évolution récente des investissements dans la production d'énergie, nous constatons que ceux consacrés aux énergies fossiles, non seulement occupent encore une part prépondérante, mais aussi continuent d'augmenter, en dépit du soutien accru aux énergies renouvelables.



Source: IEA (2022)

**FIGURE 1.6 :** Evolution de l'investissement pour la production d'énergie selon le type de 2015 à 2021

Comme l'illustre la figure 1.6, après un léger repli en 2020, les investissements dans les énergies fossiles se sont rapidement redressés, enregistrant une hausse de 12 % en 2021 par rapport à l'année précédente, tandis que ceux dans les énergies renouvelables n'ont progressé que de 4 %. Néanmoins, la part consacrée aux énergies fossiles au sein des investissements totaux en énergie est passée de 59 % à 53 % entre 2016 et 2021, alors que celle dédiée aux énergies renouvelables s'est accrue, passant d'environ 19,6 % à 25 % sur la même période; complété par les investissements dans le nucléaire (passant de 2,14% à 3,33%) et le réseau électrique (de 18,76% à 18%).

### 1.2.2 BIOÉNERGIES : UNE SOLUTION ENVIRONNEMENTALE EFFICACE ? AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

La durabilité environnementale des biocarburants se réfère à leur capacité à réduire les émissions de GES et les effets néfastes sur la biodiversité<sup>4</sup> tout en préservant mieux les ressources naturelles, par rapport aux énergies fossiles. C'est une question complexe qui nécessite une évaluation approfondie de divers aspects environnementaux, notamment les émissions de GES, le changement d'utilisation des sols, la biodiversité et les externalités négatives associées à leur production. En comparant ces facteurs aux carburants fossiles, cette revue de la littérature se concentre sur l'évaluation du cycle de vie<sup>5</sup> (ACV) des biocarburants, en particulier ceux de première et deuxième génération, pour déterminer leur durabilité effective.

#### ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ET BIOCARBURANTS

Les biocarburants, en particulier ceux de deuxième génération, sont largement reconnus pour leur capacité à réduire les émissions de GES par rapport aux carburants fossiles. Une ACV révèle que les biocarburants de première génération, comme le bioéthanol produit à partir de maïs ou de canne à sucre, peuvent réduire les émissions de GES de 20 % à 50 %, bien que cela dépende des méthodes de culture, des intrants énergétiques et des variations régionales (Searchinger et al., 2008a; Mandegari et al., 2023). À l'inverse, les biocarburants de deuxième génération issus de matières lignocellulosiques montrent une réduction plus substantielle, allant de 60 % à 90 %, en raison de l'utilisation de matières premières non alimentaires et de technologies plus avancées comme la gazéification ou l'hydrolyse enzymatique (Naik et al., 2010a,b; IEA, 2023c).

Cependant, la durabilité des biocarburants varie selon les contextes technologiques et géographiques. Par exemple, Scown et al. (2012) notent que dans certaines régions, les pratiques agricoles ou les processus industriels peuvent entraîner des émissions supplémentaires, si ces procédés ne sont pas optimisés. Certaines cultures énergétiques peuvent émettre des gaz à effet de serre comme le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), un gaz avec un potentiel de réchauffement global beaucoup plus élevé que le CO<sub>2</sub> (Crutzen et al., 2007). Cela souligne la nécessité d'adopter des technologies plus efficaces, telles que l'amélioration des enzymes ou la Capture et

---

4. La biodiversité désigne la variété des espèces vivantes, des gènes et des écosystèmes sur Terre, essentielle au bon fonctionnement des environnements naturels et à la santé des écosystèmes.

5. L'évaluation du cycle de vie (ACV) est une méthode qui analyse les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de ses différentes étapes, de l'extraction des matières premières à sa fabrication, son utilisation, et enfin son élimination ou son recyclage.

séquestration du carbone<sup>6</sup> (CCS), pour maximiser la durabilité des biocarburants (Xu et al., 2020; Basumatary et al., 2023; Bonatto et al., 2020).

## CHANGEMENTS D'UTILISATION DES SOLS ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les changements d'utilisation des sols (LUC, pour Land Use Change<sup>7</sup>) sont cruciaux pour évaluer la durabilité des biocarburants. Lorsque des terres agricoles sont converties pour la production de cultures énergétiques, cela peut libérer du carbone stocké dans les sols et réduire la biodiversité, un phénomène appelé « changement d'utilisation des sols direct » (dLUC) (Fargione et al., 2008; Searchinger et al., 2008a). Cette conversion est particulièrement problématique dans les régions tropicales, où la déforestation peut annuler les bénéfices environnementaux des biocarburants.

Les biocarburants de deuxième génération, en revanche, atténuent ces effets en utilisant des résidus ou des déchets agricoles qui ne sont pas en concurrence avec les cultures alimentaires (Lamers et al., 2021). Selon Dale et al. (2011), les cultures pérennes comme le miscanthus ou le switchgrass, cultivées spécifiquement pour produire des biomasses lignocellulosiques, permettent de restaurer les sols dégradés tout en séquestrant du carbone, ce qui renforce les bénéfices environnementaux à long terme. Dans cette même logique, des politiques telles que la directive européenne sur les énergies renouvelables (RED II) imposent des critères stricts pour la durabilité, minimisant les effets néfastes du LUC (EC, 2020b).

## BIODIVERSITÉ ET EXTERNALITÉS NÉGATIVES

L'impact des biocarburants sur la biodiversité reste une préoccupation importante, en particulier pour les biocarburants de première génération. Des cultures énergétiques telles que le soja ou le palmier à huile peuvent entraîner une perte significative de biodiversité dans des écosystèmes fragiles, comme les forêts tropicales et les zones humides (Gasparatos et al., 2017, 2022; Phalan et al., 2016). En revanche, les biocarburants de deuxième génération, produits à partir de résidus ou de cultures pérennes, réduisent la pression sur la

---

6. La capture et séquestration du carbone (CCS) est une technologie qui réduit les émissions de CO<sub>2</sub> en le capturant à la source, comme dans les centrales électriques, puis en le stockant de manière sécurisée dans des formations géologiques souterraines, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique.

7. Le changement d'utilisation des sols (LUC) se réfère aux modifications dans la manière dont les terres sont utilisées. Lorsque les conversions de terres sont directement causées par les activités humaines, telles que la déforestation pour l'agriculture ou la construction, on parle de changement d'utilisation des sols direct (dLUC)

biodiversité (Xu et al., 2020; Timmons and Terwel, 2022).

Cependant, les biocarburants peuvent encore entraîner des externalités négatives, notamment une forte consommation d'eau et d'énergie dans certaines régions. Par exemple, les études sur le bioéthanol montrent que ses besoins en eau peuvent devenir insoutenables dans des régions sujettes à des pénuries (Pfister and Scherer, 2015). La gestion durable des ressources est donc essentielle pour garantir que les biocarburants ne compromettent pas d'autres aspects environnementaux.

La durabilité des biocarburants par rapport aux combustibles fossiles repose sur une combinaison de facteurs, tels que la réduction des GES, les changements d'utilisation des sols et les impacts sur la biodiversité. Les biocarburants de deuxième génération offrent une option plus respectueuse de l'environnement que les biocarburants de première génération, mais leur durabilité dépend fortement des pratiques de gestion et des politiques mises en place pour minimiser les externalités négatives. À l'avenir, des recherches supplémentaires et des innovations technologiques seront nécessaires pour maximiser la durabilité des biocarburants et leur compétitivité sur le marché énergétique.

### 1.2.3 VIABILITÉ ÉCONOMIQUE DES BIOÉNERGIES : OPPORTUNITÉS ET DÉFIS

La compétitivité des biocarburants par rapport aux carburants fossiles reste un sujet de débat significatif à mesure que les pays visent à évoluer vers des systèmes énergétiques plus durables (Guo et al., 2015; Demirbas, 2008). Cette revue se concentre sur les principaux facteurs influençant la compétitivité relative des biocarburants, notamment les coûts de production, les cadres politiques et les dynamiques de marché, avec une attention particulière aux biocarburants de deuxième génération produits à partir de matières lignocellulosiques.

Un des cadres centraux pour comprendre la compétitivité des biocarburants est l'analyse économique des coûts de production. Plusieurs études soulignent que le coût de production des biocarburants est fortement influencé par le choix des matières premières et les technologies de production (Kumar et al., 2018; Zhang et al., 2020). Par exemple, la production de bioéthanol à partir de matières lignocellulosiques — telles que les résidus agricoles et forestiers — présente des avantages significatifs en termes de durabilité et d'utilisation des terres, mais elle reste techniquement complexe et coûteuse (Leibensperger et al., 2021; Zhang et al., 2016).

Comparée aux biocarburants de première génération, la production de biocarburants de deuxième génération peut réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière plus substantielle, mais elle nécessite des procédés de transformation plus avancés, comme l'hydrolyse enzymatique et la gazéification, qui augmentent les coûts initiaux (Taheripour et al., 2010; Wise et al., 2014). En ce sens, la production de biocarburants lignocellulosiques à une échelle économiquement viable nécessite encore des améliorations technologiques significatives et une réduction des coûts d'infrastructure (Wise et al., 2014; Li et al., 2015; Leibensperger et al., 2021). Par ailleurs, l'amélioration des rendements grâce à l'ingénierie des enzymes et aux biotechnologies pourrait rendre ces biocarburants plus compétitifs à long terme (Xu et al., 2020). En ce sens, comprendre ces mécanismes économiques, en particulier l'évolution des coûts de production des biocarburants de deuxième génération, est crucial pour évaluer leur viabilité par rapport aux carburants fossiles.

En plus des coûts de production, les politiques gouvernementales jouent un rôle essentiel dans la détermination des dynamiques de marché des biocarburants. Comme le souligne Demirbas (2008), les subventions et les incitations fiscales peuvent créer un environnement économique plus favorable pour les biocarburants, augmentant ainsi leur compétitivité. Cependant, la production de biocarburants de deuxième génération nécessite un soutien politique plus important en raison de la complexité des technologies impliquées et des coûts élevés de développement Sorda et al. (2010); Li et al. (2015); IEA (2022b). Les pays de l'Union européenne, par exemple, ont mis en place des réglementations visant à encourager les biocarburants avancés, notamment à travers des mandats d'incorporation et des subventions pour la recherche et le développement dans le domaine des biocarburants lignocellulosiques (Lin and Lu, 2021b; de Jong et al., 2017; EC, 2020b). Aux États-Unis, la loi sur les normes renouvelables (Renewable Fuel Standard) inclut des quotas spécifiques pour les biocarburants avancés, mais leur adoption à grande échelle reste limitée par les infrastructures et les incertitudes politiques (Lark et al., 2022). Ces politiques, lorsqu'elles sont appliquées de manière cohérente, peuvent stimuler le développement des infrastructures nécessaires à la production de biocarburants de deuxième génération, favorisant leur compétitivité sur le marché international (IEA, 2023b; Correa et al., 2021).

Les dynamiques de marché compliquent encore le paysage de la compétitivité. Les fluctuations des prix des carburants fossiles peuvent directement influencer la demande de biocarburants. Par exemple, lorsque les prix du pétrole chutent de manière significative, comme cela a été le cas pendant la pandémie de COVID-

19 en 2020, les biocarburants peuvent devenir moins attractifs pour les consommateurs et les producteurs (Cherwoo et al., 2023; Amant and Subtil, 2022; Dumortier et al., 2021). Cette tendance est particulièrement vraie pour les biocarburants de première génération, qui dépendent fortement des prix des matières premières agricoles (Lamers et al., 2021). Cependant, les biocarburants de deuxième génération, étant produits à partir de déchets ou de résidus, sont moins sensibles aux variations des prix des matières premières agricoles (Naik et al., 2010b; Ng et al., 2021). Les avancées dans le domaine de la biomasse lignocellulosique, notamment la diversification des matières premières telles que les algues et les déchets agricoles, permettent une meilleure stabilité des coûts de production (Van Meerbeek et al., 2019; Becerra-Pérez et al., 2022).

En résumé, la compétitivité des biocarburants par rapport aux combustibles fossiles est façonnée par plusieurs facteurs interconnectés, notamment les coûts de production, les politiques publiques et les dynamiques de marché. Si la politique économique d'accompagnement et les biocarburants de deuxième génération peuvent constituer des avantages, le principal défi reste l'échelle industrielle de la production. Ainsi, pour maintenir la compétitivité des biocarburants de deuxième génération sur le marché, des efforts continus doivent être faits pour adapter la production aux variations du marché énergétique global.

### 1.3 LES INÉGALITÉS ET LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : UN DÉFI D'ÉQUITÉ ET DE JUSTICE SOCIALE

La transition énergétique est nécessaire pour atténuer les conséquences du changement climatique et diminuer les émissions de GES. Cependant, la transition énergétique a un coût, et comme le changement climatique (mais pour des raisons différentes), elle a un impact considérable sur les inégalités de revenus entre les pays ainsi qu'à l'intérieur des pays, c'est-à-dire entre les ménages de différents niveaux de revenu. Les effets sont multiples, allant de la distribution des coûts liés à la transition vers des énergies renouvelables à l'impact sur la consommation et l'investissement. En effet, les politiques de transition affectent principalement les pays ou foyers disposant de revenus modestes, car une plus grande partie de leurs revenus est consacrée à l'énergie (EC, 2022). De plus, la nécessité d'investir dans des équipements plus efficaces (voitures électriques, panneaux solaires) profite généralement mieux, en tout cas au début, aux pays ou ménages aisés, renforçant les inégalités existantes (OECD, 2023).

Afin de mieux rendre compte de cette littérature, nous allons tout d'abord revoir les conséquences du change-

ment climatiques sur les inégalités de revenu, avant de passer en revue les impacts de la transition énergétique sur les inégalité de revenu entre les pays d'une part et, d'autre part, à l'intérieur des pays.

### 1.3.1 RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET INÉGALITÉS, UN LIEN À DOUBLE SENS

Plusieurs travaux montrent que les régions et les populations les plus vulnérables sont souvent les plus touchées par les effets climatiques, exacerbant ainsi les inégalités économiques. Ces populations dépendant des secteurs sensibles comme l'agriculture, la pêche et la sylviculture, sont les plus vulnérables aux effets des variations climatiques, tels que les températures extrêmes et les précipitations irrégulières. Ces perturbations affectent directement la productivité agricole, ce qui réduit les revenus ruraux et entraîne une augmentation des prix alimentaires, touchant indirectement les populations urbaines à faible revenu (Burke et al., 2015; Paglialunga et al., 2022; Dietz et al., 2021).

Les ménages à faible revenu sont plus exposés aux conséquences économiques du changement climatique, telles que l'augmentation des coûts de l'énergie, des pertes agricoles et des dommages matériels dus à des événements climatiques extrêmes. En ce sens, la Banque mondiale souligne également que les régions et individus les plus pauvres voient un accroissement des écarts de revenus face aux impacts climatiques, créant ainsi un cercle vicieux de pauvreté et d'inégalités (Vona and Patriarca, 2011; Taconet et al., 2020). De plus, en raison de leur plus grande exposition aux risques climatiques et de leur moindre capacité d'adaptation, les inégalités économiques déjà existantes sont exacerbées, non seulement entre pays, mais aussi au sein des pays eux-mêmes. Par exemple, en Inde, les ménages pauvres sont plus gravement affectés par les variations météorologiques que les ménages aisés, un schéma qui se reproduit dans d'autres régions de l'UE et du monde (ODI, 2021).

Pour atténuer ces impacts, il est nécessaire d'adopter des politiques climatiques. Mais, comme le Fonds monétaire international (FMI) et l'OECD (2023) l'alertent, la transition vers une économie à faible émission de carbone, si elle n'est pas bien gérée, peut également entraîner des impacts inégalitaires, en augmentant le coût de la vie pour les plus pauvres, tout en créant de nouvelles opportunités pour les plus riches (Shang, 2021).

### 1.3.2 TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET INÉGALITÉS : UN DÉFI À RELEVER

La transition énergétique ne se déroule pas sans conséquences sur la structure socio-économique de nos sociétés. En effet, elle aggrave souvent les inégalités de revenus entre les ménages. Les populations les plus vulnérables, qui ont souvent moins accès aux ressources nécessaires pour adopter des technologies vertes, se retrouvent ainsi davantage marginalisées dans ce processus (Taconet et al., 2020; Paglialunga et al., 2022). À l'inverse, les ménages les plus riches, ayant les moyens d'investir dans des solutions énergétiques durables, bénéficient d'une position encore plus avantageuse. Ce phénomène soulève des questions intéressantes sur la justice sociale et l'équité dans la mise en œuvre des politiques de transition énergétique. Pour garantir que cette transition profite à tous, il est impératif d'adopter des mesures politiques inclusives, qui tiennent compte des disparités économiques et qui visent à réduire, plutôt qu'à aggraver, les inégalités existantes, au sein même de chaque pays et entre les pays.

#### TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET INÉGALITÉS AU SEIN DES PAYS

Les politiques climatiques, telles que les taxes sur le carbone, ont un impact régressif sur les ménages à faible revenu, qui consacrent une part importante de leurs revenus à l'énergie et deviennent ainsi plus vulnérables aux hausses de prix résultant de la transition énergétique, tant dans les pays développés que dans les économies en développement (Bourguignon and Morrisson, 1998). De plus, la pauvreté énergétique a augmenté dans plusieurs pays européens, où les ménages les plus défavorisés, avec un accès limité aux technologies énergétiques efficaces, subissent particulièrement la hausse des coûts (Pye et al.).

En revanche, les ménages plus aisés bénéficient de subventions pour installer des technologies vertes, comme des panneaux solaires et des véhicules électriques, ce qui leur permet de profiter des avantages de la transition énergétique. Les ménages à faible revenu, souvent incapables d'investir dans ces solutions, voient l'écart se creuser, renforçant l'inégalité d'accès aux énergies durables (Bento and Jacobsen, 2007). Par exemple, en Amérique du Nord, les subventions pour les véhicules électriques et les panneaux solaires profitent principalement aux ménages riches en raison du coût initial élevé, ce qui accentue l'inégalité en matière d'accès aux bénéfices de la transition énergétique (Fullerton and Muehlegger, 2017).

En réaffectant les recettes fiscales de la taxation du carbone pour financer des subventions aux ménages à

faibles revenus ou pour alléger d'autres taxes qui pèsent sur les plus vulnérables, il est possible d'atténuer les inégalités de revenu, en particulier dans les pays développés (Sterner, 2012; Dorband et al., 2019). À l'inverse, en l'absence de redistribution, ces taxes risquent d'accroître les inégalités économiques et sociales.

De plus, une transition énergétique bien orchestrée peut catalyser une croissance inclusive et durable. En adoptant une économie à faible émission de carbone, des opportunités d'emploi peuvent émerger dans le secteur des énergies renouvelables, notamment dans les pays développés (Chancel et al., 2018; Chen et al., 2018). Cependant, ces créations d'emplois tendent souvent à profiter davantage aux travailleurs qualifiés, renforçant ainsi les disparités de revenus. Dans les pays en développement, les programmes d'électrification rurale utilisant des énergies renouvelables ont permis d'améliorer l'accès à l'électricité pour les ménages pauvres, contribuant à réduire les inégalités, mais ils n'ont pas significativement atténué les disparités au sein des zones urbaines riches (Aklin and Urpelainen, 2018).

Des études indiquent également que les effets de la transition énergétique sur les inégalités varient considérablement selon les régions (Mazzucato and Perez, 2015; Bourguignon and Morrisson, 1998; Chen and Wang, 2024). L'analyse des impacts dans différents pays révèle que les régions rurales et celles où les industries à forte intensité carbone prédominent sont particulièrement vulnérables aux conséquences des politiques de transition énergétique. Cette dynamique entraîne un accroissement des inégalités régionales en termes de revenu et d'emploi (Le Quéré et al., 2019; Markkanen and Anger-Kraavi, 2019).

## TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET INÉGALITÉS ENTRE LES PAYS

La transition énergétique, qui s'est intensifiée au cours des dernières décennies, ne se produit pas de manière uniforme à travers le globe. Les pays en développement, principalement dans l'hémisphère Sud, peinent à suivre le rythme de la transition énergétique. Bien que moins responsables historiquement des émissions de gaz à effet de serre, ces pays sont les plus vulnérables aux impacts climatiques et sont souvent les moins capables de financer la transition (Sachs, 2015). À l'inverse, les pays les plus avancés, souvent situés dans l'hémisphère Nord, ont été les principaux moteurs et bénéficiaires des technologies renouvelables en raison de leur capacité d'investissement et de leurs infrastructures avancées (IRENA, 2020b,a). Les disparités de revenu et d'accès aux technologies, accentuées par les coûts initiaux élevés et la dépendance historique aux

combustibles fossiles, ont aggravé les inégalités économiques entre les nations au fur et à mesure de la transition énergétique.

La transition énergétique exacerbe les inégalités, particulièrement entre les pays riches et les pays en développement. Ces derniers, souvent les plus touchés par les effets du changement climatique, sont également les moins capables d'investir dans des technologies renouvelables en raison de leur dépendance aux combustibles fossiles bon marché, ce qui entrave leur développement économique (Sachs, 2015). Bien que des engagements aient été pris par les pays avancés pour financer l'adaptation et la transition énergétique, la majorité des financements a été allouée à des pays émergents relativement riches, comme la Chine et l'Inde, laissant les pays les plus pauvres dans l'insuffisance (Jakob and Steckel, 2014). Les mécanismes de financement climatique, tels que le Fonds vert pour le climat, n'ont pas satisfait les attentes des pays en développement, créant ainsi un fossé de plus en plus large en raison de l'insuffisance des fonds disponibles pour couvrir les coûts croissants liés à la transition énergétique (Pauw et al., 2014). De plus, les pays avancés, bénéficiant d'importants investissements en recherche et développement, ont réussi à réduire les coûts des énergies renouvelables, tandis que les pays les plus pauvres, avec des infrastructures et des capacités institutionnelles limitées, n'ont pas pu tirer profit de ces avancées (IRENA, 2020a,c; WB, 2021).

Cependant, la transition énergétique, si elle est bien planifiée, peut également offrir des opportunités pour réduire les inégalités. Les pays avancés, grâce à leurs investissements massifs dans les technologies vertes, ont pu réaliser des avancées significatives dans la transition vers des systèmes énergétiques durables, stimulant ainsi leur économie et créant des emplois dans le secteur des énergies renouvelables (IRENA, 2020a,c). En parallèle, des initiatives d'électrification rurale basées sur des sources d'énergie renouvelable dans les pays en développement ont permis d'améliorer l'accès à l'électricité pour les ménages pauvres, contribuant à réduire les inégalités d'accès à une énergie propre et abordable, bien que cela ait moins d'impact sur les zones urbaines riches (Goldthau and Sovacool, 2012; Aklın and Urpelainen, 2018). Ainsi, une approche inclusive et équitable de la transition énergétique pourrait transformer ces défis en opportunités pour les pays les plus vulnérables, tout en promouvant un développement durable à l'échelle mondiale.

Ainsi, la transition énergétique, bien qu'indispensable face aux enjeux climatiques, risque d'accentuer les inégalités entre riches et moins riches si elle n'est pas accompagnée de politiques redistributives efficaces.

L'accès aux technologies vertes, les effets des taxes carbone et la répartition géographique des impacts sont des facteurs clés qui façonnent ces inégalités. Réduire ces inégalités exige des engagements financiers solides, et une répartition inclusive et équitable des ressources se révèle donc nécessaire pour que cette transition soit bénéfique à tous, tant au niveau nationale qu'à l'échelle internationale.

#### 1.4 CONTRIBUTIONS DE LA THÈSE

À travers les trois chapitres de cette thèse, nous abordons les impacts de la transition énergétique sur les ménages de différents niveaux de revenu, explorons les synergies entre bioénergie et durabilité environnementale, et proposons une simulation pour évaluer l'impact des politiques de transition énergétique sur la soutenabilité et la compétitivité des biocarburants. En mettant en lumière ces enjeux, cette thèse vise non seulement à enrichir le débat académique mais aussi à fournir des recommandations éclairées pour les décideurs politiques afin de promouvoir une transition énergétique durable et équitable.

##### 1.4.1 LES BIOCARBURANTS LIQUIDES : UN CHOIX STRATÉGIQUE POUR LA DURABILITÉ

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur les biocarburants secondaires liquides des trois générations. Ce choix s'explique par leur potentiel significatif dans la transition énergétique, en particulier pour les secteurs difficiles à électrifier comme l'aviation et le transport maritime. Les biocarburants de première génération nous permettent d'étudier les impacts de la transition énergétique sur les inégalités de revenu tout en intégrant les contraintes d'utilisation des sols. Les biocarburants de deuxième et troisième génération, en particulier, offrent des avantages environnementaux supérieurs en réduisant les conflits d'utilisation des terres et en améliorant la durabilité, ils sont de plus en plus mis en avant partout dans le monde, et dans l'UE en particulier avec les réglementations RED II et ReFuelEU Aviation.

##### 1.4.2 INÉGALITÉS DE REVENUS : UNE DIMENSION ESSENTIELLE DE L'ANALYSE

Dans l'introduction de la thèse, nous avons vu que la littérature existante met en lumière les déterminants traditionnels de la transition énergétique. Bien que de nombreuses études aient examiné les impacts économiques de la transition énergétique, il existe un manque de recherches spécifiques sur la manière dont celle-ci

peut influencer les inégalités de revenus au sein des pays, en particulier dans le contexte des biocarburants. La littérature actuelle ne prend pas suffisamment en compte les effets redistributifs des politiques de transition énergétique sur les ménages à faible revenu et la façon dont l'augmentation des prix des biens agricoles et des ressources énergétiques peut aggraver les disparités socioéconomiques. Ce vide souligne la nécessité d'une analyse plus approfondie des mécanismes à l'œuvre et des politiques qui pourraient atténuer ces inégalités.

Considérant ce manque, le premier chapitre de la thèse examine les inégalités de revenus au sein des pays à partir d'une étude théorique d'équilibre général sur la transition énergétique. L'étude est réalisée dans un cadre concurrentiel où tous les agents sont preneurs de prix et les inégalités de revenu sont pris en compte par la dotation de chaque groupe d'individus. D'une part, il y a les détenteurs de capital et de terre qui constituent le groupe à revenu élevé et, d'autre part, les détenteurs de travail qui sont dans le groupe à revenu faible. En analysant comment les politiques énergétiques affectent les différents groupes socioéconomiques, nous cherchons à comprendre les mécanismes par lesquels la transition énergétique peut influencer des agents de différents groupes de revenu et à identifier des solutions pour atténuer les effets régressifs potentiels.

Enfin, le modèle intègre les secteurs de production de la nourriture (agriculture), des biens manufacturés (industrie) et de l'énergie (fossiles et biocarburants). Intensive en capital, la technologie de production de l'énergie fossile combine le capital et le travail alors que celle de production de biocarburants combine le travail et la terre qui est son facteur intensif. Le modèle décrit un sentier de transition énergétique avant d'analyser les impacts de cette dernière sur les inégalités de revenus au sein d'un pays.

D'une part, les résultats indiquent qu'un pays avec un rapport capital-terre élevé tend à se spécialiser dans la production d'énergie fossile, tandis qu'un rapport capital-terre faible est associé à une spécialisation dans la production de biocarburants. Les résultats montrent également que l'adoption accrue de biocarburants de première génération conduit à une augmentation du prix des produits agricoles en raison du changement d'utilisation des terres, ce qui augmente les inégalités de revenus en affectant proportionnellement davantage les ménages à faible revenu. Ces résultats corroborent ceux de [Zilberman et al. \(2014\)](#) et [Rajagopal et al. \(2007\)](#); [Zilberman et al. \(2011\)](#); [Hochman et al. \(2010b\)](#), qui mettent en avant les tensions entre la transition énergétique et la justice sociale, notamment en ce qui concerne l'accès équitable aux ressources énergétiques renouvelables. Mais contrairement à ces travaux, notre modèle a mis l'accent sur les externalités négatives de

la production d'énergie fossile et les arbitrages liés à l'utilisation des terres.

En outre, nous montrons que l'accroissement des inégalités de revenu peut entraver la transition énergétique. Cette idée résonne avec les travaux de [Oswald et al. \(2020\)](#), qui discutent de l'impact des inégalités sur l'acceptation sociale des politiques environnementales. Nous démontrons que la pression pour la transition énergétique, bien qu'elle soit nécessaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), peut également exacerber les inégalités, ce qui constitue un paradoxe souligné par [Gao et al. \(2023\)](#); [Hunt and Ferguson \(2014\)](#). Ce phénomène, déjà observé par [Searchinger et al. \(2008b\)](#), souligne l'importance d'une approche systémique dans l'évaluation des impacts de la transition énergétique.

#### 1.4.3 LES CARBURANTS D'AVIATION DURABLES : UN LEVIER POUR DÉCARBONER L'AVIATION

Dans le deuxième chapitre théorique de la thèse, nous relâchons la contrainte d'utilisation de la terre pour produire les biocarburants de première génération en nous concentrant sur les biocarburants de deuxième génération. En raison de l'aspect pratique du secteur de l'aviation civile qui, à court terme, ne peut pas intégrer la technologie électrique comme c'est le cas pour le transport routier, nous étudions spécifiquement les CAD en raison de l'accent croissant mis sur leur utilisation pour la décarbonation du secteur. Ainsi, nous profitons du cadre de la réglementation ReFuelEU Aviation et nous analysons la production des CAD à partir de résidus agricoles, ainsi que les implications économiques et environnementales de leur adoption.

Pour ce faire, nous construisons un modèle théorique d'équilibre partiel avec deux secteurs de production, l'agriculture et l'énergie (Carburant d'aviation conventionnel ou traditionnel - jet fuel et CAD). Dans ce modèle, d'abord, les agents sont preneurs de prix et le secteur agricole coproduit deux biens agricoles, la nourriture et les résidus agricoles. Ensuite, les résidus agricoles sont utilisés comme intrants dans la production de CAD. Et enfin, nous faisons intervenir la réglementation européenne qui impose un mandat d'incorporation de CAD, les fournisseurs de carburant d'aviation doivent assurer que les mélanges proposés aux exploitants d'aéronefs dans les aéroports de l'UE contiennent une part minimale de CAD.

Le deuxième chapitre met en évidence que l'utilisation de résidus agricoles coproduits avec la nourriture permet d'éliminer le conflit d'utilisation des terres, ce qui favorise une transition énergétique plus durable et une baisse des émissions de GES avec les biocarburants de deuxième génération, sans provoquer de hausse

des prix alimentaires. Toutefois, il est crucial de surveiller et de réguler le niveau du mandat d'incorporation de CAD établi par la réglementation ReFuelEU Aviation, en tenant compte des technologies de production de CAD et des fluctuations du prix du carburant d'aviation conventionnel. Cette approche permet d'assurer la viabilité économique tout en maximisant les avantages environnementaux de ces biocarburants.

Toutefois, plus le mandat d'incorporation de CAD devient important, plus le prix des résidus agricoles augmente, cela peut conduire à l'utilisation de plus de terre pour avoir plus de résidus ou à un changement de cultures si le prix tend à dépasser celui de la nourriture. Ainsi, nous mettons également en lumière les menaces environnementales subsistantes, telles que le changement d'utilisation des terres et la déforestation, qui peuvent découler de l'extension de la production de CAD trop poussée. Nos résultats font écho aux préoccupations exprimées par [Fargione et al. \(2008\)](#) concernant les compromis nécessaires entre la production de biocarburants et la préservation de l'environnement.

#### 1.4.4 POTENTIEL DE PRODUCTION DES BIOCARBURANTS : DÉFIS ET PERSPECTIVES

Nous évaluons le potentiel de production des biocarburants, en particulier des CAD, par rapport aux carburateurs traditionnels. Cette analyse inclut l'examen des contraintes de production, des coûts associés et du potentiel de développement, afin de déterminer si les biocarburants peuvent constituer une alternative viable et durable dans le secteur de l'aviation.

Ainsi, nous mettons en place les éléments nécessaires à la réalisation d'une simulation de Monte-Carlo, utilisant des données réelles pour analyser le potentiel de production de CAD à l'échelle mondiale. L'objectif principal est d'évaluer si cette capacité de production pourrait suffire à répondre à la demande croissante de CAD dans l'Union européenne, en tenant compte des exigences imposées par la réglementation ReFuelEU Aviation et des projections concernant la part de CAD dans le secteur de l'aviation d'ici 2035.

Cette simulation permettra d'explorer différents scénarios basés sur des variables clés, telles que l'évolution des capacités de production, les coûts associés à la production de CAD, le prix de carburant d'aviation sur le marché, et l'impact des politiques de soutien. En intégrant ces éléments, nous viserons à déterminer la faisabilité d'une adoption à grande échelle des CAD dans le cadre de la transition énergétique de l'aviation européenne, tout en identifiant les défis potentiels et les opportunités liés à leur développement.

Nous avons collecté et traité les données relatives à ces différentes variables, puis entamé le processus de modélisation conduisant à nos simulations. Bien que les premiers résultats soient encourageants, le manque de données historiques sur les CAD, en raison de leur production récente, constitue une contrainte majeure que nous envisageons de surmonter avec le temps. Nous considérons cette problématique comme une perspective de recherche future à approfondir. Par ailleurs, les travaux de [Wang et al. \(2019\)](#) sur la modélisation des incertitudes dans la production d'énergie renouvelable offrent une base solide pour analyser le potentiel des CAD dans le contexte de l'aviation. De plus, en intégrant des données empiriques et des simulations, nous ambitionnons de démontrer que la synergie entre des politiques favorables et des innovations technologiques peut avoir un impact significatif sur la viabilité économique et environnementale des carburants durables.

En offrant une analyse théorique des inégalités de revenu face à la transition énergétique, en explorant les opportunités et les risques associés à la bioénergie, et en développant une méthodologie empirique pour évaluer les politiques liées aux carburants d'aviation durables, nous enrichissons le débat sur la durabilité. Ces travaux ouvrent la voie à des recherches futures sur les synergies et les compromis nécessaires pour naviguer dans la complexité de la transition énergétique dans un monde inégalitaire. En fin de compte, nous plaidons pour des politiques qui non seulement favorisent la transition énergétique, mais qui prennent également en compte les implications sociales et environnementales pour garantir un avenir durable et équitable. -



# 2

## Transition énergétique et biocarburants : Impact des inégalités et sur les inégalités

### 2.1 INTRODUCTION

Le changement climatique constitue l'un des principaux défis de notre époque. Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), les huit années les plus chaudes jamais enregistrées se sont toutes produites entre 2015 et 2023, tandis que la température moyenne mondiale a augmenté de 1,1 °C par rapport aux niveaux préindustriels en 2019. L'utilisation accrue de l'énergie produite à partir de sources renouvelables constitue une partie importante du paquet de mesures nécessaires pour réduire les émissions de GES d'origine anthropique et respecter l'engagement des pays signataires dans le cadre de l'accord de Paris sur le changement climatique de 2015 et renouvelés sur des bases plus réalistes à la COP26.

Cependant, la transition énergétique ou plutôt la variété dans le mix énergétique ne garantit ni une amélioration des conditions de vie des populations à travers le monde ni une bonne relation économie-environnement

à long terme. C'est pourquoi il convient de demander comment l'augmentation de la production d'énergies renouvelables peut être une solution rentable économiquement et durable écologiquement.

Etant donné que les hydrocarbures fossiles sont parmi les sources d'énergie générant le plus d'émissions de GES, la production de biocarburants liquides à partir de biens agricoles a été très longtemps vue comme une source d'énergie de substitution. Mais cette technologie de production d'énergie renouvelable est contrainte par une limite majeure parce qu'elle vient concurrencer la production de la nourriture directement (les cultures agricoles sont utilisées pour la production de biocarburant) ou indirectement (les exploitations agricoles sont utilisées pour des cultures dédiées au biocarburant).

En outre, dans les trajectoires d'émissions qui limitent le réchauffement planétaire à 1,5°C en 2050, les énergies renouvelables représentent 70 à 85% de la production d'électricité en 2050 (Masson-Delmotte et al., 2018). De plus, dans le secteur des transports, la part de l'énergie finale à faibles émissions correspondant aux biocarburants devrait passer de moins de 5% en 2020 à environ 35 à 65% en 2050. Il faut donc une production de biocarburant à grande échelle pour atteindre ne serait-ce que la projection pessimiste (35%) en 2050.

Donc, du fait du changement climatique, une certaine transition s'impose dans le système énergétique actuel. Cette transition se réalisera par des évolutions institutionnelles permettant de modifier les conditions et l'équilibre du marché énergétique actuel. Il faudra se poser la question du coût d'opportunité de la production à grande échelle de biocarburant : quels sont les effets de cette production sur le bien-être global ? En quelle sens cela peut affecter des ménages ayant des niveaux de revenu différents ? Quels sont les effets réels de la production de biocarburant à grande échelle sur les émissions de GES ?

Ce travail propose une réflexion théorique sur l'impact des biocarburants avancés sur les inégalités de revenu. Nous nous appuyons sur un cadre d'équilibre général afin de mieux comprendre comment les politiques de soutien à la bioénergie peuvent influencer la répartition des revenus entre les ménages. Bien que de nombreuses études aient examiné l'impact des politiques climatiques sur les prix et les émissions de gaz à effet de serre, la littérature théorique analysant leurs effets distributifs sur les ménages reste relativement limitée. En particulier, les effets des biocarburants sur les inégalités économiques sont sous-explorés malgré leur pertinence croissante dans le cadre de la transition énergétique.

Les travaux empiriques existants montrent que les politiques climatiques sont susceptibles d'avoir des effets redistributifs défavorables en matière d'inégalités. [Markkanen and Anger-Kraavi \(2019\)](#) soulignent que les politiques d'atténuation du changement climatique, telles que les subventions aux énergies renouvelables, peuvent accroître les inégalités en augmentant les prix de l'énergie et des produits de base. De manière similaire, les politiques climatiques peuvent entraîner des hausses de prix pour les biens essentiels, ce qui exacerbe les inégalités de revenu ([Frondel et al., 2015](#) ; [OECD, 2015](#)). [Hayer \(2017\)](#) confirme que l'augmentation des prix de l'énergie due à la transition vers les énergies renouvelables affecte de manière disproportionnée les ménages à bas revenus. Ces études fournissent des résultats empiriques importants, mais elles manquent de cadre théorique permettant d'analyser ces mécanismes en profondeur.

Dans le cadre des biocarburants, plusieurs études suggèrent également des effets redistributifs marqués. Les politiques de soutien aux biocarburants, en augmentant la demande de terres agricoles, conduisent à une hausse des prix alimentaires, ce qui pénalise les ménages les plus pauvres tout en profitant aux propriétaires fonciers ([Hochman et al., 2010a](#) ; [Chen and Khanna, 2013](#)). [Rajagopal et al. \(2007\)](#) et [Zilberman et al. \(2011\)](#) ajoutent que ces politiques peuvent bénéficier aux ménages ruraux en augmentant les prix agricoles, mais au détriment des ménages urbains plus vulnérables. Ces travaux sont essentiels pour comprendre la divergence des effets entre les différents groupes de revenus, mais ne traitent pas spécifiquement de la question des inégalités, ce qui constitue l'objet de notre analyse.

D'un point de vue théorique, le modèle d'équilibre général proposé par [Hochman et al. \(2010a\)](#) offre une base pour comprendre l'impact des biocarburants sur les prix et les revenus dans une économie ouverte. Toutefois, notre modèle s'en distingue en se concentrant sur une économie fermée pour explorer l'impact de la transition énergétique sur les inégalités internes. Les travaux de [Fredriksson et al. \(2005\)](#), qui mettent en lumière l'importance des institutions et de la gouvernance dans la réussite des politiques énergétiques, viennent renforcer l'idée que la qualité institutionnelle est cruciale pour comprendre les effets redistributifs. Enfin, les recherches de [Grossman and Krueger \(1991, 1995\)](#) sur la courbe environnementale de Kuznets (CKE) suggèrent que les effets des politiques climatiques sur les inégalités peuvent évoluer au fil du temps, ce qui nous pousse à intégrer une interprétation dynamique à notre modèle.

À notre connaissance, il n'y a pas de travaux qui ont développé un cadre théorique intégrant les effets redis-

tributifs des biocarburants et les ressources disponibles (en capital et en terre). Ce travail vise à combler cette lacune en s'inspirant des modèles existants d'équilibre général tout en focalisant l'analyse sur les inégalités de revenu entre ménages et les impacts des politiques de développement de biocarburants. Nous analysons notamment comment les variations de prix et les changements dans le mix énergétique influencent la satisfaction de différents groupes socioéconomiques.

La section suivante présente le modèle d'équilibre général utilisé pour notre analyse. Dans la section 3, compte tenu des ressources disponibles, nous examinons la relation bidirectionnelle entre les inégalités socio-économiques et la transition énergétique. Nous analysons, d'une part, comment les disparités économiques influent sur les dynamiques de la transition énergétique, et, d'autre part, comment ce processus modifie la répartition des ressources et, par conséquent, les niveaux d'inégalités. Enfin, la section 4 explore quelques pistes de développement du modèle tandis que la dernière section conclut en mettant en lumière les implications du modèle pour la conception des politiques climatiques et propose des recommandations pour limiter leurs effets inégalitaires.

## 2.2 DESCRIPTION DU MODÈLE

Considérons une économie dont les dotations factorielles en capital, terre et travail sont définies respectivement par  $\bar{K}$ ,  $\bar{A}$  et  $\bar{L}$ . Même si la technologie de production des biens est différente d'un secteur à un autre, les producteurs utilisent les trois facteurs de production pour produire la nourriture  $X$ , les biens manufacturés  $Y$  et l'énergie  $E$  qui sont des biens marchands, échangés respectivement au prix  $p_X$ ,  $p_Y$  et  $p_E$ . La production de l'énergie génère des externalités qui viennent impacter la qualité de l'environnement  $N$ , bien public non-marchand, qui a une même valeur pour toute la population.

Dans les sections suivantes sont présentés les secteurs de production de la nourriture, des biens manufacturés et de l'énergie, la manière dont les émissions sont générées, l'évolution de la qualité de l'environnement ainsi que la fonction d'utilité sur la base de laquelle sont évalués les impacts sur le bien-être de la population.

### 2.2.1 VUE D'ENSEMBLE : HYPOTHÈSES GLOBALES

Le système productif de l'économie comprend trois secteurs spécialisés dans la production des biens : la nourriture, les biens manufacturés et l'énergie. Les fonctions de production sont croissantes, quasi-concaves et homogènes de degré 1 (Hochman et al., 2010a). En d'autres termes, une augmentation des facteurs de production entraîne une hausse proportionnelle de la production. Ces facteurs peuvent être combinés de manière flexible et substitués entre eux, tandis que les entreprises optimisent leur production sous l'hypothèse de rendements d'échelle constants.

Du côté des ménages, des choix optimaux sont faits dans un contexte d'économie de marché, où les prix influencent les décisions de consommation. Les préférences des ménages sont convexes et leur fonction d'utilité est quasi-concave, c'est-à-dire qu'ils sont des agents économiques rationnels qui maximisent leur niveau d'utilité sous la contrainte de leur revenu (comme dans ce modèle de Hochman et al. (2010a)).

### 2.2.2 LA PRODUCTION

Le système productif de l'économie comprend trois secteurs spécialisés dans la production des biens : la nourriture, le bien manufacturé et l'énergie.

#### LA NOURRITURE

La nourriture  $X$ , intensive en terre  $A_X$ , est produite en combinant ce facteur avec le travail  $L_X$  et avec l'énergie  $E_X$ . La technologie de production de la nourriture est décrite par une fonction Cobb-Douglas à rendement d'échelle constant, formulée comme suit :

$$\begin{cases} X & = g_X(L_X, A_X, E_X) = b_X L_X^{\omega_x} A_X^{\sigma_x} E_X^{1-\varepsilon_x} \\ \text{avec } \varepsilon_x & = \omega_x + \sigma_x \end{cases} \quad (2.1)$$

Dans cette équation,  $b_X$  est une constante positive qui reflète le progrès technique;  $\omega_x$ ,  $\sigma_x$  ainsi que  $1 - \varepsilon_x$  sont des paramètres compris entre 0 et 1, représentant respectivement l'élasticité de la production de nourriture par rapport aux facteurs travail, terre et énergie. Ces paramètres montrent comment la quantité produite de

nourriture est affectée par des variations dans l'apport de chaque facteur de production.

## LES BIENS MANUFACTURÉS

Parallèlement, la technologie de production des biens manufacturés ( $Y$ ) combine le capital  $K_Y$ , son facteur intensif, avec le travail  $L_Y$  et l'énergie ( $E_Y$ ). Sa fonction de production est également une fonction Cobb-Douglas à rendement d'échelle constant, formulée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = g_Y(L_Y, K_Y, E_Y) = b_Y L_Y^{\omega_Y} K_Y^{\rho_Y} E_Y^{1-\varepsilon_Y} \\ \text{avec } \varepsilon_Y = \omega_Y + \rho_Y \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Dans cette équation,  $b_Y$  représente une constante positive qui rend compte du progrès technique, tandis que  $\omega_Y$ ,  $\rho_Y$  et  $1 - \varepsilon_Y$  sont des paramètres compris entre 0 et 1. Ces paramètres expriment respectivement l'élasticité de la production des biens manufacturés par rapport aux facteurs travail, capital et énergie, illustrant comment les variations dans l'apport de chacun de ces facteurs influencent la quantité de biens produits.

## L'ÉNERGIE

L'énergie est un bien intermédiaire essentiel à la production d'autres biens. Elle peut être produite de deux manières : de façon non renouvelable à partir des hydrocarbures fossiles (énergies fossiles  $E^f$ ) ou de manière renouvelable à partir de la biomasse (biocarburants  $E^b$ ). Bien que ces deux types d'énergie soient des substituts parfaits, partageant les mêmes propriétés finales, ils se distinguent par leur technologie de production. En théorie, l'économie peut produire les deux types d'énergie, mais c'est le prix de marché qui détermine lequel sera privilégié dans un pays donné. Si le coût marginal de production de l'énergie fossile est supérieur à celui de la bioénergie, c'est alors cette dernière qui sera produite, et inversement. Ainsi, les deux types d'énergie coexistent lorsque leurs coûts marginaux de production sont identiques.

## ENERGIE FOSSILE

Intensive en capital, l'énergie fossile est produite à partir de tous les intrants sauf la terre, en utilisant le travail  $L_{Ef}$  et le capital  $K_E$ , Sa fonction de production est ainsi définie comme suit :

$$E^f \equiv g_{Ef}(L_{Ef}, K_E) = b_{Ef} L_{Ef}^{\omega_{Ef}} K_E^{\rho_{Ef}} \quad (2.3)$$

Dans cette équation,  $b_{Ef} > 0$  indique le progrès technique dans la production d'énergie fossile. Le paramètre  $\rho_{Ef}$  représente l'élasticité de la production d'énergie fossile par rapport au capital, tandis que  $\omega_{Ef} = 1 - \rho_{Ef}$  correspond à l'élasticité de la production d'énergie fossile par rapport au travail. Ces paramètres soulignent l'importance relative de chacun des intrants dans la production d'énergie fossile, reflétant ainsi les dynamiques de coût et d'efficacité associées à ce type d'énergie.

## BIOCARBURANTS

Intensive en terre, les biocarburants sont produite à partir de tous les intrants sauf le capital, en utilisant le travail  $L_{Eb}$  et la terre  $A_E$ , Sa fonction de production est définie comme suit :

$$E^b \equiv g_{Eb}(L_{Eb}, A_E) = b_{Eb} L_{Eb}^{\omega_{Eb}} A_E^{\sigma_{Eb}} \quad (2.4)$$

Dans cette équation,  $b_{Eb} > 0$  représente le progrès technique dans la production de biocarburants. La variable  $\sigma_{Eb}$  indique l'élasticité de la production de biocarburants par rapport à la terre, tandis que  $\omega_{Eb} = 1 - \sigma_{Eb}$  correspond à l'élasticité de la production de biocarburants par rapport au travail. Ces paramètres mettent en lumière l'importance relative de la terre et du travail dans le processus de production de biocarburants, reflétant ainsi les dynamiques de rendement et d'efficacité de ce secteur.

## LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT

### LES EXTERNALITÉ DE PRODUCTION - LES ÉMISSIONS DE GES

Les émissions proviennent de la production de l'énergie ( $G_Z$ ). La production d'énergie fossile génère des émissions directement équivalentes à la quantité produite, tandis que la production de biocarburants génère des émissions inférieures à la quantité produite. Cette relation peut être exprimée par l'équation suivante :

$$E_p \equiv G_Z = E^f + \delta E^b \text{ avec } \delta < 1. \quad (2.5)$$

Dans cette équation,  $E^f$  représente l'énergie fossile produite et  $E^b$  désigne la quantité de biocarburants. Le paramètre  $\delta$  est un coefficient positif inférieur à 1, indiquant que la production de biocarburants est associée à des émissions plus faibles par rapport à l'énergie fossile.

### LE BIEN ENVIRONNEMENTAL

Nous définissons un bien environnemental, représentant la qualité de l'environnement  $N$ , qui est déterminée par les terres non utilisées ( $A_N$ ) et les émissions de GES générées lors du processus de production de l'énergie. Ce concept de l'environnement est très spécifique et englobe la biodiversité, qui se compose d'une part d'espaces naturels non artificialisés ou aménagés (tels que les forêts et les espaces verts) et d'autre part de tous les autres écosystèmes ainsi que de leurs interactions. Dans ce cadre, la qualité de l'environnement s'améliore avec l'augmentation des terres non exploitées ( $A_N$ ) et se dégrade, indirectement, avec les émissions de GES ( $G_Z$ ). La qualité de l'environnement, représentée par  $N$ , est formulée comme suit :

$$N \equiv g_N(A_N, G_Z) = b_N (A_N)^{\sigma_n} (G_Z)^{-\varepsilon_p} \text{ avec } b_N > 0, \sigma_n > 0 \text{ et } \varepsilon_p > 0 \quad (2.6)$$

Dans cette équation,  $g_N$  est croissante par rapport à  $A_N$  ( $\frac{\partial g_N}{\partial A_N} > 0$ ), indiquant que la qualité de l'environnement s'améliore avec des terres non exploitées, tandis qu'elle est décroissante par rapport à  $G_Z$  ( $\frac{\partial g_N}{\partial G_Z} < 0$ ), signifiant que l'augmentation des émissions de GES entraîne une dégradation de la qualité environnementale.

## LES CONTRAINTES DE RESSOURCES

Dans le contexte économique d'un pays, les ressources disponibles sont limitées, ce qui impose des contraintes sur la production dans différents secteurs. Nous modélisons ces contraintes de ressources à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{cases} \bar{K} & = K_E + K_Y \\ \bar{L} & = L_E + L_X + L_Y \\ \bar{A} - A_N & = A_E + A_X \end{cases} \quad (2.7)$$

Dans cette équation,  $\bar{K}$  représente le capital total disponible, qui est divisé entre le secteur de l'énergie ( $K_E$ ) et celui des biens manufacturés ( $K_Y$ ). De même,  $\bar{L}$  désigne la quantité totale de travail, répartie entre la production d'énergie ( $L_E$ ), la production alimentaire ( $L_X$ ), et la production de biens manufacturés ( $L_Y$ ). Par ailleurs,  $\bar{A}$  correspond à la quantité totale de terres disponibles, dont une partie est consacrée à des espaces naturels non utilisés ( $A_N$ ), tandis que le reste est alloué à la production énergétique ( $A_E$ ) et à la production alimentaire ( $A_X$ ).

La quantité de travail nécessaire pour produire de l'énergie est définie par l'équation suivante :

$$L_E = L_{E^f} + L_{E^b} \quad (2.8)$$

où  $L_{E^f}$  et  $L_{E^b}$  désignent respectivement le travail consacré à la production d'énergie fossile et de biocarburant.

C'est la dynamique entre l'offre et la demande qui détermine les quantités produites dans chaque secteur ainsi que les prix relatifs des facteurs de production au sein de l'économie. Cette interaction influence non seulement la répartition des ressources mais également la viabilité économique des différents types de production.

En outre, la quantité totale d'énergie produite et consommée dans l'économie est également liée à la consommation intermédiaire nécessaire pour produire des biens essentiels, tels que la nourriture et les biens manufacturés, et peut être exprimée par l'équation suivante :

$$E = E_X + E_Y \quad (2.9)$$

où  $E$  représente la quantité totale d'énergie,  $E_X$  la consommation d'énergie pour la production alimentaire, et  $E_Y$  la consommation d'énergie pour la production de biens manufacturés.

Cette approche souligne l'importance de la gestion des ressources dans la formulation des politiques énergétiques et économiques, car elle doit équilibrer la production d'énergie avec les besoins des autres secteurs de l'économie.

### 2.2.3 LA CONSOMMATION

Les ménages consomment principalement deux types de biens de consommation finale : la nourriture et les biens manufacturés. Les préférences des ménages en matière de consommation sont formalisées par une fonction d'utilité qui reflète leurs choix. Ces préférences montrent comment les ménages allouent leurs ressources entre la nourriture, essentielle à leur subsistance, et les biens manufacturés, qui améliorent leur qualité de vie.

Cependant, bien que les agents économiques attribuent une valeur à l'environnement, il est important de noter qu'il n'existe pas de marché pour le bien environnemental. Celui-ci n'est pas échangé comme un produit traditionnel; il est intrinsèquement lié à la quantité de terre non utilisée ( $A_N$ ) réservée à des fins de production. Par conséquent, la qualité de l'environnement, bien qu'appréciée par les ménages, ne peut être directement intégrée dans leurs décisions de consommation de manière mesurable. Cette situation souligne l'importance de considérer les effets environnementaux dans les choix économiques, même en l'absence de mécanismes de marché formels pour les biens environnementaux.

### FONCTION D'UTILITÉ

Dans ce pays, le consommateur tire sa satisfaction de la consommation de deux biens marchands : la nourriture  $X$ , les biens manufacturés  $Y$ , ainsi que de la qualité de l'environnement  $N$ , un bien non-marchand. Sa fonction d'utilité est définie comme suit :

$$U(X, Y, N) = a_X u_X(X) + a_Y u_Y(Y) + a_N u_N(N) \quad (2.10)$$

où  $u_i$ , avec  $i \in \{X, Y, N\}$ , désigne la satisfaction tirée de la consommation du bien  $i$  et  $X$ ,  $Y$  et  $N$  désignent respectivement les quantités consommées des biens marchands et la qualité de l'environnement. Les coefficients  $a_j$ , avec  $j \in \{X, Y\}$ , correspondent à la quantité d'utilité qu'un ménage tire de la consommation d'une unité supplémentaire de  $j$ , tandis que  $a_N$  reflète l'importance accordée à la qualité de l'environnement, qui, en tant que bien non-marchand, n'est pas directement échangé sur les marchés mais influence tout de même le niveau de bien-être.

Nous supposons que  $u_i$  est une fonction concave. Ainsi, nous pouvons définir la valeur associée à la satisfaction que chaque bien procure au ménage de la manière suivante :

$$\begin{cases} u_X(X) &= \ln(X) \\ u_Y(Y) &= \ln(Y) \\ u_N(N) &= \ln(N). \end{cases} \quad (2.11)$$

Dans la fonction d'utilité de l'équation 2.10, le bien environnemental  $N$ , non-marchand, inclut à la fois l'effet positif des espaces verts et l'effet négatif des émissions, par l'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère.

#### 2.2.4 NIVEAU DE REVENU

Le revenu total provient des salaires  $w$ , de la rémunération du capital  $r$  et de la rente foncière  $s$ . En tant que variable endogène, le revenu total  $R_t$  peut être exprimé par l'équation suivante :

$$R_t = w\bar{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N). \quad (2.12)$$

Le revenu moyen, ou revenu par habitant  $I$ , est donc obtenu en rapportant le revenu total à la population  $\bar{L}$  :

$$I = \frac{R_t}{\bar{L}} = \frac{w\bar{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N)}{\bar{L}}. \quad (2.13)$$

Dans ce cadre, des écarts de revenu peuvent apparaître entre les agents, en fonction des ressources qu'ils détiennent, puisque la rémunération des facteurs de production n'est pas uniforme et qu'un même agent

peut posséder plusieurs types de ressources à la fois.

#### DISTRIBUTION DE REVENU IDENTIQUE

Dans un premier temps, nous considérons que tous les agents économiques sont homogènes, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune différence de revenu au sein de la population. La fonction d'utilité reflète alors les préférences d'un agent représentatif dont les caractéristiques sont identiques à celles de l'ensemble des agents. Cet agent détient simultanément du capital, de la terre et du travail. Dans ce cadre, son revenu, déterminé de manière endogène, correspond à la somme des rémunérations du travail, du capital et de la terre :

$$I = \frac{w\bar{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N)}{\bar{L}}. \quad (2.14)$$

Cela nous permettra de voir comment varient les parts d'énergie ainsi que les quantités produites en fonction des prix des facteurs de production et des ressources disponibles. Dans ce cas, le ménage représentatif maximise son utilité globale sous la contrainte de son revenu  $I$ .

#### DISTRIBUTION DE REVENU DIFFÉRENTE

Dans un second temps nous intégrons les inégalités par la possession de ressources par deux types d'agents différents. La population total  $\bar{L}$  est divisée deux groupe de ménages :

1. un groupe ayant bénéficié de patrimoine foncier et financier en dehors de sa force de travail, *groupe à revenu élevé*  $\hat{L}$ .
  - (a) revenu total du groupe :  $\hat{R} = w\hat{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N)$ ;
  - (b) revenu moyen du groupe :  $\hat{I} = \frac{w\hat{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N)}{\hat{L}}$
2. un autre groupe ayant son revenu qui émane uniquement de sa force de travail, *groupe à faible revenu*  $\check{L}$ .
  - (a) revenu total du groupe :  $\check{R} = w\check{L}$ ;
  - (b) revenu moyen du groupe :  $\check{I} = w$ .

Nous considérons également une situation de plein emploi, ce qui nous amène à l'équation suivante :

$$\hat{L} + \check{L} = \bar{L} \quad (2.15)$$

En posant les définitions suivantes :

$$\begin{cases} \hat{\tau} &= \frac{\hat{L}}{\bar{L}} \\ \check{\tau} &= \frac{\check{L}}{\bar{L}} \end{cases} \quad (2.16)$$

où  $\hat{\tau}$  représente la proportion de la population à revenu élevé et  $\check{\tau}$  la proportion de la population à faible revenu, nous pouvons établir la relation suivante :

$$\check{\tau} = 1 - \hat{\tau}. \quad (2.17)$$

Cette structure permet de mieux comprendre la distribution des revenus au sein de la population et les inégalités qui en découlent, en reliant directement les différents groupes de ménages à leurs sources de revenus respectives.

#### MAXIMISATION DE L'UTILITÉ SELON LE NIVEAU DE REVENU

Nous avons introduit notre cadre d'analyse sur le revenu en commençant par poser une hypothèse de référence : tous les ménages disposent d'une même fonction d'utilité et bénéficient d'un revenu identique. Cette situation permet de caractériser un ménage « moyen » dont les décisions de consommation sont représentatives de l'ensemble de la population.

Cependant, dans la réalité, les dotations en capital et en terre diffèrent d'un groupe de ménages à l'autre, ce qui se traduit par des variations de revenu. Nous distinguons alors deux groupes : les ménages à revenu élevé et ceux à revenu plus faible. Cette différence de revenu affecte particulièrement la capacité à tirer de l'utilité des biens manufacturés : selon la littérature, une hausse de revenu s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'énergie (Alberini et al., 2011 ; Medlock III and Soligo, 2001 ; Aydin et al., 2017 ; Charlier, 2021). Nous supposons donc que, comparativement aux ménages à revenu faible, ceux à revenu élevé

obtiennent davantage d'utilité des biens manufacturés, ce qui se traduit par soit  $\hat{a}_Y > \check{a}_Y$ .

Ainsi, le problème du ménage représentatif de chacun des deux groupes est résolu en maximisant son utilité sous la contrainte de son revenu :

— Maximisation de l'utilité du ménage à revenu élevé :

$$\begin{cases} \hat{U}(X, Y, N) = a_X u_X(\hat{X}) + \hat{a}_Y u_Y(\hat{Y}) + a_N u_N(N) \\ \text{s.c} \quad p_X \hat{X} + p_Y \hat{Y} \leq \hat{I}. \end{cases} \quad (2.18)$$

— Maximisation de l'utilité du ménage à faible revenu :

$$\begin{cases} \check{U}(X, Y, N) = a_X u_X(\check{X}) + \check{a}_Y u_Y(\check{Y}) + a_N u_N(N) \\ \text{s.c} \quad p_X \check{X} + p_Y \check{Y} \leq \check{I}. \end{cases} \quad (2.19)$$

La quantité totale demandée de chaque type de bien est ainsi la somme des quantités consommées par chaque groupe de ménages, ce qui peut être formulé comme suit :

$$\begin{cases} X = \hat{L}\hat{X} + \check{L}\check{X} \\ Y = \hat{L}\hat{Y} + \check{L}\check{Y} \end{cases}. \quad (2.20)$$

Cette formulation permet de décrire la situation globale en introduisant la fonction de bien-être de l'économie comme suit :

$$W = \hat{L}\hat{U} + \check{L}\check{U}. \quad (2.21)$$

Ainsi, cette approche illustre comment les différences de revenus entre les groupes de ménages influencent non seulement leur consommation, mais également leur contribution à l'utilité collective de l'économie.

### 2.2.5 CHOIX ET LIMITES DU MODÈLE

Bien que notre modèle se concentre sur la transition énergétique, nous n'y intégrons pas explicitement un instrument de politique publique tel qu'une taxe carbone. Ce choix s'explique par la complexité déjà présente dans notre cadre d'analyse : nous prenons en compte l'effet des dotations en ressources (capital et terre), les

dynamiques de prix et de substitution, ainsi que l'influence des inégalités de revenus et de préférences. L'introduction d'une taxe carbone ou de tout autre dispositif similaire viendrait ajouter un niveau de difficulté supplémentaire, rendant l'interprétation des résultats plus délicate et moins lisible.

Dans ce cas, la transition énergétique est comme un acquis, et c'est l'instrument de la politique de transition énergétique qui ramène le prix des biocarburants au niveau des prix des énergies fossiles (c'est ainsi que nous pouvons écrire  $p_E^f = p_E^b$ ), condition selon laquelle l'économie arrive à produire les deux types d'énergies à la fois, un cadre dénommé mix énergétique.

Cette approche nous permet de mieux cerner les mécanismes fondamentaux à l'œuvre : d'une part, l'impact des inégalités sur la capacité du système économique à adopter des énergies renouvelables, et d'autre part, l'influence que la transition énergétique peut exercer sur la distribution des revenus et sur le bien-être individuel par la redistribution des ressources dans les différents secteurs de production, compte tenu des ressources en capital et en terre. En évitant de les variables politiques, nous conservons une structure suffisamment claire pour analyser en profondeur les interactions essentielles entre ressources, inégalités et choix énergétiques, tout en éclairant les arbitrages susceptibles d'influencer la durabilité et l'équité du système productif.

Dans le même souci de lisibilité des résultats, nous avons également fait le choix d'exclure le capital du processus de production des biocarburants et, réciproquement, de ne pas intégrer la terre dans celui des énergies fossiles. Bien que cette configuration s'écarte partiellement de la réalité, nos premières versions du modèle, qui incluaient ces spécificités, rendaient difficile la distinction de la manière dont chaque secteur mobilisait les ressources de l'économie. Simplifier ainsi la structure de la production nous permet d'isoler et d'éclairer plus clairement les mécanismes et les dynamiques en jeu, notamment l'ampleur et la direction des effets de substitution entre les différents secteurs.

### 2.3 RÉSULTATS OBTENUS

Les résultats de l'équilibre général ont été dérivés en confrontant l'offre et la demande dans chaque secteur, en maximisant, d'une part, l'utilité des consommateurs (à travers le programme du consommateur) et, d'autre part, le profit des producteurs (à travers le programme du producteur). Ces choix de consommation et de production déterminent l'équilibre général des marchés de biens et de facteurs de production, en tenant

compte des contraintes de ressources disponibles.

Dans le cadre de l'équilibre général, chaque agent (que ce soit un ménage ou une entreprise) prend ses décisions de consommation ou de production en maximisant son propre bien-être ou profit en fonction des prix du marché. Ainsi, les ménages maximisent leur satisfaction en tenant compte de la consommation des biens marchands ( $X$  et  $Y$ ), sans considération des externalités. L'effet environnemental marginal est supposé nul pour chaque agent dans ses décisions individuelles, c'est-à-dire qu'aucun agent ne tient directement compte des externalités négatives de ses choix. En conséquence, l'équilibre obtenu à partir des décisions des agents privés pourrait ne pas correspondre à une situation socialement optimale. Cette approche conduit à des prix d'équilibre sur les marchés de biens et de facteurs, tels que le capital, le travail et la terre.

D'autre part, l'optimum social est obtenu par une approche normative qui cherche à maximiser le bien-être global, en tenant compte de l'ensemble des externalités, les émissions de GES comme l'utilisation des sols. L'optimum social se définit comme celui où l'utilité marginale de chaque facteur de production est égale à son coût marginal d'utilisation, ce qui conduit à une allocation efficace des ressources dans l'économie. Dans ce cadre, le planificateur bienveillant cherche à égaliser l'utilité marginale de chaque facteur entre les différents secteurs de production. Cela implique de maximiser le bien-être global tout en prenant en compte les effets environnementaux, en particulier les émissions de GES et la préservation des espaces naturels ou espaces verts.

Dans chaque aspect du modèle (régime de production de l'énergie, inégalités de revenu, niveau de bien-être), les résultats obtenus nous permettent d'aboutir à une comparaison entre deux approches : la première, basée sur un équilibre général, où les agents prennent leurs décisions en fonction des prix de marché et des coûts des facteurs de production, et la deuxième, basée sur un optimum social, où les décisions prennent en compte les externalités et le bien-être collectif. L'équilibre général est défini par l'interaction des choix des consommateurs et des producteurs sur les différents marchés, tandis que l'optimum social repose sur la maximisation du bien-être global, qui intègre à la fois les bénéfices de la consommation des biens et les coûts environnementaux liés à la production et à la consommation.

Un élément clé de notre analyse réside dans le fait que, dans le modèle, nous avons défini un agent représentatif pour chaque groupe de ménages. L'agent représentatif d'un groupe détermine l'équilibre général en

effectuant ses choix de consommation et de production, mais son utilité indirecte correspond également à l'optimum social, puisqu'il reflète les préférences de tout le groupe en matière de biens et d'environnement. Cette dualité permet de comparer la situation observée sur les marchés (l'équilibre de marché) avec celle qui serait idéale du point de vue social (l'optimum social), où l'on cherche à minimiser les externalités négatives tout en maximisant le bien-être collectif.

Ainsi, à partir de cette comparaison entre l'équilibre de marché et l'optimum social, nous avons pu tout d'abord définir un régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie, ensuite évaluer l'impact de la transition énergétique sur les inégalités de revenu et sur le bien-être global.

### 2.3.1 TRANSITION ET MIX ÉNERGÉTIQUE

Dans cette section, nous analysons la répartition de la production d'énergie entre carburants d'origine fossile et biocarburants en fonction des ressources de capital et de terre dans une économie, en comparant l'équilibre de marché et l'optimum social. Les résultats montrent que la production conjointe des deux types d'énergie dépend du ratio capital-terre. Ces résultats soulignent les divergences entre les dynamiques de marché et les exigences sociales optimales, mettant en lumière l'importance d'une intervention politique pour favoriser un mix énergétique plus durable.

#### RÉGIME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE SELON LES RESSOURCES DE L'ÉCONOMIE À L'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ

L'équilibre de marché est défini par la répartition entre l'énergie fossile et les biocarburants, en fonction des ressources de capital  $\bar{K}$  et de terre  $\bar{A}$ . Dans l'équation 2.22,  $\varepsilon_f^{eq}$  et  $\varepsilon_b^{eq}$  expriment la proportion de chaque énergie en fonction de plusieurs paramètres économiques, tels que l'intensité de la satisfaction obtenue par la consommation des biens ( $X, Y$ ), l'élasticité de la production par rapport aux facteurs utilisés dans chaque secteur ( $\varepsilon, \omega, \rho, \sigma$ ), les progrès techniques dans chaque type d'énergie ( $b_{Eb}, b_{Ef}$ ). Lorsque les deux types d'éner-

gie sont produits, en utilisant le fait que  $\varepsilon_f = 1 - \varepsilon_b$ , la part de chaque type d'énergie est ainsi déterminée :

$$\begin{cases} \varepsilon_f^{eq} = \frac{(a_X\sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)))(b_{Ef}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} - a_Y\rho_y(b_{Eb}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - A_N))}{(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))\left(\sigma_{Eb}(b_{Ef}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} + \rho_{Ef}(b_{Eb}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - A_N))\right)} \\ \varepsilon_b^{eq} = \frac{(a_Y\rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)))(b_{Eb}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - A_N) - (a_X\sigma_x)(b_{Ef}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K})}{(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))\left(\sigma_{Eb}(b_{Ef}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} + \rho_{Ef}(b_{Eb}^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - A_N))\right)} \end{cases} \quad (2.22)$$

Ces valeurs ne sont vraies que lorsque  $\varepsilon_f^{eq}$  et  $\varepsilon_b^{eq}$  sont compris entre 0 et 1. Ceci étant clair, l'équation 2.22 permet d'analyser la situation à l'équilibre de marché sur les cas particuliers selon les limites extrêmes de la part d'énergie fossile produite  $\varepsilon_f$ , ce qui nous permet de déterminer les seuils de ratio capital-terre définissant un régime de production de l'énergie.

— Si  $\varepsilon_f = 1$ , on a l'équation de la droite  $k_{ef}^{eq}$  :

$$k_{ef}^{eq} \equiv \bar{K} = \left( \frac{a_Y\rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\sigma_x} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N). \quad (2.23)$$

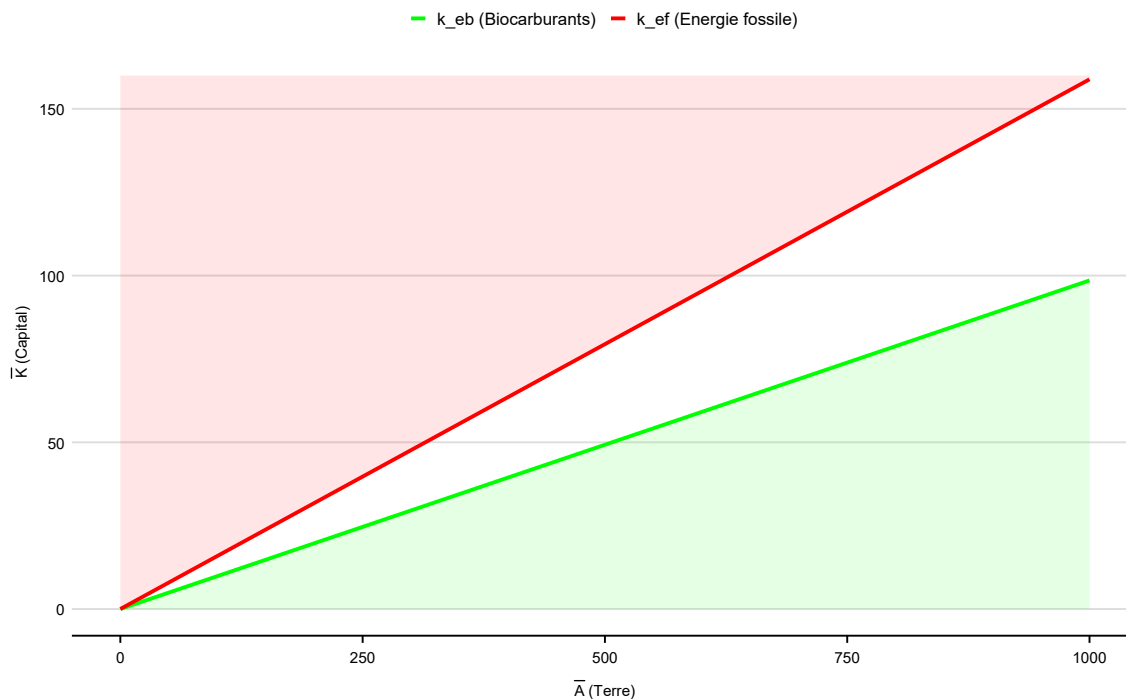
— Si  $\varepsilon_b = 0$ , on a l'équation de la droite  $k_{eb}^{eq}$  :

$$k_{eb}^{eq} \equiv \bar{K} = \left( \frac{a_Y\rho_y}{a_X\sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (2.24)$$

Nous précisons ici que  $k_{ef}^{eq} > k_{eb}^{eq}$ , donc pour tout ratio capital-terre compris entre les droites  $k_{eb}^{eq}$  et  $k_{ef}^{eq}$ , l'économie produit les deux types d'énergie.

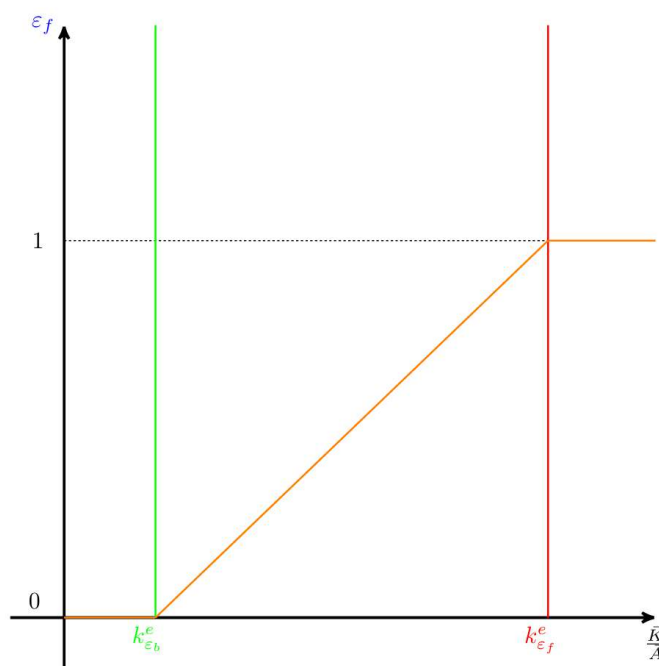
**prop 2.3.1.** *La production conjointe des deux énergies n'a lieu que si le ratio capital-terre se situe entre deux seuils  $k_{eb}^{eq}$  et  $k_{ef}^{eq}$ , l'économie produit les deux types d'énergie. Si le ratio capital-terre est trop faible, seule la bioénergie est produite, et s'il est trop élevé, seule l'énergie fossile est produite.*

La figure 2.1 illustre comment le ratio capital-terre détermine la spécialisation de l'économie dans la production d'un type d'énergie, en fonction des conditions d'équilibre du marché. En observant cette figure, on constate que lorsque le ratio capital-terre dépasse le seuil  $k_{ef}^{eq}$  (représenté par la droite rouge), l'économie se spécialise exclusivement dans la production d'énergie fossile. À l'inverse, lorsque ce ratio est inférieur à  $k_{eb}^{eq}$  (indiqué par la droite verte), l'économie se spécialise uniquement dans la production de biocarburants. Enfin,



**FIGURE 2.1 :** Régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie (à l'équilibre)

lorsque le ratio capital-terre se situe entre ces deux seuils, l'économie adopte un mix énergétique, produisant à la fois de l'énergie fossile et des biocarburants.



**FIGURE 2.2 :** Transition énergétique selon le ratio capital-terre à l'équilibre de marché

Comme le montre la figure 2.1, les droites  $k_{eb}^{eq}$  et  $k_{ef}^{eq}$  délimitent le régime de production de l'énergie dans lequel l'économie est plus efficace selon ses ressources disponibles. Avec ce résultat, nous pouvons affirmer

que :

**cor 2.3.1.** *Selon les conditions d'équilibre de marché, plus un pays dispose de capital plus il se tourne vers la production de l'énergie fossile et, parallèlement, plus il dispose de terre plus il se spécialise dans la production de biocarburants.*

Cela correspond bien à l'idée qu'un pays agricole (riche en terres) est plus orienté vers les ressources renouvelables, tandis qu'un pays industriel (riche en capital) est plus dépendant des énergies fossiles.

La figure 2.2, toujours dans le cadre des conditions d'équilibre du marché, met en lumière la transition énergétique en illustrant l'évolution de la part d'énergie fossile en fonction du ratio capital-terre. En effet, il est observable qu'à mesure que le ratio capital-terre augmente, la part d'énergie fossile dans le mix énergétique croît, ce qui entraîne une spécialisation accrue de l'économie dans la production d'énergie fossile. Ainsi, lorsque le ratio capital-terre est faible ( $0 < \bar{K}/\bar{A} < k_{eb}^{eq}$ ), l'économie se spécialise exclusivement dans la production de biocarburants. Entre les deux seuils ( $k_{eb}^{eq} \leq \bar{K}/\bar{A} \leq k_{ef}^{eq}$ ), un mix énergétique se développe, produisant à la fois de l'énergie fossile et des biocarburants. Enfin, lorsque le ratio capital-terre devient élevé ( $\bar{K}/\bar{A} > k_{ef}^{eq}$ ), l'économie se spécialise exclusivement dans la production d'énergie fossile..

#### RÉGIME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE SELON LES RESSOURCES DE L'ÉCONOMIE À L'OPTIMUM SOCIAL

La part de chaque type d'énergie produit, lorsque  $0 < \varepsilon_f < 1$ , selon les critères de l'optimum social sont données par :

$$\begin{cases} \varepsilon_f^{op} = \frac{(a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)) (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} - a_Y \rho_Y (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N)}{(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p) \left( \sigma_{Eb} (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + \rho_{Ef} (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \\ \varepsilon_b^{op} = \frac{(a_Y \rho_Y + \rho_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)) (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) - a_X \sigma_x (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K}}{(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p) \left( \sigma_{Eb} (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + \rho_{Ef} (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \end{cases} \quad (2.25)$$

L'équation 2.25 montre que la part optimale de chaque type d'énergie, fossile ( $\varepsilon_f^{op}$ ) et bioénergie ( $\varepsilon_b^{op}$ ), dépend des ratios entre capital, terre, et des rendements de chaque type d'énergie. Lorsque le capital est plus important ou lorsque l'efficacité de la production fossile augmente, la part d'énergie fossile ( $\varepsilon_f^{op}$ ) augmente, tandis que la disponibilité des terres et les rendements des biocarburants favorisent la production de bio-

énergie ( $\varepsilon_b^{op}$ ). En somme, l'équilibre entre ces deux types d'énergie dépend de l'interaction complexe entre les ressources disponibles et les technologies de production.

- Si  $\varepsilon_f^{op} = 1$  alors l'optimum social correspond au maximum de la quantité de capital par rapport à la terre où il est préférable de produire uniquement l'énergie fossile

$$k_{\varepsilon_f}^{op} \equiv \bar{K} = \left( \frac{a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \sigma_x} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (2.26)$$

- Si  $\varepsilon_f^{op} = 0$  alors la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement la bioénergie est :

$$k_{\varepsilon_b}^{op} \equiv \bar{K} = \left( \frac{a_Y \rho_y}{a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (2.27)$$

Nous précisons que  $k_{\varepsilon_f}^{op} > k_{\varepsilon_b}^{op}$ , donc pour tout ratio capital-terre compris entre les droites  $k_{\varepsilon_b}^{op}$  et  $k_{\varepsilon_f}^{op}$ , l'économie devrait produire les deux types d'énergie.

**prop 2.3.2.** *Lorsque le ratio capital/terre dépasse  $k_{\varepsilon_f}^{op}$ , l'économie doit se spécialiser dans la production d'énergie fossile pour maximiser l'efficacité économique, car la disponibilité en capital rend l'énergie fossile plus compétitive par rapport aux biocarburants.*

**cor 2.3.2.** *À l'inverse, si le ratio capital/terre est inférieur à  $k_{\varepsilon_b}^{op}$ , la production de biocarburants devient la meilleure option en raison de la prépondérance des ressources naturelles (terre), rendant son utilisation plus avantageuse économiquement.*

La figure 2.3 représente la spécialisation énergétique en fonction du ratio capital/terre ( $\bar{K}/\bar{A}$ ), dans le cadre où l'économie prend en compte les externalités environnementales liées aux émissions des GES générées par la production de l'énergie. Elle révèle que, sous l'optimum social, l'économie se spécialise exclusivement dans la production de biocarburants lorsque le ratio ( $\bar{K}/\bar{A}$ ) est inférieur à un seuil critique ( $k_{\varepsilon_b}^{op}$ ), tandis que, au-delà de ce seuil, la production d'énergie fossile devient prépondérante, avec un point de bascule à  $k_{\varepsilon_f}^{op}$ . Entre ces deux seuils, l'économie adopte un mix énergétique, produisant simultanément des énergies fossiles et renouvelables.

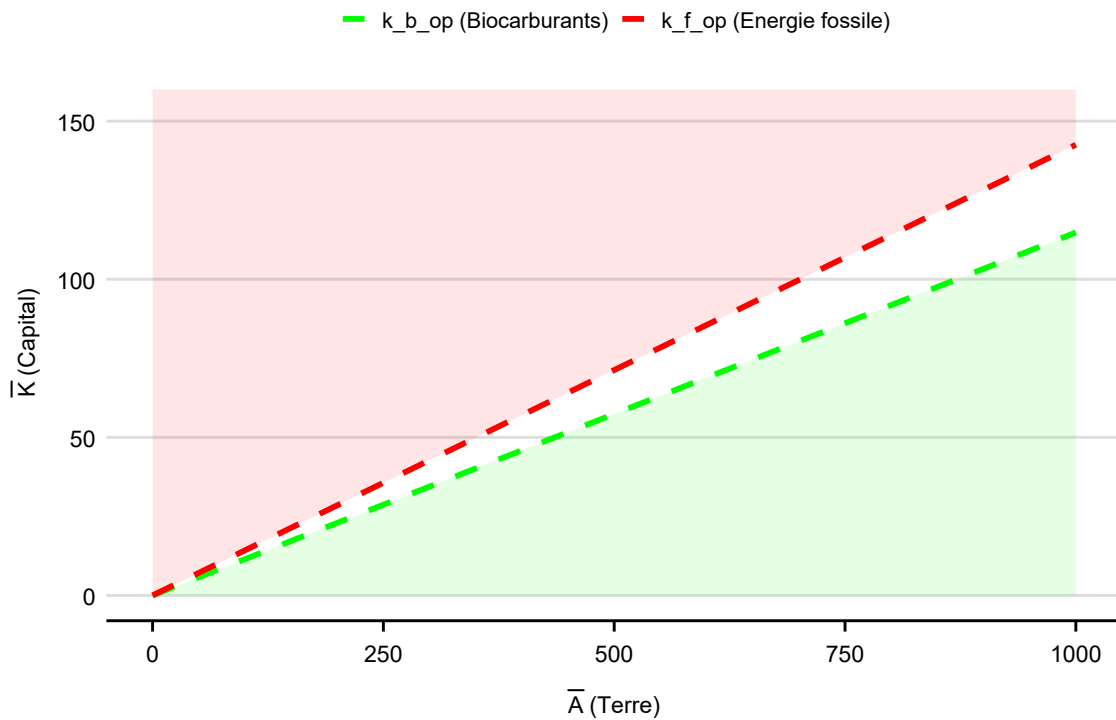


FIGURE 2.3 : Régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie (à l'optimum)

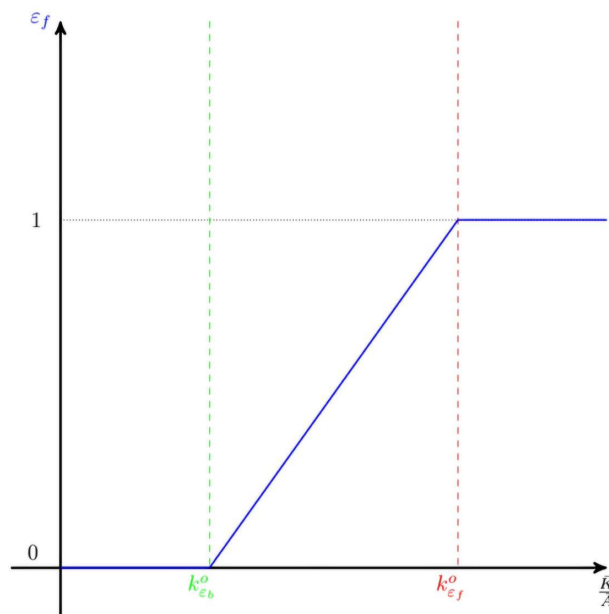


FIGURE 2.4 : Transition énergétique selon le ratio capital-terre à l'optimum social

Le graphique présente l'évolution de la part d'énergie fossile ( $\varepsilon_f$ ) en fonction du ratio capital/terre ( $\frac{\bar{K}}{\bar{A}}$ ) dans le cadre de l'optimum social. Il montre que lorsque ce ratio est faible ( $0 < \frac{\bar{K}}{\bar{A}} < k_{cb}^o$ ), l'économie se spécialise exclusivement dans la production de biocarburants, car cette spécialisation maximise le bien-être so-

cial en minimisant les externalités environnementales. Lorsque le ratio capital/terre se situe entre les seuils  $k_{eb}^{op} \leq \bar{K}/\bar{A} \leq k_{ef}^{op}$ , un mix énergétique optimal se forme, produisant à la fois de l'énergie fossile et des biocarburants, permettant ainsi un équilibre entre la production et la durabilité environnementale. Enfin, lorsque le ratio capital/terre dépasse  $k_{ef}^{op}$ , l'économie se spécialise dans la production d'énergie fossile, car les coûts environnementaux liés à la production de biocarburants deviennent plus élevés que les bénéfices sociaux de leur production.

#### COMPARAISON DE LA SITUATION D'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ À LA SITUATION D'OPTIMUM SOCIAL

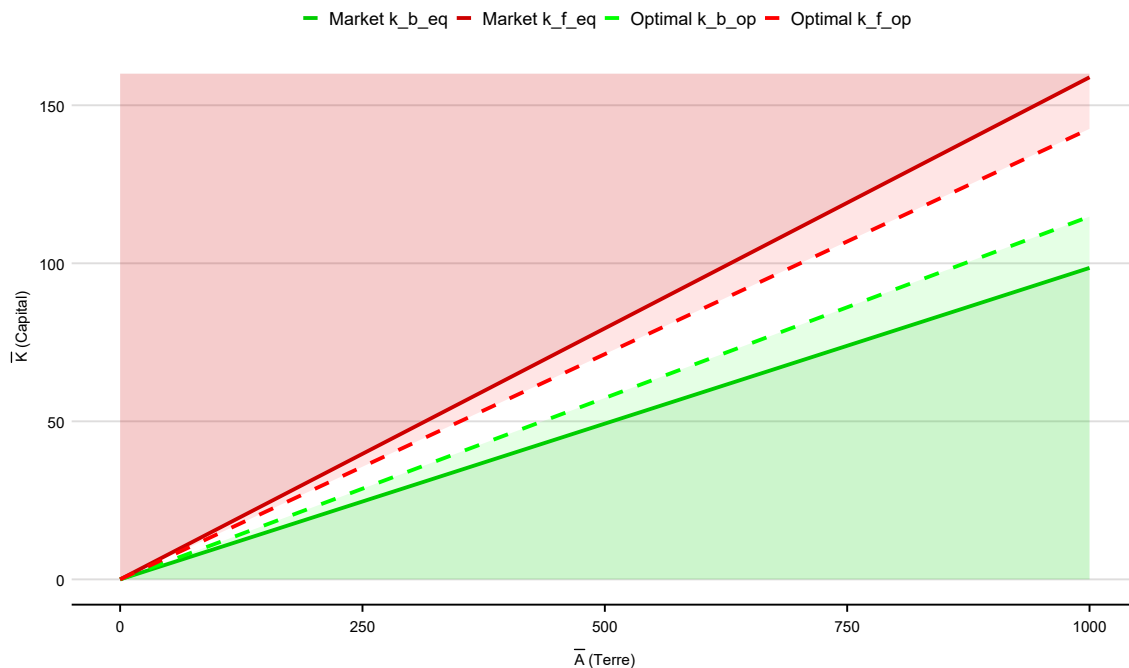
En comparant les seuils critiques du ratio capital-terre entre l'équilibre de marché et l'optimum social, nous avons constaté que  $k_{ef}^{eq} > k_{ef}^{op}$ , tandis que  $k_{eb}^{eq} < k_{eb}^{op}$ . Cette différence indique que, dans le cadre de l'optimum social, le seuil au-delà duquel l'économie se spécialise dans la production d'énergie fossile est plus bas qu'à l'équilibre de marché, tandis que le seuil pour la spécialisation dans les biocarburants est plus élevé. Ce constat reflète la prise en compte des externalités environnementales dans l'optimum social, à mesure que le ratio diminue, qui semble favoriser à la fois une production plus tardive d'énergie fossile et une transition plus rapide vers la production exclusive de biocarburants, rétrécissant la part du mix énergétique.

**prop 2.3.3.** *La part de production conjointe des deux énergies est moins importante à l'optimum social qu'à l'équilibre de marché, car  $k_{ef}^{eq} > k_{ef}^{op}$  et  $k_{eb}^{eq} < k_{eb}^{op}$ .*

**cor 2.3.3.** *La production exclusive d'un seul type d'énergie devrait-être préconisée dans la plupart des cas, avant de passer au mix énergétique.*

En effet, la figure 2.5 compare les seuils critiques du ratio capital-terre entre l'équilibre de marché et l'optimum social. Les courbes en pointillés représentent les seuils dans le cadre de l'optimum social, tandis que les courbes solides indiquent les seuils de l'équilibre de marché. Plus précisément, le seuil  $k_{ef}^{op}$  pour la spécialisation dans la production d'énergie fossile à l'optimum social est inférieur au seuil  $k_{ef}^{eq}$  observé à l'équilibre de marché, ce qui implique que, dans un cadre optimal, la transition vers la production d'énergie fossile se produit à un ratio capital-terre plus faible par rapport à l'équilibre. En revanche, le seuil  $k_{eb}^{op}$  pour la spécialisation dans la production de biocarburants à l'optimum social est supérieur au seuil  $k_{eb}^{eq}$  à l'équilibre de marché, ce qui suggère que, sous l'optimum social, la production de biocarburants devient plus attractive à

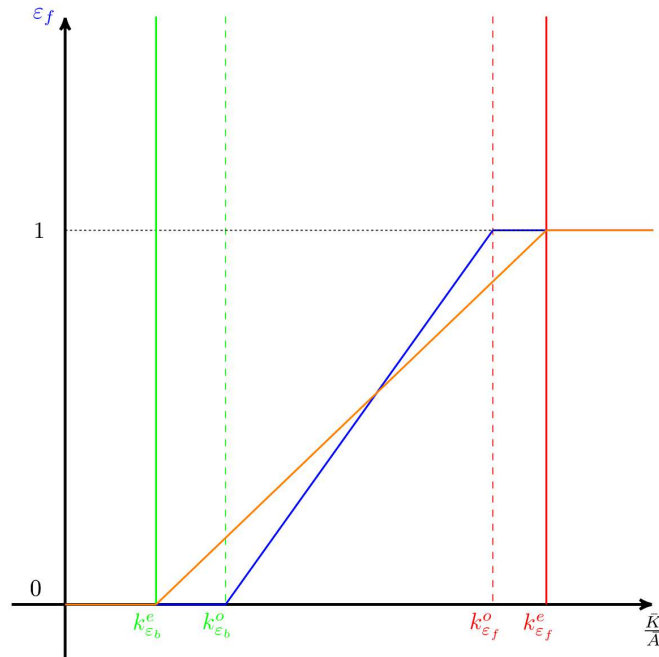
un ratio capital-terre plus élevé.



**FIGURE 2.5 :** Régime de production de l'énergie selon les ressources de l'économie (équilibre vs optimum)

Dans le même ordre d'idée, la figure 2.6 compare les évolutions de la part d'énergie fossile ( $\varepsilon_f$ ) en fonction du ratio capital-terre ( $\bar{K}/\bar{A}$ ) dans deux contextes distincts : l'équilibre de marché et l'optimum social. À l'équilibre de marché, représenté par la courbe orange, l'économie se spécialise dans la production de biocarburants lorsque le ratio capital-terre est inférieur au seuil  $k_{e_b}^{eq}$ . Plus ce ratio est élevé, plus la production d'énergie fossile est élevée dans l'économie, jusqu'à une spécialisation totale dans celle-ci lorsque le ratio dépasse  $k_{e_f}^{eq}$ . Le seuil  $k_{e_b}^{op}$  pour la spécialisation dans la production de biocarburants est plus élevé que  $k_{e_b}^{eq}$ , tandis que le seuil  $k_{e_f}^{op}$  pour la production d'énergie fossile est plus bas que  $k_{e_f}^{eq}$ . Ainsi, l'optimum social, illustré par la courbe bleue, introduit des seuils plus stricts rétrécissant la part de ratio de capital-terre d'un mix énergétique par rapport à l'équilibre de marché.

L'analyse du régime de production de l'énergie et des seuils critiques met en évidence les différences fondamentales entre l'approche de marché et l'optimum social en matière de transition énergétique. Ainsi, l'optimum social, en prenant en compte les coûts sociaux des émissions de GES, semble indiquer qu'il serait mieux d'avoir à la fois une plus grande part de spécialisation dans la production d'un seul type d'énergie (y compris l'énergie fossile exclusivement). Si ce résultat, concernant la part d'énergie produite, est surprenant il est tout à fait compréhensible quand nous le complétons par les résultats comparant les quantités produites



**FIGURE 2.6 :** *Transition énergétique selon le ratio capital-terre (équilibre vs optimum)*

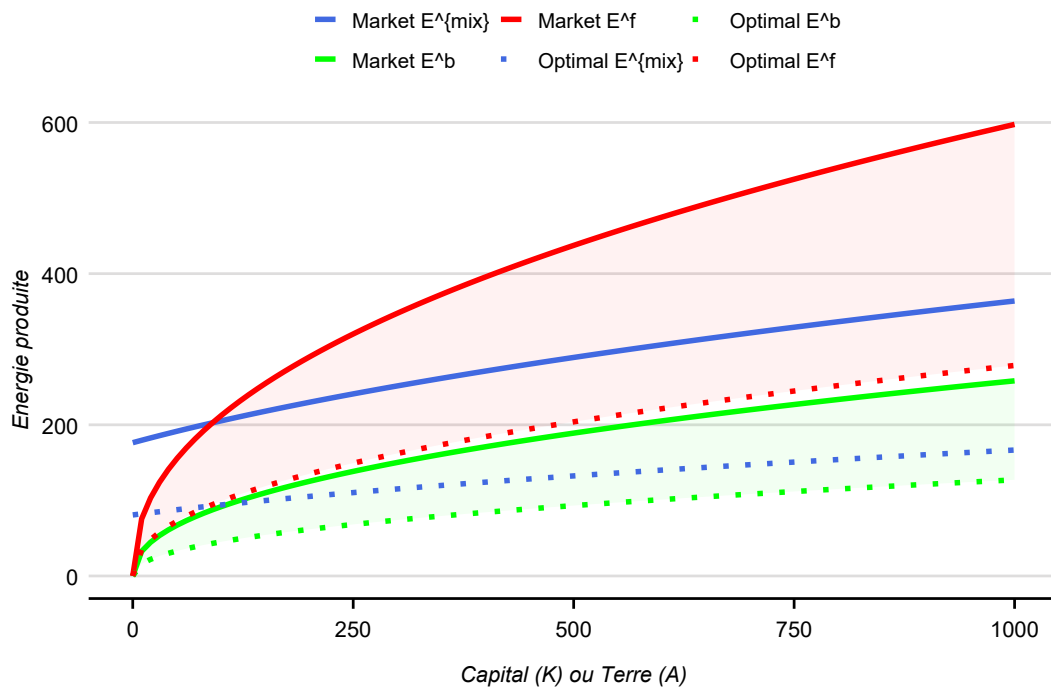
à l'équilibre de marché et à l'optimum environnemental (dit optimum social).

En effet, dans tous les cas étudiés ( $\forall j \in b, f, mix$ ), la quantité d'énergie produite à l'optimum social  $E_{op}^j$  est strictement inférieure à celle produite à l'équilibre de marché  $E_{eq}^j$  (voir l'annexe A.1.2 pour plus de détails) :

$$\left\{ \frac{E_{op}^j}{E_{eq}^j} < 1 \right. \quad (2.28)$$

Cette observation met en lumière une caractéristique clé des inefficacités du marché : la surproduction d'énergie à l'équilibre découle de l'incapacité des mécanismes de marché à internaliser les externalités environnementales ( $\varepsilon_p$ ), résultant notamment des émissions de GES. Lorsque les coûts environnementaux associés à la consommation énergétique ( $\varepsilon_p$ ) sont internalisés, cela conduit à une réduction significative de la demande énergétique totale, quel que soit le régime de production de l'énergie.

La figure 2.7 nous permet de comparer les quantités d'énergie produites selon les trois régime de production de l'énergie ( $E^j, j \in b, f, mix$ ) à l'équilibre de marché (courbe pleine) et à l'optimum social (courbe pointillée). Dans cette figure, nous pouvons constater que la quantité d'énergie produite augmente avec les ressources utilisées quel que soit le régime de production de l'énergie. En revanche, comme le montre l'équation 2.28, nous pouvons également constater que la quantité d'énergie produite à l'équilibre de marché ( $E_{eq}^j$ )



**FIGURE 2.7 :** *Quantité d'énergie produite en fonction des ressources (équilibre vs optimum)*

est nettement plus élevée que celle produite à l'optimum environnemental ( $E_{op}^j$ ; tenant compte des émissions de GES). Par ailleurs, nous pouvons remarquer que l'écart de production d'énergie entre l'équilibre et l'optimum est beaucoup plus important dans le régime de production exclusive d'énergie fossile (l'aire rougeâtre dans la figure 2.7) que dans celui de biocarburants (l'aire verdâtre), ces derniers émettant moins de GES que les premiers. Ces constats restent vrais dans toutes les approches de simulation et de comparaison que nous avons effectués.

Ainsi, selon les critères de l'optimum social, bien plus important ou urgent que la transition énergétique (l'augmentation de la part de biocarburants dans le mix énergétique), nous devrions réduire les quantités d'énergie consommées, quel que soit le régime de production de l'énergie.

#### COMPARAISON DES PRIX DE FACTEUR SELON L'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ ET LES CRITÈRES D'OPTIMALITÉ

Cette première partie est discutée dans le cadre d'un mix énergétique (c'est-à-dire dans le cas où  $0 < \varepsilon_f < 1$ ). Le résultat analytique obtenu dans l'équation A.25 (placée en annexe) met en évidence une relation fondamentale entre les prix des facteurs de production dans l'équilibre de marché ( $r_{mix}^{eq}$  et  $s_{mix}^{eq}$ ) et les conditions d'optimalité sociale ( $r_{mix}^{op}$  et  $s_{mix}^{op}$ ). Les ratios  $r_{mix}^{op}/r_{mix}^{eq}$  et  $s_{mix}^{op}/s_{mix}^{eq}$  dépendent directement des rapports d'élasticités

factorielles associées aux facteurs de production et aux ressources énergétiques. Ces ratios permettent de caractériser l'efficacité de l'allocation des ressources dans l'économie. Trois cas distincts peuvent être identifiés selon la relation entre  $\frac{\omega_{ef}}{\rho_{ef}}$  (le rapport des élasticités de l'énergie fossile) et  $\frac{a_X\omega_x+a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y}$  (le rapport des élasticités combinées du travail et de la terre dans les secteurs agricole et industriel). Ces cas sont décrits et détaillés ci-dessous.

$$\text{CAS 1 : } \frac{\omega_{ef}}{\rho_{ef}} > \frac{a_X\omega_x+a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y}$$

Lorsque le rapport des élasticités factorielles de l'énergie fossile ( $\frac{\omega_{ef}}{\rho_{ef}}$ ) dépasse celui des élasticités combinées du travail et de la terre dans les secteurs agricole et industriel ( $\frac{a_X\omega_x+a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y}$ ), les prix des facteurs de production dans l'équilibre de marché ( $r_{mix}^{eq}$  et  $s_{mix}^{eq}$ ) sont inférieurs à leurs valeurs optimales ( $r_{mix}^{op}$  et  $s_{mix}^{op}$ ). Cela indique une sous-évaluation du capital et de la terre dans le système de marché, ce qui pourrait entraîner une sur-utilisation de ces ressources, notamment dans la production de l'énergie. Cette inefficacité reflète un déséquilibre dans la valorisation ou l'utilisation des facteurs de production, nécessitant potentiellement une intervention publique, comme des subventions pour encourager l'utilisation d'énergies renouvelables ou des taxes correctives, internalisant les externalités que constituent les émissions de GES, sur les ressources fossiles, afin de rétablir des prix reflétant leur productivité réelle.

$$\text{CAS 2 : } \frac{\omega_{ef}}{\rho_{ef}} = \frac{a_X\omega_x+a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y}$$

Dans ce cas, les prix des facteurs dans l'équilibre de marché coïncident parfaitement avec ceux de l'optimum social ( $r_{mix}^{eq} = r_{mix}^{op}$  et  $s_{mix}^{eq} = s_{mix}^{op}$ ). Une telle situation reflète une allocation efficace des ressources, où le système de marché parvient à internaliser pleinement les externalités liés à la production énergétique. Ce scénario ne résulte que de politiques publiques bien calibrées alignant les incitations du marché sur les objectifs sociaux, comme une tarification du carbone ou des mécanismes de marché bien conçus pour l'énergie renouvelable, soulignant l'importance de maintenir un équilibre entre les incitations économiques et les priorités environnementales.

$$\text{CAS 3 : } \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} < \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x + a_Y\rho_y}$$

Lorsque le rapport des élasticités factorielles de l'énergie fossile est inférieur à celui des élasticités combinées du travail et de la terre, les prix des facteurs dans l'équilibre de marché ( $r_{mix}^{eq}$  et  $s_{mix}^{eq}$ ) dépassent leurs valeurs optimales ( $r_{mix}^{op}$  et  $s_{mix}^{op}$ ). Cette surévaluation peut être interprétée comme une distorsion des marchés, où les ressources comme le capital et la terre sont insuffisamment exploitées, ce qui limite leur contribution à la production.

Comme mentionné précédemment, dans le contexte du changement climatique et de la nécessité d'une transition énergétique, l'un des critères d'optimalité discutés dans cette section repose sur deux éléments majeurs : d'une part, l'égalité des prix des facteurs entre l'équilibre et l'optimum, et d'autre part, une augmentation de la production de biocarburants. Ce dernier point marque le passage d'un régime de production exclusivement basé sur l'énergie fossile à un mix énergétique, où les deux types d'énergie sont produits conjointement.

Nous souhaitons donc que la situation d'équilibre de marché se rapproche autant que possible des critères d'optimalité. Pour cela, nous posons l'hypothèse que la condition suivante est vérifiée de manière universelle :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} = \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x + a_Y\rho_y}, \quad \frac{r_{mix}^{op}}{r_{mix}^{eq}} = 1 \iff r_{mix}^{eq} = r_{mix}^{op} \\ \frac{\omega_{Eb}}{\sigma_{Eb}} = \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y}{a_X\sigma_x + a_Y\rho_y}, \quad \frac{s_{mix}^{op}}{s_{mix}^{eq}} = 1 \iff s_{mix}^{eq} = s_{mix}^{op} \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Cette hypothèse établit une correspondance clé entre deux rapports fondamentaux. Le premier membre de l'équation reflète le rapport des élasticités factorielles de l'énergie, exprimant la contribution relative du travail par rapport à celle du capital. Le second membre, quant à lui, représente le rapport entre la somme des élasticités du travail dans les secteurs agricole et industriel, et la somme des élasticités de production de la terre dans l'agriculture et du capital dans l'industrie.

Dans ce cadre, nous pouvons constater que si  $\varepsilon_f = 1$  (production d'énergie fossile uniquement), le ratio entre le prix optimal du capital et son prix à l'équilibre ( $r_{Ef}^{op}/r_{Ef}^{eq}$ ) est inférieur à 1, tandis que le ratio entre le prix optimal de la terre et son prix à l'équilibre ( $s_{Ef}^{op}/s_{Ef}^{eq}$ ) est supérieur à 1. Cela indique une surévaluation du capital et une sous-évaluation de la terre dans l'équilibre de marché par rapport à l'optimum social. En conséquence, le marché favorise une utilisation excessive du capital pour produire de l'énergie fossile, tandis que la terre

sous-exploitée pourrait être utilisée pour produire de l'énergie.

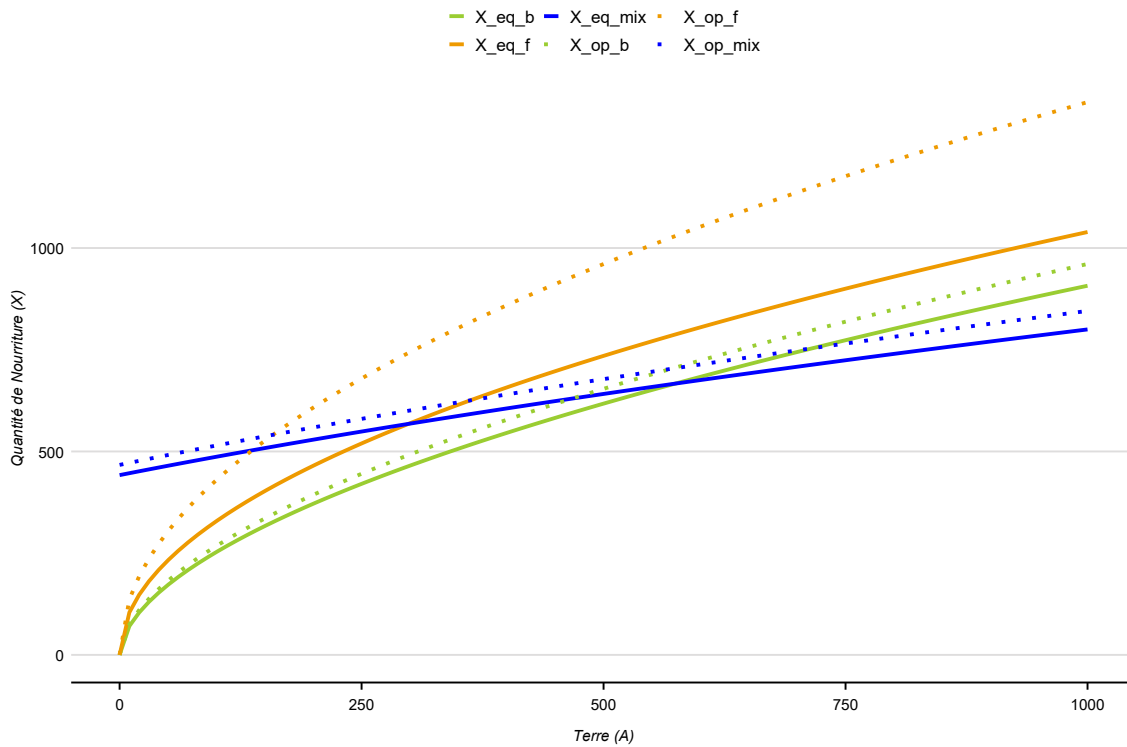
Dans le cas où toute l'énergie produite provient de biocarburants ( $\varepsilon_f = 0$ ), le ratio entre le prix optimal du capital et son prix à l'équilibre ( $r_{Eb}^{op}/r_{Eb}^{eq}$ ) est supérieur à 1, tandis que le ratio entre le prix optimal de la terre et son prix à l'équilibre ( $s_{Eb}^{op}/s_{Eb}^{eq}$ ) est inférieur à 1. Cela révèle une surévaluation du capital et une sous-évaluation de la terre dans l'équilibre de marché par rapport à l'optimum social. Cette situation traduit une allocation inefficace des ressources, où le marché favorise une mobilisation excessive de la terre pour produire des biocarburants, au détriment d'une utilisation équilibrée du capital. Pour rectifier ce déséquilibre, il est crucial d'adopter des politiques visant à améliorer l'allocation du capital dans la production de carburants, par exemple en stimulant les investissements technologiques permettant une meilleure efficacité énergétique. Simultanément, des incitations à limiter l'exploitation intensive des terres, comme le développement de techniques agricoles durables ou la promotion de cultures énergétiques adaptées, peuvent contribuer à un alignement plus proche des critères de l'optimum social.

#### COMPARAISON DES QUANTITÉS DE BIENS PRODUITES SELON L'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ ET LES CRITÈRES D'OPTIMALITÉ

Nous avons déterminé les expressions analytiques qui représentent les quantités de nourriture produites ( $X$ ) dans les trois régimes énergétiques à l'équilibre de marché (équation A.16) et à l'optimum social (équation A.40), en prenant en compte l'impact des différents facteurs de production (capital, terre, travail) et des paramètres technologiques.

Dans la figure 2.8, nous observons que, pour tous les régimes de production de l'énergie, la quantité de nourriture produite à l'optimum social excède celle obtenue à l'équilibre de marché. Autrement dit, le marché, laissé à lui-même, produit moins de nourriture que ne le préconise l'optimum social. Cette situation témoigne d'une inefficacité, puisqu'il existerait au moins une possibilité d'intervention ou de réajustement permettant de rapprocher la production réelle du niveau optimal, et ainsi d'améliorer le bien-être global.

Parallèlement, nous avons déterminé les expressions analytiques qui représentent les quantités de biens manufacturés produites ( $Y$ ) dans les trois régimes énergétiques à l'équilibre de marché (équation A.17) et à l'optimum social (équation A.44), en prenant en compte l'impact des différents facteurs de production (capital,



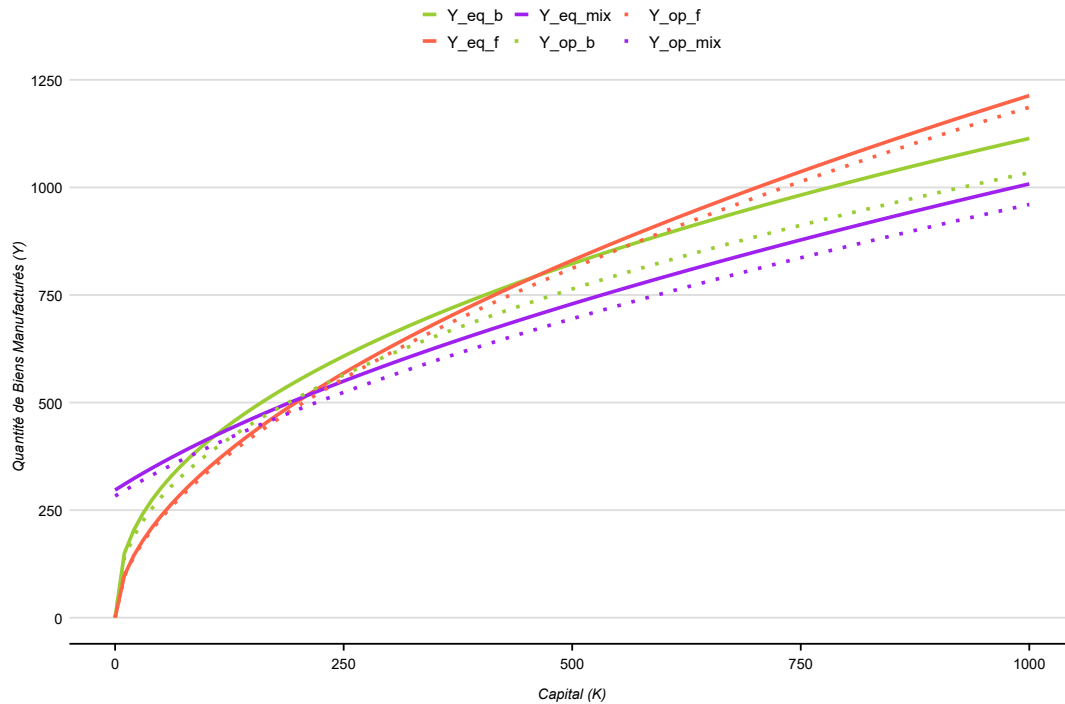
**FIGURE 2.8 :** *Quantité de nourriture  $X$  produite à l'équilibre et à l'optimum*

**Note :** La quantité de nourriture produite est ici représentée en fonction de la terre disponible  $\bar{A}$ , le capital étant fixé ( $\bar{K} = 250$ , via son utilisation dans la production d'énergie), toute chose étant égale par ailleurs (tous les autres paramètres restant les mêmes qu'avant).

terre, travail) et des paramètres technologiques.

Dans la figure 2.9, nous constatons que, pour tous les régimes de production de l'énergie, la quantité de biens manufacturés produite à l'équilibre de marché dépasse celle obtenue à l'optimum social. Autrement dit, le marché, laissé à lui-même, alloue trop de ressources à la production de ces biens par rapport à ce que préconise l'optimum social. Cette surproduction peut engendrer un déséquilibre, où l'on privilégie de façon excessive les biens manufacturés au détriment d'autres besoins essentiels ou de la préservation de l'environnement (surproduction de biens manufacturés implique surproduction d'énergie, ce qui génère plus d'émissions de GES). Par conséquent, il existe une marge de manœuvre pour ajuster le niveau de production vers un seuil plus conforme aux critères d'optimalité sociale, renforçant ainsi le bien-être collectif.

À ce stade, l'analyse montre que, dans le système productif, le marché consacre davantage de ressources qu'il n'en faudrait à l'optimum social à la production d'énergie et de biens manufacturés, tout en sous-investissant dans la production de nourriture. Cette allocation excessive de ressources dans le secteur énergétique et industriel se traduit par une hausse des émissions de gaz à effet de serre, ce qui réduit le bien-être collectif. Pour



**FIGURE 2.9 :** *Quantité de biens manufacturés produite à l'équilibre et à l'optimum*

Note : La quantité de biens manufacturés produite est ici représentée en fonction du capital disponible  $\bar{K}$ , la terre étant fixée ( $\bar{A} = 250$ , via son utilisation dans la production d'énergie), toute chose étant égale par ailleurs.

remédier à cette inefficacité, il est nécessaire de diminuer la quantité de ressources allouées à la production d'énergie et de biens manufacturés, comme le suggère la situation optimale, afin de libérer des ressources pour la production de nourriture. Une telle réallocation contribuerait à la fois à réduire les émissions de GES et à améliorer le bien-être global, en orientant l'économie vers un usage plus équilibré et durable de ses facteurs de production.

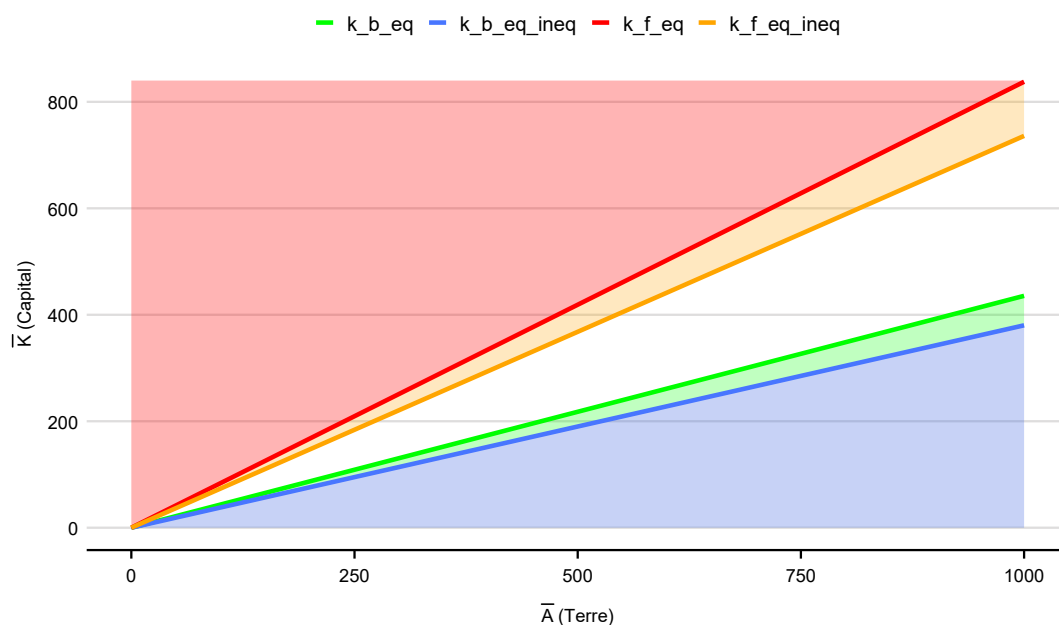
### 2.3.2 EFFETS DES INÉGALITÉS SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Nous avons introduit les inégalités dans le modèle en nous appuyant sur les principes exposés dans la section 2.2.4. En particulier, les écarts de revenus se traduisent par une divergence dans les préférences, puisque la capacité à tirer de l'utilité de la consommation de biens manufacturés s'avère plus élevée chez les ménages aisés que chez ceux aux revenus modestes. Nous avons donc pris en compte ces inégalités dans les calculs, tout en maintenant la même procédure d'analyse que dans le cadre sans disparités de revenus, aussi bien pour l'équilibre de marché que pour l'optimum social. Cela nous permet de confronter, sur une même base, la situation où les ressources sont réparties de manière inégale et celle où elles ne le sont pas.

## RÉGIME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE SELON LES RESSOURCES DE L'ÉCONOMIE ET LES INÉGALITÉS À L'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ

En les prenant en compte, l'analyse des résultats met clairement en lumière l'influence de l'inégalité sur la structure de production énergétique. Dans les deux scénarios d'équilibre de marché (avec ou sans inégalité), il apparaît que, dans les économies où le capital est abondant, la dépendance à l'égard des énergies fossiles s'accroît. Plus l'inégalité de revenus est élevée, plus la transition énergétique tend à se trouver retardée, à ratio capital-terre constant.

En effet, comme l'illustre la figure 2.10, dans les deux scénarios, la production d'énergie fossile (ligne rouge) augmente plus rapidement que celle de biocarburants (ligne verte) à mesure que le ratio  $(\bar{K}/\bar{A})$  s'accroît, traduisant un renforcement progressif de la dépendance aux énergies fossiles dans les économies intensives en capital. Toutefois, l'introduction de l'inégalité (représentée par les courbes orange et bleue) accentue encore cette dynamique, en repoussant les conditions nécessaires au développement de la bioénergie et, par conséquent, en différant la transition énergétique.



**FIGURE 2.10 :** Régime de production d'énergie à l'équilibre de marché (avec et sans inégalités)

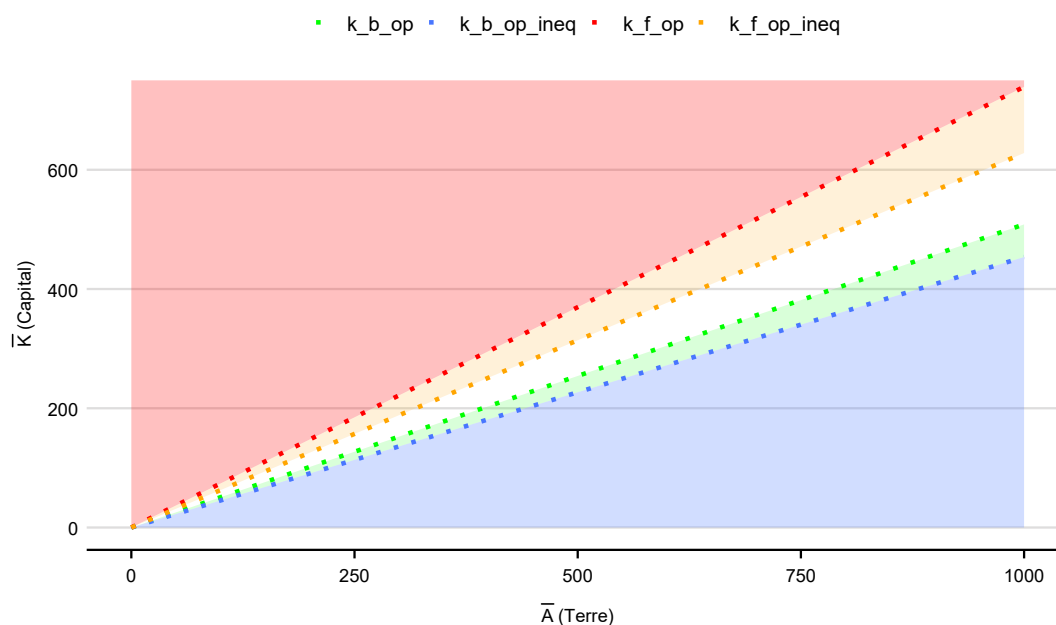
En effet, sous l'effet des inégalités, les seuils critiques de spécialisation dans l'énergie fossile ou les biocarburants s'en trouvent modifiés : les deux courbes de production (énergie fossile et bioénergie) se déplacent

vers le bas dans un contexte inégalitaire. Le seuil du ratio capital-terre nécessaire à la transition énergétique s'avère alors plus faible en présence d'inégalités que lorsqu'elles sont absentes, suggérant que les disparités socio-économiques entravent la transition énergétique, même à ratio capital-terre équivalent.

### RÉGIME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE SELON LES RESSOURCES DE L'ÉCONOMIE ET LES INÉGALITÉS À L'OPTIMUM SOCIAL

Sur la figure 2.11, la ligne rouge et la ligne verte indiquent l'optimum social en l'absence d'inégalités, tandis que la ligne orange et la ligne bleue illustrent la situation lorsqu'elles sont prises en compte.

Dans le cadre d'un optimum social intégrant les inégalités, nous observons une diminution des deux seuils critiques du ratio capital-terre (énergies fossiles et bioénergies) par rapport à l'optimum sans inégalités. L'introduction des inégalités modifie ainsi les conditions de la transition énergétique : à ratio capital-terre équivalent, la part d'énergie fossiles produite dans l'économie est plus importante sous un régime inégalitaire que sous l'optimum social sans inégalité, tandis que la part de biocarburants est, au contraire, plus faible.



**FIGURE 2.11 :** Régime de production d'énergie à l'optimum social (avec et sans inégalités)

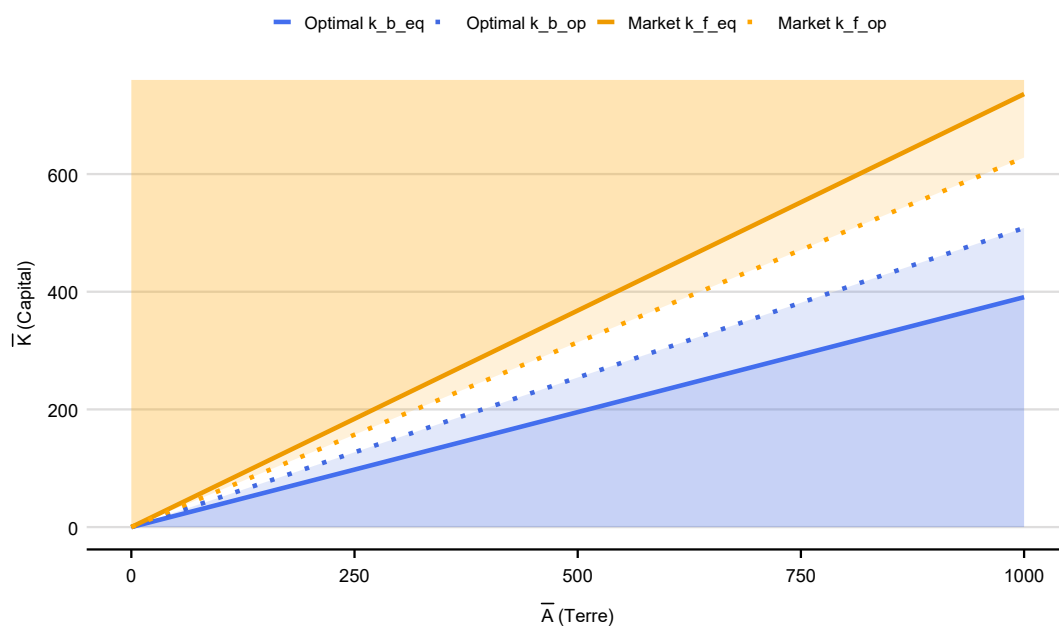
De plus, le fait que ces seuils se trouvent abaissés signifie qu'il devient plus difficile de mettre en place la dynamique globale de la transition énergétique qui est freinée ou retardée, à ratio capital-terre équivalent. Autrement dit, pour un même ratio capital-terre, un régime inégalitaire produit davantage d'énergies fossiles

et moins de biocarburants que ne le ferait un optimum social sans inégalités.

Cette configuration a des implications sur le plan environnemental et socio-économique. D'un côté, le renforcement de la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles peut accroître les émissions de gaz à effet de serre, nuisant à la lutte contre le changement climatique. De l'autre, le développement moins soutenu de la bio-énergie retarde l'émergence d'une filière renouvelable pourtant essentielle à la décarbonation de l'économie. En fin de compte, ces résultats soulignent la nécessité de corriger ou de limiter les disparités de revenus pour soutenir efficacement la transition énergétique : une répartition plus équitable des ressources permettrait de maintenir des seuils de production favorables aux énergies renouvelables, et ainsi d'orienter l'économie vers un développement plus durable.

#### COMPARAISON DES SITUATIONS D'ÉQUILIBRE ET OPTIMUM, COMPTE TENU DES INÉGALITÉS

La figure 2.12 compare le régime de production d'énergie à l'équilibre de marché et à l'optimum social en tenant compte des inégalités, en fonction du ratio capital-terre ( $\bar{K}/\bar{A}$ ). Les courbes pleines (orange pour les combustibles fossiles et bleue pour les biocarburants) correspondent à l'équilibre de marché, tandis que les courbes pointillées représentent l'optimum social.



**FIGURE 2.12 :** Régime de production de l'énergie avec les inégalités (équilibre vs optimum)

Comme l'indique la figure 2.12, à l'équilibre de marché, la spécialisation dans l'énergie fossile intervient à

un seuil critique plus élevé que celui des biocarburants pour un même ratio ( $\bar{K}/\bar{A}$ ). Lorsque l'on introduit les critères de l'optimum social, les seuils critiques se modifient : le seuil de sortie de la production fossile est plus bas qu'à l'équilibre de marché, tandis que celui d'entrée dans les biocarburants se situe plus haut. Autrement dit, la prise en compte des inégalités provoque un déplacement de la courbe d'énergie fossile vers le bas, alors que celle des biocarburants, au contraire, se déplace vers le haut, ce qui s'aligne avec les résultats déjà observés dans le cas sans inégalités.

Ces déplacements suggèrent qu'en présence d'inégalités, pour un même ratio capital/terre, l'économie tend à retarder davantage son recours aux biocarburants. En conséquence, même dans une configuration censée maximiser le bien-être social, l'introduction des inégalités influence la dynamique de la transition énergétique en modifiant les points d'inflexion où la production bascule d'une source d'énergie à l'autre. Cette évolution souligne la nécessité d'intégrer des politiques de redistribution ou d'accompagnement social afin de ne pas entraver la capacité du système productif à évoluer vers des sources d'énergie plus durables.

### 2.3.3 EFFETS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE SUR LES INÉGALITÉS

Pour analyser l'impact de la transition énergétique sur les inégalités, nous reprenons la fonction d'utilité initiale, notée  $u(X, Y, N)$ , mais nous allons modifier juste un peu la notation de la pondération du bien manufacturé. Cette fonction permet de modéliser les préférences individuelles et les arbitrages effectués entre différents types de biens. Nous rappelons que le bien environnemental  $N$  mesure la qualité environnementale, elle-même considérée comme une fonction croissante de l'usage et de la préservation des terres. Cette inclusion est essentielle pour capturer les externalités environnementales générées par les activités économiques, en particulier dans le contexte de la transition énergétique, où les décisions d'allocation des ressources influencent directement la qualité de l'environnement.

$$u(X, Y, Z) \equiv a_X \ln X + a_Y(R) \ln Y + a_N \ln N \quad (2.30)$$

Les pondérations  $a_X$ ,  $a_Y(R)$ , et  $a_N$  caractérisent la manière dont les individus valorisent ces différents biens. Nous rappelons que le coefficient  $a_X$  est supposé constant et identique pour tous les individus, quel que soit leur niveau de revenu. En revanche,  $a_Y(R)$ , associé aux biens manufacturés, est une fonction croissante

du revenu  $R$ . Ce choix reflète l'observation empirique selon laquelle les individus à revenu élevé tendent à accorder une plus grande importance aux biens de consommation secondaires, qui peuvent améliorer leur niveau de vie au-delà des besoins fondamentaux. Enfin,  $a_N$  capture la sensibilité de l'utilité individuelle aux externalités environnementales.

Le bien-être individuel, noté  $w$ , est directement lié à la fonction d'utilité tel que :

$$w = u(X, Y, N). \quad (2.31)$$

La fonction de demande de biens alimentaires est donnée par :

$$X(p, R) = \frac{a_X}{a_X + a_Y(R)} \frac{R}{p} \quad (2.32)$$

La fonction  $X(p, R)$  décrit une demande alimentaire influencée par les contraintes budgétaires (revenu  $R$ ), le coût relatif des aliments (prix  $p$ ) et les préférences de consommation, modélisées par  $a_X$  et  $a_Y(R)$ . Elle met en évidence une transition des priorités de consommation avec l'augmentation des revenus, où les biens alimentaires perdent en importance relative au profit d'autres catégories de biens.

Dans le cadre de cette analyse, nous avons déterminé l'élasticité-revenu des dépenses alimentaires, un indicateur clé pour évaluer comment la part des revenus consacrée à l'alimentation varie en fonction du niveau de revenu. Cette élasticité, notée  $e_{X/I}$ , est définie par l'expression suivante :

$$e_{X/I} = 1 - \frac{a'_Y(R)R}{a_X + a_Y(R)}, \quad (2.33)$$

Cette expression de l'équation 2.33 montre que l'élasticité est une fonction décroissante de  $a'_Y(R)$ , la variation marginale de la préférence pour les biens manufacturés en fonction du revenu. Pour une présentation détaillée des étapes de dérivation de cette élasticité, le lecteur est invité à consulter l'équation A.86 à l'annexe A.3.1.

En utilisant cette élasticité (équation 2.33), nous transformons l'équation de la demande alimentaire pour

obtenir l'équation différentielle suivante :

$$a'_Y(R) = (1 - e_{X/R}) \left( \frac{a_X + a_Y(R)}{R} \right) \quad (2.34)$$

Cette équation décrit la variation de la sensibilité aux biens non alimentaires ( $a_Y(R)$ ) en fonction du revenu ( $R$ ). Sa résolution permet de déterminer la part des dépenses alimentaires dans les revenus, notée  $\alpha_X(R)$ , qui est une fonction clé permettant de comprendre l'évolution des choix de consommation des ménages, avec un lien fondamental entre les paramètres de préférence et les niveaux de revenu.

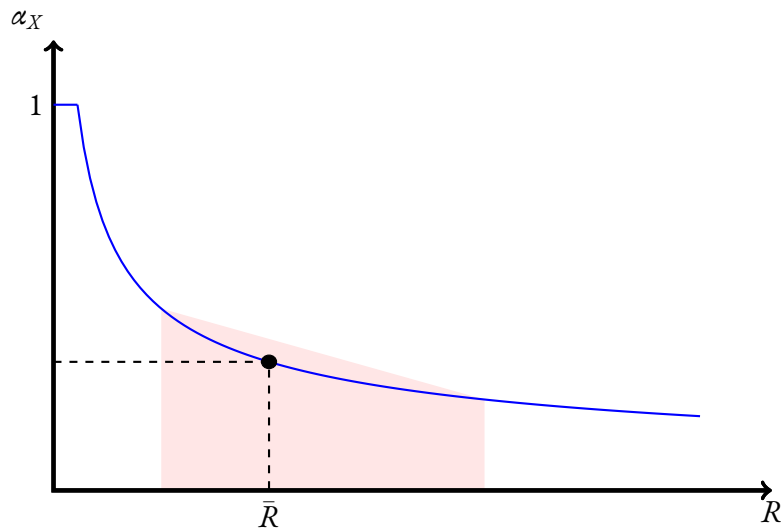
La part des dépenses alimentaires dans les revenus, notée  $\alpha_X(R)$ , exprime la proportion des ressources financières allouées à la consommation de biens alimentaires en fonction du revenu  $R$ . Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\alpha_X(R) = \frac{a_X}{a_X + a_Y} \left( \frac{\bar{R}}{R} \right)^{1 - e_{X/R}} \quad (2.35)$$

où  $\bar{R}$  désigne un niveau de revenu de référence. Cette expression illustre que la part des dépenses alimentaires dépend de deux éléments principaux : d'une part, le rapport entre l'importance accordée aux biens alimentaires ( $a_X$ ) et celle accordée aux biens non alimentaires ( $a_Y$ ), et d'autre part, la variation relative du revenu par rapport à la référence  $\bar{R}$ . Le terme exponentiel  $(1 - e_{X/R})$  modélise la manière dont l'élasticité-revenu influence la dynamique des dépenses alimentaires. Cette formulation nous permet d'analyser les comportements de consommation des ménages à différents niveaux de revenu, notamment dans le cadre de la transition énergétique et de ses implications sur les inégalités sociales et économiques.

La figure 2.13 représente la part des dépenses alimentaires, notée  $\alpha_X(R)$ , en fonction du revenu  $R$ . Cette courbe illustre la relation inverse entre la part relative des dépenses alimentaires et le niveau de revenu.

Nous pouvons constater que, *ceteris paribus*, à revenu moyen constant, une augmentation des inégalités entraîne une redistribution de la consommation en fonction des niveaux de revenu des ménages. En particulier, cette dynamique se traduit par une augmentation de l'importance relative des biens alimentaires dans le budget des ménages à faible revenu. Cet effet s'explique par le fait que les biens alimentaires sont des biens de première nécessité, caractérisés par une élasticité-revenu inférieure à 1, ce qui conduit les ménages les plus défavorisés à allouer une proportion plus importante de leur budget à leur consommation, c'est encore plus



**FIGURE 2.13 :** *Evolution de la part des dépenses alimentaires selon le revenu*

le cas lorsqu'il y a une réduction de leur revenu disponible. A partir de là, à revenu moyen constant, nous pouvons interpréter ces résultats sur les 3 aspects que nous allons détailler ci-dessous.

#### 1. IMPACT SUR LES BIENS ALIMENTAIRES

Une augmentation des inégalités entraîne une hausse de la demande pour les biens alimentaires ( $X$ ) parmi les ménages les plus pauvres. Cette hausse est directement liée au fait que les biens alimentaires représentent une part essentielle de leur budget ( $\tilde{\alpha}_X > \hat{\alpha}_X$ ), en raison de leur caractère de première nécessité. Par conséquent, la demande accrue dans ce segment provoque une augmentation des prix alimentaires ( $p_X$ ). Les ménages à faible revenu, déjà contraints par leurs ressources limitées, se retrouvent à supporter un fardeau encore plus important pour satisfaire leurs besoins alimentaires fondamentaux, ce qui limite leur capacité à diversifier leur consommation. Ce phénomène exacerbe les inégalités, car il accentue la vulnérabilité économique des ménages pauvres tout en maintenant une forte dépendance aux produits de base.

#### 2. IMPACT SUR LES BIENS MANUFACTURÉS

À l'opposé, la demande pour les biens manufacturés ( $Y$ ) diminue ( $\searrow$ ) parmi les ménages les plus pauvres, en raison de leur priorité donnée aux dépenses alimentaires. Cette réduction de la demande globale pour ces biens entraîne une baisse des prix ( $\searrow p_Y$ ), qui profite principalement aux ménages à haut revenu ( $\hat{\alpha}_Y >$

$a_Y$ ), capables de consommer davantage ces biens. Cette dynamique crée une situation où les riches peuvent accéder aux biens manufacturés à des prix plus avantageux, augmentant ainsi leur bien-être relatif, tandis que les pauvres restent marginalisés. Cette contraction de la demande pour les biens manufacturés peut également avoir des implications négatives sur l'économie dans son ensemble, en limitant les incitations à l'innovation et à la production industrielle.

### 3. AGGRAVATION DES INÉGALITÉS

Les inégalités sont doublement amplifiées par ces dynamiques de marché. Les ménages à haut revenu bénéficient d'un double dividende : d'une part, leur capacité à valoriser les biens manufacturés ( $\hat{a}_Y$ ) reste supérieure à celle des ménages pauvres, et d'autre part, la baisse des prix des biens manufacturés ( $\searrow p_Y$ ) leur permet d'augmenter leur consommation à moindre coût. En revanche, les ménages pauvres subissent une double peine : non seulement ils doivent faire face à une hausse des prix alimentaires ( $\nearrow p_X$ ), mais leur capacité à diversifier leur consommation est limitée par leur dépendance aux biens alimentaires ( $\check{\alpha}_X > \hat{\alpha}_X$ ). Par ailleurs, leur faible valorisation des biens manufacturés ( $\check{\alpha}_Y < a_Y$ ) limite leur participation à ce marché, les isolant davantage des bénéfices économiques.

Cette aggravation des inégalités complexifie la mise en œuvre de la transition énergétique. Les ménages pauvres, déjà pénalisés par des coûts alimentaires élevés, sont moins susceptibles d'adopter des technologies ou comportements durables, tandis que les ménages riches continuent de profiter d'un accès privilégié à des biens et services à valeur ajoutée. Une telle dynamique met en évidence la nécessité d'intégrer des politiques redistributives dans les stratégies de transition énergétique pour limiter ces déséquilibres structurels.

### EFFETS À PARTIR DU PRIX DU CAPITAL

Dans un premier temps, les résultats de notre analyse montrent que la production d'énergie fossile engendre des coûts de capital relativement élevés, tandis que la transition vers les biocarburants est associée à une ré-

duction de ces coûts. Les équations qui modélisent ces prix sont les suivantes :

$$\begin{cases} r_{Ef} &= \left( \frac{a_X \rho_f (1 - \varepsilon_x) + a_Y (\rho_y + \rho_f (1 - \varepsilon_y))}{a_X (\omega_x + \omega_f (1 - \varepsilon_x)) + a_Y (\omega_y + \omega_f (1 - \varepsilon_y))} \right) \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \\ r_{mix} &= \left( \frac{a_X (\sigma_x + \rho_{Ef} (1 - \varepsilon_x)) + a_Y (\rho_y + \rho_{Ef} (1 - \varepsilon_y))}{a_X (\omega_x + \omega_{Ef} (1 - \varepsilon_x)) + a_Y (\omega_y + \omega_{Ef} (1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{b_{Eb} \bar{L}}{b_{Ef} \bar{K} + b_{Eb} (\bar{A} - A_N)} \right) \\ r_{Eb} &= \left( \frac{a_Y \rho_y}{a_X (\omega_x + \omega_{Eb} (1 - \varepsilon_x)) + a_Y (\omega_y + \omega_{Eb} (1 - \varepsilon_y))} \right) \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \end{cases} \quad (2.36)$$

Dans l'équation 2.36,  $r_{Ef}$ ,  $r_{mix}$  et  $r_{Eb}$  représentent le prix du capital lorsque l'économie produit de l'énergie fossile uniquement, des biocarburants exclusivement et à la fois les deux types d'énergie, respectivement.

$$r_{Eb} < r_{Ef} \quad (2.37)$$

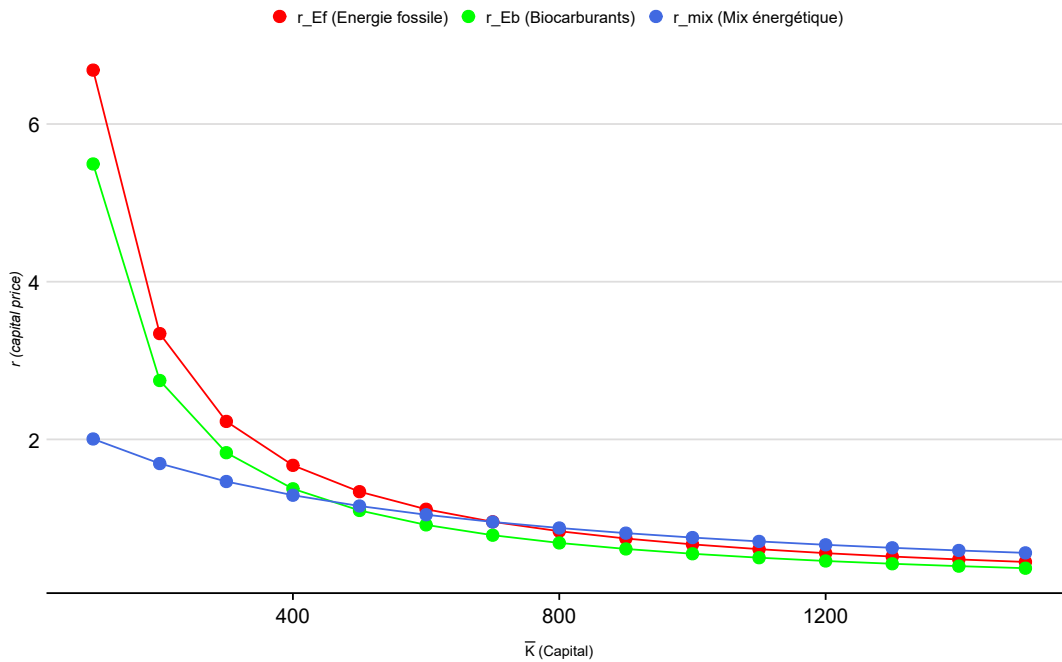


FIGURE 2.14 : Evolution du prix du capital selon le régime de production d'énergie

Avec l'équation 2.37, ces relations montrent que le coût du capital est le plus faible lorsque l'économie produit exclusivement des biocarburants par rapport à la production exclusive d'énergie fossile. Cette diminution du coût du capital pourrait initialement favoriser l'accessibilité aux investissements pour les producteurs, y compris les petits exploitants, ce qui pourrait contribuer à réduire les inégalités, au moins à court terme. Cependant, cette dynamique ne doit pas masquer les conséquences potentielles de la transition sur d'autres

aspects économiques.

#### EFFETS À PARTIR DU PRIX DE LA TERRE

Dans un second temps, les prix de la terre révèlent les résultats suivants :

$$\begin{cases} s_{Ef} &= \left( \frac{a_X \sigma_x}{a_X(\omega_x + \omega_{Ef}(1-\varepsilon_x)) + a_Y(\omega_y + \omega_{Ef}(1-\varepsilon_y))} \right) \frac{\bar{L}}{A-A_N} \\ s_{mix} &= \left( \frac{a_X(\sigma_x + \rho_{Ef}(1-\varepsilon_x)) + a_Y(\rho_y + \rho_{Ef}(1-\varepsilon_y))}{a_X(\omega_x + \omega_{Ef}(1-\varepsilon_x)) + a_Y(\omega_y + \omega_{Ef}(1-\varepsilon_y))} \right) \left( \frac{b_{Eb} \bar{L}}{b_{Ef} \bar{K} + b_{Eb}(\bar{A} - A_N)} \right) \\ s_{Eb} &= \left( \frac{a_X(\sigma_x + \sigma_{Eb}(1-\varepsilon_x)) + a_Y \sigma_b(1-\varepsilon_y)}{a_X(\omega_x + \omega_{Eb}(1-\varepsilon_x)) + a_Y(\omega_y + \omega_{Eb}(1-\varepsilon_y))} \right) \frac{\bar{L}}{A-A_N} \end{cases} \quad (2.38)$$

Dans l'équation 2.36,  $s_{Ef}$ ,  $s_{Eb}$  et  $s_{mix}$  représentent le prix de la terre lorsque l'économie produit de l'énergie fossile uniquement, des biocarburants exclusivement et à la fois les deux types d'énergie, respectivement.

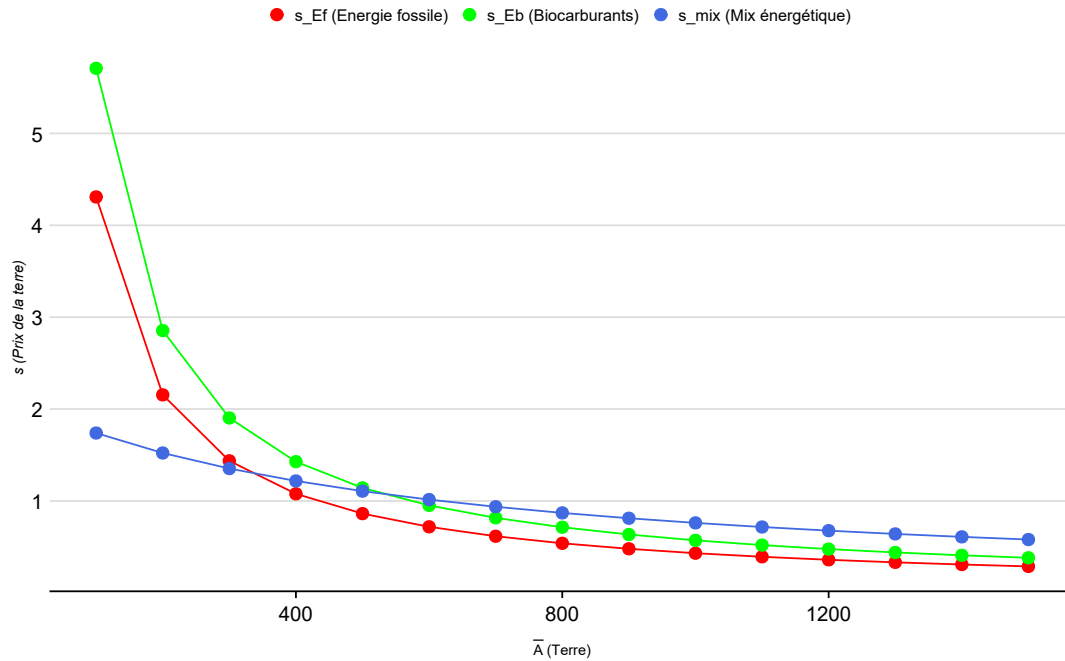
L'analyse de l'équation 2.38 indique que le passage de la production d'énergie fossile à une production mixte entraîne une augmentation des prix de la terre, qui atteignent leur pic lors de la production exclusive de biocarburants. Cette pression à la hausse sur les coûts fonciers est directement liée à l'augmentation de la demande pour des terres destinées à la production de bioénergie.

Cette dynamique définie par l'équation 2.39.

$$s_{Ef} < s_{Eb} \quad (2.39)$$

La figure 2.15 illustre que le prix de la terre est plus élevé lorsque l'économie se concentre sur la production des biocarburants, et cela a des implications significatives sur les inégalités économiques. En effet, comme la terre devient plus coûteuse, et les prix des biens agricoles augmentent, les dépenses liées à la nourriture augmentent également. Les ménages à faible revenu, dont une plus grande part du budget est consacrée à l'alimentation, ressentent alors cette pression économique de manière disproportionnée, exacerbant ainsi les inégalités.

En somme, la transition énergétique, notamment par l'introduction de biocarburants, exerce une pression significative sur les prix des produits alimentaires en raison de la concurrence accrue pour les ressources agri-



**FIGURE 2.15 :** Evolution du prix de la terre selon le régime de production d'énergie

coles, telles que les terres, entre les secteurs énergétique et alimentaire. Cette hausse des prix affecte de manière disproportionnée les ménages les plus pauvres, pour qui les dépenses alimentaires représentent une part essentielle et prioritaire de leur budget. En conséquence, cette dynamique amplifie les inégalités socio-économiques, les ménages défavorisés étant davantage pénalisés par la hausse des coûts alimentaires, tandis que les ménages plus aisés sont moins impactés.

#### 2.3.4 ANALYSE DES RÉSULTATS

La réduction du prix du capital, bien qu'initialement perçue comme un facteur de réduction des inégalités, pourrait en réalité contribuer à leur aggravation. En effet, une baisse des coûts du capital, favorisée par la transition énergétique, rend les investissements dans les biens manufacturés plus accessibles. Cela peut entraîner une augmentation de la consommation de ces biens par les ménages à revenu élevé, qui consacrent une part plus importante de leur budget à ces achats par rapport aux ménages à faible revenu.

Dans notre modèle, nous avons constaté que les ménages à revenu élevé ( $\hat{a}_Y > \check{a}_Y$ ) ont une propension plus forte à investir dans les biens manufacturés lorsque les prix du capital diminuent. Cela signifie qu'ils bénéficient davantage de la transition énergétique, ce qui les rend encore plus satisfaits de leur niveau de

consommation. Par conséquent, alors que les ménages riches peuvent profiter de coûts réduits pour accéder à des biens manufacturés de qualité, les ménages à faible revenu, dont les dépenses sont majoritairement consacrées à l'alimentation, ne voient pas leurs conditions s'améliorer de la même manière.

Cette dynamique accentue les inégalités, car les ménages à faible revenu sont moins en mesure de tirer parti de la baisse des prix du capital. Leur budget étant principalement orienté vers la consommation alimentaire, ils sont vulnérables à l'augmentation des prix alimentaires qui résulte de la hausse des coûts des terres, aggravant leur situation par rapport à ceux qui bénéficient d'une plus grande capacité d'investissement. Ainsi, la transition énergétique, bien qu'elle puisse réduire les coûts de production dans certains secteurs, peut également renforcer les disparités économiques, laissant les ménages les plus défavorisés en arrière.

Par ailleurs, l'augmentation des prix de la terre dans le cadre de la transition énergétique pose des défis plus importants. En augmentant les coûts de production alimentaire, la transition pourrait exacerber la vulnérabilité économique des ménages à faible revenu, qui consacrent une part significative de leur budget à l'alimentation. Avec des dépenses alimentaires qui augmentent en raison des coûts fonciers plus élevés, les inégalités socioéconomiques se creusent, car les ménages les plus pauvres sont plus affectés par cette hausse que ceux à revenu élevé.

De plus, la pression sur les terres agricoles due à la demande croissante pour des biocarburants pourrait également entraîner des conflits d'utilisation des terres, où la production alimentaire pourrait être compromise au profit de la production énergétique, aggravant ainsi la sécurité alimentaire pour les populations vulnérables. En effet, les ménages à faible revenu consacrent une proportion plus élevée de leur budget à l'alimentation par rapport aux ménages plus riches, qui ont une plus grande capacité d'absorption des hausses de prix dans d'autres secteurs de consommation, comme les biens manufacturés. En conséquence, lorsque les prix alimentaires augmentent en raison des coûts fonciers accrus, les ménages à faible revenu sont disproportionnellement touchés. Cette pression sur leur budget peut les contraindre à réduire leurs dépenses dans d'autres domaines essentiels, comme la santé et l'éducation, ce qui aggrave encore leur situation économique.

## 2.4 PROLONGEMENT DU MODÈLE

Pour explorer d'autres résultats à partir du modèle, il est possible d'analyser plusieurs aspects supplémentaires, notamment en approfondissant les implications des paramètres économiques et environnementaux. Voici quelques pistes d'analyse et de résultats que l'on peut tirer de manière théorique.

### 2.4.1 EXPLORATIONS ADDITIONNELLES

#### 1. Effet des progrès techniques sur la transition énergétique

Le modèle introduit deux paramètres clés pour mesurer les progrès techniques dans la production d'énergie :  $b_{Ef}$  pour l'énergie fossile et  $b_{Eb}$  pour la bioénergie. Ces paramètres influencent directement les parts de chaque type d'énergie dans le mix énergétique.

Hypothèse : Si les progrès techniques dans la bioénergie augmentent plus rapidement que ceux dans l'énergie fossile, cela devrait accélérer la transition énergétique en faveur des énergies renouvelables.

Résultat attendu : En différenciant la part de bioénergie  $\varepsilon_b^{eq}$  par rapport à  $b_{Eb}$ , on obtient une relation positive : plus  $b_{Eb}$  augmente, plus la part de bioénergie dans le mix énergétique augmente. Au contraire, une augmentation de  $b_{Ef}$  entraîne une réduction de la part de la bioénergie, car l'efficacité de la production d'énergie fossile devient plus attractive. Une analyse comparative des équilibres pourrait montrer que des investissements dans le progrès technique de la bioénergie seraient nécessaires pour compenser les externalités négatives de l'énergie fossile, en particulier dans des économies riches en capital.

#### 2. Variation des coûts environnementaux ( $a_G = a_N \varepsilon_p$ ) et dynamique de transition

Le coût du changement climatique, modélisé par  $a_G = a_N \varepsilon_p$ , joue un rôle central dans la dynamique de transition à l'optimum social. Une augmentation du coût environnemental incite à produire plus de bioénergie. Cependant, il est intéressant d'examiner les conséquences d'une réduction potentielle des coûts climatiques grâce à des technologies de séquestration du carbone ou des politiques de compensation des émissions.

Hypothèse : Si le coût du changement climatique est réduit (grâce à une capture du carbone ou des politiques incitatives), cela pourrait retarder ou ralentir la transition énergétique vers les énergies re-

nouvelables, même à l'optimum social.

Résultat attendu : Une réduction du coût climatique  $a_G$  ralentit la substitution des énergies fossiles par les bioénergies, car l'incitation à éviter les énergies polluantes est moindre. Cela pourrait retarder la transition énergétique optimale. Si  $a_G$  est réduit en dessous d'un seuil critique (comme  $a_G^{E^f}$ ), l'économie pourrait continuer à produire de l'énergie fossile, même lorsque les dotations en terre justifieraient une transition vers la bioénergie. Cela met en lumière une difficulté potentielle dans la gestion de la transition énergétique : si les politiques d'atténuation du changement climatique ne sont pas suffisamment strictes, l'économie pourrait rester dépendante des combustibles fossiles plus longtemps que nécessaire.

**cor 2.4.1.** *A mesure que le coût du changement climatique  $a_G$  augmente, ou que le progrès technique dans la bioénergie  $b_{E^b}$  augmente, la part de la bioénergie  $\varepsilon_b^{op}$  dans le mix énergétique augmente.*

Cette proposition vient du fait que la part de l'énergie fossile est décroissante avec  $a_G$  (de l'équation A.99) alors qu'elle est croissante avec le progrès technique dans la production de biocarburants. Par ailleurs, nous constatons que le coût du changement climatique ne doit pas dépasser un certain niveau pour que l'économie continue à produire de l'énergie (équation A.100).

**prop 2.4.1.** *Au delà d'un certain niveau de coût du changement climatique  $a_G > a_G^{E^f}$ , l'économie ne doit produire que de la bioénergie  $E^b$ . Dans ce cas, le coût du changement climatique est si élevé qu'il devient préférable à l'économie de produire exclusivement de la bioénergie.*

En effet, au delà de ce coût du changement climatique, le bénéfice marginal que rapporte une unité de capital et/ou de travail dans la production de l'énergie fossile est inférieur au bénéfice marginal de la terre et du travail utilisé dans la production de bioénergie, sans oublier que l'énergie fossile fait augmenter le coût du changement climatique plus rapidement.

Par contre, si  $a_G \geq a_G^{E^b}$  alors il n'y aurait point de production d'énergie, ce qui signifie qu'il n'y a point les autres biens également, l'économie serait à l'arrêt. Ainsi, on doit nécessairement avoir  $a_G < a_G^{E^b}$  (équation A.101).

### 3. Analyse de sensibilité au ratio capital-terre ( $\bar{K}/\bar{A}$ )

Le ratio capital-terre ( $\bar{K}/\bar{A}$ ) est un déterminant majeur du type d'énergie produit par l'économie. Le modèle propose deux seuils,  $k_{e_b}^{eq}$  et  $k_{e_f}^{eq}$ , qui délimitent la zone où les deux types d'énergie sont produits conjointement.

Hypothèse : Si le ratio capital-terre augmente, on observe une transition progressive de la production de bioénergie vers la production d'énergie fossile.

Résultat attendu : En augmentant progressivement  $\bar{K}$ , pour des valeurs au-dessus de  $k_{e_f}^{eq}$ , on observe que l'économie se spécialise davantage dans la production d'énergie fossile. Inversement, si  $\bar{A}$  augmente, l'économie se spécialise de plus en plus dans la bioénergie. Une étude de sensibilité permettrait d'identifier des seuils critiques de transition énergétique, au-delà desquels l'économie change radicalement son orientation énergétique.

#### 4. Politique de taxation du carbone et son effet sur l'équilibre

Une politique courante pour réduire la dépendance aux énergies fossiles est la taxation du carbone. Dans le cadre du modèle, une taxe sur les énergies fossiles pourrait être introduite sous forme de réduction du bénéfice marginal dans la fonction de production d'énergie fossile.

Hypothèse : Une taxe carbone modifie la répartition du mix énergétique en augmentant le coût relatif de l'énergie fossile, incitant ainsi l'économie à produire plus de bioénergie.

Résultat attendu : La part de bioénergie  $\varepsilon_b^{eq}$  devrait augmenter si une taxe sur le carbone est introduite. Cela peut se modéliser en modifiant les coefficients économiques associés à l'énergie fossile pour refléter la baisse de profitabilité. Si la taxe est trop faible, elle pourrait ne pas avoir l'effet escompté, et l'économie pourrait continuer à produire des énergies fossiles au-delà du seuil optimal (comme décrit par  $k_{e_f}^{op} < k_{e_f}^{eq}$ ). L'analyse de cette politique permettrait de déterminer un niveau optimal de taxe carbone pour accélérer la transition vers les énergies renouvelables.

#### 5. Comparaison entre différents types d'économie : capital-intensive vs terre-intensive

Le modèle permet aussi d'étudier la spécialisation énergétique en fonction du type d'économie. Deux scénarios peuvent être envisagés :

Économie capital-intensive : pays avec un ratio capital-terre élevé. Économie terre-intensive : pays avec beaucoup de terres et peu de capital. Résultat attendu : Les économies capital-intensives auront une

plus grande part d'énergie fossile dans leur mix énergétique à l'équilibre, car leur dotation en capital favorise la production de cette énergie. Les économies terre-intensives, quant à elles, se spécialisent davantage dans la production de bioénergie. Leurs ressources foncières abondantes rendent la bioénergie plus attractive à l'équilibre. Cela peut aussi avoir des implications sur les politiques climatiques internationales. Les pays riches en capital pourraient avoir des incitations plus faibles à la transition énergétique sans intervention gouvernementale, contrairement aux pays riches en terres qui peuvent naturellement se tourner vers des énergies renouvelables.

Ces différentes pistes d'analyse permettent de mieux comprendre comment les facteurs économiques, techniques et environnementaux influencent la répartition entre énergie fossile et bioénergie dans une économie. Les résultats supplémentaires obtenus montrent qu'une combinaison de progrès technique, de politiques environnementales, et de taxation carbone pourrait accélérer la transition énergétique vers un mix plus durable. Cependant, des arbitrages complexes existent, notamment sur le timing de la transition et les incitations économiques en fonction des dotations en capital et en terre.

## 2.5 CONCLUSION

Ce chapitre a exploré les impacts complexes et bidirectionnels entre la transition énergétique et les inégalités socioéconomiques, en révélant des dynamiques structurelles qui façonnent à la fois les trajectoires technologiques et les disparités de revenu. En synthétisant les conclusions des différentes sections, quatre enseignements majeurs émergent, soulignant la nécessité d'une approche holistique pour concilier durabilité et équité.

Premièrement, l'analyse des déséquilibres sectoriels a montré que le marché, en l'absence de régulation, favorise une allocation inefficace des ressources. Une surproduction d'énergie fossile et de biens manufacturés, au détriment de la production alimentaire, entraîne non seulement une hausse des émissions de gaz à effet de serre, mais compromet aussi le bien-être collectif. La réduction de ces déséquilibres, via une réallocation stratégique des ressources vers l'agriculture et les énergies propres, apparaît comme un levier clé pour concilier réduction des émissions et sécurité alimentaire.

Deuxièmement, l'intégration des inégalités dans le modèle a révélé que les disparités de revenu perturbent

les dynamiques de transition énergétique. En présence d'inégalités, l'économie tend à retarder l'adoption des biocarburants, même dans un cadre censé maximiser le bien-être social. Ce « retard structurel » s'explique par des pressions contradictoires : la hausse des prix de la terre pénalise les ménages pauvres, tandis que la baisse des prix du capital profite aux plus aisés. Ces résultats soulignent l'importance de politiques redistributives pour éviter que les inégalités n'entravent la transition vers des énergies durables.

Troisièmement, l'étude des effets distributifs a mis en lumière un cercle vicieux : la transition énergétique, via le développement des biocarburants, détériore les inégalités en renchérissant les coûts alimentaires. Les ménages pauvres, qui consacrent l'essentiel de leur budget à l'alimentation, subissent de plein fouet la concurrence pour les terres agricoles, tandis que les ménages riches adaptent leur consommation grâce à leur accès privilégié au capital. Cette asymétrie menace non seulement la cohésion sociale, mais aussi l'efficacité même de la transition, les populations vulnérables étant exclues des innovations durables par manque de moyens.

Enfin, les prolongements du modèle ont identifié des leviers d'action prometteurs, mais exigeant des arbitrages délicats. Une combinaison de progrès technique (notamment dans l'efficacité énergétique), de taxation carbone et de régulation des ressources foncières pourrait accélérer la transition. Toutefois, ces mesures doivent être calibrées avec précision pour éviter des effets contreproductifs. Par exemple, une fiscalité carbone mal conçue risquerait d'aggraver les inégalités, tandis qu'un soutien excessif aux biocarburants pourrait déstabiliser les marchés alimentaires.

En synthèse, ce chapitre démontre que la transition énergétique ne peut être dissociée des enjeux de justice sociale. Pour être à la fois efficace et équitable, elle doit s'appuyer sur trois piliers :

- 1) Une régulation proactive des marchés pour corriger les déséquilibres sectoriels et internaliser les coûts environnementaux.
- 2) Des mécanismes de compensation ciblés (subventions alimentaires, accès facilité aux technologies vertes) pour protéger les ménages vulnérables des chocs prix induits par la transition.
- 3) Une gouvernance intégrée des ressources critiques (terre, capital), associant acteurs publics, privés et communautés locales, afin de concilier sécurité énergétique, résilience alimentaire et réduction des inégalités.

Ces pistes ouvrent la voie à des recherches futures, notamment sur le rôle des institutions dans le suivi des

risque de conflit d'usage des ressources et l'impact des innovations technologiques sur l'inclusivité économique. Des recherches approfondies sur la mise en place de la taxe carbone et l'arbitrage entre son affectation au soutien du développement de solutions énergétiques durables ou à des mesures de redistribution visant à atténuer les inégalités sociales constitueraient également un axe d'étude particulièrement pertinent. Une transition énergétique réussie sera celle qui, au-delà de la décarbonation, saura transformer les structures économiques pour les rendre à la fois durables et équitables.



# 3

## Impacts de la Co-Production d'Énergie Biosourcée et de Carburants d'Aviation Durables

### 3.1 INTRODUCTION

Selon la Commission européenne plus de 75 % des émissions de gaz à effet de serre sont liées à la production et à l'utilisation de l'énergie dans l'Union européenne (EEA, 2021, 2023). En outre, l'Europe est responsable de près d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) qui détériorent la couche d'ozone (EEA, 2020). Dans l'objectif principal de permettre à l'Union européenne de parvenir à la neutralité carbone d'ici 2050, la Commission européenne (CE) a approuvé le Pacte vert pour l'Europe (*European Green Deal*<sup>1</sup>) en 2020. Ce pacte est constitué d'initiatives politiques visant à réduire les émissions de GES de l'UE à travers la révision des lois et l'implémentation de nouvelles réglementations dans tous les secteurs. En cohérence avec le Pacte vert pour l'Europe, en octobre 2023 l'Union européenne a promulgué la réglementation dénommée

---

1. *European Green Deal : nouvelle stratégie de croissance visant à transformer l'UE en une société juste et prospère, dotée d'une économie moderne, efficace et compétitive, sans émissions nettes de GES en 2050, avec croissance économique découplée de l'utilisation des ressources.*

*ReFuelEU Aviation*<sup>2</sup> qui comprend des articles visant à garantir des conditions de concurrence équitables tout en favorisant le développement de carburants d'aviation durable.

Dans ce cadre, la transition énergétique en vue de la décarbonation de l'aviation civile est particulièrement intéressante en ce sens que les autres technologies comme l'électrique ou le réacteur à hydrogène n'y sont pas applicables à court et moyen terme. La substitution des carburants d'aviation d'origine fossile par les carburants d'aviation durables demeurent la seule possibilité viables à court et moyen terme pour réaliser des économies d'émissions de GES, en dehors de mettre tout le secteur à l'arrêt. C'est dans cette logique que l'initiative *ReFuelEU Aviation* envisage le développement de CAD.

Dans la réglementation *ReFuelEU Aviation*, la CE impose aux fournisseurs de carburant d'aviation l'obligation de distribuer des carburants d'aviation durables (CAD, Sustainable Aviation Fuel - SAF en anglais), avec une part croissante de CAD (y compris les carburants synthétiques pour l'aviation, communément appelés e-carburants) au fil du temps, afin d'accroître la consommation de CAD par les compagnies aériennes et de réduire ainsi les émissions générées par l'aviation à l'échelle européenne. Une des méthodes les plus prometteuses pour la production de CAD consiste à utiliser des résidus agricoles, qui sont des matériaux de biomasse non alimentaire issus des activités agricoles. Ces résidus incluent des éléments tels que les tiges de maïs, la paille de blé, les balles de riz et d'autres biomasses lignocellulosiques ([Chiamonti, 2019](#); [Ahmad et al., 2021](#)).

En effet, pour accélérer les réductions d'émissions dans les secteurs couverts par le système communautaire d'échange de quotas d'émission (*EU ETS*<sup>3</sup>), la commission européenne a mis en place le « *Fit for 55 package*<sup>4</sup> » et la réglementation *ReFuelEU Aviation* n'est qu'un élément de cet ensemble. Cette dernière est accompagnée par différentes autres mesures et directives qui concerne l'aviation parmi lesquelles nous pou-

---

2. *ReFuelEU Aviation initiative* : oblige les fournisseurs de carburant à distribuer des CAD lorsqu'ils dans les aéroports de l'UE, afin de favoriser l'adoption des CAD par les compagnies aériennes et de contribuer à la réduction des émissions dues à l'aviation.

3. *EU ETS* est le moteur du marché du carbone européen, c'est en principe un instrument basé sur le marché qui doit permettre une politique environnementale rentable et ciblée.

4. *Fit for 55 package* : conçu pour réaliser la neutralité climatique d'ici 2050 et la réduction de 55 % des émissions nettes de GES d'ici 2030, par rapport aux niveaux de 1990.

vons mentionner la *Directive de la taxation énergétique*<sup>5</sup>, la *Directive des énergies renouvelables*<sup>6</sup> mais également l'*ETS as regards aviation* et la *Notification on CORSIA*<sup>7</sup>, le régime de compensation et de réduction du carbone pour l'aviation internationale, pour les vols desservant l'extérieur de l'Espace économique européen, qui s'applique à partir de l'année 2021 dans les états membres. Nous pouvons également citer la stratégie européenne pour le ciel unique (*Single European Sky strategy*)<sup>8</sup> qui vise à réduire de 10 % l'impact environnemental de l'aviation à l'horizon 2035.

Succinctement, l'ensemble de ces mesures vise à décarboner l'aviation civile en remplaçant les carburants d'aviation d'origine fossile par des carburants d'aviation durables. Cependant, le développement de CAD fait face à deux principales contraintes à l'heure actuelle. D'une part, l'augmentation de la consommation de CAD dans l'aviation civile a un effet direct sur le transport aérien en ce qu'elle doit contribuer à la réduction des émissions de GES dans le secteur<sup>9</sup>, mais la contrepartie est que le coût de production de CAD est plus élevé que celui de carburants d'aviation traditionnels (CAT). D'autre part, même si la législation européenne tente d'atténuer et de limiter les mécanismes de transmissions des effets de production de CAD sur le marché agricole, il peut encore y avoir des impacts indirects de l'utilisation de la biomasse lignocellulosique (résidus agricoles et forestiers non comestibles, cultures dédiées) sur la production agricole et l'utilisation des sols. Ainsi, le développement de la production de CAD peut avoir des effets sur le marché agricole en augmentant la demande de résidus agricoles provoquant par la même occasion une pression croissante sur l'utilisation des sols (Bauen et al., 2020; Fiorini et al., 2023).

Après notre analyse théorique sur la production de de biocarburants à grande échelle dans notre premier essai, nous avons pu identifier que le développement de biocarburants pouvait avoir ces deux effets : réduction de l'utilisation des sols à des fins agricoles au profit de la production de biocarburants et augmentation

---

5. Energy Taxation Directive : Dans le cadre de la nouvelle directive, le kérosène utilisé dans l'industrie aéronautique pour propulser les avions effectuant des vols intracommunautaires sera taxé à hauteur de 10,75 €/GJ au minimum dans l'ensemble de l'UE, comme l'essence utilisée dans les transports routiers. Afin d'encourager l'utilisation d'énergies plus propres dans les secteurs aérien et maritime, les carburants durables et alternatifs bénéficieront d'un taux d'imposition minimum nul pendant une période transitoire de 10 ans lorsqu'ils sont utilisés pour la navigation aérienne et maritime.

6. *Renewable Energy Directive* : constitue le cadre juridique pour le développement des énergies propres et fixe un objectif contraignant d'au moins 32 % d'énergies renouvelables pour l'UE à l'horizon 2030. (*Parlement Européen, 2013*)

7. Notification on Carbon offset and reduction scheme for international aviation (CORSIA) : modifie les règles applicables à l'aviation dans le cadre de EU ETS afin que les États membres notifient aux compagnies aériennes basées dans l'UE leurs obligations de compensation pour l'année 2021 au titre de la convention CORSIA.

8. Single European Sky strategy : vise à réduire l'impact du trafic aérien, en pleine croissance, sur l'environnement.

9. La Commission européenne a estimé le potentiel de réduction des émissions des CAD à 60-85% par rapport à l'utilisation du CAT d'origine fossile.

des prix des biens agricoles sur le marché. Par cet arbitrage sur l'utilisation des sols entre la production de biocarburants et de biens agricoles, nous avons retrouvé un résultat classique de la transition énergétique à partir des biomasses de première génération qui a été mis en évidence par différentes études (Hochman et al., 2014; Zilberman et al., 2013; Filip et al., 2019; Mueller et al., 2011). Dans ce nouvel essai, compte tenu des contraintes imposées par l'initiative ReFuelEU Aviation, nous pouvons proposer une analyse dans un cadre où il n'y a plus d'arbitrage entre la production de biens agricoles et de biocarburants pour l'utilisation des sols, par la production de CAD à partir des résidus agricoles.

Cependant les politiques comme l'initiative ReFuelEU Aviation peuvent aboutir à des situations ayant des effets contre-productifs, comme la déforestation et des changements dans l'utilisation des sols (Searchinger et al., 2008a), une perte de biodiversité et des dommages aux écosystèmes (Falcão, 2021) ainsi que des émissions sur l'ensemble du cycle de vie encore plus élevées que celles des combustibles fossiles conventionnels (Fleming et al., 2022; Mandegari et al., 2023), qui vont à l'encontre des objectifs fixés. En ce sens, il est important de déterminer la part de carburant d'aviation durable optimal qu'il faut fixer en vue d'atteindre un certain niveau de réduction des émissions de GES du secteur en tenant compte des contraintes de production et des possibles dérives. De manière concrète, nous pouvons nous questionner sur l'intérêt de valoriser les résidus agricoles en carburant d'aviation durable et à quels niveaux fixer les limites (concurrence d'usages des résidus, disponibilité des matières et capacités de production) et les contrôles (respect des critères et des normes européennes, audits de durabilité effective). Autrement dit, à quel niveau faut-il fixer la part de carburant d'aviation durable pour maximiser le bien-être global dans le secteur, compte tenu des effets indirects sur l'environnement et/ou la production agricole et les objectifs de réduction des émissions de  $CO_2$  ?

Pour répondre à ces questions, nous développons notre analyse présentée dans cet essai en trois parties. Premièrement, nous analysons ce que représente le secteur de l'aviation civile à travers les tendances d'évolution de demande de passagers, de demande de carburant d'aviation pour compléter les trajets ainsi que son potentiel de réduction des les émissions générés par l'aviation civile, sans oublier les intrants utilisés dans le processus de production de CAD. Ensuite, nous décrivons la proposition de l'initiative ReFuelEU Aviation, ses cadres et technologies de production envisagés et retenus. Finalement, nous développons un cadre théorique permettant d'examiner les impacts de la proposition et les limites auxquelles elle peut faire face dans son application en France et dans l'Union européenne avant de dériver et simuler les résultats du modèle.

Ainsi, compte tenu de la politique de promotion du développement de Carburant d'aviation durable (CAD) dans l'union européenne, où la promotion du développement de CAD se fait dans un cadre spécialement strict compte tenu des contraintes particulières sur les intrants pouvant être utilisés dans le processus de production de CAD, nous nous intéressons aux effets de la mise à disposition de CAD dans les aéroports européens sur la réduction effective des émissions de GES, sachant que le carburant d'aviation représente une part importante des coûts des compagnies aériennes, c'est-à-dire jusqu'à 25 % des coûts d'exploitation (Grimme, 2023). Plus spécifiquement, en considérant le développement de la production CAD, nous construisons un modèle d'équilibre partiel permettant de rendre compte des effets de l'implémentation du quota  $\theta$  de CAD sur la production de carburant d'aviation (CAD et CAT), la production agricole, l'utilisation des sols et la réduction des émissions de GES.

L'un des principaux résultats de notre analyse montre que l'initiative ReFuelEU Aviation, avec son quota de carburants d'aviation durable (CAD), contribue effectivement à réduire les émissions de GES. Cependant, il est important de ne pas progresser trop vite, car cela pourrait entraîner des effets négatifs. Par exemple, les résidus agricoles utilisés dans la production d'énergie (bio-méthane) ou en tant qu'engrais naturel, tout comme la production alimentaire, pourraient être détournés vers la production de CAD, créant ainsi des déséquilibres économiques et environnementaux.

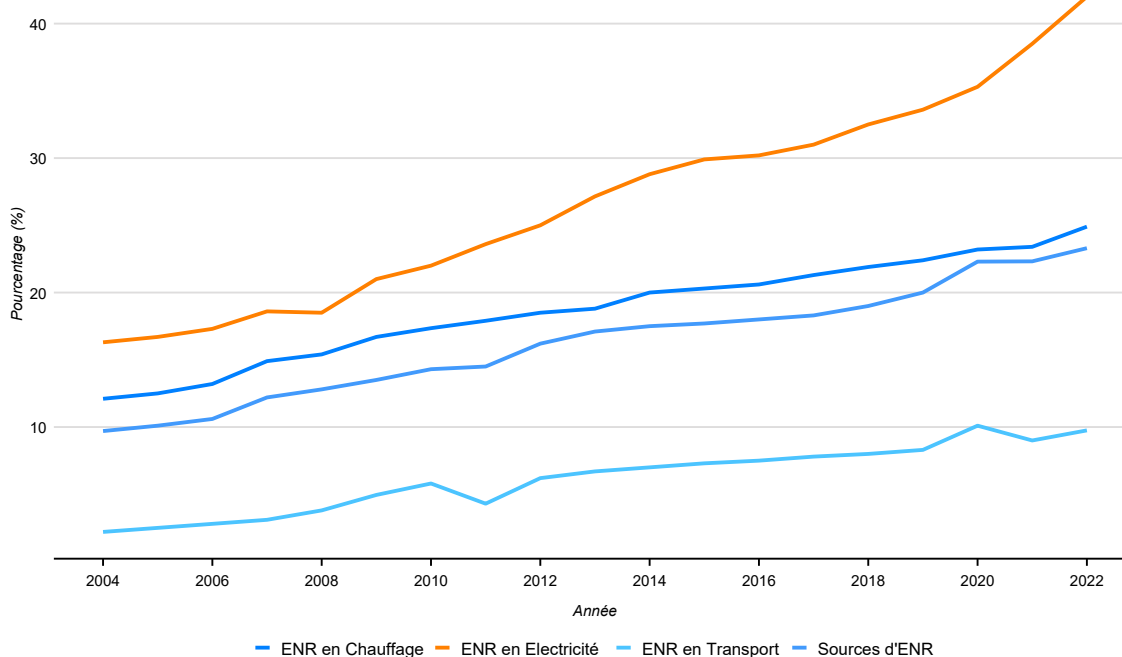
Le reste de ce chapitre est divisé en quatre sections. La première section décrit les tendances autour de différentes composantes ayant des liens à l'aviation civile (passagers, carburants, émissions, etc). La seconde section présente une brève revue de la littérature sur les impacts économiques et environnementaux de CAD, les politiques de quotas ainsi que la méthodologie de coproduction. La troisième section décrit et met en place les caractéristiques du modèle que nous développons et la quatrième section présente les résultats qui sont dérivés du modèle selon trois hypothèses différentes avant de comparer avec un prolongement possible du modèle. Pour conclure l'article, nous recommandons quelques mesures à adopter pour appliquer limiter les effets indésirables qui peuvent résulter de l'initiative ReFuelEU Aviation.

### 3.2 MARCHÉ DE CARBURANT D'AVIATION ET ÉMISSIONS DE GES DU SECTEUR

Après avoir enregistré de larges pertes en entre 2020 et 2021, l'aviation civile reprend le chemin de la croissance continue depuis l'année de 2022 et les projections sont de bonnes augures puisque le secteur devra retrouver son niveau d'avant pandémie d'ici l'année 2025 selon les prévisions de l'Association du transport aérien international (IATA, 2023a). Ainsi, suivant la croissance du secteur, la demande de carburants d'aviation devra augmenter également dans les années à venir.

#### 3.2.1 DEMANDE DE CARBURANT D'AVIATION

Les transports continuent de dépendre des produits pétroliers pour près de 91 % de leur énergie finale, soit une baisse de seulement 3,5 points de pourcentage par rapport au début des années 1970 (IEA, 2023d). La part des biocarburants consommés par les transports est passée de moins d'un demi pour cent dans le monde en 1990 à environ 3,5 % en 2022, grâce à des décennies de soutien politique, mais les implications pour les émissions de GES du puits à la roue varient considérablement, en fonction des matières premières et des technologies de conversion<sup>10</sup>.

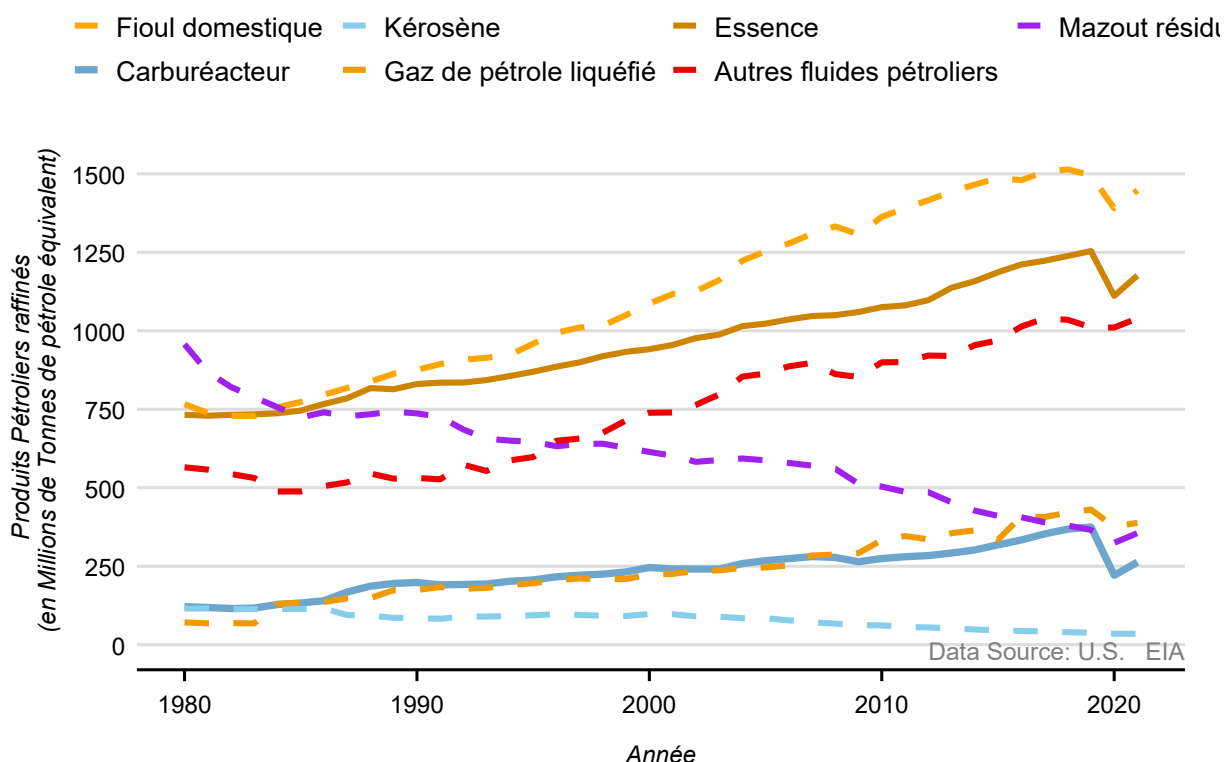


Source: EuroStat (2023)

**FIGURE 3.1 :** Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie par secteur dans l'UE

10. IEA (2023), Aviation and shipping, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/aviation-and-shipping>, License : CC BY 4.0

En dépit de ces efforts, dans le graphique 3.1, nous pouvons remarquer que le secteur des transports restent celui où la proportion d'énergies renouvelables est la plus faible dans l'Union européenne, constamment en dessous de la moyennes des ressources énergétiques renouvelables de la zone. Par ailleurs, en ce qui concerne l'aviation, la part d'énergie renouvelable est encore plus faible, les CAD représentent moins de 0.1% de la consommation totale de carburéacteur entre 2019 et 2022 (IATA, WEF, ICAO), et cette part était plus faible avant l'année 2019.



**FIGURE 3.2 :** *Évolution mondiale de la consommation de produits pétroliers raffinés par type*  
 Note : Graphique réalisé par l'auteur sur R (version 4.4.1) à partir des données disponibles sur U.S. EIA

Le graphique 3.2 nous donne une idée du poids de la consommation de carburéacteur par rapport aux autres produits pétroliers raffinés. En effet, la consommation totale de carburéacteur est croissante sur la période allant de 1980 à 2022, passant de 121 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 1980 à 246 Mtep en 2000, puis de 275 en 2019 à 263 Mtep en 2021 (enregistrant au passage une baisse de 41.08% en 2020 à cause de la pandémie). Cependant elle ne représente que 7.5% de la consommation mondiale de produits pétroliers raffinés, soit 3 fois moins que la consommation d'essence représentant 25.23%.

En 2022, nous constatons que la production de CAD a été multipliée par cinq au cours des trois dernières années, ce qui témoigne d'une forte demande (IATA, 2023a) que ce soit part l'imposition de quota de CAD

(en France, Norvège et Suède) ou par des incitations (sur la côte ouest américaine et au Pays-bas). Néanmoins, la part de carburants d'aviation durables reste très faible, loin derrière le biodiesel, le biogazoline ou le biogas, son incorporation (à 1%) au CAT n'a réellement commencé qu'en 2022 en France par exemple. La part de CAD dans la consommation globale de carburant d'aviation reste cantonné à 0.1% environ en cette même année en dépit de l'augmentation de la demande.

### 3.2.2 PERFORMANCE OPÉRATIONNELLE, PRIX ET DURABILITÉ PAR RAPPORT AU KÉROSÈNE (JET-A)

Dans le contexte de l'utilisation de carburants pour un vol de 1000 km, la comparaison entre le carburant Jet-A pur et les mélanges de Jet-A avec du CAD implique plusieurs considérations clés, notamment l'efficacité, l'efficacité et la durabilité. L'efficacité, qui se réfère à la quantité d'énergie produite par unité de carburant consommé, montre que le CAD a une densité énergétique légèrement inférieure à celle du Jet-A pur. Cela entraîne une petite augmentation de la consommation de carburant, généralement comprise entre 1 et 3 %, lorsque le CAD est mélangé, selon la proportion de CAD utilisée ([Association, 2022](#)). En termes d'efficacité, qui fait référence à la capacité du carburant à répondre aux exigences de performance opérationnelle, les mélanges de CAD offrent généralement une performance similaire à celle du Jet-A pur, sans impact significatif sur le fonctionnement de l'avion ([Ng et al., 2021](#) ; [Cabrera and de Sousa, 2022b](#)).

Cependant, la durabilité représente un avantage considérable pour le CAD. Produit à partir de matières premières renouvelables telles que les huiles usagées, les résidus agricoles et les algues, le CAD offre un impact carbone beaucoup plus faible tout au long de son cycle de vie par rapport au Jet-A. En effet, le CAD peut réduire les émissions de carbone tout au long de son cycle de vie de jusqu'à 80% ou même être considéré comme neutre en carbone ([Association, 2023](#)). Ainsi, bien que le mélange de CAD et de Jet-A puisse légèrement réduire l'efficacité du carburant, il offre des avantages environnementaux considérables et constitue une option plus durable pour réduire l'empreinte carbone de l'aviation, malgré son coût de production plus élevé ([Cabrera and de Sousa, 2022b](#)).

En effet, le CAD est généralement plus coûteux en raison de ses méthodes de production plus complexes et des matières premières renouvelables utilisées. En 2022, le prix du CAD était environ deux fois plus élevé que celui du Jet-A, avec un coût moyen de 7,20 € par gallon contre environ 3,90 € pour le Jet-A en Europe

(Association, 2022). Bien que les coûts de production de CAD soient plus élevés, l'augmentation de la production et les investissements dans les technologies de fabrication devraient permettre de réduire cet écart dans les années à venir (Huq et al., 2021 ; Caceres-Martinez et al., 2024 ; Association, 2022).

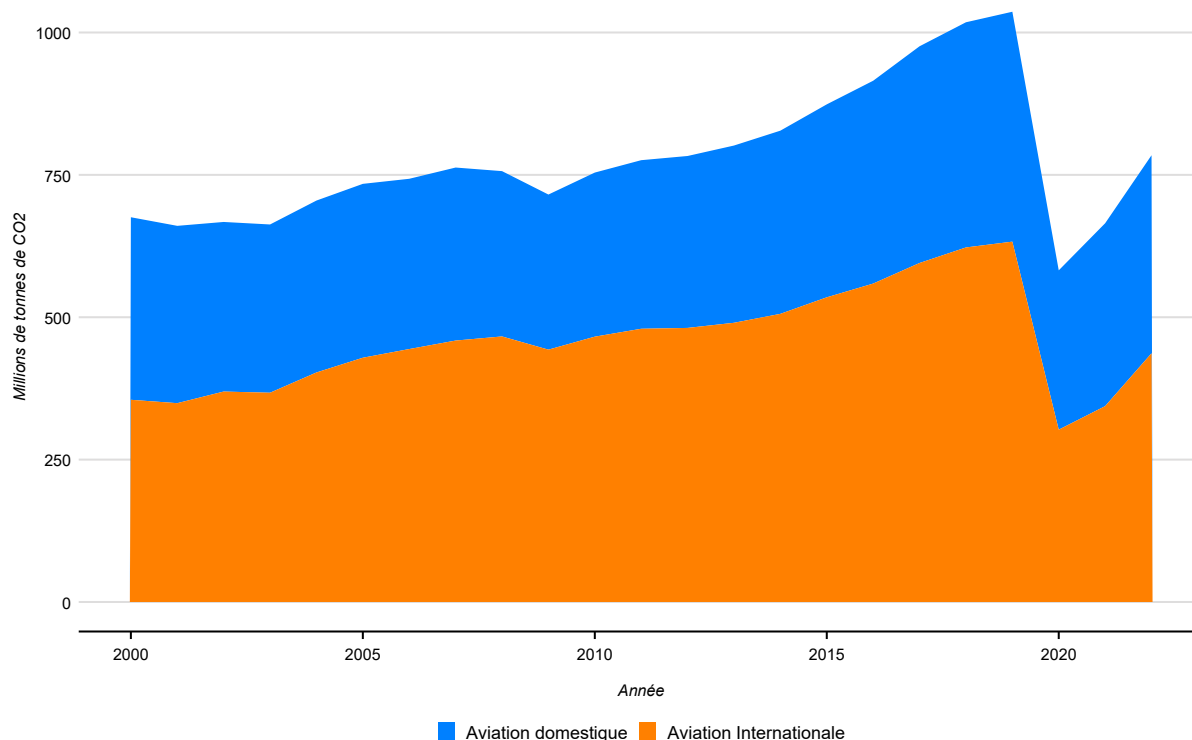
### 3.2.3 EMISSIONS DE GES DE L'AVIATION CIVILE

#### DANS LE MONDE

Le carburant d'aviation traditionnel (CAT) est principalement composé de kérosène, produit pétrolier qui émet des gaz à effet de serre (GES) lorsqu'il est brûlé, est la principale source d'émissions de GES dans l'aviation civile. Les émissions de GES provenant de l'aviation civile sont un contributeur significatif au changement climatique. Les émissions de GES provenant de l'aviation sont constitués non seulement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) mais également d'autres polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), qui contribuent à la formation de l'ozone troposphérique et au réchauffement climatique. De plus, les avions émettent des traînées de condensation qui peuvent piéger la chaleur dans l'atmosphère.

Selon l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI, 2020), pour l'année 2019 le transport aérien a émis environ 915 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, ce qui représente environ 2% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> provenant de l'activité humaine. En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES) totales, y compris les autres polluants, l'aviation civile a émis environ 1,5 milliard de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent en 2019, soit environ 2,8% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> équivalent. Par ailleurs, en ce qui concerne le transport, les émissions de GES provenant de l'aviation représentent environ 12% des émissions totales du secteur des transports en 2019, selon les données de l'IEA (IEA, 2022a).

Par ailleurs, les émissions de l'aviation ont augmenté en 2022 pour atteindre près de 80 % de leur pic pré-pandémique de 2019. Après avoir augmenté en moyenne de 2,3 % par an entre 1990 et 2019, les émissions directes de CO<sub>2</sub> dues à la combustion de combustibles fossiles ont chuté de plus de 1 000 Mt CO<sub>2</sub> en 2019 à moins de 600 Mt CO<sub>2</sub> en 2020 dans le contexte de la pandémie de Covid-19. Avec la reprise de la demande des passagers aériens en 2022, les émissions ont augmenté dans presque toutes les régions, à l'exception de la Chine et de la Russie, pour atteindre près de 800 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Les émissions de CO<sub>2</sub> devraient augmenter rapidement et dépasser leur niveau de 2019 vers 2025 (IAE, NZE scénario 2000-2030).



Source: IEA (2023)

**FIGURE 3.3 :** Émissions de CO<sub>2</sub> dans l'aviation dans le scénario net zéro, 2000-2030

Pour mettre les données en perspective, si l'aviation mondiale était un pays, elle se classerait parmi les dix premiers émetteurs, et un seul passager effectuant un aller-retour Lisbonne-New York génère à peu près le même niveau d'émissions qu'un habitant moyen de l'union européenne en chauffant sa maison pendant toute une année (European Commission, 2021).

Pour réduire les émissions de GES de l'aviation civile, plusieurs initiatives ont été mises en place, notamment la promotion de carburants alternatifs tels que les biocarburants d'aviation, appelés également carburant d'aviation durable (CAD) qui peuvent réduire les émissions de GES jusqu'à 80% par rapport au CAT. De plus, des mesures telles que la gestion du trafic aérien, l'amélioration de l'efficacité des avions et la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> ont également été proposées pour réduire l'impact environnemental de l'aviation civile.

#### EN EUROPE ET EN FRANCE

Selon les données de l'Agence européenne pour l'environnement (EEA, 2021) pour l'année 2019, l'aviation civile a émis environ 159 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'Union européenne (UE),

soit environ 3,7% des émissions totales de CO<sub>2</sub> dans l'UE pour cette année-là. Et comme le note la commission européenne, le secteur de l'aviation est à l'origine de 13,9 % des émissions du secteur des transports, ce qui en fait la deuxième source d'émissions de GES du secteur des transports après le transport routier ([European Commission, 2021](#)).

En 2021, les émissions de CO<sub>2</sub> pour le transport aérien en France se sont élevées à 12,4 Mt (millions de tonnes), dont 8,8 Mt (70,8%) pour le transport aérien international et 3,6 Mt (29,2%) pour le transport intérieur (y compris Outre-mer), dont une proportion importante liée à la desserte Métropole/Outre-mer (2,2 Mt). De plus, avec 5,0 Mt en 2019 d'après l'inventaire national des émissions<sup>11</sup>, le trafic aérien intérieur (y compris Outre-Mer et non-commercial) représentait 3,8% des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports et 1,5 % des émissions totales de la France; après réintégration des routes internationales (aériennes et maritimes) dans les bilans, le secteur aérien était à l'origine de 6,8% des émissions de CO<sub>2</sub> de la France en 2019.

En vue de la réduction des émissions des GES, la France avait opter pour un mandat d'incorporation de carburants à faible intensité carbone dans le secteur du transport routier à partir de l'année 2019 avec la taxe incitative relative à l'incorporation de biocarburants (TIRIB), et à partir de l'année 2022 cet instrument s'est élargi pour intégrer l'aviation civile et est dénommé la TIRUERT<sup>12</sup> à partir de cette année là. Dans la logique de la TIRUERT, la Commission européenne a étendu ce type de mandat d'incorporation de carburants durable à l'ensemble des pays de l'UE avec l'initiative ReFuelEU Aviation, qui vise à augmenter la demande de carburants d'aviation dans l'espace européen et à réduire les émissions de GES de l'aviation civile. Cette initiative est accompagnée d'autres directives visant à diminuer les émissions de l'aviation dans l'UE, comme le système communautaire d'échange de quotas d'émission (EU ETS). Notre analyse se concentre uniquement sur l'initiative ReFuelEU Aviation.

---

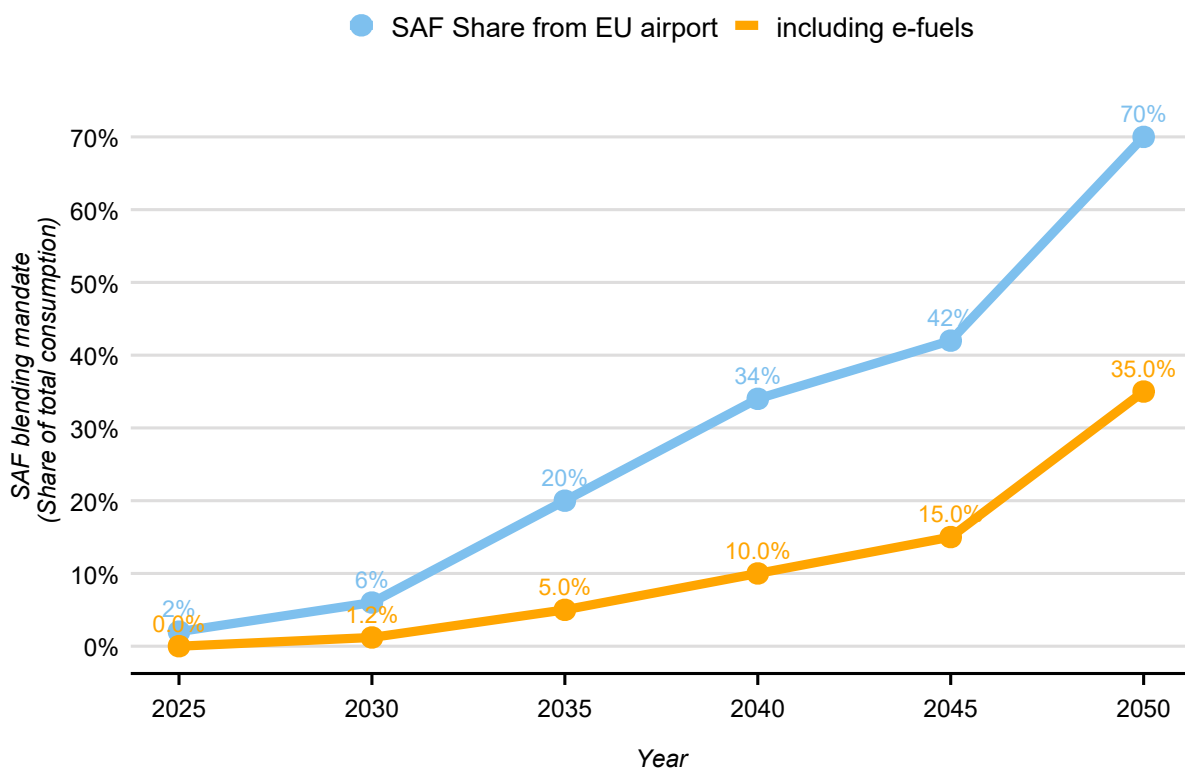
11. Selon les chiffres de Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA)

12. Taxe incitative relative à l'utilisation d'énergie renouvelable dans les transports, où une sanction de 125 € par hectolitre est infligée aux aéronefs qui ne satisferont pas le minimum d'incorporation de 1% de CAD.

### 3.3 CADRE RÉGLEMENTAIRE DE L'INITIATIVE REFUELEU AVIATION

#### 3.3.1 VUE D'ENSEMBLE

Publiée par la Commission européenne en 2021, la proposition ReFuelEU Aviation a été mise en œuvre pour instaurer le mandat d'incorporation de CAD dans le cadre du paquet « Fit for 55 » du pacte vert européen. Cette mesure européenne permettra d'harmoniser l'incorporation de CAD dans toute la zone, puisque certains gouvernements européens avaient déjà commencer à imposer cette mesure au niveau national. C'est le cas de la France par exemple, où la Taxe incitative relative à l'utilisation d'énergie renouvelable dans le transport (*TIRUERT*) avait déjà fixé le quota de CAD à 1% de la demande totale en 2022. Succinctement, la proposition de la Commission européenne stipule qu'une part croissante de CAD, passant initialement de 2 % en 2025 jusqu'à 70 % en 2050, doit être utilisée par tous les exploitants d'aéronefs décollant d'un aéroport de l'espace de l'union européenne et transportant plus d'un million de passagers ou 100 000 tonnes de fret.



**FIGURE 3.4 :** *Mandat d'incorporation minimale de CAD par année dans la zone UE*

Note : Graphique réalisé par l'auteur sur R (version 4.4.1) à partir de ReFuelEU Aviation objective

Par ailleurs, afin de promouvoir la production et l'utilisation de carburants de la filière "e-carburant", qui sont actuellement moins avancés sur le plan technologique que les filières de production de carburants à

partir de la biomasse, un sous-quota est prévu pour passer progressivement de 0,7 % de la consommation totale de carburants d'aviation en 2030 à 28 % en 2050 (Figure 3.4).

*Les députés ont également réussi à convaincre les Etats membres de l'UE d'affecter toutes les recettes provenant des amendes de non-conformité imposées aux compagnies aériennes, aux aéroports ou aux fournisseurs de carburant, à la recherche et à l'innovation afin de combler la différence de prix entre les carburants durables et les carburants conventionnels.*

Selon les contraintes de l'initiative ReFuelEU Aviation, les CADs autorisés sont seulement ceux produits selon un processus de conversion certifié et à partir des ressources ou intrants précisés dans l'annexe IX de la Directive des énergies renouvelables (RED II). Comme le montre le tableau 3.1, sept filières de conversion ainsi que deux filières de co-transformation sont actuellement certifiées, en attendant que d'autres filières de production viennent compléter la liste. En attendant, toutes les filières produisant des biocarburants à partir d'intrants qui sont en concurrence avec la nourriture (les cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale, les résidus assimilés, le palme ou le soja) sont actuellement interdites.

Production pathway	Feedstocks <sup>30</sup>	Certification name (blending limit)	TRL
Biomass Gasification + Fischer-Tropsch (Gas+FT)	Energy crops, lignocellulosic biomass, solid waste	FT-SPK <sup>31</sup> (up to 50%)	7-8
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)	Vegetable and animal fat	HEFA-SPK (up to 50%)	8-9
Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)	Conventional sugars, lignocellulosic sugars	HFS-SIP <sup>32</sup> (up to 10%)	7-8 or 5 <sup>33</sup>
Biomass Gasification + FT with Aromatics	Energy crops, lignocellulosic biomass, solid waste	FT-SPK/A <sup>34</sup> (up to 50%)	6-7
Alcohols to Jet (AtJ)	Sugar, starch crops, lignocellulosic biomass	ATJ-SPK (up to 50%)	7-8
Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ)	Vegetable and animal fat	CHJ or CH-SK <sup>35</sup> (up to 50%)	6
HEFA from algae	Microalgae oils	HC-HEFA-SPK <sup>36</sup> (up to 10%)	5
FOG Co-processing	Fats, oils, and greases	FOG (up to 5 %)	-
FT Co-processing	Fischer-Tropsch (FT) biocrude	FT (up to 5 %)	-

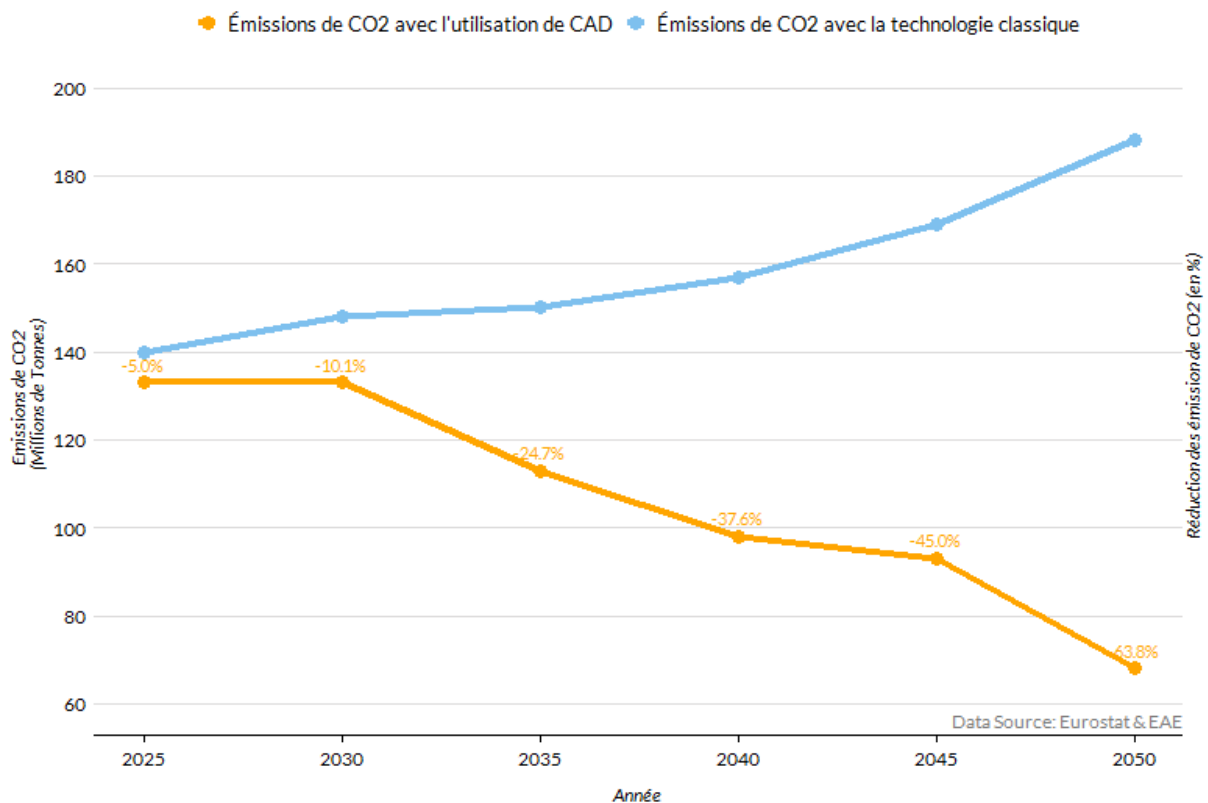
**Tableau 3.1** – Filières de production de CAD certifiées

### 3.3.2 EFFETS ATTENDUS DE L'INITIATIVE REFUELEU AVIATION

Comme nous l'avons mentionné à la section précédente (section 3.2.3), l'initiative ReFuelEU Aviation a deux principaux objectifs : réduction des émissions de GES et augmentation de la demande de CAD dans l'aviation civile dans l'espace européen. Nous allons utiliser les des données historiques et des projections dans le cadre de la neutralité carbone à l'horizon de 2050 de différentes institutions<sup>13</sup> pour analyser rapidement les potentiels effets de l'initiative sur les émissions de GES et la demande de CAD.

#### RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE L'AVIATION DANS L'UE

L'initiative ReFuelEU Aviation a également un objectif de réduction des émissions générées par l'aviation à l'échelle européenne. Comme le montre la figure 3.5, l'utilisation de CAD permettra de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'aviation civile de plus de 10% dès 2030 et de près de 64% d'ici à 2050<sup>14</sup> (EEA, 2023).



**FIGURE 3.5 :** Potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le cadre de l'initiative ReFuelEU

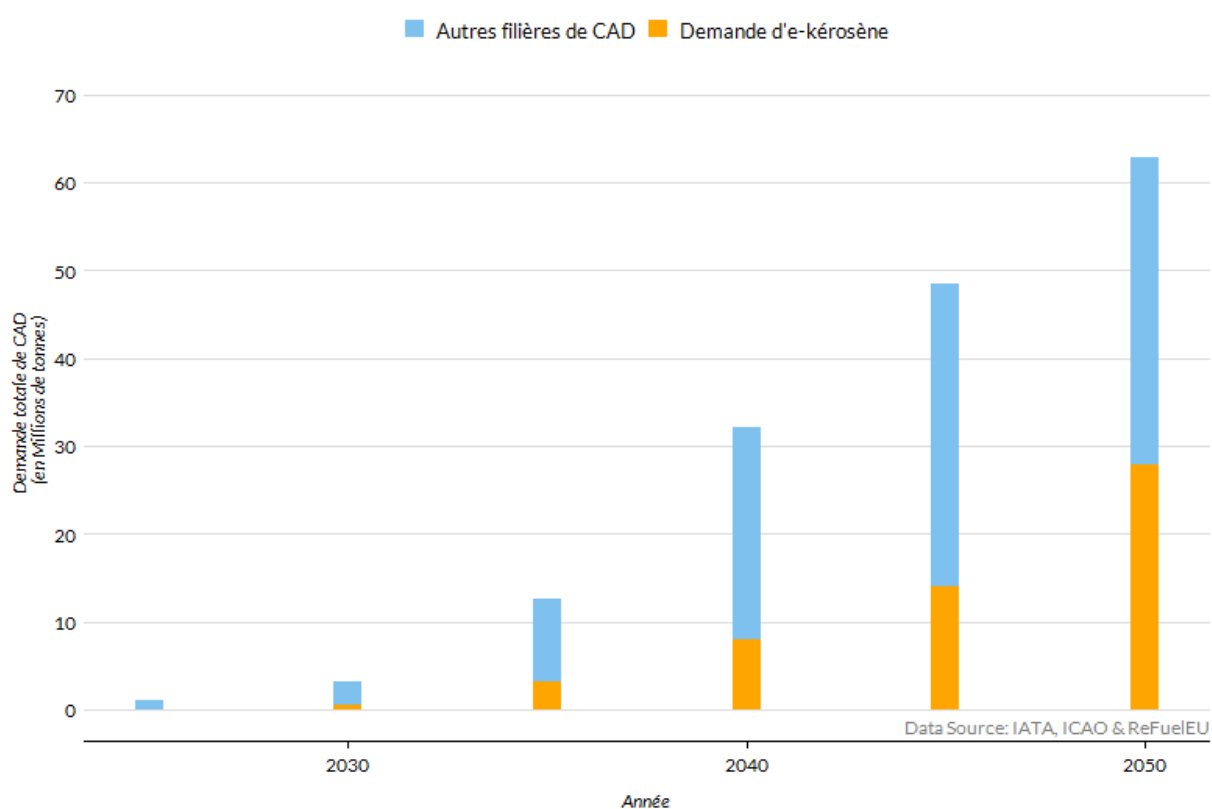
Note : Graphique réalisé par l'auteur sur R (version 4.4.1) à partir des données disponibles sur EuroStat & EAE

13. Les institutions sont l'Agence européenne de l'environnement, l'Agence internationale de l'énergie, l'Association du transport aérien international et l'Organisation de l'aviation civile internationale.

14. Cette analyse se base sur le pourcentage de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des différentes filières de production de CAD, combiné à la modélisation de la production future de SAF et de son utilisation obligatoire.

## AUGMENTATION DE LA DEMANDE DE CAD DANS L'UE

Dans le but d'estimer le niveau de la demande de CAD qu'il faudra pour combler l'obligation d'incorporation de l'UE à chaque période, nous avons utilisé la projection de la demande mondiale de carburéacteur de provenant de IATA (2023a). Nous avons couplé ces données avec ceux de l'Organisation de l'aviation civile internationale (ICAO, 2019, 2020, 2021) pour estimer le niveau de la demande européenne de carburéacteur à chaque période et à partir de cette demande, nous avons appliqué le quota de CAD pour déterminer le niveau de la demande européenne de CAD.



**FIGURE 3.6 :** Demande de CAD pour satisfaire l'initiative ReFuelEU Aviation par année

Note : Graphique réalisé par l'auteur sur R (version 4.4.1) à partir des données disponibles sur IATA, ICAO & ReFuelEU Aviation

Comme le montre le graphique 3.6, la demande au niveau de l'UE passera de 3.2 Mt de CAD en 2030 à près de 63 Mt en 2050, avec la quantité d'e-kérosène qui passe de 0.45 Mt en 2030 à près de 28 Mt en 2050.

## IMPLICATION ÉCONOMIQUE DE L'INITIATIVE

En dehors de son impact sur la demande de carburant et sur les émissions de Co<sub>2</sub>, l'initiative ReFuelEU Aviation peut avoir des impacts économiques sur le système de management des intrants utilisés, sur le coût

et le prix des intrants et des carburants d'aviation et donc également sur la compétitivité dans les différents secteurs connexes.

En effet, le fait que l'initiative ReFuelEU ne contient pas de dispositions visant à combler l'écart de coût entre les carburants fossiles et les CAD est une préoccupation majeure des compagnies aériennes qui craignent que l'écart de coût n'affecte gravement leur compétitivité. De plus, le quota d'incorporation pose également des défis technologiques à la montée en puissance de la production de CAD, par les contraintes sur les intrants et par le fait que le quota doit être réalisé dans chaque aéroport européen correspondant au critère défini<sup>15</sup> dans le règlement.

### 3.4 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section passe en revue la littérature sur les impacts économiques et environnementaux des carburants d'aviation durables (CAD) (Ng et al., 2021; Timmons and Terwel, 2022) ainsi que les politiques visant à promouvoir leur développement (Kang et al., 2018; ECA, 2023; IEA, 2023d) et à réduire les émissions (Prussi et al., 2021; Chiaramonti et al., 2021; Chao et al., 2019) dans le secteur de l'aviation. La transition vers les CAD est essentielle pour atteindre les objectifs climatiques dans le secteur aérien, nécessitant l'adoption de solutions et de technologies de production innovantes. Cela exigera l'utilisation de résidus agricoles et forestiers (Yang et al., 2019; Zhang et al., 2013) et/ou de déchets industriels ou domestiques et d'huiles usagées (Zhang et al., 2020) comme intrants dans le processus de production de CAD (Afonso et al., 2023; Escalante et al., 2022). Cependant, l'intégration des résidus agricoles dans la production de carburant soulève des questions cruciales concernant l'utilisation des terres et la sécurité alimentaire, en particulier dans les régions où la pénurie alimentaire est une préoccupation majeure (Scarlat et al., 2019).

Une partie considérable de la littérature se concentre sur les défis techniques liés à l'introduction des CAD dans le système de distribution de carburant (Norberg, 2014; Serra et al., 2019; Stolarski et al., 2020). Par exemple, Mayeres et al. (2023) évaluent les coûts des politiques destinées à promouvoir l'adoption des CAD dans l'UE, soulignant que l'atteinte d'une part minimale de carburant d'aviation durable pourrait être significativement plus coûteuse que des systèmes de commerce de carbone plus simples, ce qui met en évidence

---

15. Aéroport de l'union européenne transportant plus d'un million de passagers ou 100 000 tonnes de fret.

les implications économiques de telles politiques. La production de CAD sera de plus en plus encouragée par l'imposition de certains niveaux de demande. Pour obtenir les effets de réduction des émissions souhaités dans le secteur de l'aviation, des mandats obligatoires de mélange de CAD doivent être introduits à grande échelle (Chiaramonti, 2019; Chiaramonti et al., 2021). Jiang and Yang (2021) trouvent que si l'objectif de la politique est de contrôler les émissions de l'aviation en dessous d'un certain niveau, plus l'objectif de réduction des émissions est ambitieux, plus il est probable que les mandats de mélange de CAD surpassent une taxe sur le carbone dans le contrôle des émissions, particulièrement lorsque le prix du carburant conventionnel est plus bas que prévu.

La littérature met également en lumière les compromis potentiels entre la production de biocarburants et la sécurité alimentaire (Tomei and Helliwell, 2016; Taheripour et al., 2017, 2022). Comme l'indique Davis et al. (2015), la conversion des terres agricoles en matières premières pour les biocarburants peut avoir des effets négatifs sur les chaînes d'approvisionnement alimentaires, exacerbant la pauvreté alimentaire et affectant les populations vulnérables. Certaines recherches soulignent que les mandats promouvant les biocarburants pourraient involontairement augmenter les prix des aliments, entraînant une insécurité alimentaire, en particulier dans les pays en développement déjà confrontés à la pauvreté (Van Zanten et al., 2018; FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, 2022; Malins, 2023). Il est donc crucial de trouver un équilibre entre les objectifs d'énergie renouvelable et la sécurité alimentaire, et les décideurs doivent évaluer les compromis potentiels impliqués (Mazzone et al., 2023). Cela indique un besoin urgent de politiques qui trouvent un équilibre entre les objectifs d'énergie renouvelable et les considérations de sécurité alimentaire. La transition vers les biocarburants pourrait entraîner des changements dans les pratiques agricoles, soit en augmentant, soit en diminuant la productivité. ? soulignent qu'intégrer des pratiques agricoles durables peut aider à optimiser l'efficacité de l'utilisation des terres et la productivité, réduisant ainsi les impacts négatifs sur les systèmes alimentaires.

Notre travail aborde également la question de la co-production (Baumol, 1977; Leathers, 1992) dans le processus de production de bioénergie, qui est susceptible d'avoir des implications pour la production agricole et l'utilisation des terres (Tomei and Helliwell, 2016; Taheripour et al., 2017). Les dynamiques de la co-production sont cruciales, car elles dictent la manière dont les sorties agricoles peuvent être optimisées tout en répondant simultanément aux demandes de carburant. En intégrant une fonction de coproduction,

nous utilisons les caractéristiques proposées par Baumol (1977), reprises par Packey (2012). Ces auteurs présentent génériquement la quantité produite et effectuent des analyses sur la fonction de profit sans se concentrer sur les fonctions de production avec des intrants définis. Notre approche est étroitement alignée sur leur modélisation; toutefois, nous incluons spécifiquement des intrants pour analyser la politique des mandats de mélange de CAD à travers ses effets sur les émissions de l'aviation et ses effets indirects sur la production agricole et l'utilisation des terres.

De plus, l'introduction d'un système de comptabilisation par *réserve et réclamation*<sup>16</sup> pour les CAD pourrait faciliter leur intégration dans le système d'échange de quotas d'émission de l'UE (Pechstein et al., 2020; Skov and Schneider, 2022). En effet, comme c'est déjà le cas dans la distribution des attributs environnementaux de l'électricité durable en France<sup>17</sup>, cette méthode peut améliorer l'efficacité administrative et réduire les barrières à l'adoption des CAD, s'alignant ainsi avec les objectifs plus larges de décarbonisation du secteur de l'aviation.

Cette recherche vise à fournir une compréhension nuancée de la manière d'aborder dans les complexités de la transition énergétique sans compromettre la sécurité alimentaire, en abordant un écart significatif dans la littérature existante. En examinant les interactions entre la production de CAD, les sorties agricoles et les dynamiques d'utilisation des terres, et en évaluant les implications des instruments de politique publique, tels que les quotas de CAD, notre modèle contribuera à fournir des perspectives précieuses pour les cadres politiques qui promeuvent les CAD tout en garantissant la disponibilité alimentaire.

### 3.5 VUE D'ENSEMBLE DU MODÈLE

Dans ce modèle, le système de production principal se compose de trois secteurs spécialisés : la production de biens agricoles (aliments et résidus agricoles) par les agriculteurs, la production de carburant d'aviation par les opérateurs aériens, et les services de transport aérien par les compagnies aériennes. Ces trois secteurs sont reliés par le secteur de la production de carburant d'aviation, lequel est divisé en deux sous-secteurs : l'un

---

16. Le système de réserve et réclamation (Book-and-Claim) est un système utilisé pour suivre et revendiquer les attributs environnementaux des carburants durables. Dans le contexte du CAD, il s'agit d'un système dans lequel les compagnies aériennes ou d'autres parties prenantes peuvent comptabiliser l'achat de CAD et revendiquer les avantages environnementaux associés, même si elles ne reçoivent pas physiquement ou n'utilisent pas directement le CAD. Voir Pechstein et al. (2020) pour plus de détails sur les systèmes de certification de la chaîne de responsabilité

17. Les consommateurs achètent un mégawattheure (MWh) d'énergie renouvelable qui reçoit un certificat de garantie d'origine, ce qui leur permet d'affirmer que leur énergie est « verte », même s'ils ne l'achètent pas directement auprès de sources renouvelables.

utilise la production du secteur agricole pour produire un type de carburant d'aviation appelé biocarburant, par opposition à un autre type de carburant d'aviation, exogène, qui est d'origine fossile. Le biocarburant est désigné sous le nom de CAD, tandis que le carburant fossile est appelé kérosène. La production de carburant d'aviation est utilisée comme consommation intermédiaire dans la production des services de transport aérien.

Dans ce sens, ce sont les variations de prix sur le marché des carburants d'aviation qui modifient principalement les conditions initiales du système. Autrement dit, toute variation du prix du carburant d'aviation, à travers certains mécanismes de marché ou instruments de politique économique, implique des variations sur le marché du transport aérien et sur le marché des produits agricoles. Sur le marché du transport aérien, ces variations se traduisent par des effets sur le prix moyen d'un billet d'avion et aussi sur les émissions de gaz à effet de serre. Sur le marché agricole, les changements affectent les prix des produits agricoles (aliments et résidus) ainsi que l'utilisation des terres.

### 3.5.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU MODÈLE

Ce modèle aborde la relation complexe entre la production agricole, la production de CAD et les impacts environnementaux associés. Il met en évidence le double rôle des terres, tant pour la production alimentaire que pour la biomasse destinée au carburant, tout en prenant en compte les cadres réglementaires et les dynamiques du marché. Le modèle est structuré en plusieurs composants interconnectés qui explorent les processus de production, les influences réglementaires et leurs implications pour le bien-être économique.

#### PRODUCTION DE BIENS AGRICOLES

La coproduction fait référence à la production simultanée de plusieurs produits à partir d'un même processus de production. Dans ce modèle, les aliments, notés  $X$ , et les résidus agricoles, représentés par  $J$ , sont coproduits, au sens de [Manes and Smith \(1965\)](#), à partir d'une surface donnée de terre  $A$ . Cette coproduction est essentielle pour améliorer l'efficacité des ressources et maximiser les rendements économiques. La production de  $X$  et  $J$  repose sur la terre comme principal facteur de production, et la faisabilité économique de produire ces deux outputs est soutenue par leurs prix respectifs,  $p_X$  et  $p_J$ .

La fonction de production agricole est modélisée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{F_p}(A) \equiv bA^\sigma = F_p \\ \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} X = \alpha F_p \\ J = (1 - \alpha) F_p \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Dans cette représentation,  $b$  est une constante positive qui reflète les progrès de la technologie agricole et des pratiques agricoles, tandis que  $\sigma$  est un paramètre, compris entre 0 et 1, qui représente l'élasticité de la production agricole par rapport à la surface de terre  $A$  (dont le prix est noté  $p_A$ ). Il quantifie la réactivité de la production agricole aux variations de l'utilisation de la terre. Une valeur de  $\sigma$  entre 0 et 1 indique qu'à mesure que la surface de terre  $A$  augmente, le potentiel total de production alimentaire  $F_p$  augmente également, mais à un rythme décroissant. Cela reflète les limites agricoles réelles, telles que la qualité du sol et les pratiques de gestion, soulignant l'importance d'une utilisation durable des terres.

Dans ce système de coproduction, l'allocation des outputs  $X$  et  $J$  est déterminée par le paramètre  $\alpha$ . Plus précisément,  $X = \alpha F_p$  représente la part de la production totale dédiée à la nourriture, tandis que  $J = (1 - \alpha) F_p$  indique la part allouée aux résidus agricoles. La valeur de  $\alpha$  joue ainsi un rôle central dans l'équilibre entre la production alimentaire et la production de résidus, influençant à la fois les rendements économiques et les considérations de durabilité dans les pratiques agricoles.

## PRODUCTION DE CARBURANT D'AVIATION DURABLE ET LÉGISLATION

La production de carburant d'aviation se divise en deux catégories : le kérosène, noté  $E_f$ , et le carburant d'aviation durable (CAD), représenté par  $E_b$ . Cette distinction est cruciale en raison des environnements réglementaires variés qui influencent les sources d'inputs utilisées pour la production. En Europe, la législation ReFuelEU Aviation impose des exigences strictes concernant la production de CAD (?), visant à réduire l'impact environnemental des carburants d'aviation.

Dans ce cadre réglementaire, la production de CAD ne doit pas compromettre l'approvisionnement alimentaire, car la législation interdit l'utilisation de cultures alimentaires et fourragères comme inputs. Cette po-

litique vise à privilégier la sécurité alimentaire tout en favorisant le développement de carburants d'aviation plus propres, alignant ainsi les activités économiques avec des objectifs environnementaux plus larges. L'accent mis sur la durabilité nécessite une attention particulière aux ressources disponibles pour la production de carburants d'aviation, en particulier les résidus agricoles et forestiers ou les cultures énergétiques dédiées. Cependant, cette restriction n'est pas observée aux États-Unis, par exemple, où l'utilisation des aliments et des fourrages comme inputs n'est pas exclue.

La production totale de carburant d'aviation est modélisée comme suit :

$$E_{AV} = E_f + E_b. \quad (3.2)$$

L'équation 3.2 illustre l'interaction entre la production de kérosène et de CAD, soulignant la nécessité de concilier ces deux types de carburant pour répondre aux exigences réglementaires et aux demandes du marché. À titre de rappel, nous faisons référence aux prix du carburant d'aviation, du kérosène et du CAD sous les notations  $p_{E_{AV}}$ ,  $p_{E_f}$  et  $p_{E_b}$  respectivement.

#### PRODUCTION D'ÉNERGIE FOSSILE – KÉROSÈNE

Dans ce modèle, la production de kérosène est représentée par la variable  $E_f$ , avec son prix,  $p_{E_f}$ , traité comme exogène. Cela signifie que le prix du kérosène est déterminé par les conditions externes du marché et non par des mécanismes internes au modèle. Cette approche permet une analyse simplifiée de la production de kérosène tout en maintenant l'accent sur les implications des cadres réglementaires et des préoccupations environnementales.

Un aspect clé de ce modèle est l'hypothèse selon laquelle les émissions de gaz à effet de serre (GES) proviennent uniquement de la production de kérosène. En revanche, la production de CAD est considérée comme neutre en carbone, ce qui signifie qu'elle ne contribue pas aux émissions de GES. Cette simplification est importante pour analyser les impacts environnementaux des différentes sources de carburant et met en lumière la nécessité de passer à des alternatives plus durables dans la production de carburants d'aviation.

## PRODUCTION DE CAD

La technologie de production de CAD est représentée par cette fonction :

$$\begin{cases} g_{E_b}(J_E, X_E) \equiv b_{E_b} (J_E + X_E)^\gamma = E_b \\ \text{avec } J_E \leq J \quad \text{et } X_E \leq X \end{cases} . \quad (3.3)$$

Dans cette fonction,  $J_E$  et  $X_E$  désignent respectivement les quantités de résidus agricoles et de nourriture utilisées dans la production de CAD. Il est important de noter que  $J_E \leq J$  et  $X_E \leq X$ , ce qui indique que les quantités d'inputs utilisées pour la production de CAD ne peuvent pas dépasser leurs sorties maximales respectives issues du processus de production agricole.

Le paramètre  $\gamma$ , qui varie entre 0 et 1, mesure la réactivité de la production de CAD aux variations des inputs combinés de résidus agricoles et de nourriture. Une valeur plus élevée de  $\gamma$  suggère que la production de CAD est très sensible aux changements dans les quantités d'inputs, soulignant l'importance de l'allocation des ressources pour atteindre un rendement optimal de CAD. Cette relation met en évidence la nécessité de bien gérer les sources d'inputs, particulièrement dans le contexte des cadres réglementaires visant à promouvoir une production de carburant durable.

## INSTRUMENT DE POLITIQUE PUBLIQUE

Pour faciliter la transition vers le carburant d'aviation durable (CAD), la législation ReFuelEU Aviation impose des mandats de mélange de CAD, que nous appelons quota de CAD et notons  $\theta$  (avec  $0 < \theta < 1$ ). Le quota de mélange de CAD ou  $\theta$  spécifie la proportion de CAD requise dans la production totale de carburant d'aviation. Cette mesure réglementaire vise à garantir qu'une certaine quantité de CAD soit intégrée au mix énergétique, favorisant ainsi les alternatives énergétiques plus propres et réduisant l'empreinte carbone globale de l'aviation.

La logique derrière le système de quota repose sur l'hypothèse que le prix du CAD dépasse celui du kérosène ou du carburant d'aviation. Cette différence de prix justifie l'imposition par le gouvernement d'un minimum de CAD, reflétant ainsi la nécessité d'inciter à l'investissement dans des technologies de carburants

plus propres. Les quantités produites sous ce système de quota de CAD, notées  $\theta$ , sont définies comme suit :

$$\begin{cases} E_b & \geq \theta E_{AV} \\ E_f & \geq (1 - \theta) E_{AV} \end{cases} \quad (3.4)$$

Cette structure illustre comment les cadres réglementaires peuvent influencer directement les dynamiques de marché et la composition de la production de carburant, façonnant ainsi les incitations pour les producteurs et la disponibilité des options de carburants durables.

### ÉMISSIONS DANS L'AVIATION

Les émissions représentent une externalité négative significative associée à la production de kérosène. Dans le modèle, la fonction d'émissions est définie comme suit :

$$G_z(\cdot) = Z = E_f. \quad (3.5)$$

Elle établit une relation directe et proportionnelle entre la quantité de kérosène produite et les émissions de gaz à effet de serre (GES) générées. Cette relation linéaire indique qu'à mesure que la production de kérosène augmente, les émissions associées augmentent également de manière proportionnelle. Un tel modèle met en évidence les coûts environnementaux liés à la dépendance aux carburants fossiles, renforçant ainsi l'urgence de la transition vers des sources d'énergie alternatives telles que le CAD.

L'accent mis sur les émissions sert de rappel crucial des implications environnementales plus larges des choix de production de carburant. Alors que les décideurs politiques envisagent des stratégies pour atténuer le changement climatique, comprendre la relation entre la production de carburant et les émissions devient essentiel pour développer des réglementations et des incitations efficaces.

### IMPACT SUR LE BIEN-ÊTRE GLOBAL

Le modèle intègre une fonction de bien-être qui quantifie le bien-être économique global résultant de la production agricole et de la production de carburant d'aviation. La fonction de bien-être est définie comme

suit :

$$\mathcal{W} = a_X \ln (X - X_E) + a_E \ln (E_{Av}) - a_G \left( \frac{E_f}{2} \right)^2. \quad (3.6)$$

Dans cette équation, le premier terme  $a_X \ln (X - X_E)$  capture l'utilité dérivée de la production alimentaire, en tenant compte de toute quantité  $X_E$  pouvant avoir été utilisée dans la production de CAD. Le deuxième terme  $a_E \ln (E_{Av})$  reflète la satisfaction ou le profit généré par la production de carburant d'aviation, indiquant ainsi sa contribution au bien-être économique.

Le troisième terme,  $-a_G \left( \frac{E_f}{2} \right)^2$ , capture la perte de bien-être due aux émissions générées par le kérosène. Ici,  $a_G$  est un paramètre positif qui reflète la sensibilité de la société aux coûts environnementaux. Étant donné que le kérosène  $E_f$  génère des GES, des valeurs plus élevées de  $E_f$  entraînent une diminution du bien-être, ce qui est en accord avec les objectifs politiques visant à réduire les émissions de l'aviation pour des bénéfices environnementaux. Cette représentation met en évidence les compromis entre la production agricole, la génération de carburant d'aviation et les coûts environnementaux associés, informant ainsi les décideurs politiques sur les conséquences potentielles de leurs choix réglementaires.

En capturant les dynamiques économiques en jeu, le modèle offre des perspectives précieuses pour évaluer l'efficacité des mesures réglementaires, optimiser l'allocation des ressources et parvenir à un équilibre entre sécurité alimentaire et objectifs de durabilité. En fin de compte, l'interaction entre ces facteurs façonne l'avenir des politiques agricoles et énergétiques, soulignant la nécessité d'approches intégrées pour relever à la fois les défis économiques et environnementaux.

### 3.6 RÉSULTATS

Les résultats de cette étude sont dérivés dans un cadre d'équilibre partiel, en se concentrant sur les marchés agricoles et du carburant d'aviation indépendamment des rétroactions économiques plus larges. Le modèle examine comment les prix d'équilibre et les quantités sur ces marchés réagissent aux changements des prix et des quotas de carburant d'aviation durable (CAD). Initialement, les résultats de base sont dérivés en analysant le comportement du système sans intervention politique — spécifiquement avant l'application d'un mandat de mélange de CAD. Cette analyse de référence permet une compréhension claire des dynamiques

du marché, notamment en ce qui concerne les prix des résidus agricoles  $p_J$ , des aliments  $p_X$  et des terres  $p_A$ , ainsi que la demande de CAD et de kérosène. Ce n'est qu'une fois ces fondamentaux établis que le modèle introduit le quota de CAD  $\theta$ , en analysant ses effets sur la production agricole  $F_p$ , l'utilisation des terres  $A$  et les émissions de gaz à effet de serre  $G_z$ . Cette approche clarifie les impacts directs et indirects de la politique sur l'énergie et l'alimentation, conformément aux hypothèses clés concernant les élasticités du marché et les externalités.

Les résultats suivants sont dérivés dans le contexte spécifique de l'initiative ReFuelEU Aviation. Nous faisons deux hypothèses clés pour simplifier le modèle : premièrement, nous fixons  $E_X = 0$ , ce qui reflète l'interdiction d'utiliser des aliments et des cultures fourragères pour la production de CAD au sein de l'UE; deuxièmement, nous posons  $p_J < p_X$ , reconnaissant que le prix du marché des résidus agricoles est inférieur à celui des produits agricoles primaires utilisés pour l'alimentation. Ces conditions aident à isoler les effets de la demande de CAD sur la tarification des résidus et l'utilisation des terres, en accord avec les priorités politiques de l'UE sur la sécurité alimentaire et la non-compétition entre les secteurs du biocarburant et de l'alimentation.

### 3.6.1 SITUATION INITIALE : RÉALITÉ DU MARCHÉ ET RÉSULTATS AVANT L'APPLICATION DES MANDATS DE MÉLANGE DE CAD

Avant la mise en œuvre des mandats de mélange de CAD, le marché du carburant d'aviation fonctionnait selon une structure de prix concurrentiels où le kérosène traditionnel et le CAD étaient vendus à un prix déterminé par le marché, noté  $p_{E_f}$ . Les producteurs dont les coûts de production de CAD dépassent  $p_{E_f}$  ne peuvent pas entrer sur le marché de manière compétitive, car leurs coûts plus élevés entraînent des prix supérieurs aux niveaux du marché. Ainsi, avant les mandats, les CAD étaient fournis et vendus à des prix de marché tels que  $p_{E_b} = p_{E_f}$ .

Le premier résultat montre que, à mesure que le carburant d'aviation devient plus cher, il devient plus attractif pour les producteurs d'allouer les résidus agricoles à la production de CAD. Cependant, à un certain point, le bénéfice marginal de l'augmentation supplémentaire du prix du CAD diminue par rapport au prix des résidus agricoles, provoquant une forme concave.

**prop 3.6.1.** *Le prix des résidus agricoles  $p_J$ , généré par les mécanismes d'équilibre, est une fonction quasi-concave par rapport au prix du CAD  $p_{E_b}$  (voir l'équation B.8).*

*Démonstration.* La demande d'équilibre pour le CAD  $E_b$  est une fonction décroissante de son prix  $p_{E_b}$ , et nous pouvons montrer que  $(p_{E_b}/p_J) (dp_J/dp_{E_b}) < 1$ . □

Ce résultat est cohérent avec le cadre de co-production de [Manes and Smith \(1965\)](#), selon lequel les résidus agricoles sont un sous-produit de la production alimentaire, et leur prix est déterminé par la demande et leur utilisation dans les marchés de CAD. Le prix d'équilibre  $p_J$  est donc sensible aux variations des prix des CAD, mais la quasi-concavité reflète les rendements décroissants à mesure que les prix des CAD augmentent au-delà d'un certain seuil.

**cor 3.6.1.** *Plus le prix du CAD est élevé, plus la demande de résidus agricoles est importante, et donc, plus leur prix est élevé.*

À mesure que les prix des CAD augmentent, la demande de résidus agricoles augmente. Le modèle suppose que les résidus agricoles sont un coproduit fixe de la production alimentaire, ce qui signifie qu'en cas d'augmentation de la demande, mais avec une offre fixe ou inélastique à court terme, le prix des résidus agricoles  $p_J$  augmente.

**prop 3.6.2.** *L'utilisation des terres  $A$  augmente avec les prix du CAD  $p_{E_b}$  (la même chose avec le prix des résidus agricoles  $p_J$  et des aliments  $p_X$ ), mais diminue avec le prix des terres  $p_A$ .*

Lorsque les prix du carburant d'aviation augmentent, les prix des résidus agricoles augmentent. À mesure que les prix des résidus agricoles augmentent, les agriculteurs allouent plus de ressources (terres dans ce cas) à la production agricole, entraînant une augmentation à la fois de la production alimentaire et des résidus agricoles qui sont co-produits. À l'inverse, lorsque les prix des terres augmentent, la demande d'utilisation des terres diminue.

**cor 3.6.2.** *Plus le prix des produits agricoles est élevé, plus l'offre de produits agricoles est grande, plus l'offre de résidus agricoles est grande et plus leur prix est bas.*

C'est une réponse typique du marché dans les économies agricoles où une production alimentaire accrue entraîne une abondance de produits secondaires (résidus agricoles), réduisant leur valeur marchande. De même, des prix plus élevés des terres réduisent la surface cultivée, ce qui diminue la production alimentaire et de résidus. Avec une offre réduite et une demande inchangée, le prix des résidus agricoles augmente.

#### VARIATION POSSIBLE DE LA PART DE CAD SELON LES PRIX

L'équation 3.7 de  $\varepsilon_b$  met en évidence les déterminants influençant la part des carburants d'aviation durables ( $E_b$ ) dans le mix énergétique, notamment la production de kérosène ( $E_f$ ), l'efficacité technologique de conversion des résidus agricoles ( $b_{E_b}$ ), ainsi que le ratio des prix des résidus agricoles ( $p_f$ ) et du carburant aviation ( $p_E$ ). Une amélioration technologique ( $b_{E_b}$  plus élevé) ou une baisse relative du coût des intrants agricoles ( $p_f/p_E$ ) favorise une hausse de  $\varepsilon_b$ , tandis qu'une production importante de kérosène fossile ( $E_f$  élevé) limite son expansion.

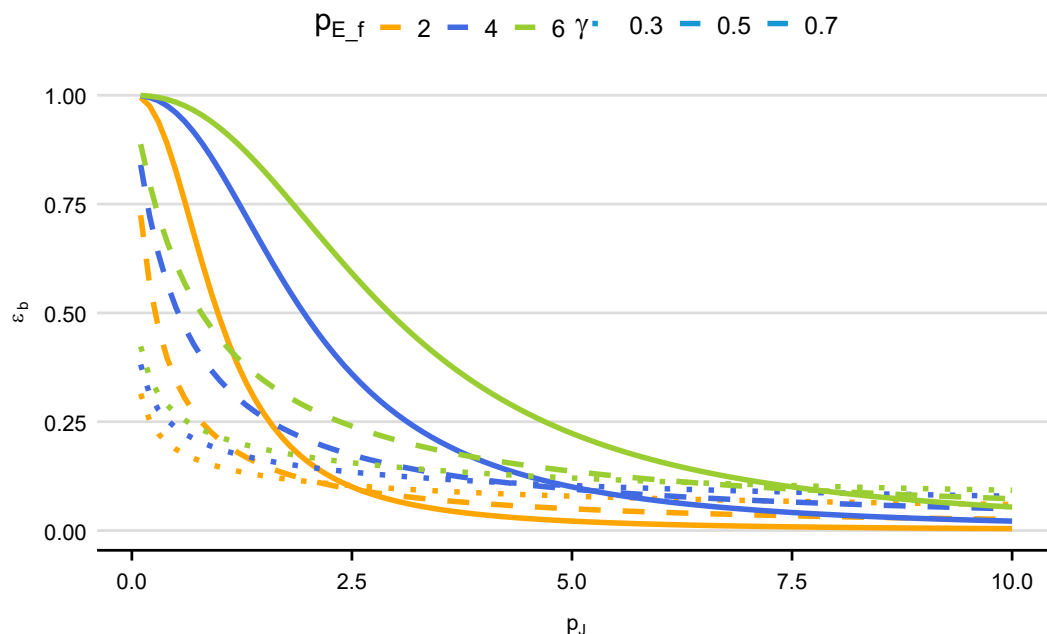
$$\varepsilon_b = \frac{1}{1 + E_f \left(\frac{1}{b_{E_b}}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \left(\frac{p_f}{p_E}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}} \quad (3.7)$$

Toutefois,  $\varepsilon_b$  ne peut jamais atteindre 0 ou 1 dans des conditions réalistes. Une transition complète vers les biocarburants ( $\varepsilon_b = 1$ ) exigerait une absence totale de kérosène ( $E_f = 0$ ) ou une efficacité technologique infinie, ce qui est irréalisable. Inversement,  $\varepsilon_b = 0$  supposerait un monopole total des énergies fossiles ou un coût prohibitif des résidus agricoles. Ainsi, la transition énergétique reste progressive et dépendante des avancées technologiques et des incitations économiques, nécessitant des politiques adaptées pour favoriser un équilibre optimal entre biocarburants et kérosène fossile.

L'analyse de la figure 3.7 met en évidence les déterminants de la part des carburants d'aviation durables ( $\varepsilon_b$ ) en fonction du prix des résidus agricoles ( $p_f$ ), de l'élasticité de production ( $\gamma$ ) et du prix du carburant d'aviation ( $p_{E_f}$ ).

D'une part, pour un même niveau de prix des résidus agricoles, une élasticité de production plus élevée ( $\gamma$ ) favorise une plus grande part de biocarburants dans le mix énergétique. En effet, une meilleure conversion des résidus agricoles en carburants permet une production plus efficace, augmentant ainsi la compétitivité de ces

derniers par rapport au kérosène fossile. D'autre part, à élasticité constante, un prix plus élevé du carburant



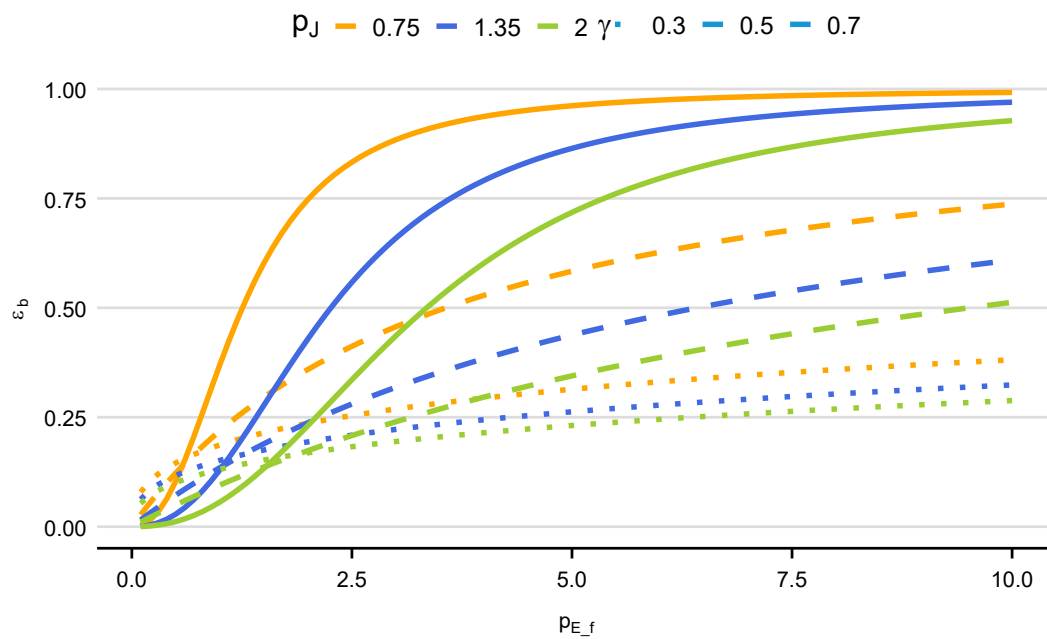
**FIGURE 3.7 :** Evolution de la part de CAD selon le prix des résidus agricoles sur le marché

d'aviation ( $p_{E_f}$ ) accroît la part des biocarburants. Un kérosène plus cher rend les alternatives renouvelables plus attractives, favorisant ainsi une transition progressive vers les carburants durables.

Cependant, cette relation demeure conditionnée par le coût des résidus agricoles, dont l'augmentation freine l'expansion des biocarburants. En fait, la relation entre  $\varepsilon_b$  et  $p_J$  reste décroissante : à mesure que le coût des intrants agricoles augmente, la production de biocarburants devient moins rentable, réduisant leur part dans le marché.

Le graphique illustre la dynamique de la part des carburants d'aviation durables ( $\varepsilon_b$ ) en fonction du prix du carburant fossile d'aviation ( $p_{E_f}$ ), sous différents niveaux d'élasticité de production ( $\gamma$ ) et de prix des résidus agricoles ( $p_J$ ).

Premièrement, à prix de résidus agricoles ( $p_J$ ) constant, une élasticité de production ( $\gamma$ ) plus élevée se traduit par une part plus importante des carburants durables dans le mix énergétique. Une élasticité élevée indique une meilleure efficacité de conversion des résidus agricoles en biocarburants, rendant ces derniers plus compétitifs face au kérosène fossile. De plus,  $\varepsilon_b$  suit une tendance croissante avec  $p_{E_f}$ , soulignant que la hausse du prix des carburants fossiles améliore l'attractivité économique des carburants d'aviation durables.



**FIGURE 3.8 :** Evolution de la part de CAD selon le prix du kérosène sur le marché

Deuxièmement, pour une élasticité donnée, une augmentation du prix des résidus agricoles ( $p_J$ ) réduit la part des carburants d'aviation durables. Un coût plus élevé des intrants agricoles pénalise la rentabilité des biocarburants, entraînant une diminution de leur part dans la consommation globale. Toutefois, même dans ce cas,  $\varepsilon_b$  reste croissant avec  $p_{E_f}$ , ce qui indique que, malgré une hausse des coûts de production, l'augmentation du prix du carburant fossile stimule toujours la transition vers les carburants alternatifs.

Cette analyse met en évidence la double influence du prix des intrants et de l'élasticité de production sur la compétitivité des carburants durables, illustrant la nécessité d'une politique de soutien ciblée pour compenser les effets négatifs des variations de prix.

Ainsi, la situation initiale est bien en accord avec les principes microéconomiques fondamentaux, ce qui rend légitime l'application de ce modèle pour évaluer les mandats de mélange de CAD dans les deux secteurs du modèle et le bien-être. Ce cadre nous permet d'extrapoler les résultats initiaux comme base de référence, en utilisant des statistiques comparatives pour comprendre comment les mandats de mélange de CAD pourraient modifier les dynamiques du marché. En exploitant ces premiers aperçus, nous pouvons explorer comment les mandats pourraient influencer les coûts de production et les résultats spécifiques aux secteurs, offrant ainsi une base pour des interprétations avec l'implémentation du quota  $\theta$ .

### 3.6.2 IMPACTS DE L'IMPOSITION DU QUOTA $\theta$

La mise en œuvre du mandat de CAD ou du quota  $\theta$  a des effets sur l'ensemble du système, notamment à travers son impact sur la demande de CAD. Le quota de CAD est imposé parce que les prix des CAD sont supérieurs à ceux du kérosène ( $p_{E_b} > p_{E_f}$ ). Puisque la demande obligatoire de CAD est  $\theta E_{AV}$ , les compagnies aériennes ont intérêt à intégrer le minimum strictement requis, mais rien au-delà. Les fournisseurs généreront juste assez pour répondre à cette demande, ce qui implique que  $E_b = \theta E_{AV}$  et alors  $E_f = (1 - \theta) E_{AV}$ . En conséquence, le prix moyen d'achat du carburant d'aviation, noté  $p_{E_{AV}}$ , est défini comme suit :

$$p_{E_{AV}} = \theta p_{E_b} + (1 - \theta) p_{E_f}. \quad (3.8)$$

Pour mieux comprendre ce qui se passe lorsque le quota de CAD est imposé, nous introduisons une hypothèse concernant l'élasticité de la demande de carburant dans le secteur de l'aviation. Étant donné que le carburant est essentiel au fonctionnement du moteur à réaction, sa demande diminuera lorsque le prix augmente, mais pas de manière drastique. Nous faisons donc l'hypothèse suivante :

**assumption 3.6.1.** *L'élasticité-prix de la demande de carburant d'aviation, notée  $\varepsilon_{Av}$ , est négative mais supérieure à moins un (-1), telle que  $\left| \varepsilon_{Av} \right| < 1$ . Elle est définie comme suit :*

$$\begin{cases} \varepsilon_{Av} &= \left( \frac{p_{E_{Av}}}{D_E} \frac{dD_E}{dp_{E_{Av}}} \right) < 0 \\ \left| \varepsilon_{Av} \right| &= \left| \frac{p_{E_{Av}}}{D_E} \frac{dD_E}{dp_{E_{Av}}} \right| < 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Cela signifie que le carburant d'aviation est un bien inélastique pour les compagnies aériennes. Ce n'est pas une hypothèse rigide, car un vol ne peut pas utiliser moins de carburant pour la même distance, du moins à court terme, sans améliorer l'efficacité du carburéacteur.

## IMPACTS SUR LES PRIX DES RÉSIDUS AGRICOLES ET DU MARCHÉ DU CARBURANT D'AVIATION

Le mandat de mélange de CAD ou quota  $\theta$  joue un rôle crucial dans la dynamique des marchés du CAD et des résidus agricoles. À mesure que le CAD devient une part plus importante du carburant d'aviation total, sa demande et, par conséquent, la demande de résidus agricoles augmentent.

**prop 3.6.3.** *Étant donné l'inélasticité du carburant d'aviation, plus la part de CAD  $\theta$  est élevée, plus le prix de marché du CAD  $p_{E_b}$  et le prix des résidus agricoles  $p_J$  augmentent (voir annexe B.2.1).*

À mesure que la demande de CAD augmente, le prix du CAD  $p_{E_b}$  augmente en raison à la fois de son offre limitée et de ses coûts de production. Cela, à son tour, augmente la demande de résidus agricoles  $p_J$  en tant qu'intrant principal dans la production de CAD, poussant ainsi leur prix à la hausse. Ce comportement est en accord avec les observations du monde réel, où une augmentation de l'offre de biocarburants tend à faire monter les prix des matières premières, comme l'indiquent les rapports de [OECD and FAO \(2020; 2022\)](#). Ces résultats sont également confirmés par [Condon et al. \(2015\)](#) dans leur méta-analyse, et plus récemment par [Lark et al. \(2022\)](#).

**cor 3.6.3.** *Le prix moyen d'achat du carburant d'aviation  $p_{E_{AV}}$  augmente à mesure que le quota de CAD  $\theta$  augmente.*

Puisque le CAD est plus coûteux que le CAT, l'augmentation du mélange de CAD entraîne naturellement une augmentation du prix moyen d'acquisition de carburant d'aviation. En augmentant la part de CAD dans la demande de carburant d'aviation, le prix moyen du carburant consommé par le secteur de l'aviation augmente. Cela est directement dû au coût plus élevé de la production de CAD et reflète le compromis économique entre la réglementation environnementale et les coûts du carburant pour les compagnies aériennes.

## IMPACT SUR LE VOLUME DE CARBURANT D'AVIATION

En ce qui concerne la demande de carburant d'aviation, nous constatons que lorsque le quota de CAD imposé augmente, il y a une diminution de la demande totale de carburant d'aviation ( $dE_{AV}/d\theta < 0$ ). En effet, cette diminution de la demande est due à l'augmentation du prix moyen d'achat du carburant d'aviation sur le marché après l'imposition du mandat de mélange de CAD.

**prop 3.6.4.** *À mesure que le quota de CAD  $\theta$  augmente, la demande globale de carburant d'aviation  $E_{AV}$  diminue (voir annexe B.2.2).*

À mesure que le quota de CAD  $\theta$  augmente, le prix moyen d'achat du carburant d'aviation  $p_{E_{AV}}$  augmente. Puisque le carburant est un facteur de coût majeur dans l'aviation, les compagnies aériennes réagissent à l'augmentation des prix du carburant en réduisant leur demande de carburant d'aviation  $E_{AV}$  (les coûts plus élevés du carburant peuvent entraîner moins de vols quotidiens sur certaines routes, à mesure que les prix des billets augmentent).

**cor 3.6.4.** *À mesure que le quota de CAD augmente, l'offre de CAD  $E_b$  sur le marché augmente, tandis que l'offre de CAT  $E_f$  diminue. Cependant, l'augmentation de l'offre de CAD  $E_b$  ne compense pas complètement la diminution de l'offre de CAT  $E_f$ , ce qui entraîne une réduction globale de l'offre de carburant d'aviation  $E_{AV}$ .*

Les résultats montrent que l'augmentation de l'offre de CAD  $E_b$  ne compense pas la diminution de l'offre de kérosène  $E_f$ . En conséquence, le marché du carburant d'aviation se rétrécit.

$$\left| \frac{dE_f}{d\theta} \right| > \left| \frac{dE_b}{d\theta} \right| \quad (3.10)$$

La diminution de l'offre de CAT est plus importante que l'augmentation de l'offre de CAD lorsque le quota  $\theta$  est appliqué, entraînant ainsi une réduction nette du carburant d'aviation total ( $dE_{AV}/d\theta < 0$ ). Cela reflète les coûts plus élevés et la disponibilité limitée du CAD par rapport au CAT, ce qui entraîne une contraction globale du marché du carburant d'aviation.

#### CHANGEMENT DANS L'OFFRE ALIMENTAIRE, L'UTILISATION DES TERRES ET LES ÉMISSIONS DE GES

Les résultats montrent que, comme le prix des résidus agricoles, l'offre alimentaire et le niveau d'utilisation des terres varient positivement en relation avec le mandat de mélange de CAD.

$$\frac{dX}{d\theta} > 0; \frac{dA}{d\theta} > 0 \quad (3.11)$$

Ainsi, dans la même direction que le prix des résidus agricoles, le mandat de mélange de CAD induit une

augmentation de l'offre agricole (aliments et résidus), ce qui implique une augmentation de l'utilisation des terres.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES)  $G_Z$ , il peut être observé que l'augmentation du quota  $\theta$  entraîne une diminution des émissions de GES, ce qui est conforme aux attentes, car la quantité de kérosène  $E_f$  est également inversement liée au quota et les émissions de GES sont supposées être liées au kérosène.

$$\frac{dG_Z}{d\theta} = \frac{dE_f}{d\theta} < 0 \quad (3.12)$$

En réalité, les économies d'émissions de GES seraient inférieures, car le CAD produit en réalité entre 60% et 80% de moins d'émissions que le CAT.

**prop 3.6.5.** *L'offre alimentaire et l'utilisation des terres augmentent avec le mandat de mélange de CAD, tandis que les émissions de GES diminuent.*

À mesure que le mandat de CAD augmente, les terres agricoles sont utilisées plus intensivement pour répondre à la demande de résidus nécessaires à la production de CAD. Cela conduit à une augmentation à la fois de la production alimentaire et des résidus agricoles, car ces deux produits sont co-produits. Cependant, malgré l'augmentation de l'utilisation des terres, les émissions de GES diminuent car le CAD émet beaucoup moins que le CAT. Ce résultat est cohérent avec les hypothèses du modèle concernant la neutralité carbone du CAD et reflète les bénéfices environnementaux des mandats de CAD dans la réduction de l'empreinte carbone du secteur de l'aviation.

### 3.6.3 CONSIDÉRATIONS SUR LE BIEN-ÊTRE

Le bien-être augmente avec la quantité de nourriture et de carburant d'aviation, mais diminue avec les émissions de GES générées par la quantité de kérosène. Lorsque le quota de CAD est appliqué, à la fois la quantité de kérosène et les émissions de GES générées diminuent. Ainsi, une augmentation du quota de CAD affecte le bien-être dans deux directions différentes : par la quantité de nourriture  $X$  et la réduction des émissions de GES  $G_Z$  (positive) d'une part, et la quantité de carburant d'aviation consommé  $E_{AV}$  (négative) d'autre part.

**prop 3.6.6.** *Il existe un mandat optimal de mélange de CAD, noté  $\theta^*$ , au point où le bien-être global  $\mathcal{W}$  est maximisé. À ce point, les gains marginaux de bien-être dus à l'augmentation de la production alimentaire  $X$  et à la réduction des émissions de GES grâce à l'utilisation réduite de kérosène  $E_f$  sont égaux à la perte marginale de bien-être associée à l'augmentation du coût du carburant d'aviation  $E_{AV}$ .*

Ce résultat met en évidence l'équilibre que les décideurs doivent trouver lorsqu'ils fixent les mandats de CAD : bien que les mandats de CAD contribuent positivement aux composants de bien-être environnemental et agricole, ils imposent également des coûts économiques sur la consommation de carburant d'aviation. Identifier ce niveau optimal de quota de CAD  $\theta^*$  permet aux décideurs de maximiser le bien-être social sans surcharger un secteur particulier

**cor 3.6.5.** *Augmenter le quota de CAD  $\theta$  au-delà du niveau optimal  $\theta^*$  conduit à une diminution nette du bien-être global  $\mathcal{W}$ , car les pertes marginales de bien-être dues à la réduction de la consommation de carburant d'aviation surpassent les gains marginaux liés à l'augmentation de la production alimentaire et à la réduction des émissions.*

Si le mandat de CAD est fixé trop haut, les pertes de bien-être dues à la diminution de l'activité aérienne (en raison de l'augmentation des coûts du carburant et de la réduction de la consommation de carburant) l'emportent sur les bénéfices issus de l'augmentation de la production alimentaire et des gains environnementaux. Ce résultat met en garde contre des quotas de CAD trop stricts, suggérant qu'il existe un point de basculement au-delà duquel des augmentations supplémentaires peuvent nuire au bien-être global.

#### EFFETS DES PRIX DES BIENS AGRICOLES ET DES CARBURANTS SUR LE NIVEAU OPTIMAL DU QUOTA DE CAD $\theta^*$

La valeur analytique de  $\theta^*$  intègre plusieurs paramètres clés du modèle, chacun reflétant des facteurs économiques ou environnementaux influençant le niveau de mélange de CAD maximisant le bien-être. Ici, nous analysons comment les prix des deux principaux secteurs du modèle influencent le mandat optimal de mélange de CAD.

## RAPPORT DES PRIX DES RÉSIDUS AGRICOLES ET DE LA NOURRITURE $p_X/p_J$

Le ratio  $p_X/p_J$  compare les prix de la nourriture et des résidus, affectant  $\theta^*$  en indiquant la valeur économique attribuée aux résidus agricoles par rapport à la nourriture. Si les prix des résidus  $p_J$  sont bas par rapport aux prix de la nourriture  $p_X$ , cela soutient un  $\theta^*$  plus élevé, car le coût de production de CAD reste contrôlable sans impacter la rentabilité de la production alimentaire, en alignement avec le mandat ReFuelEU visant à éviter la concurrence entre l'alimentation et le carburant.

## RATIO DE PRIX DU CAD AU CAT $p_{E_b}/p_{E_f}$

Le terme  $p_{E_b}/p_{E_f}$  met en évidence la différence de prix entre le CAD et le kérosène. Un prix du CAD plus élevé par rapport au CAT  $p_{E_f}$  réduit  $\theta^*$ , car cela augmente le fardeau des coûts pour les compagnies aériennes, diminuant ainsi le mélange de CAD maximisant le bien-être. Cet aspect est en accord avec des résultats antérieurs montrant que des coûts élevés de CAD peuvent avoir un impact négatif sur le bien-être, nécessitant une calibration soignée du mandat de CAD pour éviter une pression économique excessive sur l'industrie aérienne.

## UTILISATION DE LA NOURRITURE DANS LA PRODUCTION DE CAD

Si le prix des résidus agricoles est identique à celui des aliments ( $p_J = p_X$ ), l'augmentation de la quantité de CAD entraînera une augmentation du prix des aliments et des résidus agricoles. Cela conduit à une pénurie de nourriture destinée à la consommation humaine et à l'alimentation animale, car une partie de l'approvisionnement alimentaire peut être utilisée comme matières premières pour la production de CAD.

Cependant, si le prix des résidus est supérieur à celui des aliments ( $p_J \geq p_X$ ) et que la restriction sur l'utilisation des aliments et des fourrages comme intrants est respectée, le besoin d'une offre plus importante de biens agricoles peut également conduire à un changement dans le type de biens agricoles produits afin de générer davantage de résidus agricoles.

Le développement de la production de CAD, comme celui de tout autre biocarburant, doit donc être encouragé, mais il convient de prendre conscience des limites et des abus que sa production à grande échelle

peut entraîner dans le système. Cela justifie le fait que l'Union européenne interdise l'utilisation des aliments (pour la consommation humaine et animale) comme matières premières dans la production de CAD. Cependant, la production de CAD peut encore avoir des impacts négatifs, car l'augmentation de la demande de CAD conduit à une demande accrue de biens agricoles, entraînant ainsi une augmentation de l'utilisation des terres ou un changement d'utilisation des terres.

### 3.7 CONCLUSION

Cette étude fournit une analyse détaillée du bien-être et des dynamiques de marché des mandats de mélange de carburant d'aviation durable (CAD) dans le cadre de la législation ReFuelEU Aviation de l'UE. À travers un modèle d'équilibre partiel, nous avons examiné comment la demande de CAD influence la production agricole, l'utilisation des terres et les émissions de GES, en identifiant les conditions sous lesquelles le mélange de CAD peut atteindre les objectifs environnementaux sans imposer des coûts insoutenables au secteur aérien. Le quota optimal de CAD  $\theta^*$  montre comment les niveaux de mélange peuvent équilibrer les réductions d'émissions et l'augmentation de la demande agricole avec l'impact économique des coûts plus élevés du CAD, soulignant l'importance de quotas de CAD calibrés pour améliorer efficacement le bien-être.

La mise en œuvre des quotas de CAD qui s'alignent sur les objectifs environnementaux et économiques pourrait être mieux réalisée par des augmentations progressives, permettant au secteur aérien de s'adapter. Soutenir des pratiques agricoles durables pour la production de CAD à partir de résidus garantirait un approvisionnement stable en CAD tout en préservant la sécurité alimentaire et l'utilisation responsable des terres. Des incitations financières pour les producteurs de CAD, telles que des subventions ou des crédits d'impôt, pourraient également compenser l'écart de prix entre le CAD et le CAT, facilitant la transition économique pour les compagnies aériennes et les consommateurs. Ces soutiens ciblés sont essentiels pour établir un marché viable de CAD et faciliter un changement durable dans le secteur aérien.

L'analyse souligne l'importance de gérer soigneusement l'utilisation des terres et de surveiller les effets interconnectés des mandats de CAD sur la production alimentaire et les prix. Les décideurs doivent tenir compte de ces interdépendances sectorielles, en veillant à ce que les mandats de CAD ne surchargent pas involontairement les ressources agricoles. Les hypothèses du modèle sur la neutralité carbone du CAD et la dépendance

aux résidus suggèrent la nécessité de cadres réglementaires qui favorisent les voies de production de CAD les plus durables, avec des évaluations des émissions sur le cycle de vie alignant la politique du CAD avec les objectifs climatiques de l'UE et minimisant les compromis environnementaux.

Des recherches supplémentaires pourraient explorer les effets à long terme des mandats de CAD sur plusieurs secteurs, y compris l'emploi et le tourisme, dans l'aviation et l'agriculture. L'analyse du CAD en parallèle avec des technologies telles que l'hydrogène et l'aviation électrique pourrait également fournir des informations sur les stratégies de décarbonisation diversifiées. Des comparaisons entre pays mettraient également en lumière la manière dont les conditions réglementaires et économiques variées affectent l'adoption du CAD, fournissant une base pour des politiques harmonisées.

En résumé, les mandats de mélange de CAD offrent un potentiel significatif pour réduire l'empreinte carbone de l'aviation tout en soutenant des pratiques agricoles durables. Pour y parvenir, des politiques doivent équilibrer les avantages environnementaux avec la faisabilité économique, complétées par des subventions et des incitations qui soutiennent l'adoption du CAD sans imposer une pression financière excessive. À mesure que l'UE progresse vers ses objectifs climatiques, des recherches supplémentaires sur la production de CAD, les structures réglementaires et les technologies alternatives seront essentielles pour créer un secteur aérien résilient et durable. -



# 4

## Conclusion générale

### 4.1 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

#### 4.1.1 TAXATION OPTIMAL DES ÉMISSIONS DE GES POUR UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ÉQUITABLE

Dans le premier chapitre théorique de la thèse, nous avons exploré l'impact de la transition énergétique sur les inégalités de revenu au sein d'un pays, en analysant comment les politiques de transition énergétique peuvent à la fois aggraver les inégalités sociales et être freinées par celles-ci. Nous avons en effet montré que les hausses de prix induites par des politiques de transition peuvent avoir des effets disproportionnés sur les ménages à faibles revenus, qui sont plus sensibles aux fluctuations des prix de l'énergie. En parallèle, nous avons souligné comment les inégalités de revenu peuvent empêcher une transition énergétique fluide, comme en témoignent des mouvements sociaux tels que les Gilets Jaunes en France, déclenchés après l'augmentation des taxes sur les carburants.

Notre analyse constitue un point de départ relativement important pour une étude plus approfondie qui modélise explicitement l'impact de la taxe carbone dans le cadre d'une transition énergétique équitable. En

introduisant la taxe carbone dans un modèle analytique tout en conservant les éléments d'inégalités de revenu développés dans le premier chapitre théorique, il devient possible de mieux comprendre comment cette politique peut être conçue pour à la fois respecter les objectifs environnementaux et limiter les effets négatifs sur les groupes sociaux les plus vulnérables. Une telle approche permettrait d'identifier des solutions permettant de concilier la nécessité de lutter contre le changement climatique avec la préservation de l'équité sociale.

La modélisation de la taxe carbone dans un tel cadre offrirait une analyse plus rigoureuse des effets redistributifs et permettrait d'explorer des mécanismes de compensation efficaces pour atténuer les impacts régressifs de la taxe sur les ménages à faibles revenus. Des études antérieures ont montré que, sans ces compensations, les inégalités de revenu risquent de s'aggraver sous l'effet de la taxe, ce qui rend d'autant plus crucial le développement de politiques ciblées et redistributives. Par ailleurs, l'introduction d'une taxe carbone dans un modèle économique permettant d'étudier l'impact sur les inégalités pourrait également fournir des perspectives pratiques sur la redistribution des recettes fiscales, en vue d'une transition énergétique socialement juste.

Enfin, cette modélisation analytique contribuerait à affiner les propositions de politiques publiques, en particulier en mettant en lumière les secteurs et les populations les plus vulnérables. Les résultats pourraient ainsi guider la mise en place de politiques ciblées visant à soutenir les travailleurs et les régions dépendant des secteurs à forte émission de carbone, tout en assurant une transition juste. En reliant cette perspective de recherche à mon travail précédent, cette étude approfondie serait un prolongement naturel, permettant d'ancrer les résultats de mes analyses préliminaires dans une démarche plus analytique et solutionniste, en vue de promouvoir une transition énergétique équitable.

#### 4.1.2 POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION DE CAD

Comme nous l'avons vu, l'introduction du règlement ReFuelEU Aviation marque une étape importante dans les efforts de l'Union européenne pour décarboniser le secteur de l'aviation. Ce règlement, qui entrera en vigueur le 1er janvier 2025, impose une augmentation progressive du mélange de CAD dans le kérosène conventionnel, en commençant par 2% en 2025 et en atteignant 70% d'ici à 2050. Toutefois, la possibilité d'atteindre ces quotas ambitieux de SAF reste incertaine en raison des contraintes liées à la capacité de produc-

tion, à la disponibilité des matières premières et aux coûts associés. Cette section présente trois perspectives de recherche clés pour relever ces défis.

## ÉVALUATION LA CAPACITÉ DE PRODUCTION DE CAD POUR RÉPONDRE À LA DEMANDE FUTURE

Malgré l'implication théorique selon laquelle les mandats de mélange augmenteront la demande de CAD, il existe peu de preuves empiriques suggérant que la capacité de production de CAD actuelle ou prévue est suffisante pour répondre aux exigences réglementaires. En effet, les données existantes révèlent que les registres de production de CAD ne sont disponibles que depuis 2018 et que, même dans ce cas, ils manquent de précision quant à la part spécifique des CAD dans les chiffres plus généraux de la production de biocarburants. Les recherches futures doivent analyser les capacités de production des installations de CAD, en incorporant des données sur les usines opérationnelles et en construction.

Pour évaluer la capacité de production du CAD afin de répondre aux demandes futures, cette recherche se concentrera sur une approche de modélisation économétrique à multiples facettes qui analyse les tendances historiques et prévoit la production future. Les simulations de Monte Carlo amélioreront encore cette analyse en introduisant la variabilité de paramètres clés tels que les niveaux d'investissement et les progrès technologiques, fournissant ainsi une évaluation probabiliste des capacités de production.

## MÉTHODOLOGIE

Notre méthode s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle tout le biocarburant produit dans le monde est utilisé pour les vols en Europe. Cette hypothèse ne nous paraît pas trop illogique car pour l'instant seule l'Europe a instauré un quota pour l'utilisation de biocarburant sur ses vols. Il paraît donc logique que les compagnies aériennes allouent donc leur stocks de biocarburant sur la zone européenne.

Les données utilisées pour l'analyse probabiliste viennent de plusieurs sources et s'étendent sur des intervalles de temps différents. Les données de consommation proviennent d'Eurostat et vont de 1990 à 2022. Tandis que, les données de production provenant de l'IEA vont de 2019 à 2028 en comptant les prévisions. Notre méthode consiste en trois étapes :

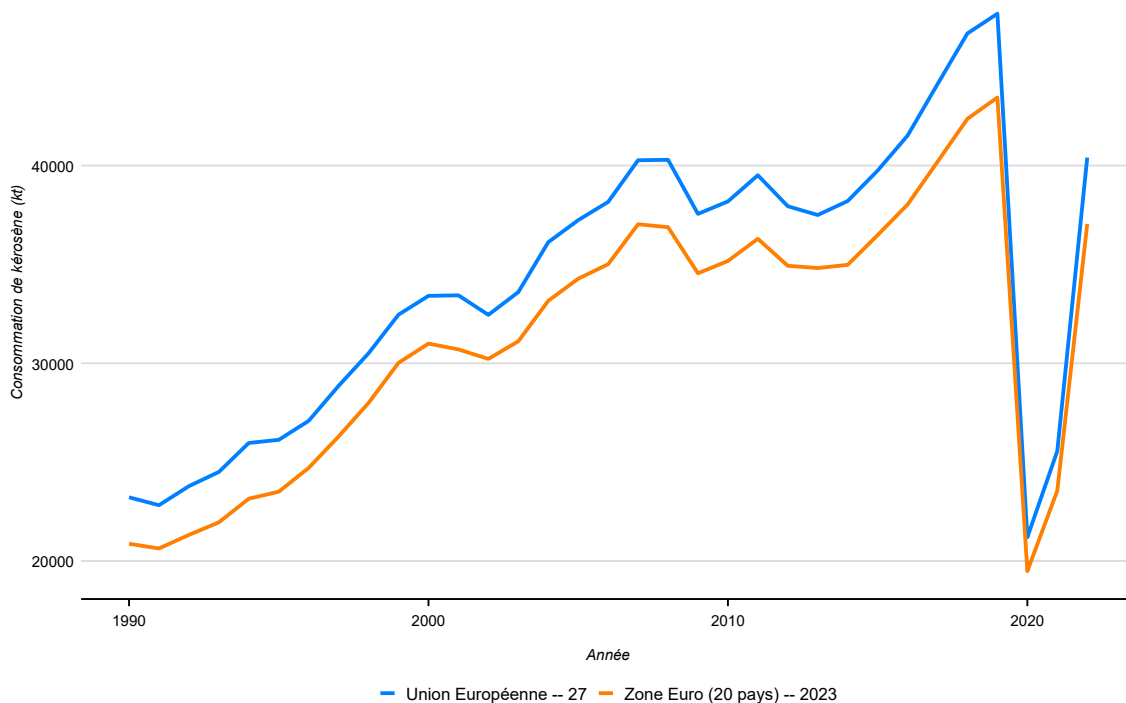
- Etape 1 : on utilise les prévisions ainsi qu'un modèle de lissage pour prédire la consommation et la

production à jusqu'à l'année fixée pour le seuil. Ainsi la consommation et la production pour le seuil de 2% seront prédites jusqu'à l'année 2025, 2030 pour le seuil de 5% et 2035 pour le seuil de 20%.

- Etape 2 : on estime les densités de probabilité théorique à partir des données empiriques et en utilisant les densité théoriques estimés on tire 100 millions de valeurs aléatoires.
- Etape 3 : on calcule le ratio  $R_{seuil} = \frac{Production \times 100}{Consumption}$  et on calcule le pourcentage de cas qui sont supérieurs ou égaux au ratio en question

#### ESTIMATION DE LA DISTRIBUTION THÉORIQUE DE LA CONSOMMATION

Comme nous pouvons le constater sur la figure 4.1, la consommation de kérosène dans l'UE-27 et la Zone Euro (20 pays) a suivi une trajectoire globalement ascendante entre 1990 et 2020, reflétant l'essor des voyages aériens et la croissance économique au cours des dernières décennies. Toutefois, des périodes de stagnation ou de recul, telles que celles associées à la crise financière mondiale de 2008 et, plus récemment, à la pandémie de Covid-19 en 2020, témoignent de la sensibilité du secteur aérien aux chocs économiques et sanitaires.



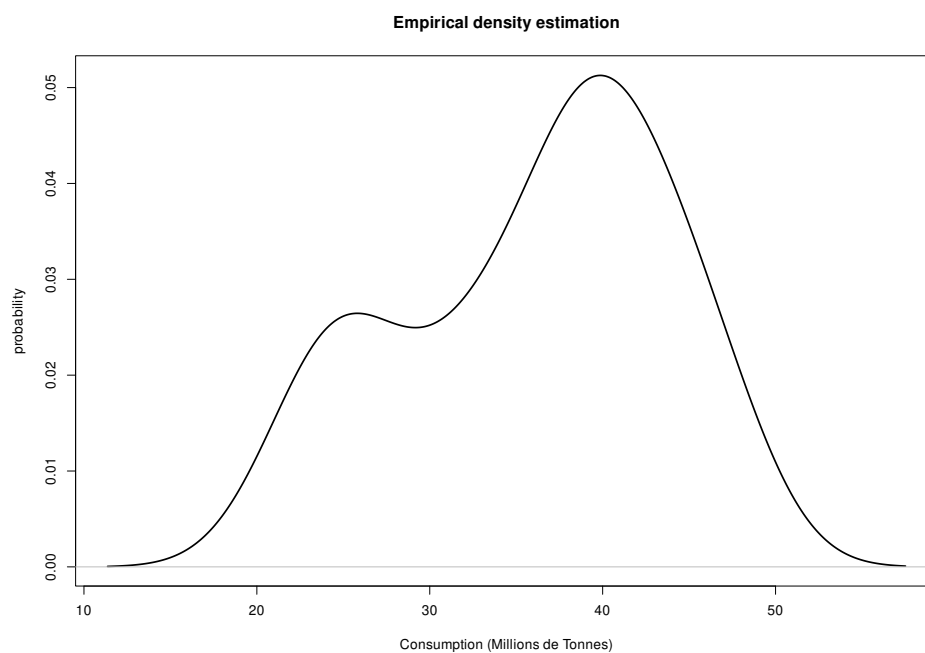
Source: Eurostat (2023)

**FIGURE 4.1 :** *Consommation de carburéacteur dans l'Union européenne de 1990 à 2022*

Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité énergétique des avions, couplée à des politiques environnementales

plus strictes, a probablement contribué à ralentir la croissance de la consommation de kérosène dans les années récentes. Mais les prévisions de l'IATA (2023b) estiment que le marché atteindra son niveau de consommation de kérosène d'avant la pandémie à partir de 2025. Ces dynamiques soulignent l'importance d'une transition vers des carburants plus durables pour concilier les besoins de mobilité croissants avec les objectifs climatiques.

En regardant la figure 4.2 on peut remarquer une distribution bimodal de la densité empirique de la consommation. Cela suggère que la consommation de pétrole dans l'aviation a deux comportements. En effet Lux (2009) et Schmitt and Westerhoff (2017) ont montré que les actifs financiers avaient eux aussi une distribution bimodale qui est le résultat de leur double comportement. Un comportement en période de boom économique et un comportement en période de récession. Nous pensons que la consommation de pétrole dans l'aviation suit également cette même dynamique étant donné qu'elle est étroitement liée à l'activité économique. La bimodalité de la distribution empirique indique qu'il faut utiliser un mélange de lois de probabilité pour la distribution théorique.

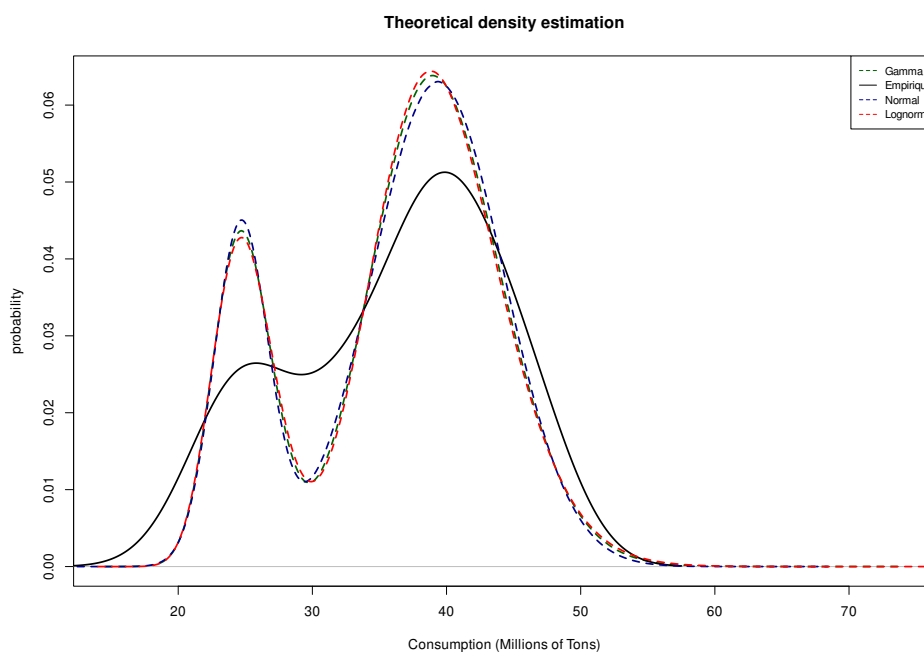


**FIGURE 4.2 :** *Densité empirique de la consommation de carburant dans l'Union européenne*

On aurait pu adopter une méthode différentes pour estimer la probabilité d'atteindre les seuils fixés. Elle consisterait à considérer l'intervalle de confiance des prédictions de consommations et de production et de tirer des valeurs dans ces intervalles. Toutefois une telle méthode a plusieurs failles : i) elle dépend trop des

valeurs prédites ce qui peut rendre les valeurs tirées trop optimistes ou trop pessimistes et la rend non robuste face aux aléas (ex Covid-19) et ii) elle nous forcerait à tirer des valeurs à partir d'une loi uniforme ce qui donnerait la même probabilité à toutes les valeurs possibles. En gros, un autre épisode similaire à la pandémie de Covid-19 aurait la même probabilité qu'une période relativement calme.

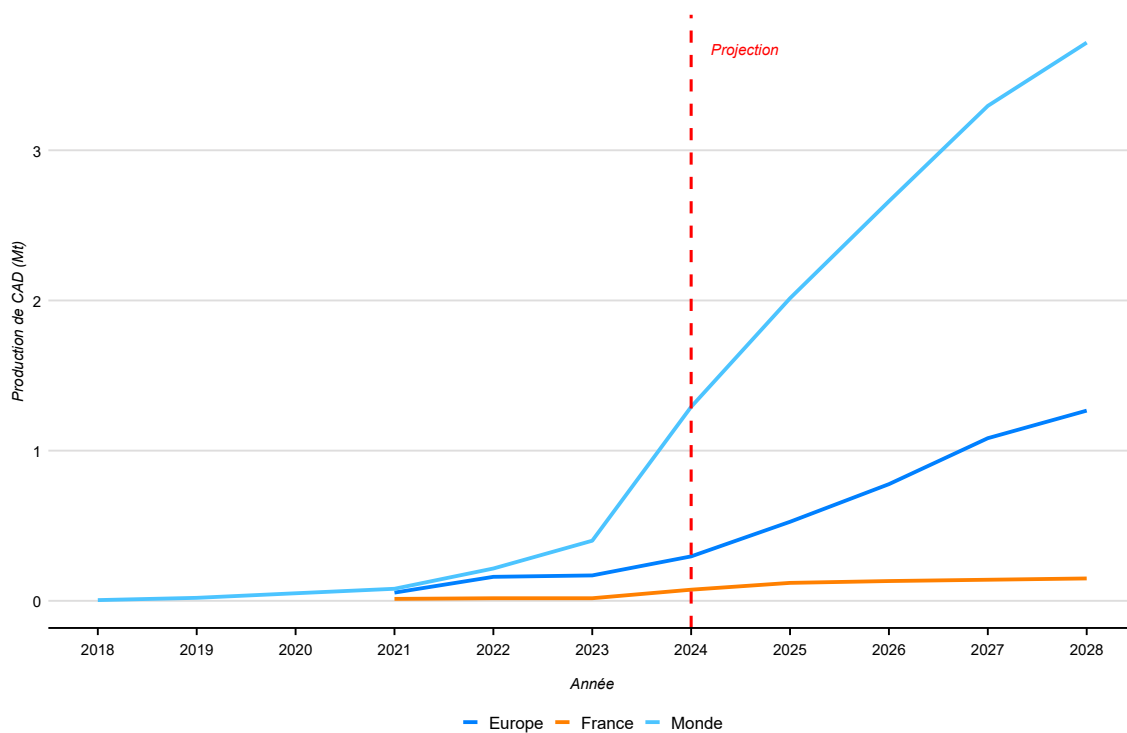
Etant donné que l'on est sûr des valeurs strictement positives pour la consommation on utilisera des lois Gamma et Lognormal. Toutefois, étant donné les valeurs empiriques observées on peut aussi utiliser la loi normal car la probabilité qu'elle fournisse des valeurs négatives dans nos simulations. La figure 4.3 présente les lois théoriques estimées ainsi que la loi empirique obtenu par une estimation de densité de kernel.



**FIGURE 4.3 :** *Densité empirique de la consommation de carburant dans l'Union européenne*

#### ESTIMATION DE LA DISTRIBUTION DE LA PRODUCTION

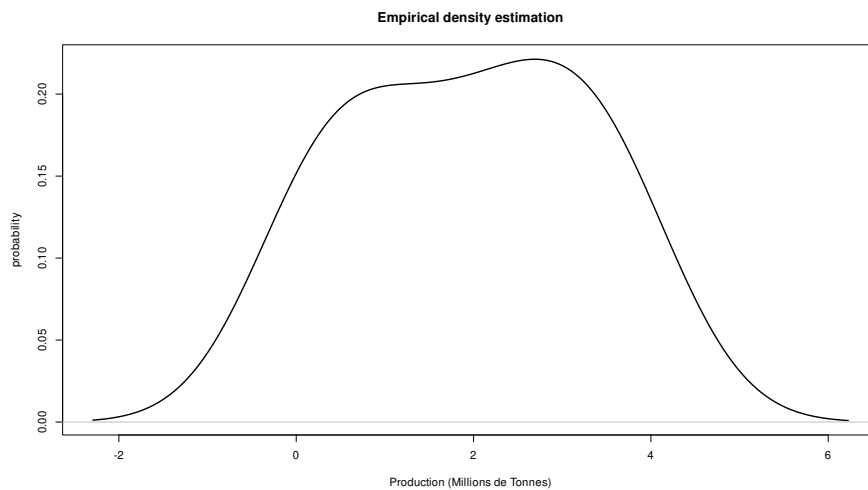
La production de CAD est en pleine croissance et les prévisions de l'IEA pointent vers une production en constante augmentation comme le montre la figure 4.4. Toutefois, pour l'estimation de la densité théoriques nous commencerons à partir de 2022 bien que nos données remontent à 2019. En effet, la production de CAD reste très faible mais la production ne fait qu'augmenter et avec la nouvelle régulation RefuelEU elle ne fera qu'augmenter. Inclure les valeurs très faibles des années précédant 2022 reviendrait à pénaliser la distribution en le tirant vers la gauche car le nombre de valeurs faibles seront plus élevé que les autres.



Source: IATA (2023) & IEA (2023)

**FIGURE 4.4 :** *Evolution de la production de CAD en Europe et dans le monde*

Pour estimer la distribution théorique de la production nous utilisons les lois gamma et lognormal car on est sur des valeurs strictement positives. Etant donné que l'on est sur des valeurs très petites, contrairement à la production, une loi normal donnerait des valeurs négatives. Toutefois, nous utiliserons aussi une loi uniforme sur les trois dernières années, ce qui revient à choisir les scénarios les plus favorables à la production de CAD. En effet, la production de CAD est à son tout début et beaucoup de chantier sont en cours pour augmenter la production dans le futur ce qui laisse penser que la production ne fera qu'augmenter. Néanmoins, la loi uniforme accorde une équiprobabilité à toutes les valeurs dans l'intervalle considéré.



**FIGURE 4.5 :** *Estimation de la densité empirique de la production de CAD*

#### EXPLORATION DES CONTRAINTES DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT ET DES INTERVENTIONS POLITIQUES

La production de CAD est intrinsèquement liée à la disponibilité de matières premières durables, d'infrastructures de raffinage et de cadres politiques favorables. La recherche doit identifier les goulets d'étranglement critiques dans la chaîne d'approvisionnement, depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la distribution, et évaluer comment les mécanismes politiques tels que les subventions, la tarification du carbone et les partenariats public-privé peuvent atténuer ces contraintes. En outre, l'étude explorera des technologies de production alternatives, telles que la transformation de l'énergie en liquide (PtL) et les biocarburants avancés.

Sans tenir compte de la disponibilité des matières premières, de la capacité de raffinage et de la logistique, la production de CAD ne pourra pas atteindre les objectifs réglementaires. Les interventions politiques doivent être conçues de manière stratégique pour atténuer ces contraintes.

La modélisation de la dynamique des systèmes sera utilisée pour cartographier les interactions au sein de la chaîne d'approvisionnement et simuler les effets de diverses interventions politiques. L'analyse de scénarios complétera cette approche en évaluant l'efficacité de ces politiques dans différentes conditions de marché et de réglementation, en s'appuyant sur les données de l'IRENA et sur les indicateurs de développement mondial de la Banque mondiale.

La viabilité économique de la production de CAD est influencée par des facteurs tels que les coûts de production, la demande du marché et la concurrence avec le carburéacteur conventionnel. Parallèlement, les avantages environnementaux des CAD dépendent des réductions d'émissions sur l'ensemble du cycle de vie, qui varient en fonction de la matière première et du processus de production. Les recherches futures devront déterminer si les mandats relatifs aux CAD atteignent les objectifs visés, à savoir la réduction des émissions de l'aviation, sans imposer de charges économiques disproportionnées.

Si les CAD présentent des avantages pour l'environnement, leurs coûts de production plus élevés et les distorsions potentielles du marché pourraient avoir des conséquences inattendues. Il est essentiel de trouver un équilibre entre les objectifs environnementaux et la durabilité économique pour assurer le succès à long terme.

Cette recherche utilisera une combinaison d'analyse des entrées-sorties pour évaluer les impacts économiques dans les industries concernées et d'ACV pour quantifier les avantages environnementaux de l'utilisation des CAD. Cette double approche facilitera une analyse coûts-bénéfices complète, mettant en balance les coûts économiques et les bénéfices environnementaux et sociétaux. Les données essentielles de cette analyse proviendront de l'IAE, de l'IATA et de divers rapports gouvernementaux et industriels qui fournissent des informations détaillées sur les aspects économiques et environnementaux de la production et de l'utilisation des CAD.

### 4.2 CONCLUSION

Cette thèse a pour objectif principal d'analyser les effets de la transition énergétique sur les inégalités de revenu, en examinant les interactions complexes entre la production d'énergie, les choix de consommation, et les conséquences économiques et sociales. À travers une modélisation en équilibre général, nous avons d'abord exploré comment la transition énergétique, en modifiant les prix des facteurs de production (capital, travail, terre), peut influencer la distribution des revenus au sein de l'économie. Les résultats montrent que la transition vers les énergies renouvelables peut réduire certaines inégalités, mais elle peut aussi en aggra-

ver d'autres, notamment en ce qui concerne l'accès aux biens essentiels comme l'alimentation, en raison des hausses des coûts fonciers.

Le deuxième chapitre a permis de démontrer que les effets de la transition énergétique sur les inégalités sont largement déterminés par les prix des facteurs de production, particulièrement le capital et la terre. Nous avons montré que la baisse du prix du capital favorise davantage les ménages à revenu élevé, qui consomment une plus grande part de biens manufacturés. En revanche, l'augmentation des prix de la terre, liée à la transition énergétique, se répercute négativement sur les ménages à faible revenu, qui consacrent une part plus importante de leur budget à l'alimentation. Cette dynamique renforce les inégalités économiques, mettant en évidence la nécessité d'une approche différenciée pour traiter les impacts de la transition sur les différents groupes sociaux.

Ce chapitre a également permis d'élargir la portée de l'analyse en intégrant les aspects théoriques de l'optimum social et des politiques climatiques. Nous avons montré que l'optimum social, en tenant compte des externalités environnementales, permet de mieux aligner les choix individuels avec les objectifs collectifs de développement durable. L'introduction de l'optimisation sociale a permis de mettre en lumière les limites des approches de marché, en particulier lorsque les coûts environnementaux ne sont pas internalisés. Ces résultats ont permis de formuler des recommandations pour une politique de transition énergétique plus équitable, qui tienne compte des externalités négatives tout en soutenant les groupes sociaux les plus affectés.

Le troisième chapitre s'est concentré sur la compétitivité des biocarburants dans l'aviation et a examiné les défis et opportunités liés à leur intégration dans les systèmes énergétiques mondiaux. Cette recherche fournit un cadre analytique permettant d'examiner les implications de l'imposition de quotas de CAD dans le secteur de l'aviation, en particulier dans le cadre réglementaire ReFuelEU Aviation. En intégrant un modèle d'équilibre partiel, nous avons saisi l'interaction entre les secteurs de l'agriculture et de l'énergie, offrant un aperçu de la manière dont les mandats de mélange de CAD ont un impact sur les résidus agricoles, les prix des denrées alimentaires, l'utilisation des terres et les émissions de GES. Les résultats soulignent que le quota de CAD qui maximise le bien-être dépend fortement de la dynamique des prix des CAD et du kérosène conventionnel, de l'élasticité de la demande de carburant aviation et des contributions relatives des

marchés des denrées alimentaires et des résidus agricoles au bien-être. L'analyse souligne notamment le risque de conséquences économiques imprévues, telles que l'augmentation des prix des denrées alimentaires ou la réduction de la disponibilité des résidus agricoles et l'augmentation et/ou le changement d'utilisation des sols, si le quota de CAD sont fixés à un niveau trop élevé sans tenir compte de ces interdépendances.

La principale contribution de ce chapitre réside dans l'avancement théorique de la littérature sur les politiques de CAD et leurs compromis économiques et environnementaux. Contrairement aux études précédentes qui se concentrent principalement sur la faisabilité technique ou les réductions d'émissions, notre travail comble le fossé entre la modélisation économique et la politique environnementale en incorporant explicitement la coproduction de biens agricoles (aliments et résidus) dans l'analyse. Cette approche nuancée vient s'ajouter à une littérature de plus en plus abondante soulignant la nécessité d'évaluations politiques holistiques qui tiennent compte des interconnexions complexes entre la transition énergétique et la sécurité alimentaire. En outre, les perspectives analytiques dérivées de la dynamique du bien-être fournissent une base solide pour les futurs travaux empiriques et les simulations de politiques. Cette recherche est particulièrement pertinente dans le contexte des efforts en cours pour décarboniser le secteur de l'aviation, car elle fournit aux décideurs politiques les outils nécessaires pour concevoir des mandats CAD qui maximisent les avantages environnementaux tout en protégeant les marchés alimentaires et agricoles contre les chocs économiques négatifs.

En conclusion, cette thèse apporte une contribution significative à la compréhension des effets économiques et sociaux de la transition énergétique, en particulier en ce qui concerne ses impacts sur les inégalités de revenu. À travers une approche analytique rigoureuse, elle révèle comment les changements dans les prix des facteurs de production, notamment le capital et la terre, influencent différemment les ménages en fonction de leurs revenus, exacerbant souvent les disparités économiques. L'intégration des concepts d'équilibre général et d'optimum social met en lumière les limites des mécanismes de marché pour internaliser les externalités environnementales, tout en soulignant l'importance d'une régulation appropriée pour aligner les intérêts individuels avec les objectifs collectifs. Enfin, en explorant la compétitivité des biocarburants dans le secteur de l'aviation, la thèse comble une lacune importante dans la littérature en proposant une approche nuancée qui lie explicitement transition énergétique et sécurité alimentaire. Ces contributions offrent un cadre analytique robuste pour concevoir des politiques énergétiques et climatiques qui non seulement soutiennent la

durabilité environnementale, mais aussi favorisent une répartition équitable des bénéfices de cette transition entre les différents groupes sociaux.



# Bibliographie

Frederico Afonso, Martin Sohst, Carlos M.A. Diogo, Simão S. Rodrigues, Ana Ferreira, Inês Ribeiro, Ricardo Marques, Francisco F.C. Rego, Abdolrasoul Sohoul, Joana Portugal-Pereira, Hugo Policarpo, Bruno Soares, Bruna Ferreira, Edgar C. Fernandes, Fernando Lau, and Afzal Suleman. Strategies towards a more sustainable aviation : A systematic review. *Progress in Aerospace Sciences*, 137 :100878, 2023. ISSN 03760421. doi : 10.1016/j.paerosci.2022.100878. URL <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100878>.

Salman Ahmad, Jamal Ouenniche, Ben W. Kolosz, Philip Greening, John M. Andresen, M. Mercedes Maroto-Valer, and Bing Xu. A stakeholders' participatory approach to multi-criteria assessment of sustainable aviation fuels production pathways. *International Journal of Production Economics*, 238 :108156, aug 2021. doi : 10.1016/J.IJPE.2021.108156.

Michaël Aklin and Johannes Urpelainen. *Renewables : The politics of a global energy transition*. MIT Press, 2018. URL <https://mitpress.mit.edu/9780262534949/renewable-energy-in-developing-countries/>.

Anna Alberini, Will Gans, and Daniel Velez-Lopez. Residential consumption of gas and electricity in the us : The role of prices and income. *Energy Economics*, 33(5) :870–881, 2011.

R. Alizadeh, P. D. Lund, and L. Soltanisehat. Outlook on biofuels in future studies : A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134 :110326, 2020.

Stéphane Amant and Marion Subtil. Transport Routier : Quels Avantages Offrent Les Biodiesels De Seconde Generation Pour Le Climat? sep 2022.

ANP. Brazilian ethanol production and use. 2021. URL <http://www.anp.gov.br>.

Mohammed Antar, Dongmei Lyu, Mahtab Nazari, Ateeq Shah, Xiaomin Zhou, and Donald L Smith. Biomass for a sustainable bioeconomy : An overview of world biomass production and utilization. *Renewable*

and *Sustainable Energy Reviews*, 139 :110691, 2021.

Eva Mari Aro. From first generation biofuels to advanced solar biofuels. *Ambio*, 45 :24–31, 2016. ISSN 16547209. doi : 10.1007/s13280-015-0730-0.

International Air Transport Association. Sustainable aviation fuel output increases, but volumes still low. 2022. URL <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/sustainable-aviation-fuel-output-increases-but-volumes-still-low/>.

International Air Transport Association. Sustainable aviation fuel : A path to a sustainable aviation industry. 2023. URL <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>.

Erdal Aydin, Nils Kok, and Dirk Brounen. Energy efficiency and household behavior : the rebound effect in the residential sector. *The RAND Journal of Economics*, 48(3) :749–782, 2017.

M. Banse, P. Nowicki, and H. van Meijl. Will eu biofuel policies affect global agricultural markets? *European Review of Agricultural Economics*, 35(2) :117–141, 2008.

Siri Fung Basumatary, Sona Brahma, Mainul Hoque, Basanta Kumar Das, Manickam Selvaraj, Sujata Brahma, and Sanjay Basumatary. Advances in CaO-based catalysts for sustainable biodiesel synthesis. *Green Energy and Resources*, 1(3) :100032, 2023. ISSN 29497205. doi : 10.1016/j.gerr.2023.100032. URL <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100032>.

Ausilio Bauen, Göran Berndes, Martin Junginger, Marc Londo, François Vuille, Robert Ball, Tjasa Bole, Claire Chudziak, André Faaij, and Hamid Mozaffarian. Bioenergy – a sustainable and reliable energy source : A review of status and prospects, 2009. ExCo : 2009 :06.

Ausilio Bauen, Niccolò Bitossi, Lizzie German, Anisha Harris, and Khangzhen Leow. Sustainable aviation fuels : Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(3) :263–278, 2020.

William J Baumol. On the Proper Cost Tests for Natural Monopoly in a Multiproject Industry. *American Economic Review*, 67(5) :809–822, 1977. ISSN 0002-8282. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true{&}db=bth{&}AN=4506025{&}site=ehost-live{&}scope=site>.

Luis Armando Becerra-Pérez, Luis E. Rincón, and John A. Posada-Duque. Logistics and Costs of Agricultural Residues for Cellulosic Ethanol Production. *Energies*, 15(12) :4480, jun 2022. ISSN 19961073.

doi : 10.3390/en15124480. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/12/4480/html><https://www.mdpi.com/1996-1073/15/12/4480>.

Antonio Bento and Mark Jacobsen. The distributional and efficiency impacts of increased us gasoline taxes. *American Economic Review*, 97(2) :667–669, 2007. doi : 10.1257/aer.97.2.667.

C. Bessou, F. Ferchaud, B. Gabrielle, and B. Mary. Biofuels, greenhouse gases and climate change. In *Sustainable Agriculture Volume 2*, pages 365–468. 2011.

Charline Bonatto, Aline Frumi Camargo, Thamarys Scapini, Fábio Spitz Stefanski, Sérgio L Alves, Caroline Müller, Gislaine Fongaro, and Helen Treichel. Biomass to bioenergy research : current and future trends for biofuels. *Recent developments in bioenergy research*, pages 1–17, 2020.

François Bourguignon and Christian Morrisson. Inequality and development : The role of dualism. *Journal of Development Economics*, 57(2) :233–257, 1998. doi : 10.1016/S0304-3878(98)00090-6.

M. Burke, S. M. Hsiang, and E. Miguel. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577) :235–239, 2015. doi : 10.1038/nature15725. URL <https://doi.org/10.1038/nature15725>.

Eduardo Cabrera and João M Melo de Sousa. Use of sustainable fuels in aviation—a review. *Energies*, 15(7) :2440, 2022a.

Eduardo Cabrera and João M Melo de Sousa. Use of sustainable fuels in aviation—a review. *Energies*, 15(7) :2440, 2022b.

Louis Edwards Caceres-Martinez, Johnny Saavedra Lopez, Robert A Dagle, Ralph Gillespie, Hilikka I Kenttämä, and Gozdem Kilaz. Influence of blending cycloalkanes on the energy content, density, and viscosity of jet-a. *Fuel*, 358 :129986, 2024.

Rafael S. Capaz, Elisa Guida, Joaquim E.A. Seabra, Patricia Osseweijer, and John A. Posada. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels : costs and potential. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(2) :502–524, mar 2021. ISSN 19321031. doi : 10.1002/BBB.2168.

Miguel A Carriquiry, Xiaodong Du, and Govinda R Timilsina. Second generation biofuels : Economics and policies. *Energy policy*, 39(7) :4222–4234, 2011.

Lucas Chancel, Alex Hough, and Tançrède Voituriez. Reducing Inequalities within Countries : Assessing the Potential of the Sustainable Development Goals. *Global Policy*, 9(1) :5–16, feb 2018.

ISSN 17585899. doi : 10.1111/1758-5899.12511. URL <https://onlinelibrary-wiley-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/doi/full/10.1111/1758-5899.12511><https://onlinelibrary-wiley-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/doi/abs/10.1111/1758-5899.12511><https://onlinelibrary-wiley-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/doi/abs/10.1111/1758-5899.12511>

Hsun Chao, Datu Buyung Agusdinata, Daniel DeLaurentis, and Ellen B. Stechel. Carbon offsetting and reduction scheme with sustainable aviation fuel options : Fleet-level carbon emissions impacts for U.S. airlines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75 :42–56, oct 2019. ISSN 13619209. doi : 10.1016/j.trd.2019.08.015.

Dorothee Charlier. Explaining the energy performance gap in buildings with a latent profile analysis. *Energy Policy*, 156 :112480, 2021. doi : 10.1016/j.enpol.2021.112480.

R. Chen, Z. Qin, J. Han, M. Wang, F. Taheripour, W. Tyner, and J. Duffield. Life cycle energy and greenhouse gas emission effects of biodiesel in the united states with induced land use change impacts. *Bioresource Technology*, 251 :249–258, 2018.

T. L. Chen and M. Wang. Environmental regulation, endowment characteristics and income inequality : A general equilibrium analysis. *Journal of Environmental Management*, 368 :122118, 2024.

Xiaoguang Chen and Madhu Khanna. Food vs. fuel : The effect of biofuel policies. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(2) :289–295, jan 2013. ISSN 00029092. doi : 10.1093/ajae/aas039. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1093/ajae/aas039>.

Francesco Cherubini, Gregory P. Peters, T. Berntsen, A. H. Strømman, and E. Hertwich. Co2 emissions from biomass combustion for bioenergy : Atmospheric decay and contribution to global warming. *Global Change Biology Bioenergy*, 3(5) :413–426, 2011.

Lubhan Cherwoo, Ishika Gupta, G. Flora, Ritu Verma, Muskaan Kapil, Shailendra Kumar Arya, Balasubramani Ravindran, Kuan Shiong Khoo, Shashi Kant Bhatia, Soon Woong Chang, Chawalit Ngamcharussrivichai, and Veeramuthu Ashokkumar. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels : A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, dec 2023. ISSN 22131388. doi : 10.1016/j.seta.2023.103503.

David Chiaramonti. Sustainable aviation fuels : The challenge of decarbonization. *Energy Procedia*, 158 : 1202–1207, 2019. ISSN 18766102. doi : 10.1016/j.egypro.2019.01.308.

David Chiaramonti, Giacomo Talluri, George Vourliotakis, Lorenzo Testa, Matteo Prussi, and Nicolae Scarlat. Can lower carbon aviation fuels (Lcaf) really complement sustainable aviation fuel (saf) towards eu aviation decarbonization? *Energies*, 14(19) :6430, oct 2021. ISSN 19961073. doi : 10.3390/en14196430. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6430/htm><https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6430>.

Nicole Condon, Heather Klemick, and Ann Wolverton. Impacts of ethanol policy on corn prices : A review and meta-analysis of recent evidence. *Food Policy*, 51 :63–73, 2015.

Diego F Correa, Hawthorne L Beyer, Hugh P Possingham, Joseph E Fargione, Jason D Hill, and Peer M Schenk. Microalgal biofuel production at national scales : Reducing conflicts with agricultural lands and biodiversity within countries. *Energy*, 215 :119033, jan 2021. ISSN 03605442. doi : 10.1016/j.energy.2020.119033. URL <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119033><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054422032140X>.

F. F. Costa, D. T. de Oliveira, Y. P. Brito, G. N. da Rocha Filho, C. G. Alvarado, A. M. Balu, and L. A. S. do Nascimento. Lignocellulosics to biofuels : an overview of recent and relevant advances. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 24 :21–25, 2020.

P. J. Crutzen, A. R. Mosier, K. A. Smith, and W. Winiwarter. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(4) :11191–11205, 2007.

Virginia H Dale, Keith L Kline, Lynn L Wright, Robert D Perlack, Mark Downing, and Robin L Graham. Interactions among bioenergy feedstock choices, landscape dynamics, and land use. *Ecological Applications*, 21(4) :1039–1054, 2011.

Kyle Frankel Davis, Maria Cristina Rulli, and Paolo D’Odorico. The global land rush and climate change. *Earth’s Future*, 3(8) :298–311, 2015. doi : <https://doi.org/10.1002/2014EF000281>. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014EF000281>.

Sierk de Jong, Ric Hoefnagels, Elisabeth Wetterlund, Karin Pettersson, André Faaij, and Martin Junginger. Cost optimization of biofuel production – The impact of scale, integration, transport and supply chain configurations. *Applied Energy*, 195 :1055–1070, jun 2017. ISSN 03062619. doi : 10.1016/j.apenergy.2017.03.109.

Sierk de Jong, Joost van Stralen, Marc Londo, Ric Hoefnagels, Andre Faaij, and Martin Junginger. Renewable jet fuel supply scenarios in the European Union in 2021–2030 in the context of proposed biofuel policy and competing biomass demand. *Gcb Bioenergy*, 10(9):661–682, 2018.

Ayhan Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8):2106–2116, 2008. ISSN 01968904. doi:10.1016/j.enconman.2008.02.020.

Ayhan Demirbas. Biofuels securing the planet’s future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 50(9):2239–2249, 2009. doi:10.1016/j.enconman.2009.05.010.

S. Dietz, A. Bowen, C. Dixon, and P. Gradwell. Tipping points in the climate system and the economics of climate change. *Nature Climate Change*, 11(4):302–310, 2021. doi:10.1038/s41558-021-00909-8. URL <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00909-8>.

Ira I. Dorband, Michael Jakob, Matthias Kalkuhl, and Jan Christoph Steckel. Poverty and distributional effects of carbon pricing in low- and middle-income countries—a global comparative analysis. *World Development*, 115:246–257, 2019. doi:10.1016/j.worlddev.2018.11.015.

Jerome Dumortier, Miguel Carriquiry, and Amani Elobeid. Where does all the biofuel go? Fuel efficiency gains and its effects on global agricultural production. *Energy Policy*, 148:111909, 2021. ISSN 03014215. doi:10.1016/j.enpol.2020.111909. URL <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111909>.

EASAC. Science Advice for the Benefit of Europe EASAC policy report 44. 2022. URL <https://easac.eu/fileadmin/PDF{s}/reports{s}/statements/Regenerative{s}Agriculture/EASAC{s}RegAgri{s}Web{s}290422.pdf>.

EC. Directive (eu) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources, 2018. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>.

EC. The European Green Deal, 2020a. URL [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_en.pdf).

EC. *The Renewable Energy Directive: A new framework for advanced biofuels*. Brussels, 2020b.

EC. *The impact of energy & climate policies on income inequality and energy poverty*. Publications Office of the European Union, 2022. URL <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/>

[publication/0c312b47-4710-11ed-92ed-01aa75ed71a1](#). DOI : 10.2833/295622, ISBN : 978-92-76-52428-1.

EC. Refueled aviation regulation. 2023. Accessed : 2024-11-09.

ECA). The EU's support for sustainable biofuels in transport - An unclear route ahead. Technical report, European Court of Auditors (ECA), 2023.

EEA. Ozone-depleting substances 2020. Technical report, European Environment Agency, 9 2020. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/ozone-depleting-substances-2020/2020>.

EEA. Trends and projections in Europe 2021. Technical report, European Environment Agency, 2021. URL <http://www.eea.europa.eu>.

EEA. Trends and projections in Europe 2023. Technical report, European Environment Agency, 2023. URL <http://www.eea.europa.eu>.

Janine Eguienta, Simon Wellenreiter, Alexandru Andrei, Virginie Andrieux, Marianne Fontvieille, Yvain Journée, Jean Lauerjat, Évelyne Misak, Frédéric Nauroy, and Élodie Ricaud. Chiffres clés des énergies renouvelables. Technical report.

Elissavet Emmanouilidou, Sophia Mitkidou, Agapios Agapiou, and Nikolaos C Kokkinos. Solid waste biomass as a potential feedstock for producing sustainable aviation fuel : A systematic review. *Renewable Energy*, 206 :960–1481, 2023. doi : 10.1016/j.renene.2023.02.113. URL <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.113>.

Johannes Emmerling and Massimo Tavoni. Representing inequalities in integrated assessment modeling of climate change. *One Earth*, 4(2) :177–180, feb 2021. ISSN 25903322. doi : 10.1016/j.oneear.2021.01.013. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590332221000592>.

EPA. Renewable fuel standard program. 2021. URL <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>.

Edwin Santiago Rios Escalante, Luth Silva Ramos, Christian J. Rodriguez Coronado, and João Andrade de Carvalho Júnior. Evaluation of the potential feedstock for biojet fuel production : Focus in the Brazilian context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 2022. ISSN 18790690. doi : 10.1016/j.rser.2021.111716. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111716>.

European Commission. Reducing emissions from aviation, 2021. URL [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation\\_en#:~:text=How%20big%20is%20EU%20aviation's,and%20a%20non%2DEU%20country](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation_en#:~:text=How%20big%20is%20EU%20aviation's,and%20a%20non%2DEU%20country).

Tatiana Falcão. Highlights of the United Nations Handbook on Carbon Taxation. *Intertax*, 49(11): 897–914, 2021. ISSN 18758347.

FAO. UBET Unified Bioenergy Terminology Wood Energy Programme. Technical report, 2004.

FAO. *The State of Food and Agriculture 2020*. 2020. URL <http://www.fao.org/3/cb1393en/CB1393EN.pdf>.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022 : Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2022. URL <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc0639en/>.

J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867):1235–1238, 2008. doi : 10.1126/science.1152747.

Ondrej Filip, Karel Janda, Ladislav Kristoufek, and David Zilberman. Food versus fuel : An updated and expanded evidence. *Energy Economics*, 82 :152–166, aug 2019. ISSN 01409883. doi : 10.1016/j.eneco.2017.10.033. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988317303742>.

Ana Carolina Oliveira Fiorini, Gerd Angelkorte, Pedro Luiz Maia, Clarissa Bergman-Fonte, Clarissa Vicente, Taísa Morais, Lucas Carvalho, Marianne Zanon-Zotin, Alexandre Szklo, Roberto Schaeffer, and Joana Portugal-Pereira. Sustainable aviation fuels must control induced land use change : an integrated assessment modelling exercise for Brazil. *Environmental Research Letters*, 18(1), 2023. ISSN 17489326. doi : 10.1088/1748-9326/acae1.

G. Fischer, S. Prieler, H. van Velthuizen, G. Berndes, A. Faaij, M. Londo, and M. de Wit. Biofuel production potentials in europe : Sustainable use of cultivated land and pastures, part ii : Land use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 34(2):173–187, 2010a.

G. Fischer, S. Prieler, H. van Velthuizen, S. M. Lensink, M. Londo, and M. de Wit. Biofuel production potentials in europe : Sustainable use of cultivated land and pastures. part i : Land productivity potentials. *Biomass and Bioenergy*, 34(2):159–172, 2010b.

- Gregg G Fleming, Ivan de Lepinay, and Roger Schaufele. Environmental Trends in Aviation to 2050 Environmental Trends in Aviation to 2050 Background. In *Innovation for a Green Transition - Environmental Report 2022*, chapter 1, pages 17–23. ICAO, 2022. URL <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Post-Covid-Forecasts-Scenarios.aspx>.
- R. Fouquet. A brief history of energy. In *International Handbook on the Economics of Energy*. Edward Elgar Publishing, 2009.
- R. Fouquet. Lessons from energy history for climate policy : Technological change, demand and economic development. *Energy Research & Social Science*, 22 :79–93, 2016.
- R. Fouquet and P. J. Pearson. A thousand years of energy use in the united kingdom. *The Energy Journal*, 19(4) :1–41, 1998.
- P. G. Fredriksson, E. Neumayer, S. Gates, and R. Damania. Environmentalism, democracy, and pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management*, 49(3) :328–343, 2005. doi : 10.1016/j.jeem.2004.05.001.
- Manuel Frondel, Stephan Sommer, and Colin Vance. The burden of Germany’s energy transition : An empirical analysis of distributional effects. *Economic Analysis and Policy*, 45 :89–99, 2015. ISSN 03135926. doi : 10.1016/j.eap.2015.01.004.
- Don Fullerton and Erich Muehlegger. Who bears the economic costs of environmental regulations? Working Paper w23677, National Bureau of Economic Research, 2017. URL <https://www.nber.org/papers/w23677>.
- S. Gao, P. Zhou, and H. Zhang. Does energy transition help narrow the urban-rural income gap? evidence from china. *Energy Policy*, 182 :1113759, 2023.
- A. Gasparatos, S. Mudombi, B. S. Balde, G. P. Von Maltitz, F. X. Johnson, C. Romeu-Dalmau, and K. J. Willis. Local food security impacts of biofuel crop production in southern africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154 :111875, 2022.
- Alexandros Gasparatos, Christopher NH Doll, Miguel Esteban, Abubakari Ahmed, and Tabitha A Olang. Renewable energy and biodiversity : Implications for transitioning to a green economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 :161–184, 2017.

Andreas Goldthau and Benjamin K Sovacool. The uniqueness of the energy security, justice, and governance problem. *Energy policy*, 41 :232–240, 2012.

Wolfgang Grimme. The Introduction of Sustainable Aviation Fuels—A Discussion of Challenges, Options and Alternatives. *Aerospace*, 10(3) :218, feb 2023. ISSN 22264310. doi : 10.3390/aerospace10030218. URL <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/218/html><https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/218>.

Gene M Grossman and Alan B Krueger. Environmental impacts of a North American free trade agreement. Technical report, NBER, 1991. URL <https://www.nber.org/papers/w3914>.

Gene M. Grossman and Alan B. Krueger. Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2) :353–377, 1995. doi : 10.2307/2118443.

Mingxin Guo, Weiping Song, and Jeremy Buhain. Bioenergy and biofuels : History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 :712–725, 2015. doi : 10.1016/j.rser.2014.10.013.

Sarabjeet Hayer. DIRECTORATE GENERAL FOR INTERNAL POLICIES POLICY DEPARTMENT A : ECONOMIC AND SCIENTIFIC POLICY Fossil Fuel Subsidies. Technical report, European Union, Brussels, 2017.

Gal Hochman, Steven Sexton, and David Zilberman. Food and Biofuel in a Global Environment. In *Handbook of Bioenergy Economics and Policy*, pages 267–286. Springer New York, New York, NY, 2010a. doi : 10.1007/978-1-4419-0369-3\_16. URL [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-0369-3\\_{ }16](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-0369-3_{ }16).

Gal Hochman, Steven Sexton, and David D Zilberman. The Economics of Trade, Biofuel, and the Environment. *Uc Bekerley : Department of Agricultural and Resource Economics*, pages —, 2010b. URL <https://escholarship.org/uc/item/5h03r349>.

Gal Hochman, Deepak Rajagopal, Govinda Timilsina, and David Zilberman. Quantifying the causes of the global food commodity price crisis. *Biomass and Bioenergy*, 68 :106–114, sep 2014. ISSN 09619534. doi : 10.1016/j.biombioe.2014.06.012. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.06.012><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953414003146>.

Alistair Hunt and Julia Ferguson. Distributional impacts : Intra-national, international and inter-temporal aspects of equity in adaptation. In *Routledge Handbook of the Economics of*

*Climate Change Adaptation*, chapter 6, page 18. Routledge, 2014. doi : <https://doi.org/10.4324/9780203095201>. URL <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203095201-8/distributional-impacts-alistair-hunt-julia-ferguson>.

Nabila A Huq, Glenn R Hafenstine, Xiangchen Huo, Hannah Nguyen, Stephen M Tiff, Davis R Conklin, Daniela Stück, Jim Stunkel, Zhibin Yang, Joshua S Heyne, et al. Toward net-zero sustainable aviation fuel with wet waste-derived volatile fatty acids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(13): e2023008118, 2021.

IATA. For more information : IATA Global Outlook for Air Transport Industry Statistics. Technical report, 2023a.

IATA. Global Outlook for Air Transport A local sweet spot December 2023 2 Global Outlook for Air Transport-A local sweet spot Contents. Technical report, 2023b. URL <http://www.thisismotif.com>.

ICAO. The world of air transport in 2019. Technical report, 2019. URL <https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019.aspx>.

ICAO. The world of air transport : Presentation of 2020 air transport statistical results. Technical report, 2020. URL <https://www.icao.int/annual-report-2020/Pages/the-world-of-air-transport-in-2020-statistical-results.aspx>.

ICAO. The world of air transport : Presentation of 2021 air transport statistical results. Technical report, 2021. URL <https://www.icao.int/sustainability/WorldofAirTransport/Pages/presentation-of-2021-air-transport-statistical-results.aspx>.

IEA. Biomass : A review of global production and consumption. Technical report, International Energy Agency, 2003. URL <https://www.iea.org/reports/biomass-2023>.

IEA. Renewable energy essentials : Biomass. Technical report, International Energy Agency, 2010. URL <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-essentials-biomass>.

IEA. Biofuels 2017 : Analysis and forecasts. Technical report, International Energy Agency, 2017. URL <https://www.iea.org/reports/biofuels-2017>.

IEA). IEA-Bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 121 :iii–viii, feb 2019. ISSN 09619534. doi : 10.1016/S0961-9534(19)30020-0. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/>

S0961953419300200.

IEA. Net zero by 2050 : A roadmap for the global energy sector, 2021a. URL <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

IEA. Biofuels. 2021b. URL <https://www.iea.org/reports/biofuels>.

IEA. Co2 emissions in 2022. Technical report, International Energy Agency, 2022a. URL [www.iea.org](http://www.iea.org).

IEA. *Energy Technology Perspectives 2022*. IEA, 2022b.

IEA. Tracking Clean Energy Progress 2023. Technical report, International Energy Agency, 2023a. URL <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>.

IEA. Renewables 2023. Technical report, International Energy Agency (IEA), 2023b. URL <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.

IEA. World energy outlook. Technical report, International Energy Agency, 2023c. URL <http://vnk.fi/tiedostot/julkinen/talousneuvosto/muistiot/TN-esitykset{ }14-04-07.pdf>.

IEA. Renewables 2023. Technical report, International Energy Agency, 2023d. URL [www.iea.org](http://www.iea.org).

IEA. Energy end-uses and efficiency indicators database documentation. Technical report, International Energy Agency, 2023e. URL <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-efficiency-indicators{#}documentation>.

IPCC. *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IPCC. Ipcc, 2022, summary for policymakers, wg iii. Technical Report I, Working Group III contribution to the Sixth Assessment, 2022a. URL [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

IPCC. *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, 2022b. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IRENA. Renewable energy capacity highlights. Technical report, International Renewable Energy Agency, 2020a.

IRENA. Energy Statistics 2020. Technical report, International Renewable Energy Agency, 2020b.

IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2020*. 2020c. ISBN 978-92-9260-244-4.

IRENA. Renewable energy capacity highlights. Technical Report March 2021, International Renewable Energy Agency, 2021a.

IRENA. Biofuels : A pathway to decarbonizing transport, 2021b.

IRENA. RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2023. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023a. URL [www.irena.org](http://www.irena.org).

IRENA. Renewable capacity highlights. Technical Report April, International Renewable Energy Agency, 2023b. URL [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA\\_{\\_}-RE\\_{\\_}Capacity\\_{\\_}Highlights\\_{\\_}2023.pdf?rev=a4a69a28b3a444f1b4ff02f6a6664bb4{&}hash=553011612FECB16B409DA315652AB9ED](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_{_}-RE_{_}Capacity_{_}Highlights_{_}2023.pdf?rev=a4a69a28b3a444f1b4ff02f6a6664bb4{&}hash=553011612FECB16B409DA315652AB9ED).

Michael Jakob and Jan Christoph Steckel. How climate change mitigation could harm development in poor countries. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 5(2) :161–168, 2014. doi : 10.1002/wcc.260.

Changmin Jiang and Hangjun Yang. Carbon tax or sustainable aviation fuel quota. *Energy Economics*, 103, nov 2021. ISSN 01409883. doi : 10.1016/j.eneco.2021.105570.

Nicholas Kaldor. *Causes of the Slow Rate of Economic Growth of the United Kingdom : An Inaugural Lecture*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1966.

Seungwoo Kang, Sandrine Selosse, and Nadia Maïzi. Contribution of global GHG reduction pledges to bioenergy expansion. *Biomass and Bioenergy*, 111 :142–153, 2018. ISSN 18732909. doi : 10.1016/j.biombioe.2017.05.017. URL <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.017>.

M. Khanna, D. Rajagopal, and D. Zilberman. Lessons learned from us experience with biofuels : Comparing the hype with the evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 15(1) :67–86, 2021.

Masami Kojima, Donald Mitchell, and William Ward. Considering trade policies for liquid biofuels, 2007. URL <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17941>.

Deepak Kumar, Stephen P. Long, and Vijay Singh. Biorefinery for combined production of jet fuel and ethanol from lipid-producing sugarcane : a techno-economic evaluation. *GCB Bioenergy*, 10(2) :92–107, feb 2018. ISSN 17571707. doi : 10.1111/gcbb.12478.

- P. Lamers, T. A. F. Avelino, Y. Zhang, E. C. D. Tan, B. Young, J. Vendries, and H. Chum. Potential socioeconomic and environmental effects of an expanding us bioeconomy : an assessment of near-commercial cellulosic biofuel pathways. *Environmental Science Technology*, 55(8) :5496–5505, 2021.
- Tyler J. Lark, Nathan P. Hendricks, Aaron Smith, and Holly K. Gibbs. Environmental outcomes of the us renewable fuel standard. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(9), 2022.
- Corinne Le Quéré, R. M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Hauck, J. Pongratz, P. A. Pickers, J. I. Korsbakken, and G. P. Peters. Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11 :1783–1838, 2019. doi : 10.5194/essd-11-1783-2019.
- Howard D. Leathers. Allocable fixed inputs as a cause of joint production : an empirical investigation. *Agricultural Economics*, 7(2) :109–124, 1992. ISSN 15740862. doi : 10.1016/0169-5150(92)90002-G.
- C. Leibensperger, P. Yang, Q. Zhao, S. Wei, and X. Cai. The synergy between stakeholders for cellulosic biofuel development : Perspectives, opportunities, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137 :110613, 2021.
- Q. Li, Y. Zhang, and G. Hu. Techno-economic analysis of advanced biofuel production based on bio-oil gasification. *Bioresourcetechnology*, 191 :88–96, 2015. doi : 10.1016/j.biortech.2015.04.039.
- Cherng Yuan Lin and Cherie Lu. Development perspectives of promising lignocellulose feedstocks for production of advanced generation biofuels : A review, feb 2021a. ISSN 18790690.
- Cherng-Yuan Lin and Cherie Lu. Development perspectives of promising lignocellulose feedstocks for production of advanced generation biofuels : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136 : 110445, 2021b.
- Thomas Lux. Chapter 3 - stochastic behavioral asset-pricing models and the stylized facts. In Thorsten Hens and Klaus Reiner Schenk-Hoppé, editors, *Handbook of Financial Markets : Dynamics and Evolution*, Handbooks in Finance, pages 161–215. North-Holland, San Diego, 2009. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-012374258-2.50007-5>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742582500075>.
- Chris Malins. How does biofuel demand affect food markets?, July 2023. Available at : <https://www.cerulogy.com>.

Mohsen Mandegari, Mahmood Ebadian, and Jack (John) Saddler. The need for effective life cycle assessment (lca) to enhance the effectiveness of policies such as low carbon fuel standards (lcf's). *Energy Policy*, 181 :113723, 2023. ISSN 0301-4215. doi : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113723>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523003087>.

R P Manes and Vernon L Smith. Economic Joint Cost Theory and Accounting Practice. *Source : The Accounting Review*, 40(1) :31-35, 1965.

Sanna Markkanen and Annela Anger-Kraavi. Social impacts of climate change mitigation policies and their implications for inequality. *Climate Policy*, 19(7) :827-844, aug 2019. ISSN 1469-3062. doi : 10.1080/14693062.2019.1596873. URL <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tcpo20https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1596873>.

V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, et al. *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018. URL <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

Inge Mayeres, Stef Proost, Eef Delhaye, Philippe Novelli, Sjaak Conijn, Inmaculada Gómez-Jiménez, and Daniel Rivas-Brousse. Climate ambitions for european aviation : Where can sustainable aviation fuels bring us? *Energy Policy*, 175 :113502, 2023. ISSN 0301-4215. doi : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113502>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523000873>.

Andrea Mazzone, D. K. Fulkaxò Cruz, S. Tumwebaze, M. Ushigua, P. A. Trotter, A. E. Carvajal, R. Schaeffer, and R. Khosla. Indigenous cosmologies of energy for a sustainable energy future. *Nature Energy*, 8 :19-29, 2023. doi : 10.1038/s41560-022-01121-7. URL <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01121-7>.

M. Mazzucato and C. Perez. Innovation as growth policy. In *The Triple Challenge for Europe*, pages 229-264. Oxford University Press, 2015.

Kenneth B Medlock III and Ronald Soligo. Economic development and end-use energy demand. *The*

*Energy Journal*, 22(2) :77–105, 2001.

K. Moustakas, M. Loizidou, M. Rehan, and A. S. Nizami. A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems : Key challenges and future perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119 :109418, 2020. doi : 10.1016/j.rser.2019.109418.

Sherry A Mueller, James E Anderson, and Timothy J Wallington. Impact of biofuel production and other supply and demand factors on food price increases in 2008. *Biomass and Bioenergy*, 35(5) :1623–1632, may 2011. ISSN 09619534. doi : 10.1016/j.biombioe.2011.01.030. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953411000316>.

S. G. Mungodla, L. Z. Liganiso, S. Mlambo, and T. Motaung. Economic and technical feasibility studies : technologies for second generation biofuels. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 17(4) :670–704, 2019.

S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout, and A. K. Dalai. Production of first and second generation biofuels : a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2) :578–597, 2010a. doi : 10.1016/j.rser.2009.10.003.

Satya Narayan Naik, Vaibhav V Goud, Prasant K Rout, and Ajay K Dalai. Production of first and second generation biofuels : a comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2) :578–597, 2010b.

Kok Siew Ng, Danial Farooq, and Aidong Yang. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, oct 2021. ISSN 18790690. doi : 10.1016/j.rser.2021.111502. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111502>.

Per Norberg. Will a quota obligation fly? Prospects for introducing a renewable fuel quota obligation on Sweden's jet fuel market. Technical report, 2014.

William D. Nordhaus. *The Climate Casino : Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. 2013. URL <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=TRf7AAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=The+climate+casino:+Risk,+uncertainty,+and+economics+for+a+warming+world&ots=2hBhffSxWx&sig=RAeTFi9lf3mfmDEfFjaFB{ }nlssI{ }redir{ }esc=y{#}v=onepage{ }q=Theclimatecasino{ }3ARisk{ }2Cuncerta>.



750X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.106030>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X22002200>.

S. Pang. Promises and challenges for woody biomass to biofuels and biochemicals—a review. *NZ Journal of Forestry*, 64(3) :17, 2019.

Parlement Européen. Directive 2013/36/UE du Parlement européen et du Conseil, oct 2013.

Pieter Pauw, Clara Brandi, Carmen Richerzhagen, Steffen Bauer, and Hanna Schmole. Different perspectives on differentiated responsibilities : a state-of-the-art review of the notion of common but differentiated responsibilities in international negotiations, 2014. URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:zbw:diedps:62014>.

Jan Pechstein, Nils Bullerdiek, and Martin Kaltschmitt. A “book and claim”-approach to account for sustainable aviation fuels in the eu-ets – development of a basic concept. *Energy Policy*, 136 :111014, 2020. ISSN 0301-4215. doi : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519306019>.

Stephan Pfister and Laura Scherer. Uncertainty analysis of the environmental sustainability of biofuels. *Energy, Sustainability and Society*, 5 :1–12, 2015.

B. Phalan, R. E. Green, L. V. Dicks, G. Dotta, C. Feniuk, A. Lamb, and A. Balmford. How can higher-yield farming help to spare nature? *Science*, 351(6272) :450–451, 2016. doi : 10.1126/science.aad0055.

David Pimentel and Tad W. Patzek. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Research*, 14(1) :65–76, 2005.

Matteo Prussi, Uisung Lee, Michael Wang, Robert Malina, Hugo Valin, Farzad Taheripour, César Velarde, Mark D. Staples, Laura Lonza, and James I. Hileman. CORSIA : The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 2021. ISSN 18790690. doi : 10.1016/j.rser.2021.111398. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>.

Steve Pye, Audrey Dobbins, and Claire Baffert. Energy poverty and vulnerable consumers in the energy sector across the eu : Analysis of policies and measures.

D. Rajagopal, S. E. Sexton, D. Roland-Holst, and D. Zilberman. Challenge of biofuel : Filling the tank without emptying the stomach? *Environmental Research Letters*, 2(4) :044004, oct 2007. ISSN 17489326.

doi : 10.1088/1748-9326/2/4/044004. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/2/4/044004>.

M. Raud, T. Kikas, O. Sippula, and N.J. Shurpali. Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111 :44–56, 2019. ISSN 1364-0321. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.020>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119303338>.

J. Reilly and S. Paltsev. Biomass energy and competition for land. In *Economic Analysis of Land Use in Global Climate Change Policy*, pages 202–225. Routledge, 2009.

R. C. Rial. Biofuels versus climate change : Exploring potentials and challenges in the energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196 :114369, 2024.

M. V. Rodionova, A. M. Bozieva, S. K. Zharmukhamedov, Y. K. Leong, J. C. W. Lan, A. Veziroglu, and S. I. Allakhverdiev. A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3) :1481–1498, 2022. doi : 10.1016/j.ijhydene.2021.11.121.

Jeffrey D Sachs. *The Age of Sustainable Development*. Columbia University Press, 2015.

N. Scarlat, F. Fahl, E. Lugato, F. Monforti-Ferrario, and J. F. Dallemand. Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 122 :257–269, 2019. ISSN 18732909. doi : 10.1016/j.biombioe.2019.01.021. URL <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.021>.

Noemi Schmitt and Frank Westerhoff. On the bimodality of the distribution of the sp 500's distortion : Empirical evidence and theoretical explanations. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 80 : 34–53, 2017. ISSN 0165-1889. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2017.05.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165188917300994>.

R. Schnepf. Cellulosic ethanol : Feedstocks, conversion technologies, economics, and policy options. *Asia Pacific Journal of Life Sciences*, 5(3) :171, 2011.

Corinne D Scown, William W Nazaroff, Umakant Mishra, Bret Strogon, Agnes B Lobscheid, Eric Masanet, Nicholas J Santero, Arpad Horvath, and Thomas E McKone. Lifecycle greenhouse gas implications of us national scenarios for cellulosic ethanol production. *Environmental Research Letters*, 7(1) :014011, 2012.

T. Searchinger, R. Heimlich, R. A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, and T. H. Yu. Use of us croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867):1238–1240, 2008a.

Timothy Searchinger, Ralph Heimlich, RA Houghton, Feng Dong, Amani Elobeid, Jacinto Fabiosa, Simla Tokgoz, Dermot Hayes, and Tim Yu. Use of u.s. croplands for biofuels increases greenhouse gases through land use change. *Science*, 319(5867):1238–1240, 2008b. URL <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1151861>.

Rut Serra, Iman Niknia, David Paré, Brian Titus, Bruno Gagnon, and Jérôme Laganière. From conventional to renewable natural gas : can we expect GHG savings in the near term? *Biomass and Bioenergy*, 131, 2019. ISSN 18732909. doi : 10.1016/j.biombioe.2019.105396.

Baoping Shang. The poverty and distributional impacts of carbon pricing : Channels and policy implications, 2021. URL <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2021/06/25/The-Poverty-and-Distributional-Impacts-of-Carbon-Pricing-Channels-and-Policy-Implications>  
Accessed on October 10, 2024.

Iva Ridjan Skov and Noémi Schneider. Incentive structures for power-to-x and e-fuel pathways for transport in eu and member states. *Energy Policy*, 168 :113121, 2022. ISSN 0301-4215. doi : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113121>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421522003469>.

Giovanni Sorda, Martin Banse, and Claudia Kemfert. An overview of biofuel policies across the world. *Energy policy*, 38(11):6977–6988, 2010.

N. Stern. *The Economics of Climate Change : The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007.

Thomas Sterner. *Fuel Taxes and the Poor : The Distributional Effects of Gasoline Taxation and Their Implications for Climate Policy*. Routledge, 2012. ISBN 9780415518270. URL <https://www.routledge.com/Fuel-Taxes-and-the-Poor-The-Distributional-Effects-of-Gasoline-Taxation/Sterner/p/book/9780415518270>.

Mariusz Jerzy Stolarski, Kazimierz Warmiński, Michał Krzyżaniak, Ewelina Olba-Zięty, and Marta Akincza. Bioenergy technologies and biomass potential vary in Northern European countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 2020. ISSN 18790690. doi : 10.1016/j.rser.2020.110238.

Nicolas Taconet, Aurélie Méjean, and Céline Guivarch. Influence of climate change impacts and mitigation costs on inequality between countries. *Climatic Change*, 160(1) :15–34, may 2020. ISSN 0165-0009. doi : 10.1007/s10584-019-02637-w. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10584-019-02637-w>.

F. Taheripour, T. W. Hertel, W. E. Tyner, J. F. Beckman, and D. K. Birur. Biofuels and their by-products : Global economic and environmental implications. *Biomass and Bioenergy*, 34(3) :278–289, 2010.

F. Taheripour, H. Cui, and W. E. Tyner. The economics of biofuels. In *The Routledge Handbook of Agricultural Economics*, pages 637–657. 2018.

Farzad Taheripour, Xin Zhao, and Wallace E. Tyner. The impact of considering land intensification and updated data on biofuels land use change and emissions estimates. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), jul 2017. ISSN 17546834. doi : 10.1186/s13068-017-0877-y.

Farzad Taheripour, Ehsanreza Sajedinia, and Omid Karami. Oilseed Cover Crops for Sustainable Aviation Fuels Production and Reduction in Greenhouse Gas Emissions Through Land Use Savings. *Frontiers in Energy Research*, 9, jan 2022. ISSN 2296-598X. doi : 10.3389/fenrg.2021.790421. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.790421/full>.

Govinda R. Timilsina and A. Shrestha. How much hope should we have for biofuels? *Energy*, 36(4) : 2055–2069, 2011.

David Timmons and Rob Terwel. Economics of aviation fuel decarbonization : A preliminary assessment. *Journal of Cleaner Production*, 369 :133097, 2022. ISSN 09596526. doi : 10.1016/j.jclepro.2022.133097. URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133097>.

Julia Tomei and Richard Helliwell. Food versus fuel? Going beyond biofuels. *Land Use Policy*, 56 :320–326, 2016. ISSN 02648377. doi : 10.1016/j.landusepol.2015.11.015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.11.015>.

UNFCCC. Paris agreement, 2015.

USDA. *World Agricultural Production*. 2020. URL <https://apps.fas.usda.gov/gainfiles/2020/2020-11-09/2020%20World%20Agricultural%20Production%20Report.pdf>.

Koenraad Van Meerbeek, Bart Muys, and Martin Hermy. Lignocellulosic biomass for bioenergy beyond intensive cropland and forests, 2019. ISSN 18790690.

- Hannah H. E. Van Zanten, Mario Herrero, Ollie Van Hal, Elin Rööös, Adrian Muller, Tara Garnett, Pierre J. Gerber, Christian Schader, and Imke J. M. De Boer. Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. *Global Change Biology*, 24(9) :4185–4194, 2018. doi : <https://doi.org/10.1111/gcb.14321>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.14321>.
- F. Vona and F. Patriarca. Income inequality and the development of environmental technologies. *Ecological Economics*, 70(11) :2201–2213, 2011.
- Meng Wang, Raf Dewil, Kyriakos Maniatis, John Wheeldon, Tianwei Tan, Jan Baeyens, and Yunming Fang. Biomass-derived aviation fuels : Challenges and perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*, 74 :31–49, sep 2019. ISSN 03601285. doi : 10.1016/j.peccs.2019.04.004.
- WB. *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. World Bank Group, Washington, DC, 2021. URL <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>. Accessed : October 10, 2024.
- M. Wise, J. Dooley, P. Luckow, K. Calvin, and P. Kyle. Agriculture, land use, energy and carbon emission impacts of global biofuel mandates to mid-century. *Applied Energy*, 114 :763–773, 2014.
- WWF. Palm oil : The good, the bad, and the ugly, 2019. URL <https://www.worldwildlife.org/pages/palm-oil-the-good-the-bad-and-the-ugly>.
- H. Xu, U. Lee, and M. Wang. Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, dec 2020. ISSN 18790690. doi : 10.1016/j.rser.2020.110144.
- Jie Yang, Zhong Xin, Quan (Sophia) He, Kenneth Corscadden, and Haibo Niu. An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *Fuel*, 237 :916–936, feb 2019. ISSN 00162361. doi : 10.1016/j.fuel.2018.10.079.
- L. Yang, X. C. Wang, M. Dai, B. Chen, Y. Qiao, H. Deng, and Y. Wang. Shifting from fossil-based economy to bio-based economy : Status quo, challenges, and prospects. *Energy*, 228 :120533, 2021.
- Libing Zhang, Terri L. Butler, and Bin Yang. Recent trends, opportunities and challenges of sustainable aviation fuel. In *Green Energy to Sustainability : Strategies for Global Industries*, pages 85–110. 2020. ISBN 9781119152057. doi : 10.1002/9781119152057.ch5.
- Wei Zhang, Elaine A Yu, Scott Rozelle, Jun Yang, and Siwa Msangi. The impact of biofuel growth on agriculture : Why is the range of estimates so wide? *Food Policy*, 38 :227–239, feb 2013. ISSN

03069192. doi : 10.1016/j.foodpol.2012.12.002. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.12.002><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306919212001273>.

Y. Zhang, M. Goldberg, E. Tan, and P. A. Meyer. Estimation of economic impacts of cellulosic biofuel production : a comparative analysis of three biofuel pathways. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10 (3) :281–298, 2016. doi : 10.1002/bbb.1632.

D. Zilberman, G. Hochman, S. Kaplan, and E. Kim. Political economy of biofuel. *Choices*, 29(1) :1–5, 2014.

David Zilberman, Deepak Rajagopal, Steven Sexton, Gal Hochman, and Teresa Serra. The Economics of Biofuels, food, and the Environment. In David Zilberman, Deepak Rajagopal, Steven Sexton, Gal Hochman, and Teresa Serra, editors, *The Economics of Alternative Energy Sources and Globalization*, pages 24–34. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS, mar 2011. ISBN 9781608056149. doi : 10.2174/978160805233211101010024. URL <http://www.eurekaselect.com/node/54467>.

David Zilberman, Gal Hochman, Deepak Rajagopal, Steve Sexton, and Govinda Timilsina. The impact of biofuels on commodity food prices : Assessment of findings. In *American Journal of Agricultural Economics*, volume 95, pages 275–281, 2013. doi : 10.1093/ajae/aas037.





## Annexe du chapitre 2

Dans cette partie, qui sera définitivement l'annexe pour le chapitre 1, on va présenter les différents résultats obtenus dans la résolution du modèle. D'une part, il y aura les résultats sans différence de revenu et d'autre part avec les différences de revenu.

A chaque niveau nous regarderons les résultats selon les conditions de l'équilibre de marché et selon l'optimum social. Dans chaque cas, on s'intéressera tout d'abord au prix des facteurs de production ( $r$  et  $s$ ), le prix du travail  $w$ , considéré comme numéraire, étant fixé à l'unité. Ensuite, on s'intéressera au ratio capital-travail qui, à l'aide de la part de chaque type d'énergie produite ( $\varepsilon_f, \varepsilon_b$ ), nous permettra de définir le régime de production de l'énergie selon les ressources disponibles dans l'économie (garde à l'idée que chaque point dans ce régime de production représente un pays  $t$  détenant un niveau de capital  $\bar{K}_t$  et de terre  $\bar{A}_t$ ). Ainsi, on pourra essayer d'identifier quel pays peut produire quel type d'énergie selon ses ressources. En général, le régime de production de l'énergie est délimité par les droites ( $k_{\varepsilon_f}, k_{\varepsilon_b}$ ). Après cela, le cas échéant, on déterminera le niveau de revenu  $I$  associé à chaque groupe, quand c'est à l'optimum social, on pourra déterminer le revenu implicite par les dépenses effectuées ( $p_X X + p_Y Y = I$ ). Dans cette première partie, on s'intéressera au cas où les deux types d'énergie sont produites, les cas extrêmes pouvant être dérivées facilement à partir de là.

Enfin, on calculera les quantités demandées en biens échangés ( $X, Y, E$ ), cette fois-ci, dans les trois cas possibles en termes de production d'énergie.

L'économie produit la nourriture  $X$ , les biens manufacturés  $Y$  et l'énergie ( $E = E^f + E^b$ ) à partir des ressources

Terre  $A$ , Capital  $K$  et Travail  $L$ . Les ressources du pays sont limitées de sortes que :

$$\begin{cases} \bar{K} & = K_E + K_Y \\ \bar{L} & = L_E + L_X + L_Y \\ \bar{A} - A_N & = A_E + A_X \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Fonction de production des biens :

$$\begin{cases} X & = b_X (L_X)^{\omega_x} (A_X)^{\sigma_x} (E_X)^{1-\varepsilon_x} \\ Y & = b_Y (L_Y)^{\omega_y} (K_Y)^{\rho_y} (E_Y)^{1-\varepsilon_y} \\ E^f & = b_{E^f} (L_{E^f})^{1-\rho_{E^f}} (K_E)^{\rho_{E^f}} \\ E^b & = b_{E^b} (L_{E^b})^{1-\sigma_{E^b}} (A_E)^{\sigma_{E^b}} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_{E^f} + \rho_{E^f} & = 1 \\ \omega_{E^b} + \sigma_{E^b} & = 1 \\ \sigma_x + \omega_x + (1 - \varepsilon_x) & = 1 \\ \rho_y + \omega_y + (1 - \varepsilon_y) & = 1 \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Avec l'égalité des prix de l'énergie quand les deux types sont produites, on a :

$$p_{E^f} = p_{E^b} \iff \frac{r}{w} = \left( \frac{b_{E^f} (\omega_{E^f})^{\omega_{E^f}} (\rho_{E^f})^{\rho_{E^f}}}{b_{E^b} (\omega_{E^b})^{\omega_{E^b}} (\sigma_{E^b})^{\sigma_{E^b}}} \left( \frac{s}{w} \right)^{\sigma_{E^b}} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \quad (\text{A.4})$$

#### A.1 MODÈLE AVEC ÉGALITÉ DE REVENU ET DE PRÉFÉRENCES ( $ME_R E_P$ )

Niveau de revenu identique :

$$\begin{cases} Rt & = \bar{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N) \\ I & = \frac{1}{L} Rt = \frac{1}{L} (\bar{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_N)) \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Fonction d'utilité :

$$\begin{cases} \text{Max}_{\{X,Y\}} & U(X, Y, N) = a_X u_X(X) + a_Y u_Y(Y) + a_N u_N(N) \\ s/c & p_X X + p_Y Y \leq I \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

#### A.1.1 RÉSULTATS SELON LES CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ

RATIO CAPITAL-TERRE, PRIX DES FACTEURS, RÉGIME DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ET DISTRIBUTION DE REVENU ASSOCIÉE

— Variation du ratio capital-travail :

$$\frac{\bar{K}}{\bar{A} - A_N} = \left( \frac{a_Y \rho_y + \varepsilon_f \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \sigma_x + \varepsilon_b \sigma_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{b_{E^b}}{b_{E^f}} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \quad (\text{A.7})$$

— Prix des facteurs de production ( $\varepsilon_f$  implicite), cela permet de dériver rapidement pour les cas extrêmes :

$$\begin{cases} r & = \left( \frac{a_Y \rho_y + \varepsilon_f \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + (\varepsilon_f \omega_{E^f} + \varepsilon_b \omega_{E^b}) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right) \\ s & = \left( \frac{a_X \sigma_x + \varepsilon_b \sigma_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + (\varepsilon_f \omega_{E^f} + \varepsilon_b \omega_{E^b}) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A} - A_N} \right) \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

— Le prix des facteurs de production lorsque les deux types d'énergie sont produite ( $0 < \varepsilon_f < 1$ ) :

$$\begin{cases} r_{mix}^{eq} & = \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{(b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{L}}{(b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} + (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N)} \right) \\ s_{mix}^{eq} & = \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{(b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{L}}{(b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} + (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N)} \right) \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

— Part de chaque type d'énergie produite lorsque  $0 < \varepsilon_f < 1$  :

$$\begin{cases} \varepsilon_f & = \frac{(a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))) (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} - a_Y \rho_y (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N)}{(a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)) \left( \sigma_{E^b} (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} + \rho_{E^f} (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \\ \varepsilon_b & = \frac{(a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))) (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) - a_X \sigma_x (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K}}{(a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)) \left( \sigma_{E^b} (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} + \rho_{E^f} (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

— Si  $\varepsilon_f = 1$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement l'énergie fossile est :

$$k_{\varepsilon_f}^{eq} = \bar{K} = \left( \frac{a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \sigma_x} \right) \left( \frac{b_{E^b}}{b_{E^f}} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.11})$$

- Si  $\varepsilon_f = 0$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement la bioénergie est :

$$k_{\varepsilon_b}^{eq} = \bar{K} = \left( \frac{a_Y \rho_Y}{a_X \sigma_X + \sigma_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{b_{E^b}}{b_{E^f}} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.12})$$

- Le niveau de revenu associé (avec  $\varepsilon_f$  implicite) :

$$\begin{cases} R_t &= \bar{L} \left( \frac{a_X \sigma_X + a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + a_Y \rho_Y + a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + (\varepsilon_f (\omega_{E^f} - \omega_{E^b}) + \omega_{E^b}) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \\ &= \bar{L} \left( \frac{a_X + a_Y}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

Donc, l'hypothèse que  $\rho_{E^f} = \sigma_{E^b}$  ou  $\omega_{E^f} = \omega_{E^b}$  revient à supposer un niveau de revenu moyen constant quel que soit le type d'énergie produit et consommé. Ce niveau de revenu est ainsi défini :

$$I_{MC}^{eq} = \left( \frac{a_X + a_Y}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \quad (\text{A.14})$$

#### QUANTITÉ PRODUITE POUR CHAQUE BIEN ÉCHANGÉ

- Quantité d'énergie consommée :

$$\begin{cases} E_{eq}^f &= b_{E^f} \left( \frac{\omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \bar{L} \right)^{\omega_{E^f}} \left( \frac{\rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_Y \rho_Y + \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \bar{K} \right)^{\rho_{E^f}} \\ E_{eq}^b &= b_{E^b} \left( \frac{\omega_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \bar{L} \right)^{\omega_{E^b}} \left( \frac{\sigma_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \sigma_X + \sigma_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} (\bar{A} - A_N) \right)^{\sigma_{E^b}} \\ E_{eq}^{mix} &= \left( \frac{\omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{L} \right)^{\omega_{E^f}} \\ &\quad \left( \frac{\rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \sigma_X + a_Y \rho_Y + \rho_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \left( (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} + (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \right) \right)^{\rho_{E^f}} \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

- Quantité de nourriture consommée :

$$\begin{cases} X_{E_{eq}^f} &= \left( \frac{a_X (b_X) (\omega_X)^{\omega_X} (\sigma_X)^{\sigma_X} (1 - \varepsilon_x)^{1 - \varepsilon_x}}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^f} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{1}{s_{E^f}^{eq}} \right)^{\sigma_X} \left( \frac{1}{p_{E^f}^{eq}} \right)^{1 - \varepsilon_x} \\ X_{E_{eq}^b} &= \left( \frac{a_X (b_X) (\omega_X)^{\omega_X} (\sigma_X)^{\sigma_X} (1 - \varepsilon_x)^{1 - \varepsilon_x}}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{1}{s_{E^b}^{eq}} \right)^{\sigma_X} \left( \frac{1}{p_{E^b}^{eq}} \right)^{1 - \varepsilon_x} \\ X_{E_{eq}^{mix}} &= \left( \frac{a_X (b_X) (\omega_X)^{\omega_X} (\sigma_X)^{\sigma_X} (1 - \varepsilon_x)^{1 - \varepsilon_x}}{a_X \omega_X + a_Y \omega_Y + \omega_{E^b} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \left( \frac{1}{s_{E^{mix}}^{eq}} \right)^{\sigma_X} \left( \frac{1}{p_{E^{mix}}^{eq}} \right)^{1 - \varepsilon_x} \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

— Quantité de biens manufacturés consommée :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{E^f}^{eq} \\ Y_{E^b}^{eq} \\ Y_{E^{mix}}^{eq} \end{array} \right. = \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_Y)^{\omega_Y}(\rho_Y)^{\rho_Y}(1-\varepsilon_Y)^{1-\varepsilon_Y}}{a_X\omega_X+a_Y\omega_Y+\omega_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_X)+a_Y(1-\varepsilon_Y))} \right) \left( \frac{1}{r_{E^f}^{eq}} \right)^{\rho_Y} \left( \frac{1}{p_{E^f}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_Y} \\ = \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_Y)^{\omega_Y}(\rho_Y)^{\rho_Y}(1-\varepsilon_Y)^{1-\varepsilon_Y}}{a_X\omega_X+a_Y\omega_Y+\omega_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_X)+a_Y(1-\varepsilon_Y))} \right) \left( \frac{1}{r_{E^b}^{eq}} \right)^{\rho_Y} \left( \frac{1}{p_{E^b}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_Y} \\ = \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_Y)^{\omega_Y}(\rho_Y)^{\rho_Y}(1-\varepsilon_Y)^{1-\varepsilon_Y}}{a_X\omega_X+a_Y\omega_Y+\omega_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_X)+a_Y(1-\varepsilon_Y))} \right) \left( \frac{1}{r_{E^{mix}}^{eq}} \right)^{\rho_Y} \left( \frac{1}{p_{E^{mix}}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_Y} \quad (\text{A.17})$$

## PRIX DES BIENS ÉCHANGÉS

— Prix quand l'économie produit exclusivement de l'énergie fossile :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X|_{E^f} \\ p_Y|_{E^f} \\ p_{E^f}|_{E^f} \\ p_{E^b}|_{E^f} \end{array} \right. = \left( \frac{1}{b_X} \right) \left( \frac{1}{\omega_X} \right)^{\omega_X} \left( \frac{1}{\sigma_X} \right)^{\sigma_X} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_X} \right)^{1-\varepsilon_X} (s)^{\sigma_X} (p_{E^f})^{1-\varepsilon_X} \\ = \left( \frac{1}{b_Y} \right) \left( \frac{1}{\omega_Y} \right)^{\omega_Y} \left( \frac{1}{\rho_Y} \right)^{\rho_Y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_Y} \right)^{1-\varepsilon_Y} (r)^{\rho_Y} (p_{E^f})^{1-\varepsilon_Y} \\ = \left( \frac{1}{b_{E^f}} \right) \left( \frac{1}{\omega_{E^f}} \right)^{\omega_{E^f}} \left( \frac{1}{\rho_{E^f}} \right)^{\rho_{E^f}} \left( \frac{a_X\rho_{E^f}(1-\varepsilon_X)+a_Y(\rho_Y+\rho_{E^f}(1-\varepsilon_Y))}{a_X(\omega_X+\omega_{E^f}(1-\varepsilon_X))+a_Y(\omega_Y+\omega_{E^f}(1-\varepsilon_Y))} \right)^{\rho_{E^f}} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right)^{\rho_{E^f}} \\ > p_{E^f}|_{E^f} \quad (\text{A.18})$$

— Prix quand l'économie produit exclusivement de biocarburants :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X|_{E^b} \\ p_Y|_{E^b} \\ p_{E^f}|_{E^b} \\ p_{E^b}|_{E^b} \end{array} \right. = \frac{1}{b_X} \left( \frac{1}{\omega_X} \right)^{\omega_X} \left( \frac{1}{\sigma_X} \right)^{\sigma_X} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_X} \right)^{1-\varepsilon_X} (s)^{\sigma_X} (p_{E^b})^{1-\varepsilon_X} \\ = \frac{1}{b_Y} \left( \frac{1}{\omega_Y} \right)^{\omega_Y} \left( \frac{1}{\rho_Y} \right)^{\rho_Y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_Y} \right)^{1-\varepsilon_Y} (r)^{\rho_Y} (p_{E^b})^{1-\varepsilon_Y} \\ > p_{E^b}|_{E^b} \\ = \frac{1}{b_{E^b}} \left( \frac{1}{\omega_{E^b}} \right)^{\omega_{E^b}} \left( \frac{1}{\sigma_{E^b}} \right)^{\sigma_{E^b}} \left( \frac{a_X(\sigma_X+\sigma_{E^b}(1-\varepsilon_X))+a_Y\sigma_{E^b}(1-\varepsilon_Y)}{a_X(\omega_X+\omega_{E^b}(1-\varepsilon_X))+a_Y(\omega_Y+\omega_{E^b}(1-\varepsilon_Y))} \right)^{\sigma_{E^b}} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A}-\bar{A}_N} \right)^{\sigma_{E^b}} \quad (\text{A.19})$$

— Prix quand l'économie produit les deux types d'énergie :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X|_{mix} \\ p_Y|_{mix} \\ p_{E^f}|_{mix} \\ p_{E^b}|_{mix} \\ p_{E^f}|_{mix} \end{array} \right. = \frac{1}{b_X} \left( \frac{1}{\omega_X} \right)^{\omega_X} \left( \frac{1}{\sigma_X} \right)^{\sigma_X} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_X} \right)^{1-\varepsilon_X} (s)^{\sigma_X} (p_{E^f})^{1-\varepsilon_X} \\ = \frac{1}{b_Y} \left( \frac{1}{\omega_Y} \right)^{\omega_Y} \left( \frac{1}{\rho_Y} \right)^{\rho_Y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_Y} \right)^{1-\varepsilon_Y} (r)^{\rho_Y} (p_{E^f})^{1-\varepsilon_Y} \\ = \frac{1}{b_{E^f}} \left( \frac{1}{\omega_{E^f}} \right)^{\omega_{E^f}} \left( \frac{1}{\rho_{E^f}} \right)^{\rho_{E^f}} \left( \frac{a_X(\sigma_X+\rho_{E^f}(1-\varepsilon_X))+a_Y(\rho_Y+\rho_{E^f}(1-\varepsilon_Y))}{a_X(\omega_X+\omega_{E^f}(1-\varepsilon_X))+a_Y(\omega_Y+\omega_{E^f}(1-\varepsilon_Y))} \right)^{\rho_{E^f}} \left( \frac{b_{E^f}\bar{L}}{b_{E^f}\bar{K}+b_{E^b}(\bar{A}-\bar{A}_N)} \right)^{\rho_{E^f}} \\ = \frac{1}{b_{E^b}} \left( \frac{1}{\omega_{E^b}} \right)^{\omega_{E^b}} \left( \frac{1}{\sigma_{E^b}} \right)^{\sigma_{E^b}} \left( \frac{a_X(\sigma_X+\sigma_{E^b}(1-\varepsilon_X))+a_Y(\rho_Y+\sigma_{E^b}(1-\varepsilon_Y))}{a_X(\omega_X+\omega_{E^b}(1-\varepsilon_X))+a_Y(\omega_Y+\omega_{E^b}(1-\varepsilon_Y))} \right)^{\sigma_{E^b}} \left( \frac{b_{E^b}\bar{L}}{b_{E^f}\bar{K}+b_{E^b}(\bar{A}-\bar{A}_N)} \right)^{\sigma_{E^b}} \\ = p_{E^b}|_{mix} \quad (\text{A.20})$$

## A.1.2 RÉSULTATS SELON LES CONDITIONS À L'OPTIMUM SOCIAL

Posons :

$$\begin{cases} \Psi_A = \Psi_{L_{Eb}} &= (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)) - \delta \frac{a_N \varepsilon_p}{\delta + (1 - \delta) \varepsilon_f} \\ \Psi_K = \Psi_{L_{Ef}} &= (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)) - \frac{a_N \varepsilon_p}{\delta + (1 - \delta) \varepsilon_f} \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

RATIO CAPITAL-TERRE, PRIX DES FACTEURS, RÉGIME DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ET DISTRIBUTION DE REVENU ASSOCIÉE

— Variation implicite du ratio capital-terre :

$$\frac{\bar{K}}{\bar{A} - A_N} = \left( \frac{a_Y \rho_y + \varepsilon_f \rho_{Ef} \Psi_K}{a_X \sigma_x + \varepsilon_b \sigma_{Eb} \Psi_A} \right) \left( \frac{\Psi_A b_{Eb}}{\Psi_K b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \quad (\text{A.22})$$

— Prix des facteurs de production ( $\varepsilon_f$  implicite), cela permet de dériver rapidement pour les extrêmes :

$$\begin{cases} r &= \left( \frac{a_Y \rho_y + \varepsilon_f \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + (\varepsilon_f \omega_{Ef} + \varepsilon_b \omega_{Eb}) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right) \\ s &= \left( \frac{a_X \sigma_x + \varepsilon_b \sigma_{Eb} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + (\varepsilon_f \omega_{Ef} + \varepsilon_b \omega_{Eb}) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A} - A_N} \right) \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

— Le prix des facteurs de production lorsque les deux types d'énergie sont produite :

$$\begin{cases} r_{mix}^{op} &= \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{L}}{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N)} \right) \\ s_{mix}^{op} &= \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{(b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{L}}{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N)} \right) \end{cases} \quad (\text{A.24})$$

COMPARAISON DES PRIS DES FACTEURS DE PRODUCTION (ÉQUILIBRE DE MARCHÉ VS OPTIMUM SOCIAL,  $w = 1$ )

i. Quand  $0 < \varepsilon_f < 1$  on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{mix}^{op} \\ r_{mix}^{eq} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} s_{mix}^{op} \\ s_{mix}^{eq} \end{array} \right. = \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y))} \right) \quad (\text{A.25})$$

Le signe de ce ration dépend de la dynamique de l'équation suivante :

$$\omega_{Ef} = \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \varepsilon_x + a_Y \varepsilon_y} \iff \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} = \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y} \iff \rho_{Ef} = \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y}{a_X \varepsilon_x + a_Y \varepsilon_y} < 1 \quad (\text{A.26})$$

En conséquence, on retrouve les conditions suivantes pour le prix du capital (dans le même sens pour

le prix de la terre) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} > \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y} \text{ alors, } \frac{r_{mix}^{op}}{r_{mix}^{eq}} > 1 \iff r_{mix}^{eq} < r_{mix}^{op} \\ \text{Si } \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} = \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y} \text{ alors, } \frac{r_{mix}^{op}}{r_{mix}^{eq}} = 1 \iff r_{mix}^{eq} = r_{mix}^{op} \\ \text{Si } \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} < \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y} \text{ alors, } \frac{r_{mix}^{op}}{r_{mix}^{eq}} < 1 \iff r_{mix}^{eq} > r_{mix}^{op} \end{array} \right. \quad (\text{A.27})$$

Nous souhaitons que la situation d'équilibre de marché (reflétant ce qui se passe réellement dans l'économie) se rapproche autant que possible des critères d'optimalité (correspondant à l'optimum social, c'est-à-dire ce qui devrait idéalement se produire). Pour cela, nous posons l'hypothèse que la condition suivante est vérifiée de manière universelle :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{Ef}}{\rho_{Ef}} = \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y}, \quad \frac{r_{mix}^{op}}{r_{mix}^{eq}} = 1 \iff r_{mix}^{eq} = r_{mix}^{op} \\ \frac{\omega_{Eb}}{\sigma_{Eb}} = \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y}, \quad \frac{s_{mix}^{op}}{s_{mix}^{eq}} = 1 \iff s_{mix}^{eq} = s_{mix}^{op} \end{array} \right. \quad (\text{A.28})$$

Cette hypothèse établit une correspondance clé entre deux rapports fondamentaux. Le premier membre de l'équation reflète le rapport des élasticités factorielles de l'énergie, exprimant la contribution relative du travail par rapport à celle du capital. Le second membre, quant à lui, représente le rapport entre la somme des élasticités du travail dans les secteurs agricole et industriel, et la somme des élasticités de production de la terre dans l'agriculture et du capital dans l'industrie.

2. Quand  $\varepsilon_f = 1$  on a (résultat obtenu par l'hypothèse de l'équation A.28 pour le prix du capital) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{r_{Ef}^{op}}{r_{Ef}^{eq}} = \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y))} \right) < 1 \\ \frac{s_{Ef}^{op}}{s_{Ef}^{eq}} = \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) > 1 \end{array} \right. \quad (\text{A.29})$$

3. Quand  $\varepsilon_f = 0$  on a (résultat obtenu par l'hypothèse de l'équation A.28 pour le prix de la terre) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{r_{Eb}^{op}}{r_{Eb}^{eq}} = \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) > 1 \\ \frac{s_{Eb}^{op}}{s_{Eb}^{eq}} = \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + a_Y (1 - \varepsilon_y))} \right) < 1 \end{array} \right. \quad (\text{A.30})$$

— Part de chaque type d'énergie produite lorsque  $0 < \varepsilon_f < 1$  :

$$\begin{cases} \varepsilon_f &= \frac{(a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)) \left( \frac{b_{Ef}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} - a_Y \rho_y \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Eb}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N)}{(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p) \left( \sigma_{Eb} \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Eb}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} \bar{K} + \rho_{Ef} \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Eb}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \\ \varepsilon_b &= \frac{(a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Eb}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) - a_X \sigma_x \left( \frac{b_{Ef}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K}}{(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p) \left( \sigma_{Eb} \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Eb}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} \bar{K} + \rho_{Ef} \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Eb}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \end{cases} \quad (\text{A.31})$$

— Si  $\varepsilon_f = 1$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement l'énergie fossile est :

$$k_{\varepsilon_f}^{op} \equiv \bar{K} = \left( \frac{a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \sigma_x} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.32})$$

— Si  $\varepsilon_f = 0$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement la bioénergie est :

$$k_{\varepsilon_b}^{op} \equiv \bar{K} = \left( \frac{a_Y \rho_y}{a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.33})$$

— Le niveau de revenu implicite (les dépenses  $p_X X + p_Y Y = I$ ) associé (avec  $\varepsilon_f$  implicite) :

$$\begin{cases} p_X X &= \frac{a_X \bar{L}}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \\ p_Y Y &= \frac{a_Y \bar{L}}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \end{cases} \quad (\text{A.34})$$

On a alors :

$$I^{op} = \bar{L} \left( \frac{a_X + a_Y}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \quad (\text{A.35})$$

Donc, le niveau de revenu implicite moyen constant est ainsi défini :

$$I_{MC}^{op} = \left( \frac{a_X + a_Y}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right) \quad (\text{A.36})$$

## QUANTITÉ PRODUITE POUR CHAQUE BIEN ÉCHANGÉ

— Quantité d'énergie consommée

$$\begin{cases} E_{op}^f &= b_{Ef} \left( \frac{\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \bar{L} \right)^{\omega_{Ef}} \left( \frac{\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_Y\rho_y+\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \bar{K} \right)^{\rho_{Ef}} \\ E_{op}^{Eb} &= b_{Eb} \left( \frac{\omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \bar{L} \right)^{\omega_{Eb}} \left( \frac{\sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\sigma_x+\sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} (\bar{A}-A_N) \right)^{\sigma_{Eb}} \\ E_{op}^{mix} &= \left( \frac{\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{L} \right)^{\omega_{Ef}} \\ &\quad * \left( \frac{\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y+\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \left( (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A}-A_N) \right) \right)^{\rho_{Ef}} \end{cases} \quad (\text{A.37})$$

COMPARAISON DE LA QUANTITÉ D'ÉNERGIE CONSOMMÉE (ÉQUILIBRE DE MARCHÉ VS OPTIMUM SOCIAL) Et on montre que  $\forall j \in b, f, mix$  :

$$\left\{ \frac{E_{op}^j}{E_{eq}^j} < 1. \right. \quad (\text{A.38})$$

Par exemple, dans le cas du mix, on a :

$$\begin{cases} \frac{E_{op}^{mix}}{E_{eq}^{mix}} &= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)} \right) \left( \frac{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y))} \right)^{\omega_{Ef}} \\ &* \left( \frac{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y+\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)}{a_X\sigma_x+a_Y\rho_y+\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y))} \right)^{\rho_{Ef}} < 1 \end{cases} \quad (\text{A.39})$$

— Quantité de nourriture consommée :

$$\begin{cases} X_{Ef}^{op} &= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X(b_X)(\omega_x)^{\omega_x}(\sigma_x)^{\sigma_x}(1-\varepsilon_x)^{1-\varepsilon_x} \bar{L}}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{s_{Ef}^{op}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{p_{Ef}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_x} \\ X_{Eb}^{op} &= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X b_X (\omega_x)^{\omega_x} (\sigma_x)^{\sigma_x} (1-\varepsilon_x)^{1-\varepsilon_x} \bar{L}}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{s_{Eb}^{op}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{p_{Eb}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_x} \\ X_{Emix}^{op} &= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X(b_X)(\omega_x)^{\omega_x}(\sigma_x)^{\sigma_x} \left( (1-\varepsilon_x) \left( b_{Ef} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \right)^{1-\varepsilon_x} \bar{L}}{a_X\omega_x+a_Y\omega_y+\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x)+a_Y(1-\varepsilon_y)-a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{s_{Emix}^{op}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{p_{Emix}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_x} \end{cases} \quad (\text{A.40})$$

COMPARAISON DE LA QUANTITÉ DE NOURRITURE CONSOMMÉE (ÉQUILIBRE DE MARCHÉ VS OPTIMUM SOCIAL) Et nous montrons que  $\forall j \in b, f, mix$  :

$$\left\{ \begin{array}{c} X \\ \left| \frac{j}{eq} \right. \\ X \\ \left| j \right. \end{array} \right\}^{op} < 1 \quad (\text{A.41})$$

$$\left\{ \begin{array}{c} X \\ \left| \frac{E^f}{eq} \right. \\ X \\ \left| \frac{E^f}{op} \right. \\ X \\ \left| \frac{E^b}{eq} \right. \\ X \\ \left| \frac{E^b}{op} \right. \\ X \\ \left| \frac{E^{mix}}{eq} \right. \\ X \\ \left| E^{mix} \right. \end{array} \right\} = \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^j} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^j} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{s_{E^j}^{eq}}{s_{E^j}^{op}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{P_{E^j}^{eq}}{P_{E^j}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_x} < 1 \quad (\text{A.42})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X \\ \frac{E^f}{E^q} \\ X \\ \frac{E^b}{E^q} \\ X \\ \frac{E^b}{E^q} \\ X \\ \frac{E^{mix}}{E^q} \\ X \\ E^{mix} \end{array} \right. = \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right)^{1-\sigma_x - \rho_{E^f}(1-\varepsilon_x)} \left( \frac{a_Y\rho_y + \rho_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_Y\rho_y + \rho_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right)^{\rho_{E^f}(1-\varepsilon_x)} \\
= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right)^{\omega_x + \omega_{E^b}(1-\varepsilon_x)} \left( \frac{a_X\sigma_x + \sigma_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\sigma_x + \sigma_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right)^{\sigma_x + \sigma_{E^b}(1-\varepsilon_x)} \\
= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_x} \left( \frac{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right)^{\omega_x + \omega_{E^b}(1-\varepsilon_x)} \left( \frac{a_X\sigma_x + a_Y\rho_y + \sigma_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\sigma_x + a_Y\rho_y + \sigma_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right)^{\sigma_x + \sigma_{E^b}(1-\varepsilon_x)}
\end{array} \right. \quad (A.43)$$

— Quantité de biens manufacturés consommée :

III

$$\left\{ \begin{array}{l} Y \\ \frac{E^f}{E^q} \\ Y \\ E^b \\ Y \\ E^{mix} \end{array} \right. \begin{array}{l} |^{op} \\ |^{E^f} \\ |^{op} \\ |^{E^b} \\ |^{op} \\ |^{E^{mix}} \end{array} = \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_y} \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_y)^{\omega_y}(\rho_y)^{\rho_y}(1-\varepsilon_y)^{1-\varepsilon_y}\bar{L}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{r_{E^f}^{op}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{p_{E^f}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_y} \\
= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_y} \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_y)^{\omega_y}(\rho_y)^{\rho_y}(1-\varepsilon_y)^{1-\varepsilon_y}\bar{L}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^b}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{r_{E^f}^{op}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{p_{E^f}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_y} \\
= \left( \frac{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p}{a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y)} \right)^{1-\varepsilon_y} \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_y)^{\omega_y}(\rho_y)^{\rho_y} \left( (1-\varepsilon_y) \left( b_{E^f} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \right)^{1-\varepsilon_y} \bar{L}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{E^f}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{r_{E^{mix}}^{op}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{p_{E^{mix}}^{op}} \right)^{1-\varepsilon_y}
\end{array} \right. \quad (A.44)$$

COMPARAISON DE LA QUANTITÉ DE BIENS MANUFACTURÉS CONSOMMÉE (ÉQUILIBRE DE MARCHÉ VS OPTIMUM SOCIAL) Et nous montrons que

$\forall j \in b, f, mix$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y \\ \frac{j}{E^q} \\ Y \\ j \end{array} \right. < 1 \quad (A.45)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y \\ \frac{E^f}{\epsilon^q} \\ Y \\ \frac{E^f}{\sigma^p} \\ Y \\ \frac{E^b}{\epsilon^q} \\ Y \\ \frac{E^b}{\sigma^p} \\ Y \\ \frac{E^{mix}}{\epsilon^q} \\ Y \\ E^{mix} \end{array} \right. = \left( \frac{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p}{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y)} \right)^{1-\epsilon_y} \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right) \left( \frac{r_{E^f}^{eq}}{r_{E^f}^{\sigma^p}} \right)^{\rho_y + \rho_{E^f}(1-\epsilon_y)} \\
= \left( \frac{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p}{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y)} \right)^{1-\epsilon_y} \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^b} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^b} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right) \left( \frac{r_{E^b}^{eq}}{r_{E^b}^{\sigma^p}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{s_{E^b}^{eq}}{s_{E^b}^{\sigma^p}} \right)^{\sigma_{E^b}(1-\epsilon_y)} \\
= \left( \frac{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p}{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y)} \right)^{1-\epsilon_y} \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right) \left( \frac{r_{E^{mix}}^{eq}}{r_{E^{mix}}^{\sigma^p}} \right)^{\rho_y + \rho_{E^f}(1-\epsilon_y)}
\end{array} \right. \quad (\text{A.46})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y \\ \frac{E^f}{\epsilon^q} \\ Y \\ \frac{E^f}{\sigma^p} \\ Y \\ \frac{E^b}{\epsilon^q} \\ Y \\ \frac{E^b}{\sigma^p} \\ Y \\ \frac{E^{mix}}{\epsilon^q} \\ Y \\ E^{mix} \end{array} \right. = \left( \frac{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p}{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y)} \right)^{1-\epsilon_y} \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right)^{\omega_y + \omega_{E^f}(1-\epsilon_y)} \left( \frac{a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right)^{\rho_y + \rho_{E^f}(1-\epsilon_y)} \\
= \left( \frac{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p}{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y)} \right)^{1-\epsilon_y} \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^b} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^b} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right)^{\omega_y + \omega_{E^b}(1-\epsilon_y)} \left( \frac{a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right)^{\sigma_{E^b}(1-\epsilon_y)} \\
= \left( \frac{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p}{a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y)} \right)^{1-\epsilon_y} \left( \frac{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right)^{\omega_y + \omega_{E^f}(1-\epsilon_y)} \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y))}{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{E^f} (a_X(1-\epsilon_x) + a_Y(1-\epsilon_y) - a_N \epsilon_p)} \right)^{\rho_y + \rho_{E^f}(1-\epsilon_y)}
\end{array} \right. \quad (\text{A.47})$$

PRIX IMPLICITE DES BIENS

— Prix implicite quand l'économie produit exclusivement de l'énergie fossile :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X \Big|_{Ef} = \left( \frac{1}{b_X} \right) \left( \frac{1}{\omega_x} \right)^{\omega_x} \left( \frac{1}{\sigma_x} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_x} \right)^{1-\varepsilon_x} (s)^{\sigma_x} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_x} \\ p_Y \Big|_{Ef} = \left( \frac{1}{b_Y} \right) \left( \frac{1}{\omega_y} \right)^{\omega_y} \left( \frac{1}{\rho_y} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_y} \right)^{1-\varepsilon_y} (r)^{\rho_y} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_y} \\ p_{Ef} \Big|_{Ef} = \left( \frac{1}{b_{Ef}} \right) \left( \frac{1}{\omega_{Ef}} \right)^{\omega_{Ef}} \left( \frac{1}{\rho_{Ef}} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X (1-\varepsilon_x) + a_Y (1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X (1-\varepsilon_x) + a_Y (1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right)^{\rho_{Ef}} \\ p_{Eb} \Big|_{Ef} > p_{Ef} \Big|_{Ef} \end{array} \right. \quad (A.48)$$

— Prix implicite quand l'économie produit exclusivement de biocarburants :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X \Big|_{Eb} = \frac{1}{b_X} \left( \frac{1}{\omega_x} \right)^{\omega_x} \left( \frac{1}{\sigma_x} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_x} \right)^{1-\varepsilon_x} (s)^{\sigma_x} (p_{Eb})^{1-\varepsilon_x} \\ p_Y \Big|_{Eb} = \frac{1}{b_Y} \left( \frac{1}{\omega_y} \right)^{\omega_y} \left( \frac{1}{\rho_y} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_y} \right)^{1-\varepsilon_y} (r)^{\rho_y} (p_{Eb})^{1-\varepsilon_y} \\ p_{Ef} \Big|_{Eb} > p_{Eb} \Big|_{Eb} \\ p_{Eb} \Big|_{Eb} = \frac{1}{b_{Eb}} \left( \frac{1}{\omega_{Eb}} \right)^{\omega_{Eb}} \left( \frac{1}{\sigma_{Eb}} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{a_X \sigma_x + \sigma_{Eb} (a_X (1-\varepsilon_x) + a_Y (1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1-\varepsilon_x) + a_Y (1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A} - \bar{A}_N} \right)^{\sigma_{Eb}} \end{array} \right. \quad (A.49)$$

— Prix implicite quand l'économie produit les deux types d'énergie :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X \\ p_Y \\ p_{Ef} \\ p_{Eb} \\ \dot{p}_{Ef} \end{array} \right|_{mix} = \begin{array}{l} \frac{1}{b_X} \left( \frac{1}{\omega_x} \right)^{\omega_x} \left( \frac{1}{\sigma_x} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_x} \right)^{1-\varepsilon_x} (s)^{\sigma_x} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_x} \\ \frac{1}{b_Y} \left( \frac{1}{\omega_y} \right)^{\omega_y} \left( \frac{1}{\rho_y} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_y} \right)^{1-\varepsilon_y} (r)^{\rho_y} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_y} \\ \frac{1}{b_{Ef}} \left( \frac{1}{\omega_{Ef}} \right)^{\omega_{Ef}} \left( \frac{1}{\rho_{Ef}} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \rho_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Ef} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{b_{Ef} \bar{L}}{b_{Ef} \bar{K} + b_{Eb} (\bar{A} - A_N)} \right)^{\rho_{Ef}} \\ \frac{1}{b_{Eb}} \left( \frac{1}{\omega_{Eb}} \right)^{\omega_{Eb}} \left( \frac{1}{\sigma_{Eb}} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{a_X \sigma_x + a_Y \rho_y + \sigma_{Eb} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)}{a_X \omega_x + a_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N \varepsilon_p)} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{b_{Eb} \bar{L}}{b_{Ef} \bar{K} + b_{Eb} (\bar{A} - A_N)} \right)^{\sigma_{Eb}} \\ = \dot{p}_{Eb} \Big|_{mix} \end{array} \quad (A.50)$$

$a_X$	$a_Y$	$\rho_{Ef}$	$\sigma_{Eb}$	$\sigma_x$	$\omega_x$	$\rho_y$	$\omega_y$	$\varepsilon_x$	$\varepsilon_y$
0.4	0.6	0.55	0.55	0.35	0.25	0.317	0.283	0.6	0.6
0.4	0.6	0.55	0.55	0.4	0.3	0.375	0.325	0.7	0.7
0.4	0.6	0.55	0.55	0.45	0.35	0.323	0.277	0.8	0.6
0.4	0.6	0.55	0.55	0.35	0.2	0.381	0.369	0.55	0.75
0.4	0.6	0.55	0.55	0.35	0.3	0.363	0.288	0.65	0.65
0.4	0.6	0.55	0.55	0.35	0.25	0.372	0.328	0.6	0.7
0.4	0.6	0.55	0.55	0.45	0.3	0.278	0.273	0.75	0.55
0.4	0.6	0.55	0.55	0.5	0.4	0.437	0.363	0.9	0.8
0.4	0.6	0.55	0.55	0.31	0.2	0.365	0.335	0.51	0.7
0.4	0.6	0.55	0.55	0.45	0.4	0.369	0.281	0.85	0.65

**Tableau A.1** – Tableau de calibration des paramètres compte tenu de l'équation A.28

CALIBRATION DES PARAMÈTRES EN VUE DES SIMULATIONS DU MODÈLE

A.2 MODÈLE AVEC INÉGALITÉ DE REVENU ET DE PRÉFÉRENCES  $MI_R I_P$

RAPPEL : LA POPULATION TOTAL  $\bar{L}$  EST DIVISÉE DEUX GROUPE DE MÉNAGES :

1. un groupe ayant bénéficié de patrimoine foncier et financier en dehors de sa force de travail, *groupe à revenu élevé*  $\hat{L}$ .

(a) revenu total du groupe :  $\hat{R} = w\hat{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_n)$ ;

(b) revenu moyen du groupe :  $\hat{I} = \frac{w\hat{L} + r\bar{K} + s(\bar{A} - A_n)}{\hat{L}}$

2. un autre groupe ayant son revenu qui émane uniquement de sa force de travail, *groupe à faible revenu*  $\check{L}$ .

(a) revenu total du groupe :  $\check{R} = w\check{L}$ ;

(b) revenu moyen du groupe :  $\check{I} = w$ .

Nous sommes en situation de plein emploi, de sorte que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{L} + \check{L} = \bar{L} \end{array} \right. \quad (\text{A.51})$$

RAPPEL : MAXIMISATION DE L'UTILITÉ SELON LE NIVEAU DE REVENU

I\XX

— Maximisation de l'utilité du ménage à revenu élevé :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{U}(X, Y, N) = a_X u_X(\hat{X}) + \hat{a}_Y u_Y(\hat{Y}) + a_N u_N(N) \\ \text{s.c} \quad p_X \hat{X} + p_Y \hat{Y} \leq \hat{I}. \end{array} \right. \quad (\text{A.52})$$

— Maximisation de l'utilité du ménage à faible revenu :

$$\left\{ \begin{array}{l} \check{U}(X, Y, N) = a_X u_X(\check{X}) + \check{a}_Y u_Y(\check{Y}) + a_N u_N(N) \\ \text{s.c} \quad p_X \check{X} + p_Y \check{Y} \leq \check{I}. \end{array} \right. \quad (\text{A.53})$$

où :

—  $a_X = \hat{a}_X = \check{a}_X, a_N = \hat{a}_N = \check{a}_N$  et  $\hat{a}_Y > \check{a}_Y$ ;

—  $\hat{a}_i$  et  $\check{a}_i, i \in X, Y$ , désignent la capacité à dériver de la satisfaction de la consommation de la nourriture  $X$  et des biens manufacturés  $Y$ ;

- $a_N$  : valeur attribuée à la qualité de l'environnement  $N$ ;
- $\hat{X}$  et  $\hat{Y}$  représentent la quantité de nourriture et de biens manufacturés consommés par les ménages à revenu élevé;
- $\check{X}$  et  $\check{Y}$  représentent la quantité de nourriture et de biens manufacturés consommés par les ménages à faible revenu.

Ainsi, la quantité totale demandée de chaque type de bien est la somme des quantités consommées par chaque groupe de ménages :

$$\begin{cases} X &= \hat{L}\hat{X} + \check{L}\check{X} \\ Y &= \hat{L}\hat{Y} + \check{L}\check{Y} \end{cases} \quad (\text{A.54})$$

#### A.2.1 RÉSULTATS SELON LES CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DE MARCHÉ

#### RATIO CAPITAL-TERRE, PRIX DES FACTEURS, RÉGIME DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ET DISTRIBUTION DE REVENU ASSOCIÉE

Variation du ratio capital-travail :

$$\frac{\bar{K}}{\bar{A} - A_N} = \left( \frac{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)(\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) \hat{L} + \left[ ((a_X + \hat{a}_Y) - (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b)) (\check{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \check{\eta}_f) + (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \check{\eta}_b) \right] (a_X + \hat{a}_Y) \check{L}}{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \hat{L} + \left[ ((a_X + \hat{a}_Y) - (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f)) (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \check{\eta}_b) + (\check{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \check{\eta}_f) (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \right] (a_X + \hat{a}_Y) \check{L}} \right) \left( \frac{b_{E^b}}{b_{E^f}} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \quad (\text{A.55})$$

Tels que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\eta}_b = \sigma_{Eb} (a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y)) \\ \check{\eta}_b = \sigma_{Eb} (a_X(1 - \varepsilon_x) + \check{a}_Y(1 - \varepsilon_y)) \\ \hat{\eta}_f = \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y)) \\ \check{\eta}_f = \rho_{Ef} (a_X(1 - \varepsilon_x) + \check{a}_Y(1 - \varepsilon_y)) \\ \hat{\eta} = (a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y)) \\ \check{\eta} = a_X(1 - \varepsilon_x) + \check{a}_Y(1 - \varepsilon_y) \end{array} \right.$$

Prix des facteurs de production ( $\varepsilon_f$  implicite), cela permet de dériver rapidement pour les extrêmes :

XXVIII

$$\left\{ \begin{array}{l} r \\ ineq \\ s \\ ineq \end{array} \right. \begin{array}{l} = \frac{(a_X + \check{a}_Y)((a_X + \hat{a}_Y) - (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \check{\eta}_b))(\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \check{\eta}_f) \check{L} + (a_X + \check{a}_Y)(\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \check{\eta}_f)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \hat{L}}{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f(\sigma_{Eb} - \rho_{Ef}))(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y))) \bar{K}} \\ + \frac{(a_X + \hat{a}_Y)((a_X + \hat{a}_Y) - (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b))(\check{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) \check{L} + (a_X + \hat{a}_Y)(\check{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \check{\eta}_b) \hat{L}}{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f(\sigma_{Eb} - \rho_{Ef}))(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y))) \bar{K}} \\ = \frac{(a_X + \check{a}_Y)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b)((a_X + \hat{a}_Y) - (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f)) \check{L} + (a_X + \check{a}_Y)(\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \hat{L}}{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f(\sigma_{Eb} - \rho_{Ef}))(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y))) (\bar{A} - A_N)} \\ + \frac{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \check{\eta}_b)((a_X + \hat{a}_Y) - (\check{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \check{\eta}_f)) \check{L} + (a_X + \hat{a}_Y)(\check{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \check{\eta}_f)(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \check{\eta}_b) \hat{L}}{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f(\sigma_{Eb} - \rho_{Ef}))(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y))) (\bar{A} - A_N)} \end{array} \quad (A.56)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r \\ \text{ineq} \end{array} \right. = \frac{(\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) \hat{L}}{(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f (\sigma_{Eb} - \rho_{Ef})) (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) \bar{K}} \\ + \frac{((a_X + \hat{a}_Y) - (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b)) (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) \check{L} + (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \check{L}}{(a_X + \hat{a}_Y) (a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f (\sigma_{Eb} - \rho_{Ef})) (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) \bar{K}} \\ \left. \begin{array}{l} s \\ \text{ineq} \end{array} \right. = \frac{(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \hat{L}}{(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f (\sigma_{Eb} - \rho_{Ef})) (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (\bar{A} - A_N)} \\ + \frac{(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) ((a_X + \hat{a}_Y) - (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f)) \check{L} + (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \hat{\eta}_f) (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \hat{\eta}_b) \check{L}}{(a_X + \hat{a}_Y) (a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + (\omega_{Eb} + \varepsilon_f (\sigma_{Eb} - \rho_{Ef})) (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (\bar{A} - A_N)}$$

Le prix des facteurs de production lorsque les deux types d'énergie sont produite :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{mix}^{eq} \\ \text{ineq} \end{array} \right. = \left( \frac{(a_X \sigma_x + \hat{a}_Y \rho_y + \sigma_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (a_X + \hat{a}_Y) \check{L} + (a_X \sigma_x + \hat{a}_Y \rho_y + \sigma_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L}}{(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (a_X + \hat{a}_Y)} \right) \left( \frac{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}}{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N)} \right) \\ \left. \begin{array}{l} s_{mix}^{eq} \\ \text{ineq} \end{array} \right. = \left( \frac{(a_X \sigma_x + \hat{a}_Y \rho_y + \sigma_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (a_X + \hat{a}_Y) \check{L} + (a_X \sigma_x + \hat{a}_Y \rho_y + \sigma_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L}}{(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + \omega_{Eb} (a_X (1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y (1 - \varepsilon_y))) (a_X + \hat{a}_Y)} \right) \left( \frac{(b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}}{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N)} \right) \quad (\text{A.57})$$

Part de chaque type d'énergie produite lorsque  $0 < \varepsilon_f < 1$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_f \\ \text{ineq} \end{array} \right. = \frac{[(a_X \sigma_x + \hat{\eta}_b) (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + [(a_X \sigma_x + \hat{\eta}_b) (a_X + \hat{a}_Y) + a_X \sigma_x (\hat{a}_Y \rho_y - \hat{a}_Y \rho_y) + (\hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y - \hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y)] \check{L}] (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} - [\hat{a}_Y \rho_y (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + (\hat{a}_Y \rho_y (a_X + \hat{a}_Y) + a_X \sigma_x (\hat{a}_Y \rho_y - \hat{a}_Y \rho_y) + (\hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y - \hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y)] \check{L}] (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N)}{[\hat{\eta}_f (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + (\hat{\eta}_f (a_X + \hat{a}_Y) + (\hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y - \hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y) + a_X \sigma_x (\hat{\eta}_f - \hat{\eta}_f)) \check{L}] (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) + [\hat{\eta}_b (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + (\hat{\eta}_b (a_X + \hat{a}_Y) + a_X \sigma_x (\hat{\eta}_f - \hat{\eta}_f) - (\hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y - \hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y)) \check{L}] (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K}} \\ \left. \begin{array}{l} \varepsilon_b \\ \text{ineq} \end{array} \right. = \frac{[(\hat{a}_Y \rho_y + \hat{\eta}_f) (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + ((a_X + \hat{a}_Y) (\hat{a}_Y \rho_y + \hat{\eta}_f) + a_X \sigma_x ((\hat{a}_Y \rho_y + \hat{\eta}_f) - (\hat{a}_Y \rho_y + \hat{\eta}_f))) \check{L}] (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) - a_X \sigma_x [(a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + ((a_X + \hat{a}_Y) + (\hat{a}_Y \rho_y + \hat{\eta}_f) - (\hat{a}_Y \rho_y + \hat{\eta}_f)) \check{L}] (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K}}{[\hat{\eta}_f (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + (\hat{\eta}_f (a_X + \hat{a}_Y) + (\hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y - \hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y) + a_X \sigma_x (\hat{\eta}_f - \hat{\eta}_f)) \check{L}] (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) + [\hat{\eta}_b (a_X + \hat{a}_Y) \hat{L} + (\hat{\eta}_b (a_X + \hat{a}_Y) + a_X \sigma_x (\hat{\eta}_f - \hat{\eta}_f) - (\hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y - \hat{\eta}_b \hat{a}_Y \rho_y)) \check{L}] (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K}} \quad (\text{A.58})$$

— Si  $\varepsilon_f = 1$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement l'énergie fossile est :

$$\left\{ k_{\varepsilon_f}^{eq} \right\}_{ineq} \equiv \bar{K} = \left( \frac{(a_X + \check{a}_Y)(\hat{a}_Y \rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y)))\check{L} + ((a_X + \hat{a}_Y - a_X \sigma_x)(\check{a}_Y \rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + \check{a}_Y(1-\varepsilon_y))) + a_X \sigma_x (\hat{a}_Y \rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y))))\check{L}}{a_X \sigma_x ((a_X + \check{a}_Y)\check{L} + ((a_X + \hat{a}_Y) + (\check{a}_Y \rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y))) - (\hat{a}_Y \rho_y + \rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y))))\check{L}} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.59})$$

— Si  $\varepsilon_f = 0$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire uniquement la bioénergie est :

$$\left\{ k_{\varepsilon_b}^{eq} \right\}_{ineq} \equiv \bar{K} = \left( \frac{\hat{a}_Y \rho_y (a_X + \check{a}_Y)\check{L} + (\hat{a}_Y \rho_y (a_X \sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \check{a}_Y(1-\varepsilon_y))) + \check{a}_Y \rho_y ((a_X + \hat{a}_Y) - (a_X \sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y))))\check{L}}{(a_X + \check{a}_Y)(a_X \sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y)))\check{L} + [\check{a}_Y \rho_y (a_X \sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y))) + ((a_X + \hat{a}_Y) - \hat{a}_Y \rho_y)(a_X \sigma_x + \sigma_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \check{a}_Y(1-\varepsilon_y)))]\check{L}} \right) \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.60})$$

— Le niveau de revenu associé (avec  $\varepsilon_f$  implicite) :

XX

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{R}_t \\ \check{R}_t \end{array} \right\}_{ineq} = \frac{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)\check{L} + (a_X + \hat{a}_Y)(a_X \sigma_x + \check{a}_Y \rho_y + \check{\eta}_b)\check{L}}{(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y)))} \quad (\text{A.61})$$

$$\check{R}_t = \check{L}; \text{ avec } w = 1$$

$$\left\{ R_t \right\}_{ineq}^{eq} = \frac{(a_X + \check{a}_Y)(a_X + \hat{a}_Y)\check{L} + [(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y))) + (a_X + \hat{a}_Y)(a_X \sigma_x + \check{a}_Y \rho_y + \check{\eta}_b)]\check{L}}{(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y)))} \quad (\text{A.62})$$

$$= \check{L} + \frac{(a_X + \check{a}_Y)(a_X \sigma_x + \hat{a}_Y \rho_y + \check{\eta}_b)\check{L} + (a_X + \hat{a}_Y)(a_X \sigma_x + \check{a}_Y \rho_y + \check{\eta}_b)\check{L}}{(a_X + \check{a}_Y)(a_X \omega_x + \hat{a}_Y \omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1-\varepsilon_y)))}$$

Donc, l'hypothèse que  $\rho_{Ef} = \sigma_{Eb}$  ou  $\omega_{Ef} = \omega_{Eb}$  revient à supposer un niveau de revenu moyen constant quel que soit le type d'énergie produit et consommé. Ce niveau de revenu est ainsi défini :

$$\begin{cases} \hat{I}_{MC} \Big|_{ineq} &= \frac{(a_X + \hat{a}_Y)(a_X + \check{a}_Y)\hat{L} + (a_X + \hat{a}_Y)(a_X\sigma_x + \check{a}_Y\rho_y + \check{\eta}_b)\check{L}}{(a_X + \check{a}_Y)(a_X\omega_x + \hat{a}_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y)))\hat{L}} \\ \check{I}_{MC} \Big|_{ineq} &= 1 \end{cases} \quad (\text{A.63})$$

$$I_{MC} \Big|_{ineq}^{eq} = \left( \frac{(a_X + \check{a}_Y)(a_X + \hat{a}_Y)\hat{L} + \left[ (a_X + \check{a}_Y)(a_X\omega_x + \hat{a}_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y))) + (a_X + \hat{a}_Y)(a_X\sigma_x + \check{a}_Y\rho_y + \check{\eta}_b) \right] \check{L}}{(a_X + \check{a}_Y)(a_X\omega_x + \hat{a}_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1 - \varepsilon_x) + \hat{a}_Y(1 - \varepsilon_y)))\bar{L}} \right) \quad (\text{A.64})$$

## QUANTITÉ PRODUITE POUR CHAQUE BIEN ÉCHANGÉ

— Quantité d'énergie consommée :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{eq}^f \Big|_{ineq} \\ E_{eq}^b \Big|_{ineq} \\ E_{eq}^{mix} \Big|_{ineq} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} b_{Ef} \left( \frac{\omega_{Ef}((a_X + \tilde{a}_Y)(a_X(1-\varepsilon_x) + \tilde{a}_Y(1-\varepsilon_y))\bar{L} + a_X(\tilde{a}_Y - \tilde{a}_Y)(\omega_y(1-\varepsilon_x) - \omega_x(1-\varepsilon_y))\bar{L})}{(a_X + \tilde{a}_Y)(a_X\omega_x + \tilde{a}_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + \tilde{a}_Y(1-\varepsilon_y)))} \right)^{\omega_{Ef}} \\ \left( \frac{\rho_{Ef}((a_X + \tilde{a}_Y)(a_X(1-\varepsilon_x) + \tilde{a}_Y(1-\varepsilon_y))\bar{L} + a_X(\tilde{a}_Y - \tilde{a}_Y)(\omega_y(1-\varepsilon_x) - \omega_x(1-\varepsilon_y))\bar{L})}{(a_X + \tilde{a}_Y)(\tilde{a}_Y\rho_y + \tilde{\eta}_f)\bar{L} + [(a_X + \tilde{a}_Y) - a_X\sigma_x](\tilde{a}_Y\rho_y + \tilde{\eta}_f) + a_X\sigma_x(\tilde{a}_Y\rho_y + \tilde{\eta}_f)} \right)^{\rho_{Ef}} \bar{K} \\ b_{Eb} \left( \frac{\omega_{Eb}((a_X + \tilde{a}_Y)(a_X(1-\varepsilon_x) + \tilde{a}_Y(1-\varepsilon_y))\bar{L} + a_X(\tilde{a}_Y - \tilde{a}_Y)(\omega_y(1-\varepsilon_x) - \omega_x(1-\varepsilon_y))\bar{L})}{(a_X + \tilde{a}_Y)(a_X\omega_x + \tilde{a}_Y\omega_y + \omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + \tilde{a}_Y(1-\varepsilon_y)))} \right)^{\omega_{Eb}} \\ \left( \frac{\sigma_{Eb}((a_X + \tilde{a}_Y)(a_X(1-\varepsilon_x) + \tilde{a}_Y(1-\varepsilon_y))\bar{L} + a_X(\tilde{a}_Y - \tilde{a}_Y)(\omega_y(1-\varepsilon_x) - \omega_x(1-\varepsilon_y))\bar{L})}{(a_X\sigma_x + \tilde{\eta}_b)(a_X + \tilde{a}_Y)\bar{L} + ((a_X\sigma_x + \tilde{\eta}_b)((a_X + \tilde{a}_Y) - \tilde{a}_Y\rho_y) + \tilde{a}_Y\rho_y(a_X\sigma_x + \tilde{\eta}_b))\bar{L}} (\bar{A} - A_N) \right)^{\sigma_{Eb}} \\ \left( \frac{\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))} (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{L} \right)^{\omega_{Ef}} \\ \left( \frac{\rho_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))}{a_X\sigma_x + a_Y\rho_y + \rho_{Ef}\omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))} \left( (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Eb}}} (\bar{A} - A_N) \right) \right)^{\rho_{Ef}} \end{array} \right. \quad (A.65)$$

— Quantité de nourriture consommée :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{Ef}^{eq} \\ X_{Eb}^{eq} \\ X_{Emix}^{eq} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{a_X(b_X)(\omega_x)^{\omega_x}(\sigma_x)^{\sigma_x}(1-\varepsilon_x)^{1-\varepsilon_x}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))} \right) \left( \frac{1}{s_{Ef}^{eq}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{p_{Ef}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_x} \\ \left( \frac{a_X(b_X)(\omega_x)^{\omega_x}(\sigma_x)^{\sigma_x}(1-\varepsilon_x)^{1-\varepsilon_x}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))} \right) \left( \frac{1}{s_{Eb}^{eq}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{p_{Eb}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_x} \\ \left( \frac{a_X(b_X)(\omega_x)^{\omega_x}(\sigma_x)^{\sigma_x}(1-\varepsilon_x)^{1-\varepsilon_x}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y))} \right) \left( \frac{1}{s_{Emix}^{eq}} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{p_{Emix}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_x} \end{array} \right. \quad (A.66)$$

— Quantité de biens manufacturés consommée :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{Ef}^{eq} \\ Y_{Eb}^{eq} \\ Y_{Emix}^{eq} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_y)^{\omega_y}(\rho_y)^{\rho_y}(1-\varepsilon_y)^{1-\varepsilon_y}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{r_{Ef}^{eq}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{p_{Ef}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_y} \\ \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_y)^{\omega_y}(\rho_y)^{\rho_y}(1-\varepsilon_y)^{1-\varepsilon_y}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Eb}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{r_{Eb}^{eq}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{p_{Eb}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_y} \\ \left( \frac{a_Y(b_Y)(\omega_y)^{\omega_y}(\rho_y)^{\rho_y}(1-\varepsilon_y)^{1-\varepsilon_y}}{a_X\omega_x + a_Y\omega_y + \omega_{Ef}(a_X(1-\varepsilon_x) + a_Y(1-\varepsilon_y) - a_N\varepsilon_p)} \right) \left( \frac{1}{r_{Emix}^{eq}} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{p_{Emix}^{eq}} \right)^{1-\varepsilon_y} \end{array} \right. \quad (A.67)$$

## PRIX DES BIENS ÉCHANGÉS

— Prix quand l'économie produit exclusivement de l'énergie fossile :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X \Big|_{Ef} = \left( \frac{1}{b_X} \right) \left( \frac{1}{\omega_x} \right)^{\omega_x} \left( \frac{1}{\sigma_x} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_x} \right)^{1-\varepsilon_x} (s)^{\sigma_x} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_x} \\ p_Y \Big|_{Ef} = \left( \frac{1}{b_Y} \right) \left( \frac{1}{\omega_y} \right)^{\omega_y} \left( \frac{1}{\rho_y} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_y} \right)^{1-\varepsilon_y} (r)^{\rho_y} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_y} \\ p_{Ef} \Big|_{Ef} = \left( \frac{1}{b_{Ef}} \right) \left( \frac{1}{\omega_{Ef}} \right)^{\omega_{Ef}} \left( \frac{1}{\rho_{Ef}} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{a_X \rho_{Ef}^{1-\varepsilon_x} + a_Y (\rho_y + \rho_{Ef}^{1-\varepsilon_y})}{a_X (\omega_x + \omega_{Ef}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y (\omega_y + \omega_{Ef}^{1-\varepsilon_y})} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right)^{\rho_{Ef}} \\ p_{Eb} \Big|_{Ef} > p_{Ef} \Big|_{Ef} \end{array} \right. \quad (\text{A.68})$$

— Prix quand l'économie produit exclusivement de biocarburants :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X \Big|_{Eb} = \frac{1}{b_X} \left( \frac{1}{\omega_x} \right)^{\omega_x} \left( \frac{1}{\sigma_x} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_x} \right)^{1-\varepsilon_x} (s)^{\sigma_x} (p_{Eb})^{1-\varepsilon_x} \\ p_Y \Big|_{Eb} = \frac{1}{b_Y} \left( \frac{1}{\omega_y} \right)^{\omega_y} \left( \frac{1}{\rho_y} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_y} \right)^{1-\varepsilon_y} (r)^{\rho_y} (p_{Eb})^{1-\varepsilon_y} \\ p_{Ef} \Big|_{Eb} > p_{Eb} \Big|_{Eb} \\ p_{Eb} \Big|_{Eb} = \frac{1}{b_{Eb}} \left( \frac{1}{\omega_{Eb}} \right)^{\omega_{Eb}} \left( \frac{1}{\sigma_{Eb}} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{a_X (\sigma_x + \sigma_{Eb}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y \sigma_{Eb}^{1-\varepsilon_y}}{a_X (\omega_x + \omega_{Eb}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y (\omega_y + \omega_{Eb}^{1-\varepsilon_y})} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A} - \bar{A}_N} \right)^{\sigma_{Eb}} \end{array} \right. \quad (\text{A.69})$$

— Prix quand l'économie produit les deux types d'énergie :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_X \Big|_{mix} = \frac{1}{b_X} \left( \frac{1}{\omega_x} \right)^{\omega_x} \left( \frac{1}{\sigma_x} \right)^{\sigma_x} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_x} \right)^{1-\varepsilon_x} (s)^{\sigma_x} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_x} \\ p_Y \Big|_{mix} = \frac{1}{b_Y} \left( \frac{1}{\omega_y} \right)^{\omega_y} \left( \frac{1}{\rho_y} \right)^{\rho_y} \left( \frac{1}{1-\varepsilon_y} \right)^{1-\varepsilon_y} (r)^{\rho_y} (p_{Ef})^{1-\varepsilon_y} \\ p_{Ef} \Big|_{mix} = \frac{1}{b_{Ef}} \left( \frac{1}{\omega_{Ef}} \right)^{\omega_{Ef}} \left( \frac{1}{\rho_{Ef}} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{a_X (\sigma_x + \rho_{Ef}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y (\rho_y + \rho_{Ef}^{1-\varepsilon_y})}{a_X (\omega_x + \omega_{Ef}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y (\omega_y + \omega_{Ef}^{1-\varepsilon_y})} \right)^{\rho_{Ef}} \left( \frac{b_{Ef} \bar{L}}{b_{Ef} \bar{K} + b_{Eb} (\bar{A} - \bar{A}_N)} \right)^{\rho_{Ef}} \\ p_{Eb} \Big|_{mix} = \frac{1}{b_{Eb}} \left( \frac{1}{\omega_{Eb}} \right)^{\omega_{Eb}} \left( \frac{1}{\sigma_{Eb}} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{a_X (\sigma_x + \sigma_{Eb}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y (\rho_y + \sigma_{Eb}^{1-\varepsilon_y})}{a_X (\omega_x + \omega_{Eb}^{1-\varepsilon_x}) + a_Y (\omega_y + \omega_{Eb}^{1-\varepsilon_y})} \right)^{\sigma_{Eb}} \left( \frac{b_{Eb} \bar{L}}{b_{Ef} \bar{K} + b_{Eb} (\bar{A} - \bar{A}_N)} \right)^{\sigma_{Eb}} \\ p_{Ef} \Big|_{mix} = p_{Eb} \Big|_{mix} \end{array} \right. \quad (\text{A.70})$$

## A.2.2 RÉSULTATS SELON LES CONDITIONS DE L'OPTIMUM SOCIAL

RATIO CAPITAL-TERRE, PRIX DES FACTEURS, RÉGIME DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ET DISTRIBUTION DE REVENU ASSOCIÉE

— Variation du ratio capital-travail :

$$\frac{\bar{K}}{\bar{A} - \bar{A}_N} = \left( \frac{\Psi_{\hat{A}} \hat{\tau} + \Psi_{\hat{A}} (1 - \hat{\tau})}{\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\hat{K}} (1 - \hat{\tau})} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \left( \frac{b_{Eb}}{b_{Ef}} \right)^{\frac{1}{\rho_{Ef}}} \left( \frac{(\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \rho_{Ef} \Psi_{\hat{K}}) \hat{\tau} + (\hat{a}_Y \rho_y + \varepsilon_f \rho_{Ef} \Psi_{\hat{K}}) (1 - \hat{\tau})}{(a_X \sigma_x + \varepsilon_b \sigma_{Eb} \Psi_{\hat{A}}) \hat{\tau} + (a_X \sigma_x + \varepsilon_b \sigma_{Eb} \Psi_{\hat{A}}) (1 - \hat{\tau})} \right) \quad (\text{A.71})$$

Avec :

$$\begin{cases} \Psi_{\bar{K}} &= \Psi_{\hat{K}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{K}}(1 - \hat{\tau}) \\ \Psi_{\bar{A}} &= \Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}) \\ a_Y &= \hat{a}_Y\hat{\tau} + \check{a}_Y(1 - \hat{\tau}) \end{cases} \quad (\text{A.72})$$

— Prix des facteurs de production ( $\varepsilon_f$  implicite), cela permet de dériver rapidement pour les extrêmes ::

$$\begin{cases} r^{op} \\ s^{op} \end{cases} \Big|_{ineq} = \frac{(\hat{a}_Y\rho_y + \varepsilon_f\rho_f\Psi_{\hat{K}})\hat{\tau} + (\check{a}_Y\rho_y + \varepsilon_f\rho_f\Psi_{\bar{K}})(1 - \hat{\tau})}{(a_X\omega_x + \hat{a}_Y\omega_y + \varepsilon_f(1 - \rho_f)\Psi_{\hat{K}} + (1 - \varepsilon_f)(1 - \sigma_b)\Psi_{\hat{A}})\hat{\tau} + (a_X\omega_x + \check{a}_Y\omega_y + \varepsilon_f(1 - \rho_f)\Psi_{\bar{K}} + (1 - \varepsilon_f)(1 - \sigma_b)\Psi_{\bar{A}})(1 - \hat{\tau})} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right)$$

$$\begin{cases} r^{op} \\ s^{op} \end{cases} \Big|_{ineq} = \frac{(a_X\sigma_x + (1 - \varepsilon_f)\sigma_b\Psi_{\hat{A}})\hat{\tau} + (a_X\sigma_x + (1 - \varepsilon_f)\sigma_b\Psi_{\bar{A}})(1 - \hat{\tau})}{(a_X\omega_x + \hat{a}_Y\omega_y + \varepsilon_f(1 - \rho_f)\Psi_{\hat{K}} + (1 - \varepsilon_f)(1 - \sigma_b)\Psi_{\hat{A}})\hat{\tau} + (a_X\omega_x + \check{a}_Y\omega_y + \varepsilon_f(1 - \rho_f)\Psi_{\bar{K}} + (1 - \varepsilon_f)(1 - \sigma_b)\Psi_{\bar{A}})(1 - \hat{\tau})} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A} - \bar{A}_N} \right) \quad (\text{A.73})$$

$$\begin{cases} r^{op} \\ s^{op} \end{cases} \Big|_{ineq} = \frac{(\hat{a}_Y\hat{\tau} + \check{a}_Y(1 - \hat{\tau}))\rho_y + \varepsilon_f\rho_f(\Psi_{\hat{K}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{K}}(1 - \hat{\tau}))}{a_X\omega_x + (\hat{a}_Y\hat{\tau} + \check{a}_Y(1 - \hat{\tau}))\omega_y + \omega_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{K}} \right)$$

$$\begin{cases} r^{op} \\ s^{op} \end{cases} \Big|_{ineq} = \frac{a_X\sigma_x + (1 - \varepsilon_f)\sigma_b(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))}{a_X\omega_x + (\hat{a}_Y\hat{\tau} + \check{a}_Y(1 - \hat{\tau}))\omega_y + \omega_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))} \left( \frac{\bar{L}}{\bar{A} - \bar{A}_N} \right) \quad (\text{A.74})$$

— Le prix des facteurs de production lorsque les deux types d'énergie sont produite :

$$\begin{cases} r^{op}_{Emix} \\ s^{op}_{Emix} \end{cases} \Big|_{ineq} = \left( \frac{a_X\sigma_x + (\hat{a}_Y\rho_y\hat{\tau} + \check{a}_Y\rho_y(1 - \hat{\tau})) + \sigma_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))}{a_X\omega_x + (\hat{a}_Y\hat{\tau} + \check{a}_Y(1 - \hat{\tau}))\omega_y + \omega_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))} \right) \left( \frac{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{L}}{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N)} \right)$$

$$\begin{cases} r^{op}_{Emix} \\ s^{op}_{Emix} \end{cases} \Big|_{ineq} = \left( \frac{a_X\sigma_x + (\hat{a}_Y\rho_y\hat{\tau} + \check{a}_Y\rho_y(1 - \hat{\tau})) + \sigma_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))}{a_X\omega_x + (\hat{a}_Y\hat{\tau} + \check{a}_Y(1 - \hat{\tau}))\omega_y + \omega_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))} \right) \left( \frac{(b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{L}}{(b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N)} \right) \quad (\text{A.75})$$

— Part de chaque type d'énergie produite lorsque  $0 < \varepsilon_f < 1$  :

$$\begin{cases} \varepsilon_f \\ \varepsilon_b \end{cases} \Big|_{ineq}^{op} = \frac{(a_X\sigma_x + \sigma_{Eb}(\Psi_{\hat{A}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{A}}(1 - \hat{\tau}))) (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} - (\hat{a}_Y\rho_y\hat{\tau} + \check{a}_Y\rho_y(1 - \hat{\tau})) (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N)}{\rho_{Ef}(\Psi_{\hat{K}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{K}}(1 - \hat{\tau})) \left( (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N) \right)}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_f \\ \varepsilon_b \end{cases} \Big|_{ineq}^{op} = \frac{((\hat{a}_Y\rho_y\hat{\tau} + \check{a}_Y\rho_y(1 - \hat{\tau})) + \rho_{Ef}(\Psi_{\hat{K}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{K}}(1 - \hat{\tau}))) (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N) - a_X\sigma_x (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K}}{\rho_{Ef}(\Psi_{\hat{K}}\hat{\tau} + \Psi_{\bar{K}}(1 - \hat{\tau})) \left( (b_{Ef})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}\bar{K} + (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N) \right)}$$

— Si  $\varepsilon_f = 1$  alors l'optimum social correspond au maximum de la quantité de capital par rapport à la terre où il est préférable de produire uniquement l'énergie fossile \

$$k_{\varepsilon_f}^{op} \Big|_{ineq} \equiv \bar{K} = \left( \frac{(\hat{a}_Y\rho_y + \rho_{Ef}\Psi_{\hat{K}})\hat{\tau} + (\check{a}_Y\rho_y + \rho_{Ef}\Psi_{\bar{K}})(1 - \hat{\tau})}{a_X\sigma_x} \right) (b_{Eb})^{\frac{1}{\rho_{Ef}}}(\bar{A} - \bar{A}_N) \quad (\text{A.76})$$

— Avec  $\varepsilon_f = 0$  on a, la quantité de capital par rapport à la terre à partir duquel il est préférable de produire

uniquement la bioénergie est :

$$k_{\varepsilon_b}^{op} \Big|_{ineq} \equiv \bar{K} = \left( \frac{\hat{a}_Y \rho_y \hat{\tau} + \check{a}_Y \rho_y (1 - \hat{\tau})}{(a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} \Psi_{\hat{A}}) \hat{\tau} + (a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} \Psi_{\check{A}}) (1 - \hat{\tau})} \right) \left( \frac{b_{E^b}}{b_{E^f}} \right)^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \quad (\text{A.77})$$

— Quantité d'énergie produite :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{op}^f \Big|_{op}^{ineq} \\ E_{op}^b \Big|_{op}^{ineq} \\ E_{op}^{mix} \Big|_{op}^{ineq} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} = b_E^f \left( \frac{\omega_{E^f} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau})) \bar{L}}{a_X \omega_x + (\hat{a}_Y \hat{\tau} + \check{a}_Y (1 - \hat{\tau})) \omega_y + \omega_{E^f} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau}))} \right)^{\omega_{E^f}} \left( \frac{\rho_{E^f} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau})) \bar{K}}{(\hat{a}_Y \hat{\tau} + \check{a}_Y (1 - \hat{\tau})) \rho_y + \rho_{E^f} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau}))} \right)^{\rho_{E^f}} \\ = b_E^b \left( \frac{\omega_{E^b} (\Psi_{\hat{A}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{A}} (1 - \hat{\tau})) \bar{L}}{a_X \omega_x + (\hat{a}_Y \hat{\tau} + \check{a}_Y (1 - \hat{\tau})) \omega_y + \omega_{E^b} (\Psi_{\hat{A}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{A}} (1 - \hat{\tau}))} \right)^{\omega_{E^b}} \left( \frac{\sigma_{E^b} (\Psi_{\hat{A}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{A}} (1 - \hat{\tau})) (\bar{A} - A_N)}{a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} (\Psi_{\hat{A}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{A}} (1 - \hat{\tau}))} \right)^{\sigma_{E^b}} \\ = b_{E^f} \left( \frac{(a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} (\Psi_{\hat{A}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{A}} (1 - \hat{\tau}))) (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} - (\hat{a}_Y \rho_y \hat{\tau} + \check{a}_Y \rho_y (1 - \hat{\tau})) (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N)}{(a_X \omega_x + (\hat{a}_Y \hat{\tau} + \check{a}_Y (1 - \hat{\tau})) \omega_y + \omega_{E^f} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau})))} \frac{\omega_{E^f} \bar{L}}{\rho_{E^f} \left( (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} + (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N) \right)} \right)^{\omega_{E^f}} \\ \left( \frac{(a_X \sigma_x + \sigma_{E^b} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau}))) (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \bar{K} - (\hat{a}_Y \rho_y \hat{\tau} + \check{a}_Y \rho_y (1 - \hat{\tau})) (b_{E^b})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} (\bar{A} - A_N)}{(a_X \sigma_x + \hat{a}_Y \rho_y \hat{\tau} + \check{a}_Y (1 - \hat{\tau})) + \sigma_{E^b} (\Psi_{\hat{K}} \hat{\tau} + \Psi_{\check{K}} (1 - \hat{\tau}))} (b_{E^f})^{\frac{1}{\rho_{E^f}}} \right)^{\rho_{E^f}} \end{array} \right) \quad (\text{A.78})$$

### A.3 EFFETS DES INÉGALITÉS ET SUR LES INÉGALITÉS

#### A.3.1 EFFETS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE SUR LES INÉGALITÉS

Pour étudier l'impact de la transition énergétique sur les inégalités, on reprend la fonction d'utilité et on la note de la manière suivante :

$$u(X, Y, Z) \equiv a_X \ln X + a_Y(R) \ln Y + a_N \ln N \quad (\text{A.79})$$

- $X$  : nourriture
- $Y$  : bien manufacturé
- $N$  : bien environnemental, où  $N$  mesure la qualité environnementale (une fonction croissante des terres).

Les coefficients sont définis comme suit :

- $a_X$  : identique pour tous, quel que soit le revenu.
- $a_Y(R)$  : la capacité à dériver de l'utilité du bien  $Y$  augmente avec le niveau de revenu  $R$ .
- $a_N$  : mesure de l'externalité environnementale.

Le bien-être individuel est donné par :

$$w = u(X, Y, N) \quad (\text{A.80})$$

Les fonctions de demande des biens sont définies comme suit :

#### DEMANDE INDIVIDUELLE POUR LES BIENS ALIMENTAIRES ET MANUFACTURÉS

$$\begin{cases} \hat{X} = \frac{a_X}{a_X + \hat{a}_Y} \frac{\hat{I}}{p_X} \\ \check{X} = \frac{a_X}{a_X + \check{a}_Y} \frac{\check{I}}{p_X} \end{cases} \quad (\text{A.81})$$

$$\begin{cases} \hat{Y} = \frac{\hat{a}_Y}{a_X + \hat{a}_Y} \frac{\hat{I}}{p_Y} \\ \check{Y} = \frac{\check{a}_Y}{a_X + \check{a}_Y} \frac{\check{I}}{p_Y} \end{cases} \quad (\text{A.82})$$

#### DEMANDE GLOBALE POUR LES BIENS ALIMENTAIRES

$$\begin{cases} X = \hat{L} \left( \frac{a_X}{a_X + \hat{a}_Y} \frac{\hat{I}}{p_X} \right) + \check{L} \left( \frac{a_X}{a_X + \check{a}_Y} \frac{\check{I}}{p_X} \right) \\ Y = \hat{L} \left( \frac{\hat{a}_Y}{a_X + \hat{a}_Y} \frac{\hat{I}}{p_Y} \right) + \check{L} \left( \frac{\check{a}_Y}{a_X + \check{a}_Y} \frac{\check{I}}{p_Y} \right) \end{cases} \quad (\text{A.83})$$

$$\begin{cases} X = \left( \frac{a_X}{a_X + \hat{a}_Y} \frac{\hat{R}}{p_X} \right) + \left( \frac{a_X}{a_X + \check{a}_Y} \frac{\check{R}}{p_X} \right) \\ Y = \left( \frac{\hat{a}_Y}{a_X + \hat{a}_Y} \frac{\hat{R}}{p_Y} \right) + \left( \frac{\check{a}_Y}{a_X + \check{a}_Y} \frac{\check{R}}{p_Y} \right) \end{cases} \quad (\text{A.84})$$

#### FONCTION DE DEMANDE DE BIENS ALIMENTAIRES

$$X(p, R) = \frac{a_X}{a_X + a_Y(R)} \frac{R}{p} \quad (\text{A.85})$$

#### ÉLASTICITÉ-REVENU DES DÉPENSES ALIMENTAIRES

$$e_{X/I} = \left( \frac{R}{D} \frac{\partial D}{\partial R} \right) = \frac{R}{D} \left( \frac{-a_X a'_Y(R)}{(a_X + a_Y(R))^2} \frac{R}{p} + \frac{1}{p} \frac{a_X}{a_X + a_Y(R)} \right) \quad (\text{A.86})$$

$$e_{X/I} = \left( \frac{-a'_Y(R)}{(a_X + a_Y(R))} R + 1 \right) \quad (\text{A.87})$$

$$e_{X/I} = 1 - \frac{a'_Y(R) R}{(a_X + a_Y(R))} \quad (\text{A.88})$$

#### PART DES PRODUITS ALIMENTAIRES DANS LES DÉPENSES

L'expression pour la part des produits alimentaires est donnée par :

$$\alpha_X(R) = \frac{a_X}{a_X + a_Y(R)} \left( \frac{\bar{R}}{R} \right)^{1-e_{X/R}} \quad (\text{A.89})$$

#### RÉSOLUTION DE L'ÉQUATION DIFFÉRENTIELLE

L'équation différentielle donnée est :

$$a'_Y(R) = (1 - e_{X/R}) \left( \frac{a_X + a_Y(R)}{R} \right) \quad (\text{A.90})$$

ÉTAPE 1 : RÉÉCRITURE DE L'ÉQUATION DIFFÉRENTIELLE. Pour simplifier, posons  $a_Y(R) = A(R)$ .

Cela donne :

$$A'(R) = (1 - e_{X/R}) \left( \frac{a_X + A(R)}{R} \right) \quad (\text{A.91})$$

Divisons les deux côtés par  $a_X + A(R)$  :

$$\frac{A'(R)}{a_X + A(R)} = \frac{1 - e_{X/R}}{R} \quad (\text{A.92})$$

ÉTAPE 2 : PASSAGE EN INTÉGRALES La partie gauche devient :

$$\int \frac{1}{a_X + A(R)} dA = \ln |a_X + A(R)| \quad (\text{A.93})$$

La partie droite devient :

$$\int \frac{1 - e_{X/R}}{R} dR = \gamma \ln R \quad \text{où } \gamma = 1 - e_{X/R}. \quad (\text{A.94})$$

ÉTAPE 3 : RÉOLUTION En exponentiant, on obtient :

$$a_X + A(R) = C_1 R^\gamma \quad (\text{A.95})$$

$$A(R) = C_1 R^\gamma - a_X \quad (\text{A.96})$$

ÉTAPE 4 : EXPRESSION FINALE La part des dépenses alimentaires est donnée par :

$$\alpha_X(R) = \frac{a_X}{a_X + a_Y(R)} = \frac{a_X}{C_1 R^\gamma} \quad (\text{A.97})$$

En substituant  $C_1 = a_X \bar{R}^{1-e_{X/R}}$  et  $\gamma = 1 - e_{X/R}$  :

$$\alpha_X(R) = \frac{a_X}{a_X + a_Y} \left( \frac{\bar{R}}{R} \right)^{1-e_{X/R}} \quad (\text{A.98})$$

#### A.4 AUTRES CONSIDÉRATIONS POSSIBLES ET PROLONGEMENT DU MODÈLE

##### A.4.1 VARIATION DES PARTS ET DES QUANTITÉS À L'OPTIMUM SOCIAL PAR RAPPORT À $a_G$

DÉRIVÉES DE  $\varepsilon_f^{op}$  PAR RAPPORT À  $a_G$

$$\frac{\partial \varepsilon_f^{op}}{\partial a_G} < 0 \quad (\text{A.99})$$

La part d'énergie fossile est monotone décroissante par rapport à  $a_G$ .

VALEUR CONTRAINTE DE  $a_G$

1. Pour produire de l'énergie fossile,  $a_G$  doit être défini tel que :

$$a_G < a_G^{Ef} = \left( \frac{\delta + (1 - \delta)\varepsilon_f}{\gamma_G G_z^{\gamma_G}} \right) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)) \quad (\text{A.100})$$

2. Pour produire de la bioénergie,  $a_G$  doit être défini tel que :

$$a_G < a_G^{Eb} = \left( \frac{\delta + (1 - \delta)\varepsilon_f}{\gamma_G G_z^{\gamma_G} \delta} \right) (a_X(1 - \varepsilon_x) + a_Y(1 - \varepsilon_y)) \quad (\text{A.101})$$

# B

## Annexe du chapitre 3

### B.1 RÉSULTATS DE BASE

#### B.1.1 PRODUCTION DE NOURRITURE ET DE RÉSIDUS AGRICOLES

En résolvant le programme de maximisation du profit suivant :

$$\begin{cases} \max_{(A_X)} & \pi_X = p_X X + p_J J_E - s A_X, \\ \text{s.c. } X & = g_X(A_X) = b_X A_X^\sigma, \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

Nous commençons par déterminer la demande de terre :

$$A_X = (\sigma)^{\frac{1}{1-\sigma}} (b_X)^{\frac{1}{1-\sigma}} \left( \frac{\alpha p_X + (1-\alpha) p_J}{s} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}. \quad (\text{B.2})$$

Ensuite, l'offre de nourriture et de résidus agricoles résultante :

$$\begin{cases} X = (\sigma)^{\frac{\sigma}{1-\sigma}} (b_X)^{\frac{1}{1-\sigma}} \left( \frac{\alpha p_X + (1-\alpha) p_J}{s} \right)^{\frac{\sigma}{1-\sigma}}, \\ J = (\sigma)^{\frac{\sigma}{1-\sigma}} (b_X)^{\frac{1}{1-\sigma}} \left( \frac{\alpha p_X + (1-\alpha) p_J}{s} \right)^{\frac{\sigma}{1-\sigma}}. \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

### B.1.2 PRODUCTION DE CAD À PARTIR DE RÉSIDUS AGRICOLES

En résolvant le programme de maximisation du profit suivant :

$$\begin{cases} \max_{(J_E)} & \pi_{E_b} = p_E E_b - p_J J_E, \\ \text{s.c. } E & \leq g_{E_b}(J_E) = b_{E_b} J_E^\gamma, \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

on obtient la demande de résidus agricoles et l'offre de carburant aviation durable :

$$\begin{cases} J_E = (\gamma)^{\frac{1}{1-\gamma}} (b_{E_b})^{\frac{1}{1-\gamma}} \left(\frac{p_E}{p_J}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}, \\ E_b = (\gamma)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} (b_{E_b})^{\frac{1}{1-\gamma}} \left(\frac{p_E}{p_J}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}, \end{cases} \quad \text{avec } p_E = p_{E_f}. \quad (\text{B.5})$$

### B.1.3 ÉQUILIBRE SUR LE MARCHÉ DES RÉSIDUS AGRICOLES

En égalisant les quantités demandées et offertes de résidus agricoles  $D(J) = O(J)$ , on écrit la forme implicite du prix des résidus agricoles :

$$p_J = \left(\gamma b_{E_b} p_E\right) \left[ \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)^{1-\gamma} \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{\frac{\sigma(1-\gamma)}{1-\sigma}} \left(\frac{1}{b_X}\right)^{\frac{1-\gamma}{1-\sigma}} \left(\frac{s}{\alpha p_X + (1-\alpha) p_J}\right)^{\frac{\sigma(1-\gamma)}{1-\sigma}} \right]. \quad (\text{B.6})$$

Notons  $p_J^*(p_E, p_X)$  la valeur de  $p_J$  satisfaisant l'équation [eq :Pj implicite]. En le remplaçant, on obtient :

$$\frac{dF}{dp_E} = \frac{p_J}{p_E} \left( \frac{(1-\sigma)(\alpha p_X + (1-\alpha) p_J)}{(1-\sigma)\alpha p_X + (1-\sigma\gamma)(1-\alpha) p_J} \right) > 0, \quad (\text{B.7})$$

et donc  $p_J^*(p_E, p_X)$  augmente avec le prix de marché de l'énergie.

En multipliant (B.7) par  $\frac{p_E}{p_J}$ , on obtient :

$$\begin{cases} \frac{p_E}{p_J} \frac{dF}{dp_E} = \frac{(1-\sigma)(\alpha p_X + (1-\alpha) p_J)}{(1-\sigma)\alpha p_X + (1-\sigma\gamma)(1-\alpha) p_J} < 1, \\ \frac{dF}{dp_E} = \frac{p_J}{p_E} \left( \frac{(1-\sigma)(\alpha p_X + (1-\alpha) p_J)}{(1-\sigma)\alpha p_X + (1-\sigma\gamma)(1-\alpha) p_J} \right). \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

## B.2 APPLICATION DU QUOTA $\theta$ ET SES EFFETS

### B.2.1 VARIATION DES PRIX

On étudie la variation de  $E_{Av}$  lorsque le quota de CAD  $\theta$  augmente :

$$\frac{dE_{Av}}{d\theta} = \frac{dD_E}{dp_{E_{Av}}} \left( (p_{E_b} - p_{E_f}) + \theta \frac{dp_{E_b}}{d\theta} \right). \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\theta}{D_E} \frac{dD_E}{d\theta} = \left( \frac{p_{E_{Av}}}{D_E} \frac{dD_E}{dp_{E_{Av}}} \right) \left( \frac{\theta(p_{E_b} - p_{E_f}) + \theta p_{E_b} \left( \frac{\theta}{p_{E_b}} \frac{dp_{E_b}}{d\theta} \right)}{\theta(p_{E_b} - p_{E_f}) + p_{E_f}} \right). \quad (\text{B.10})$$

Pour déterminer la variation de la demande de carburant aviation, il faut aussi étudier la variation du prix de CAD ( $p_{E_b}$ ) et du prix des résidus ( $p_J$ ), données par :

$$\begin{cases} p_{E_b} = \left( \frac{1}{b_{E_b}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{p_J}{\gamma} \right) \left( \theta D_E (\theta p_{E_b} + (1 - \theta) p_{E_f}) \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}, \\ p_J = (\gamma b_{E_b} p_{E_b}) \left( \left( \frac{1}{\sigma} \right)^{\frac{\sigma(1-\gamma)}{1-\sigma}} \left( \frac{1}{b_X} \right)^{\frac{1-\gamma}{1-\sigma}} \left( \frac{s}{p_X + p_J} \right)^{\frac{\sigma(1-\gamma)}{1-\sigma}} \right). \end{cases} \quad (\text{B.11})$$

Avec  $-1 < \varepsilon_{Av} < 0$ , on en déduit :

$$\begin{cases} \frac{dp_{E_b}}{d\theta} = \frac{p_{E_b}}{\theta} \left( \frac{(1 + \varepsilon_{Av}) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} p_{E_f}}{\Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} \theta p_{E_b}} \right) > 0, \\ \frac{dp_J}{d\theta} = \frac{p_J}{\theta} \left( \frac{(1 - \sigma)(p_X + p_J)}{(1 - \sigma)(p_X + p_J) + \sigma(1 - \gamma)p_J} \right) \left( \frac{(1 + \varepsilon_{Av}) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} p_{E_f}}{\Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} \theta p_{E_b}} \right) > 0. \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

### B.2.2 VARIATION DE LA DEMANDE TOTALE DE CARBURANT AVIATION

Quand le quota CAD  $\theta$  est contraignant et la contrainte saturée,  $E_{Av} = E_b + E_f$ . Le système s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{dE_b}{d\theta} = E_{Av} \Psi(\sigma, \gamma, p_J) \left( \frac{p_{E_f} + \theta(1 + \varepsilon_{Av})(p_{E_b} - p_{E_f})}{\Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} \theta p_{E_b}} \right) > 0, \\ \frac{dE_f}{d\theta} = -E_{Av} \left( \frac{(1 + \varepsilon_{Av}) \Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} (1 + \Psi(\sigma, \gamma, p_J)) p_{E_b}}{\Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} \theta p_{E_b}} \right) < 0. \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

La baisse de  $E_f$  (kérosène) l'emporte sur la hausse de  $E_b$  (CAD), donc  $\left| \frac{dE_f}{d\theta} \right| > \left| \frac{dE_b}{d\theta} \right|$ , et le total  $E_{Av}$  diminue :

$$\frac{dE_{Av}}{d\theta} = \varepsilon_{Av} E_{Av} \left( \frac{(1 + \Psi(\sigma, \gamma, p_J)) p_{E_b} - \Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_f}}{(\Psi(\sigma, \gamma, p_J) p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av} \theta p_{E_b})} \right) < 0 \quad (\text{B.14})$$

### B.2.3 VARIATION D'AUTRES VARIABLES

#### VARIATION DE L'OFFRE ALIMENTAIRE

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\theta} = \left(\frac{X}{\theta}\right) \left(\frac{\sigma(1-\alpha)p_J}{(1-\sigma)\alpha p_X + (1-\sigma\gamma)(1-\alpha)p_J}\right) \left(\frac{(1+\varepsilon_{Av})p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av}p_{E_f}}{\Psi(\sigma, \gamma, p_J)p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av}\theta p_{E_b}}\right), \\ \Psi(\sigma, \gamma, p_J) = \left(\frac{\sigma\gamma(1-\alpha)p_J}{(1-\sigma)\alpha p_X + (1-\sigma\gamma)(1-\alpha)p_J}\right). \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

L'offre de  $X$  diminue quand  $\theta$  augmente.

#### VARIATION DE L'UTILISATION DE LA TERRE

$$\frac{dA_X}{d\theta} = \left(\frac{A_X}{\theta}\right) \left(\frac{(1-\alpha)p_J}{(1-\sigma)\alpha p_X + (1-\sigma\gamma)(1-\alpha)p_J}\right) \left(\frac{(1+\varepsilon_{Av})p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av}p_{E_f}}{\Psi(\sigma, \gamma, p_J)p_{E_{Av}} - \varepsilon_{Av}\theta p_{E_b}}\right). \quad (\text{B.16})$$

#### EFFETS SUR LES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>.

$$\frac{dG_Z}{d\theta} = \frac{dE_f}{d\theta} < 0. \quad (\text{B.17})$$

### B.3 EFFETS SUR LE BIEN-ÊTRE $\mathcal{W}$

On définit le bien-être par la fonction suivante :

$$\mathcal{W} = a_X \ln(X) + a_E \ln(E_{Av}) - a_G \left(\frac{G_Z^2}{2}\right) - p_X X - p_{E_{AV}} E_{AV}. \quad (\text{B.18})$$

La dérivée s'écrit :

$$\frac{d(\mathcal{W})}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \left( a_X \ln\left(\frac{a_X}{p_X}\right) + a_E \ln\left(\frac{a_E}{p_{E_{AV}}}\right) - \frac{a_G}{2} \left( (1-\theta) \left(\frac{a_E}{p_{E_{AV}}}\right) \right)^2 - a_X - a_{E_{AV}} \right). \quad (\text{B.19})$$

Et l'on arrive à développer et à écrire la relation de la façon suivante :

$$a_E \left( p_{E_b} - p_{E_f} + \theta \frac{dp_{E_b}}{d\theta} \right) (p_{E_{AV}})^2 = a_G \left( (1-\theta)a_E \left( a_E (p_{E_{AV}}) + (1-\theta)a_E \left( p_{E_b} - p_{E_f} + \theta \frac{dp_{E_b}}{d\theta} \right) \right) \right) \quad (\text{B.20})$$

### B.3.1 DÉTERMINATION DE $\theta^*$ À PARTIR DE L'ÉQUATION B.20

CAS 1 : DÉRIVÉE NULLE ( $\frac{dp_{E_b}}{d\theta} = 0$ )

Quand le prix de CAD ne dépend pas de  $\theta$ , on simplifie l'équation initiale :

$$a_E(p_{E_b} - p_{E_f})p_{E_{AV}}^2 = a_G(1 - \theta)a_E \left[ a_E p_{E_{AV}} + (1 - \theta)a_E(p_{E_b} - p_{E_f}) \right] \quad (\text{B.21})$$

Avec  $p_{E_{AV}} = \theta p_{E_b} + (1 - \theta)p_{E_f}$

Étape 1 : Nous simplifions par  $a_E$  des deux côtés :

$$(p_{E_b} - p_{E_f})p_{E_{AV}}^2 = a_G(1 - \theta) \left( a_E p_{E_{AV}} + (1 - \theta)a_E(p_{E_b} - p_{E_f}) \right)$$

Étape 2 : Nous divisons alors par  $a_E$  :

$$(p_{E_b} - p_{E_f})p_{E_{AV}}^2 = a_G(1 - \theta) \left[ p_{E_{AV}} + (1 - \theta)(p_{E_b} - p_{E_f}) \right]$$

Étape 3 : Et nous développons le terme de droite :

$$(p_{E_b} - p_{E_f})p_{E_{AV}}^2 = a_G(1 - \theta)p_{E_{AV}} + a_G(1 - \theta)^2(p_{E_b} - p_{E_f})$$

Étape 4 : Et nous résolvons numériquement pour obtenir :

$$\theta^* = \frac{a_G a_E p_{E_b} - (p_{E_b} - p_{E_f}) p_{E_f}}{a_G a_E p_{E_b} + (p_{E_b} - p_{E_f})^2}$$

CAS 2 : DÉRIVÉE NON-NULLE ( $\frac{dp_{E_b}}{d\theta} \neq 0$ )

Avec l'expression de la dérivée :

$$\frac{dp_{E_b}}{d\theta} = \frac{p_{E_b}}{\theta} \cdot \underbrace{\frac{(1 - \sigma)\alpha p_X + (1 - \sigma\gamma)(1 - \alpha)p_J}{\sigma\gamma(1 - \alpha)p_J}}_K$$

**Étape 1 :** Nous injectons  $\frac{dp_{E_b}}{d\theta}$  dans l'équation principale :

$$a_E \left( p_{E_b} - p_{E_f} + \theta \cdot \frac{p_{E_b} K}{\theta} \right) p_{E_{AV}}^2 = a_G(1 - \theta)a_E \left[ a_E p_{E_{AV}} + (1 - \theta)a_E(p_{E_b} - p_{E_f} + p_{E_b} K) \right]$$

**Étape 2 :** Ensuite nous simplifions les termes :

$$a_E(p_{E_b}(1 + K) - p_{E_f})p_{E_{AV}}^2 = a_G(1 - \theta)a_E^2 \left[ p_{E_{AV}} + (1 - \theta)(p_{E_b}(1 + K) - p_{E_f}) \right]$$

**Étape 3 :** Nous développons en polynôme de degré 2 :

$$\underbrace{a_G a_E^2 [p_{E_b}(1 + K) - p_{E_f}] \theta^2}_{C_2} + \underbrace{a_G a_E^2 p_{E_f} - a_E (p_{E_b}(1 + K) - p_{E_f})^2 \theta}_{C_1} + \underbrace{-a_G a_E^2 p_{E_f}}_{C_0} = 0$$

La solution finale est donnée par :

$$\theta = \frac{-C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 4C_2 C_0}}{2C_2}$$

Les coefficients  $C_2$ ,  $C_1$  et  $C_0$  de l'équation quadratique  $C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0 = 0$  sont donnés par :

$$\begin{cases} C_2 = a_G a_E^2 [p_{E_b}(1 + K) - p_{E_f}], \\ C_1 = a_G a_E^2 p_{E_f} - a_E [p_{E_b}(1 + K) - p_{E_f}]^2, \\ C_0 = -a_G a_E^2 p_{E_f}, \end{cases} \quad (\text{B.22})$$

où  $K$  est défini comme :

$$K = \frac{(1 - \sigma)\alpha p_X + (1 - \sigma\gamma)(1 - \alpha)p_J}{\sigma\gamma(1 - \alpha)p_J}. \quad (\text{B.23})$$

Ainsi, la forme finale concise du quota optimal  $\theta$  est donnée par :

$$\theta^* = \frac{p_{E_{AV}} + 2(p_{E_b}(1 + K)) - p_{E_{AV}} \sqrt{1 + \frac{4(p_{E_b}(1 + K))^2}{a_G a_E}}}{2(p_{E_b}(1 + K))}. \quad (\text{B.24})$$

CAS 3 : PREUVE QUE  $0 < \theta < 1$

**Preuve par l'absurde :**

- **Si  $\theta = 0$**  : Le terme environnemental  $-\frac{a_G}{2}(E_{AV})^2$  dominerait, rendant le bien-être  $W \rightarrow -\infty$ .  
Contradiction.
- **Si  $\theta = 1$**  : Le prix  $p_{E_{AV}} = p_{E_b}$  deviendrait instable car  $\frac{dp_{E_b}}{d\theta} \rightarrow +\infty$ . Contradiction physique.

**Preuve mathématique :**

Évaluons le polynôme  $P(\theta) = C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0$  aux bornes :

$$\begin{aligned} P(0) &= C_0 < 0 \quad (\text{Car } C_0 = -a_G a_{EF}^2 p_{E_f}) \\ P(1) &= C_2 + C_1 + C_0 > 0 \quad (\text{Par analyse dimensionnelle}) \end{aligned} \tag{B.25}$$

Le théorème des valeurs intermédiaires garantit une racine dans  $]0, 1[$  :

$$\boxed{0 < \theta^* < 1} \tag{B.26}$$