UCLouvain

epl

École polytechnique de Louvain

Impact d'un scénario bas carbone sur l'emploi en Belgique

Auteur: **Emile SALIEZ**
Promoteurs: **Hervé JEANMART, Antoine GODIN**
Lecteurs: **Fabio MARIANI, Paolo THIRAN**
Année académique 2025–2026
Master [120] in Energy Engineering

Table des matières

1 Introduction **5**

2 Revue de littérature **7**

3 Méthodologie **12**
3.1 EnergyScope TD 12
3.2 Méthodologie entrée sortie 13
3.2.1 Le Tableau Entrées-Sorties (TES) 13
3.2.2 Construction de l'inverse de Leontief 15
3.3 Cadre général de l'analyse, estimation du nombre d'emplois créés . 17
3.3.1 Vecteur d'intensité en emploi e 18
3.3.2 Matrice de correspondance 18
3.3.3 Les importations 19
3.3.4 Conversion euro constant-euro courant 20
3.4 Scénario alternatif : relocalisation des filières 21
3.5 Désagrégation des emplois par sexe et niveaux d'études, estimation des salaires 21

4 Résultats **23**
4.1 Différences d'investissements entre le scénario de référence et le scénario bas carbone 23
4.2 Emplois totaux 25
4.2.1 Désagrégation des emplois des Technologies et Ressources (T&R) par secteurs industriels 28
4.3 Scénario alternatif : relocalisation des filières 28
4.4 Intensité emploi des T&R 31
4.5 Désagrégation en type d'emploi 31

5 Discussion **35**
5.1 Synthèse et interprétation des principaux résultats 35
5.2 Limites méthodologiques et pistes de recherches futures 36

6 Conclusion **39**

A Signification des abréviation des ressources/technologies d'Energie Scope TD présentés. **41**

B Matrice de comptabilité sociale et modèles d'équilibre général calculables **43**

C Sources matrice de correspondance **45**

Liste des abréviations

TES Tableau Entrées-Sorties

T&R Technologies et Ressources

Capex Capital Expenditures

Opex Operational Expenditures

NACE Nomenclature des Activités économiques dans la Communauté Européenne

ETP Equivalents Temps Plein

GWP Global Warming Potential

Remerciements

Je voudrais remercier les personnes qui m'ont soutenu dans l'écriture de ce mémoire.

Je tiens à remercier les Professeurs Hervé Jeanmart et Antoine Godin de m'avoir accompagné tout au long de ce travail. Leur expertise a été très précieuse.

Je remercie le Bureau du Plan de m'avoir fourni les tables indispensables à ce mémoire. Les compléments d'information qu'ils m'ont fournis ont également été très instructifs.

Je voudrais finalement remercier ma famille et mes amis d'avoir été là tout au long de ce processus.

Un grand merci à Rayan, Victor et Mathis pour les heures passées ensemble en bibliothèque.

Abstract

La transition énergétique est fréquemment présentée comme un vecteur de création d'emplois. Mais, en plus du seul volume, une question essentielle demeure : à qui ces emplois bénéficieront-ils ?

Ce mémoire apporte des éléments de réponse à cette question dans le contexte belge à l'horizon 2050, en comparant deux scénarios issus du modèle EnergyScope TD. Le premier constitue un scénario de référence sans contrainte d'émission, tandis que le second impose une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre à hauteur de 5% des niveaux de 1990. Les différences de coûts d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX) entre ces deux scénarios sont ensuite intégrées dans un modèle entrées-sorties afin d'estimer l'impact net sur l'emploi en Belgique.

On obtient une création nette de 18 365 emplois, principalement associés aux secteurs de la construction et du transport. La répartition des emplois entre les sexes est très inégale avec seulement 19% d'emplois féminins.

Chapitre 1

Introduction

La transition énergétique s'impose aujourd'hui comme l'un des défis structurels majeurs auxquels les économies européennes sont confrontées. En réponse aux engagements climatiques pris dans le cadre de l'Accord de Paris et du Pacte vert européen, la Belgique s'est fixé l'objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 [1][30]. Outre la réduction des émissions de gaz à effet de serre, elle pourrait soutenir la croissance économique, rééquilibrer la balance commerciale et améliorer la santé publique [31]. Cette transformation profonde du système énergétique, qui implique le déploiement massif des énergies renouvelables, l'électrification des usages et le changement des habitudes de transport, ne saurait être réduite à sa seule dimension environnementale. Comme nous le verrons, elle dépasse la dimension environnementale et implique des choix économiques et sociaux considérables, au premier rang desquels figure la question de l'emploi [23].

Cette dynamique repose sur deux leviers macroéconomiques majeurs : d'une part, les investissements massifs requis par la transition et, d'autre part, la substitution des énergies fossiles, dont l'Europe est importatrice nette, par des énergies renouvelables d'origine plus locale. Bien que plusieurs rapports institutionnels aient quantifié ces effets à l'échelle nationale ([31] [13][14]), les analyses académiques récentes couplant une optimisation technologique avec une désagrégation socio-démographique du type d'emploi (genre, qualifications) demeurent limitées.

Ce mémoire vise à combler cette lacune. Il s'appuie sur l'outil de programmation linéaire EnergyScope TD. Ce modèle optimise le système énergétique belge sous contrainte de neutralité carbone. Il est ici articulé avec une approche entrées-sorties reposant sur les Tableaux Entrées-Sorties. Ce travail propose une estimation quantitative de l'impact de la transition énergétique sur l'emploi en Belgique. La question de recherche centrale est la suivante :

Quel est l'impact net de la transition énergétique sur le nombre et le

type d'emplois en Belgique ?

Cette question est abordée selon plusieurs dimensions complémentaires : le nombre total d'emplois créés ou supprimés, leur répartition sectorielle, et leurs caractéristiques en termes de genre et de niveau de qualification.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante. Le Chapitre 2 présente une revue de la littérature existante sur les liens entre transition énergétique et emploi. Le Chapitre 3 décrit le cadre méthodologique, en détaillant successivement le modèle EnergyScope TD, la méthodologie entrées-sorties et la procédure de calcul des emplois créés. Le Chapitre 4 expose les résultats obtenus : la transition énergétique telle que modélisée génère un solde net positif en termes d'emplois, concentré toutefois dans des secteurs à prédominance masculine, ce qui soulève des enjeux d'équité de genre que ce mémoire s'attache à mettre en lumière. Enfin, le Chapitre 5 discute les limites de l'analyse et ouvre des pistes pour des recherches futures.

Chapitre 2

Revue de littérature

Les études quantitatives portant sur la création globale d'emplois liée à la transition énergétique peuvent être divisées en deux grands ensembles : d'une part, celles mesurant le nombre total d'emplois générés sans tenir compte des destructions d'emplois, on parle alors de création brute d'emplois, et d'autre part, celles qui évaluent le nombre net d'emplois par rapport à un scénario de référence. Par ailleurs, des études se concentrent spécifiquement sur l'analyse des différences d'intensité en emploi entre les diverses technologies et secteurs [41].

Sur le plan méthodologique, on distingue deux approches. D'un coté, les méthodes descendantes (top-down) partent de grands agrégats macroéconomiques et utilisent des relations monétaires globales pour évaluer l'impact d'un choc sur toute l'économie. D'un autre coté, les méthodes ascendantes (bottom-up), construisent le système « par le bas » en modélisant une multitude de technologies réelles. Les approches basées sur les modèles entrées-sorties (Input-Output) et les modèles d'équilibre général calculable (détaillés à l'annexe B) constituent les approches top-down, tandis que les modèles analytiques relèvent des méthodes bottom-up. [36, 26].

Création brute

En ce qui concerne la création brute d'emplois, les différentes études entrées-sorties recensées mettent en évidence une création significative, avoisinant fréquemment les 100 000 emplois. À titre d'illustration, l'analyse du plan solaire espagnol Solar CSP 2005-2010 menée par Caldés et al. [8] estiment une création substantielle de 108 000 équivalents temps plein (ETP), localisés principalement dans les secteurs de la construction et des services financiers. Suivant une approche méthodologique similaire, Oliveira et al. [38] évaluent à 105 000 ETP l'impact brut généré par le déploiement de diverses filières renouvelables au Portugal, touchant en premier

lieu les industries de la machinerie et des équipements électriques. Enfin, l'étude de Tourkolias et al. [45] portant sur la Grèce propose une désagrégation de cette dynamique par technologie dans le cadre des objectifs *EU 20-20-20*. Leurs résultats quantifient le contenu en emploi brut de chaque technologie, s'élevant notamment à 182 hommes-années/MW pour la biomasse et 1 503 hommes-années/TWh pour le photovoltaïque, impactant de manière transversale les secteurs manufacturiers, du transport et du commerce. Il convient toutefois de souligner que le volume absolu d'emplois créés dépend en grande partie de la taille de l'économie considérée.

En somme, le déploiement des énergies renouvelables engendre une création brute massive d'emplois. Pour obtenir une vision complète de cette dynamique, il convient toutefois de confronter ces gains aux destructions d'emplois dans les secteurs fossiles, c'est l'objet du paragraphe suivant.

Création nette

En matière de création nette, Fulleman et al. [21] évaluent les impacts à long terme de la transition énergétique sur l'emploi en Suisse à l'horizon 2050. Ils modélisent simultanément l'offre et la demande (efficacité énergétique des bâtiments, comportements de transport, etc.) grâce à un modèle entrées-sorties hybride. En comparant un scénario de statu quo avec un scénario de transition ambitieux, les auteurs observent que ce dernier génère 70 000 emplois supplémentaires, soit 1.5% de la population active suisse. Fait notable, une très grande partie de ces emplois provient de la gestion de la demande et non de la production d'énergie, les principaux secteurs gagnants étant la construction et les transports.
De leur côté, Fragkos et Parousos [20] mobilisent le modèle GEM-E3 afin d'évaluer l'impact sur l'emploi du remplacement des sources d'énergie conventionnelles par des énergies renouvelables (des informations complémentaires relatives au modèle GEM-E3 sont présentées en annexe B). Leurs projections indiquent que la transition bas carbone européenne pourrait mener à la création nette de 200 000 emplois directs à l'horizon 2050, principalement concentrés dans la construction de panneaux photovoltaïques, la production et la fourniture de biocarburants avancés, ainsi que la fabrication et l'installation d'éoliennes. Ces emplois liés aux énergies renouvelables représenteraient alors 1 % de la main-d'œuvre européenne en 2050. Les auteurs démontrent par ailleurs que les énergies renouvelables affichent, en moyenne, une intensité en emploi supérieure à celle des énergies fossiles.
Dans un rapport pour Eurofound, Lewney et al. [32] s'appuient sur le modèle macro-économétrique global E3ME et prévoient une augmentation de 0.5% de l'emploi en Europe à l'horizon 2030 dans un scénario conforme à l'Accord de Paris (par rapport au scénario de référence). Ils soulignent que les emplois créés exigeraient majoritairement de faibles niveaux de qualification, tout en pointant

d'importantes disparités selon les réalités nationales. Cela confirme la pertinence d'une analyse ciblée.
Enfin, Quirion [39] estime à 105 000 le nombre d'emplois nets créés en France d'ici 2030 (chiffre qui s'élève à 632 000 en intégrant les effets induits). Ses calculs reposent, entre autres, sur des ratios de 14 emplois par million d'euros investi dans le photovoltaïque et d'environ 13,5 emplois pour le transport ferroviaire.

L'ensemble de ces travaux converge vers un bilan net positif de la transition énergétique sur l'emploi, et ce quelles que soient les méthodes mobilisées, le périmètre ou le lieu de l'étude. Au-delà de ce bilan agrégé, ces études révèlent que les gains d'emploi sont concentrés dans quelques secteurs clés, ce qui souligne l'importance d'une analyse désagrégée plutôt que d'un simple total net.

Études analytiques

Les études analytiques permettent également d'appréhender l'impact sur l'emploi. Reposant généralement sur des enquêtes, elles peinent toutefois à capturer les emplois indirects (générés chez les sous-traitants). Elles s'avèrent ainsi plus appropriées pour des analyses à l'échelle régionale que nationale, et se concentrent habituellement sur un nombre restreint de technologies plutôt que sur l'ensemble d'un système énergétique [29].
Simas et Pacca [44] combinent une approche analytique et une méthode entrées-sorties pour évaluer la création d'emplois liée à l'énergie éolienne au Brésil. Ils estiment le contenu en emploi à 13,5 personnes-années/MW pour la phase d'installation, et à 24,5 personnes-années/MW sur l'ensemble du cycle de vie de l'infrastructure. À l'instar de la majorité des travaux de la littérature, une part prépondérante de ces emplois est captée par le secteur de la construction.
Llera et al. [35] analysent quant à eux l'évolution des emplois par MW pour le photovoltaïque en Espagne entre 2000 et 2011. Ils observent une diminution asymptotique de cet indicateur, attribuée aux économies d'échelle, qui s'effondre de 145 emplois/MW en 2000 à seulement 3 emplois/MW en 2010. Pour cette même année, ils recensent un total de 19 855 emplois au sein du secteur photovoltaïque espagnol.

Distribution et profil des emplois

Au-delà du volume global, la structure socioprofessionnelle des emplois fait l'objet d'analyses dédiées. Cerny et al. [10] analysent les impacts sur l'emploi d'une transition vers un système électrique décarboné au sein de l'Union européenne et du Royaume-Uni. Leurs conclusions indiquent que la demande de main-d'œuvre

augmentera de manière asymétrique au profit des postes hautement et moyennement qualifiés, ainsi que des profils à prédominance masculine. En termes relatifs, la catégorie des hommes hautement qualifiés enregistre la plus forte progression (+165% d'ici 2050 par rapport à 2015 dans le secteur de la production d'électricité et sa chaîne d'approvisionnement), tandis que celle des femmes peu diplômées est celle qui bénéficie le moins de cette dynamique (+79%). Par ailleurs, les auteurs démontrent que même en l'absence de politiques protectionnistes, le secteur domestique de l'électricité captera la majorité des gains avec une hausse de +127% d'ici 2050.
Blanco et Rodrigues [3] confirment cette tendance sectorielle par une méthode analytique, montrant que 78% de la main-d'œuvre de l'éolien européen est masculine (contre 55.7% tous secteurs confondus). Cette surreprésentation s'explique par la forte dépendance de l'éolien envers les secteurs de la construction et de l'ingénierie. Ce Déséquilibre de genre et de qualification se retrouve dans l'étude de Cai et al. [7] sur la Chine, où les emplois créés s'avèrent majoritairement masculins et destinés à des profils hautement qualifiés.
Raju et al. [41], dans leur analyse input-output appliquée au Maroc, chiffrent la création d'emplois à environ 145 000 postes par an. Les transports et l'efficacité énergétique des bâtiments génèrent 88% de ces gains. La répartition y est également très inégalitaire : les femmes n'occupent que 18.7% des emplois liés à la transition mais 88.7% des postes se concentrent dans les deux niveaux de qualification les plus bas, dans une tendance inverse aux études précédentes.
Néanmoins, l'IRENA [27] nuance ces constats en indiquant que la part des femmes reste plus élevée dans les énergies renouvelables (32%) que dans l'industrie conventionnelle du pétrole et du gaz (22%).

En somme, la littérature met en évidence une reconfiguration asymétrique du marché du travail. Les études s'accordent sur la persistance d'un déséquilibre de genre au détriment des femmes, malgré une amélioration relative par rapport au secteur fossile. En revanche, l'impact sur les qualifications s'avère contrasté entre les différentes études.

Le cas de la Belgique

Bien que la littérature relative aux impacts de la transition sur l'emploi soit abondante à l'échelle internationale, les travaux spécifiquement consacrés à la Belgique demeurent plus rares. Cornet et al. [12], dans un rapport pour la Belgian Offshore Platform, estiment que le secteur éolien en mer pourrait générer jusqu'à 24 000 emplois si la puissance installée en Belgique atteignait 6GW.
Par ailleurs, dans une étude menée en 2013 pour le Bureau fédéral du Plan, Devogelaer [13, 14] projette la création de 21 000 à 65 000 emplois à l'horizon 2030

dans l'hypothèse d'un système énergétique belge 100% renouvelable. Toutefois, en intégrant les gains de productivité technologique futurs, cette fourchette est réévaluée entre 18 000 et 53 000 ETP créés pour 2030.
Enfin, le rapport du cabinet Climact publié en 2016 [31] évoque un potentiel de 80 000 créations d'emplois pour 2030, signalant qu'une part prépondérante de ces postes serait portée par le secteur de la construction et les services marchands.

Chapitre 3

Méthodologie

Ce chapitre présente le cadre méthodologique utilisé pour évaluer l'impact de la transition énergétique sur l'emploi en Belgique. Les chapitres précédents ont permis de situer cette transition dans son contexte et d'identifier les approches existantes dans la littérature. Il s'agit à présent de décrire précisément les outils et les données mobilisés pour répondre à la question centrale de ce mémoire : quel est l'impact net de la transition énergétique sur le nombre et sur le type d'emplois en Belgique ?

La démarche repose sur un modèle entrées-sorties, dont le cadre théorique est présenté en section 3.2.2. Ce modèle permet de capturer les effets directs et indirects d'un choc de demande sur l'ensemble des secteurs de l'économie belge, en s'appuyant sur les Tableaux Entrées-Sorties (TES) du Bureau du Plan, décrits en section 3.2.1. Enfin, la section 3.3 expose la procédure complète permettant de traduire ces effets économiques en variations d'emploi, via le vecteur d'intensité en emploi et l'inverse de Leontief.

La figure 3.2 offre une vue d'ensemble de cette chaîne méthodologique.

3.1 EnergyScope TD

EnergyScope TD est un modèle de programmation linéaire qui tient compte des secteurs de la mobilité, du chauffage et de l'électricité. L'objectif du modèle est de satisfaire la demande au coût le plus faible possible. La demande est donc considérée comme exogène et les technologies qui travaillent à sa réduction (comme l'isolation thermique des bâtiments) ne sont pas modélisées. Sa résolution horaire permet de prendre en compte les sources d'énergie intermittentes ainsi que la gestion des systèmes de stockage. Il repose sur des « typical days », c'est-à-dire des journées représentatives combinées à une méthode de reconstruction. Cette méthode permet

de réduire de manière significative le temps de calcul. Dans le modèle, les coûts sont associés soit à des technologies, soit à des ressources. Les coûts des technologies sont séparés en deux : les coûts associés à l'investissement à long terme (Capex) et les dépenses d'exploitation courantes, à l'exception des ressources (Opex). Il existe différentes extensions au modèle appliquées à différents pays. La version « pathway » permet d'optimiser le système énergétique d'une année existante à une année cible future. Nous avons utilisé la version « snapshot » qui ne modélise qu'une seule année, 2050 en l'occurrence. Energy Scope Multi-Cells permet la représentation simultanée de plusieurs régions. Ces régions sont résolues simultanément et tiennent compte des échanges de plusieurs vecteurs d'énergie (généralement l'électricité, les molécules et le bois). La version qui ne comprend qu'une seule cellule géographique (la Belgique) a été utilisée dans cette étude. [33] [34]

Deux scénarios ont été éxécutés dans EnergyScope TD. Le premier, dans lequel aucune contrainte d'émission de gaz à effet de serre n'a été imposée, sert de point de référence. Les coûts d'OPEX et de CAPEX associés à ces T&R ont été enregistrés. Pour la seconde simulation, une limite d'émission de gaz à effet de serre a été fixée à 5% des émissions de 1990 en Belgique. On a :

$$0.05 \cdot 130785 = 6539.25 \text{ [ktCO2-eq./year] [2]} \tag{3.1}$$

La puissance nucléaire maximale a été fixée à 6 GW.

Les vecteurs des différences de coûts pour chaque T&R, $\Delta costs_{capex}$ et $\Delta costs_{opex}$ sont obtenus en calculant la différence entre les deux simulations. Ces différences de coûts indiquent donc l'investissement supplémentaire nécessaire pour être neutre en carbone comparativement au scénario le plus efficace financièrement pour 2050. Le scénario de référence n'est donc pas lié à la réalité actuelle du secteur.

3.2 Méthodologie entrée sortie

La méthodologie utilisée dans ce mémoire pour calculer les emplois créés repose sur l'inverse de Léontiev. L'objectif de cette section est d'en expliquer le fonctionnement et la construction.

3.2.1 Le Tableau Entrées-Sorties (TES)

Un Tableau Entrées-Sorties (TES) peut être vu comme une batterie d'équations qui traduisent les échanges économiques dans un lieu donné. Elle dit, à un instant

T, quels sont les échanges qui sont effectués. [37]

La figure 3.1 illustre la structure d'un tableau entrée-sortie. La partie en gris correspond à la matrice des coefficients techniques, qui retrace les échanges intermédiaires entre secteurs. Chaque colonne représente les dépenses d'un secteur donné : la première colonne indique par exemple ce que le secteur agricole achète aux autres secteurs mais aussi ce qui est payé aux employés, les profits et les taxes. Ces trois derniers postes constituent la valeur ajoutée du secteur. Les lignes se lisent quant à elles du côté des ventes : chaque ligne indique, pour un secteur donné, ce qu'il vends à chacun des autres secteurs. Ainsi, la première ligne recense les achats des différents secteurs à l'agriculture et la demande finale qui lui est adressée.

Les secteurs indiqués dans la figure 3.1 sont des exemples. Les TES utilisés dans ce mémoire suivent la nomenclature du bureau du plan belge et comportent 143 secteurs.

		PRODUCERS AS CONSUMERS								FINAL DEMAND			
		Agric.	Mining	Const.	Manuf.	Trade	Transp.	Services	Other	Personal Consumption Expenditures	Gross Private Domestic Investment	Govt. Purchases of Goods & Services	Net Exports of Goods & Services
PRODUCERS	Agriculture												
	Mining												
	Construction												
	Manufacturing												
	Trade												
	Transportation												
	Services												
	Other Industry												
VALUE ADDED	Employees	Employee compensation								GROSS DOMESTIC PRODUCT			
	Business Owners and Capital	Profit-type income and capital consumption allowances											
	Government	Indirect business taxes											

FIGURE 3.1 – Tableau entrée sortie [37].

Les tableaux entrées-sorties peuvent être séparés en deux catégories :

- Les tableaux industrie par industrie relient les secteurs économiques entre eux en considérant l'output principal des entreprises. Si par exemple une entreprise d'une branche A produit des output de la branche A mais aussi, dans une moindre mesure, des produits de la branche B. L'impact de ces derniers sera compté dans la branche A.
- Les tableaux produits par produits classent les flux selon le type de produit, en ne tenant pas compte de l'entreprise à l'origine de la production. [17, p. 378]

Dans le cadre d'une analyse de l'emploi, le tableau industrie par industrie est

préférable. Bien qu'il introduise une légère imprécision due aux activités secondaires des entreprises, il reflète plus fidèlement les données statistiques brutes et s'avère de ce fait plus fiable. Le recours au tableau produit par produit présente en outre un inconvénient majeur : le modèle mathématique utilisé pour le construire génère parfois des coefficients de production négatifs, ce qui est dépourvu de sens économique et nuit à la robustesse du modèle [40].

Les TES peuvent aussi être distinguées selon la zone géographique de production. Le Bureau du Plan en propose trois variantes [5] :

- un TES de la production intérieure, qui ne tient compte que des biens produits localement
- un TES des importations, qui ne reprend que les biens achetés domestiquement et provenant de l'étranger
- un TES global, obtenu en additionnant les deux précédents.

Dans la partie sur l'impact domestique, c'est le TES de la production intérieure qui sera utilisé.

3.2.2 Construction de l'inverse de Leontief

La partie supérieure du TES peut se réécrire de la manière suivante :

$$x = Zi + f \tag{3.2}$$

Avec

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & \cdots & z_{mn}, \end{bmatrix} \quad i = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

x étant le vecteur d'output brut par secteur, c'est-à-dire la production totale de chaque secteur de l'économie. Z étant la matrice des consommations intermédiaires, également appelée matrice des échanges inter-industriels : elle retrace l'ensemble des flux de biens et services qu'un secteur achète à un autre pour produire. L'élément z_{mn} représente la valeur totale de ce qui est acheté par le secteur n au secteur m. i étant un vecteur colonne de uns et f étant le vecteur des demandes finales, il donne pour chaque secteur la somme des différents usages finaux de la production (consommation des ménages, investissements, exportations, dépenses publiques). La relation 3.2 formalise le fait que la production totale d'un secteur est égale à la somme de la demande finale et des échanges inter-industriels de ce secteur.

Nous normalisons ensuite chaque élément z_{mn} par le total consommé par le secteur n pour obtenir A.

$$a_{mn} = \frac{z_{mn}}{x_n} \tag{3.4}$$

On a :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{x_1} & \dots & \frac{z_{1n}}{x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{z_{m1}}{x_1} & \dots & \frac{z_{mn}}{x_n} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

La matrice A est appelée « matrice des coefficients techniques » ou « matrice des consommations intermédiaires directes » (« direct requirements matrix »). Chaque colonne de cette matrice représente la « recette de production » du secteur correspondant, c'est-à-dire la combinaison fixe de biens intermédiaires nécessaire à la production d'une unité de produit dans ce secteur. Chaque élément a_{mn} donne, pour un euro dépensé dans le secteur n, la proportion qui sera redirigée vers le secteur m. La somme de chaque colonne de A est inférieure à 1 puisqu'elle ne représente pas la valeur ajoutée.

Cette représentation formalise l'hypothèse de proportions fixes entre les facteurs de production, ce qui implique, dans le cadre du modèle, des rendements d'échelle constants.

On a maintenant :

$$x = Ax + f \tag{3.6}$$

Si $det(A - I) \neq 0$, cela indique que $(A - I)$ est inversible et on trouve alors :

$$x = (I - A)^{-1} f = Lf \tag{3.7}$$

I étant la matrice identité.
L'égalité 3.7 met en évidence l'une des relations fondamentales de ce mémoire. La matrice L, appelée matrice inverse de Leontief, relie la demande finale à la production totale de chaque secteur. Elle intègre non seulement les exigences directes, mais également l'ensemble des besoins indirects. Prenons l'exemple du secteur de la construction : pour répondre à une augmentation de sa demande finale (la commande d'un nouveau bâtiment), ce secteur doit accroître sa production. Pour ce faire, il engendre des besoins en consommant les produits de ses fournisseurs (béton, acier, services d'architecture). À leur tour, ces fournisseurs doivent augmenter leur propre production et commander des intrants auprès de leurs propres fournisseurs (énergie, matières premières), et ainsi de suite par effets de cascade à travers tout l'appareil productif. Toutes ces productions sont prises en compte.

La matrice L est également appelée "total requirement matrix". La "direct requirement matrix" (matrice A) tient uniquement compte des besoins directs, la matrice L tient compte des besoins directs et indirects.

En effet, l'inverse de Leontief peut être réécrit comme suit grâce aux séries de Neumann [43] :

$$(I - A)^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + \dots \tag{3.8}$$

I représente la demande finale, A représente les besoins intermédiaires directs de premier rang [1], A^2 représente les besoins indirects de second rang,... [11]

L'élément l_{mn} de la matrice L représente, en euro, la quantité nécessaire de produits du secteur m nécessaire pour produire 1€ de demande finale dans le secteur n. Les éléments de la diagonale représentent la quantité qu'il faut produire dans un secteur pour fournir 1€ de demande finale. Puisque pour fournir une unité de demande finale, le secteur doit produire une unité mais aussi toutes les unités requises par les intrants intermédiaires, (Un secteur peut, par exemple, être fournisseur de ses fournisseurs), ces éléments seront toujours supérieur ou égaux à 1.

3.3 Cadre général de l'analyse, estimation du nombre d'emplois créés

Cette section a pour objectif de présenter l'ensemble des opérations qui permettent d'obtenir le nombre d'emplois créés. La figure 3.2 présente une vue d'ensemble de

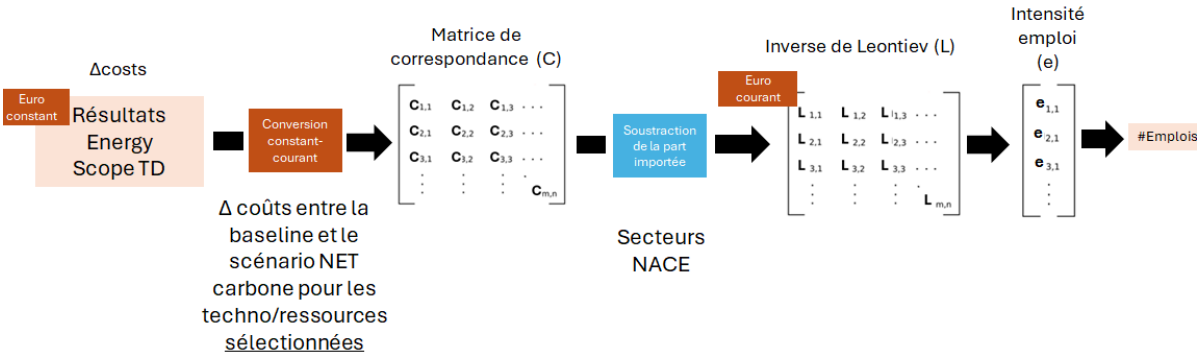


FIGURE 3.2 – Vision d'ensemble de la méthodologie

1. Attention, les termes direct et indirect ne se rapportent pas au même élément en fonction de s'il est question de flux financiers ou d'emploi. A représente les besoins intermédiaires directs de premier rang, mais est lié aux emplois indirects. C'est I qui est lié aux emplois directs

la méthodologie décrite tout au long de cette section.

3.3.1 Vecteur d'intensité en emploi e

Le vecteur d'intensité en emploi $e \in \mathbb{R}^{143}$ donne, pour chaque secteur industriel, le nombre d'emplois créés par million d'euros de production dans le secteur. Il a été calculé sur base des informations fournies par le Bureau du Plan en utilisant la formule suivante :

$$e_j = \frac{\text{Nombre d'emplois dans le secteur } j}{\text{Production du secteur } j} \tag{3.9}$$

La production correspond à la valeur totale des biens et services créés par les unités résidentes (entreprises, administrations, etc.) au cours d'une année.
Le total d'emplois créés s'obtient par la formule suivante :

$$\#Emplois = ex \tag{3.10}$$

Puisque les données sur l'emploi du Bureau du Plan sont en nombre de postes, les résultats de cette étude seront en nombre de postes également. Il ne s'agit pas d'Equivalents Temps Plein (ETP).

3.3.2 Matrice de correspondance

En combinant les équations 3.10 et 3.7, on obtient :

$$\#Emplois = eLf \tag{3.11}$$

Le vecteur des demandes finales f est exprimé dans les secteurs NACE du Bureau du Plan. Comme expliqué à la section 3.1, Energy Scope TD nous donne un montant pour l'Opex et le Capex des T&R. Il faut donc ventiler ces valeurs en secteurs NACE. Cela se fait grace aux matrices de correspondance $C_{capex}, C_{opex} \in \mathbb{R}^{143\times140}$.
On trouve alors :

$$f = C_{capex}\Delta costs_{capex} + C_{opex}\Delta costs_{opex} \tag{3.12}$$

L'indice c_{mn} donne la proportion de l'investissement de la T&R n qui ira dans le secteur industriel m.
L'expression générale devient :

$$\#Emplois = eL(C_{capex}\Delta costs_{capex} + C_{opex}\Delta costs_{opex}) \tag{3.13}$$

EnergyScope TD comprend 112 technologies et 28 ressources qu'il faut ventiler en 143 secteurs NACE, tant pour l'opex que pour le capex. Il n'est donc pas possible d'implémenter toutes les T&R dans le cadre de ce mémoire. Nous avons sélectionné les quelques T&R les plus pertinentes. Pour commencer, les ressources qui ne sont pas produites en Belgique ont été enlevées (Méthanol, gaz, importations d'électricité,...). Parmi les T&R restantes, nous avons sélectionné celles dont l'impact financier est le plus important. Nous avons également ajouté des T&R pour lesquelles il était facile de trouver des sources. Ces choix sont explicités dans les résultats à la section 4.1. La somme des éléments des colonnes correspondant aux T&R dont nous tenons compte vaut 1. Tous les éléments des colonnes liées aux T&R dont nous ne tenons pas compte sont mis à 0. Les sources utilisées pour construire les matrices de correspondances sont disponibles à l'annexe C.

3.3.3 Les importations

Une partie des investissements nécessaires à la décarbonation sera directement investie à l'étranger et ne contribuera donc pas à la création d'emplois domestiques. Bien que cette part soit inconnue au niveau de chaque T&R, elle peut être déterminée au niveau des secteurs NACE. C'est pourquoi cette opération est réalisée à droite de la matrice de correspondance dans le schéma de la figure 3.2. Le coefficient d'importation est calculé pour chaque secteur j comme le rapport entre la production locale p_j^{loc} et la somme de la production locale et de la production étrangère p_j^{imp} :

$$\beta_j = \frac{p_j^{\text{loc}}}{p_j^{\text{loc}} + p_j^{\text{imp}}} \tag{3.14}$$

où $\beta_j \in [0, 1]$ représente la part de la production satisfaite localement pour le secteur j.

Sur le plan opérationnel, nous construisons une matrice d'importation $B_{Imp} \in \mathbb{R}^{143\times143}$ dont l'entièreté de la colonne j est remplie par le coefficient β_j (tous les éléments d'une même colonne étant identiques). Nous appliquons ensuite un produit de Hadamard (produit terme à terme) entre la matrice de Leontief L et la matrice I_{mp}, ce qui donne la matrice de Leontief pondérée :

$$l_{pond,ij} = l_{ij}\beta_j \tag{3.15}$$

$$L_{\text{pond}} = L \odot B_{Imp} \tag{3.16}$$

Puisque la matrice de Leontief initiale est construite à partir d'un Tableau Entrées-Sorties (TES) en production intérieure, les fuites monétaires liées aux importations

dans les échanges intersectoriels sont déjà intégrées. La pondération par B_{mp} permet de prendre en compte la part des achats effectués auprès du premier secteur d'activité qui est couverte par la production domestique. L'équation 3.13 devient alors :

$$\#\text{Emplois} = e\, L_{\text{pond}}\, (C_{capex}\, \Delta costs_{capex} + C_{opex}\, \Delta costs_{opex}) \tag{3.17}$$

3.3.4 Conversion euro constant-euro courant

Les montants fournis par Energy Scope TD sont exprimés en euros constants, c'est-à-dire qu'ils sont tous rapportés aux prix d'une année de référence, en l'occurrence 2015. Les matrices input-output, en revanche, sont en euros courants, et celle que nous utilisons est établie pour l'année 2022. Il faut donc actualiser les prix de 2015 afin de les exprimer en valeur 2022.
Conformément à la méthodologie implémentée dans Energy Scope TD [25], l'actualisation repose sur le Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI). Cet indice rend compte de l'évolution des coûts des équipements, de la main-d'œuvre dans le secteur de la construction, des bâtiments et matériaux de construction, ainsi que des coûts d'ingénierie et de supervision [9]. Une des limites de cette approche est qu'elle suppose que toutes les T&R du modèle ont une inflation égale à celle du CEPCI. L'indice étant exprimé en dollars américains, une conversion entre l'euro et le dollar est requise. L'ajustement des coûts est alors effectué de la manière suivante :

$$\text{cost}[€_{2022}] = \text{cost}[€_{2015}] \cdot \frac{\text{USD}_{2015}}{€_{2015}} \cdot \frac{\text{CEPCI}_{2022}[\text{USD}_{2022}]}{\text{CEPCI}_{2015}[\text{USD}_{2015}]} \cdot \frac{€_{2022}}{\text{USD}_{2022}} \tag{3.18}$$

On obtient [24] :

$$\Delta costs[€_{2022}] = \Delta costs[€_{2015}] \cdot 1.11 \cdot \frac{816}{556.8} \cdot 0.95 \tag{3.19}$$

$$= \Delta costs[€_{2015}] \cdot 1.545 \tag{3.20}$$

Ainsi, les coûts exprimés en euros de 2015 sont multipliés par un facteur de 1,545 pour être convertis en euros de 2022.

On obtient finalement :

$$\#\text{Emplois} = e\, L_{\text{pond}}\, C_{capex}\, \Delta costs_{capex}[€_{2022}] \; + e\, L_{\text{pond}}\, C_{opex}\, \Delta costs_{opex}[€_{2022}] \tag{3.21}$$

3.4 Scénario alternatif : relocalisation des filières

Afin d'analyser l'ampleur du manque à gagner en emploi pour la Belgique lié aux importations, une seconde inverse de Leontief a été construite, cette fois à partir de la table entrées-sorties globale (production intérieure + importations) et sans multiplication par la matrice B_{Imp}.

Cette approche revient à simuler un nouveau scénario : que se passerait-il si la Belgique produisait domestiquement l'ensemble des T&R analysées, en substituant ses importations par de la production nationale ? Dans ce cadre, les achats intermédiaires importés sont traités comme des achats domestiques, et la structure de leurs fournisseurs est supposée identique à la structure productive belge observée. Les valeurs obtenues ne représentent donc pas l'emploi effectivement généré en Belgique et chez ses partenaires commerciaux, mais bien l'emploi total généré si ces filières étaient intégralement internalisées.

Seul l'impact des T&R générant une hausse des investissements a été pris en compte. Les valeurs sans relocalisation ont été conservées pour les T&R qui décroissent en importance dans la transition énergétique. Calculer le nombre d'emplois relocalisables supprimés n'aurait pas beaucoup de sens.

Deux limites importantes doivent être soulignées. D'une part, cette approche suppose que la structure technique de la production de substitution est identique à celle déjà observée dans la table, une hypothèse forte qui ne tient pas compte des changements structurels qu'induirait la mise en place de nouvelles filières industrielles en Belgique. D'autre part, certaines ressources représentant une part significative des coûts estimés par Energy Scope TD n'ont pas été incluses dans cette étude, étant entendu qu'elles ne sont pas internalisables sur le territoire belge et continueraient donc de faire l'objet d'importations. Le choix des T&R est discuté à la section 4.1.

3.5 Désagrégation des emplois par sexe et niveaux d'études, estimation des salaires

Nous avons cherché à ventiler les emplois selon le sexe et le niveau d'études. Pour cela, nous avons utilisé le rapport sur la qualité de l'emploi de 2024 fourni par le Bureau du Plan [19]. Ce rapport contient des informations relatives à l'emploi par secteur NACE. Il indique la part d'hommes et de femmes, ainsi que la distribution selon le niveau d'études, réparti en quatre catégories : primaire et secondaire infé-

rieur, secondaire supérieur, enseignement supérieur non universitaire de type court, ainsi qu'enseignement supérieur non universitaire de type long et universitaire.

Ces éléments nous permettent d'affiner notre vecteur d'intensité en emploi. Plutôt que de ne connaître que le nombre total d'emplois par euro investi dans chaque secteur NACE, nous obtenons désormais le nombre d'emplois masculins par euro investi, le nombre d'emplois féminins, etc. Nous pouvons ensuite agréger les emplois de l'ensemble des secteurs afin de déterminer l'impact global de notre choc exogène, en termes de répartition hommes-femmes et de niveau de formation.

Dans un second temps, nous avons estimé le niveau de salaire associé aux emplois créés. Pour chaque secteur j, un salaire coût complet moyen $\mu_{salaire,j}$ a été calculé en divisant la masse salariale totale (catégorie D1 des tables entrées-sorties) par le nombre d'employés du secteur. La moyenne salariale globale des emplois créés est ensuite obtenue comme une moyenne pondérée par le nombre d'emplois créés dans chaque secteur :

$$\text{Moyenne Salariale} = \frac{\sum_j (\mu_{salaire,j} \cdot \#emplois_j)}{\#emplois_{total}} \tag{3.22}$$

Cette approche présente deux limites importantes.

Premièrement, elle ne capture que les revenus du travail salarié, excluant ainsi les revenus des indépendants. Ces derniers sont comptabilisés dans la catégorie B2N+B3N (excédent d'exploitation et revenus mixtes), qui englobe également les bénéfices des entreprises. Il est donc impossible d'isoler les revenus combinés des salariés et des indépendants en additionnant simplement D1 et B2N+B3N. Cette limite a une conséquence concrète : si un investissement se déplace d'un secteur vers un autre employant une plus grande proportion d'indépendants, à salaire moyen réel équivalent, le salaire moyen apparent diminuera mécaniquement, non pas parce que les travailleurs sont moins bien rémunérés, mais parce qu'une partie de leur rémunération échappe à la catégorie D1.

Deuxièmement, le salaire moyen sectoriel reflète une situation à un instant T et ne tient pas compte de toute la vie des travailleurs. Un secteur dont la main-d'œuvre est en moyenne plus âgée affichera mécaniquement une masse salariale plus élevée simplement parce que les salaires tendent à croître avec l'ancienneté. Comparer les salaires moyens entre secteurs sans corriger cet effet d'âge peut donc conduire à des conclusions biaisées.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Différences d'investissements entre le scénario de référence et le scénario bas carbone

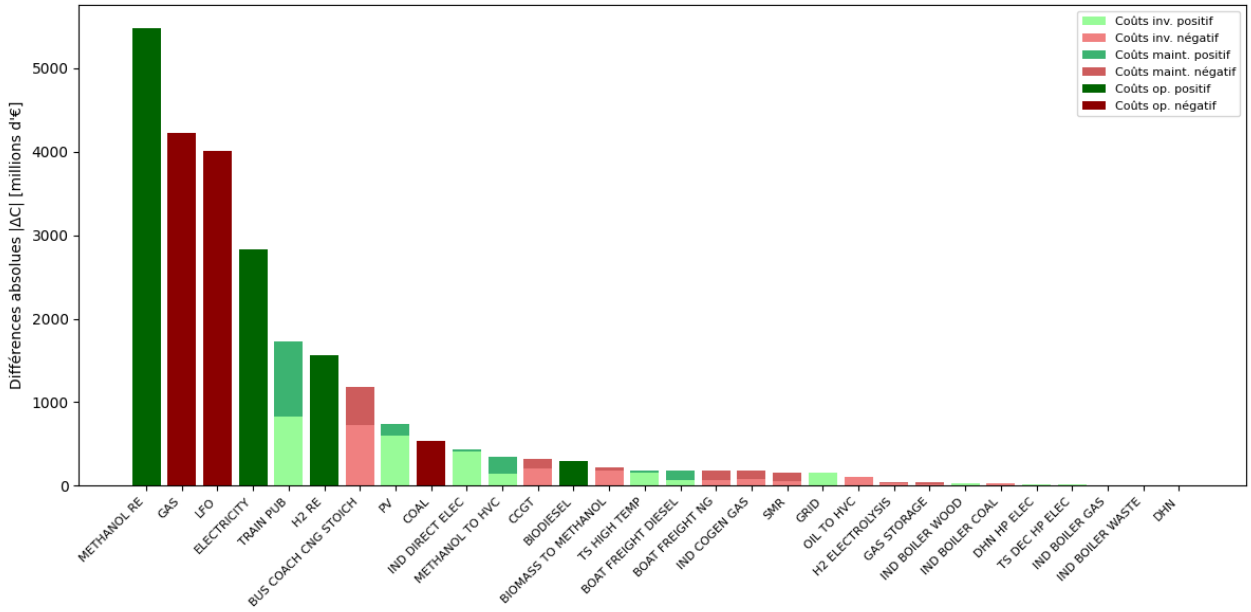


FIGURE 4.1 – Différence des coûts entre le scénario de référence et le scénario bas carbone. La signification des T&R en abscisse est disponible à l'annexe A.

Après avoir fait tourner les deux scénarios, les coûts totaux pour le scénario neutre en carbone et le scénario sans limite d'émissions sont respectivement de 45 milliards d'€ et de 42.2 milliards d'€. On obtient donc une différence de 2.8 milliards d'€.

Cela représente 0.42 % du PIB actuel. Il faut bien noter que seule la différence entre les deux scénarios est vraiment pertinente. Les valeurs absolues donnent simplement un cout total pour les T&R prises en compte par EnergyScope TD. Elles changeraient si on incorporait d'autres secteurs dans EnergyScope TD et ne traduisent donc pas vraiment de réalité physique.

En regardant technologie par technologie et ressource par ressource, on obtient les différences d'investissements de la figure 4.1. Elles sont exprimées par ordre décroissant de valeurs absolues. En rouge, on voit les éléments qui vont diminuer en passant du scénario de référence au scénario net et en vert les éléments qui vont augmenter. Pour les technologies, la barre est séparée en deux : en plus clair on trouve les dépenses d'investissement (Capex) et en plus foncé les coûts d'opération et de maintenance fixes (Opex), cela ne tient pas compte des carburants qui font partie des ressources. Seules les 30 plus importantes sont affichées. IND DIRECT ELEC correspond à la génération de chaleur grâce à l'électricité dans l'industrie. GRID correspond aux investissements nécessaires dans le réseau électrique. La signification des autre T&R est disponible à l'annexe A

Ces différences d'investissements traduisent ce qu'il faut ajouter par rapport au scénario optimal financièrement. L'éolien n'est par exemple pas présent car il était déjà exploité à son plein potentiel dans le scénario de référence. Selon le modèle, ce n'est pas la neutralité carbone qui impose son utilisation, mais la réalité énergétique et budgétaire de 2050. Les emplois liés à cette technologie ne sont donc pas comptabilisés.

On observe que les plus gros flux financiers sont des ressources importées, donc très faibles en intensité en emplois domestique. On a uniquement tenu compte du biodiesel pour lequel une filière locale existe [15]. Le développement de filières locales de production de méthanol et d'hydrogène d'origine renouvelable n'a pas été jugé réaliste au regard des volumes d'énergie nécessaires à leur mise en œuvre [16]. Pour le reste, la matrice de correspondance a été implémentée pour les T&R les plus importantes et pour lesquelles il était possible de trouver des données. Les T&R sélectionnées, affichées en couleur sur la figure 4.2, représentent 94.34% des flux financiers liés auc technologies. En prenant en compte les ressources également, ce pourcentage tombe à 23.6%.

La liberté a été laissée au modèle d'émettre 6 539 $ktCO_2$-eq./an. Imposer une neutralité carbone opérationnelle stricte (GWP = 0) modifie significativement les résultats et augmente les coûts d'investissement pour deux raisons principales. Premièrement, le modèle décarbone par ordre de coût d'abattement croissant : les

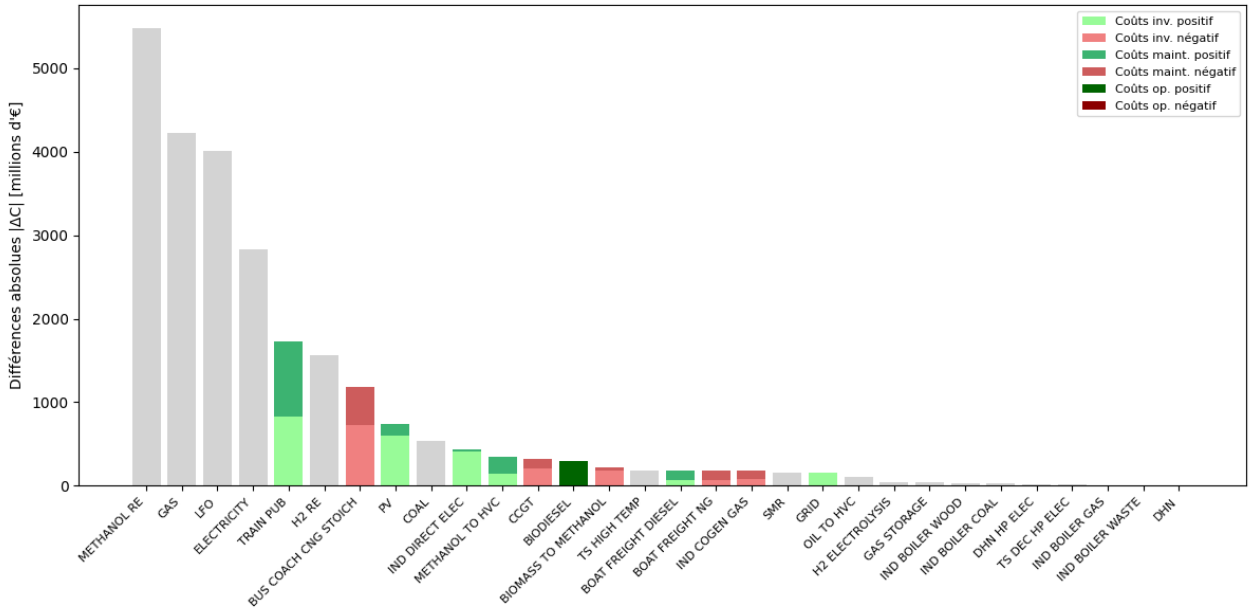


FIGURE 4.2 – Différence des coûts entre les deux scénarios, seules les T&R prises en compte dans notre étude sont en couleur. La signification des T&R en abscisse est disponible à l'annexe A.

substitutions les moins coûteuses sont réalisées en priorité, si bien que les dernières unités de CO_2 éliminées correspondent aux usages les plus difficiles à décarboner, et donc les plus onéreux. Deuxièmement, autoriser de faibles émissions résiduelles constitue un filet de sécurité efficace lors des pics de demande ou des périodes de faible production renouvelable. Sans cette marge, le modèle doit surdimensionner les capacités de stockage ou de backup décarbonés pour couvrir ces situations extrêmes, ce qui pèse fortement sur les coûts d'investissement. Dans le scénario bas carbone, les émissions proviennent principalement du charbon, du gaz et de la combustion des déchets.

4.2 Emplois totaux

On obtient un total net de 18 365 emplois créés. Cela représente 0.36% de l'emploi actuel en Belgique et 6.6 emplois / millions d'€ investis. La figure 4.3 représente le nombre d'emplois créés ou supprimés par T&R. Sans surprise, les T&R nécessitant de plus grands investissements mènent à plus de création d'emplois. On observe quand même quelques échanges dans le classement dus à des différences d'intensité en emploi. En effet, la conversion de méthanol en produits chimiques de haute

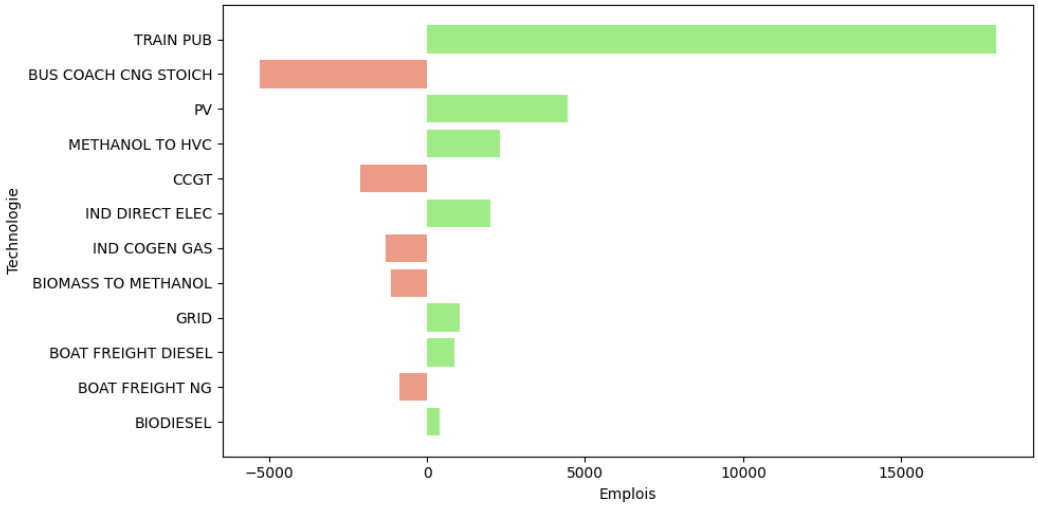


FIGURE 4.3 – Création d'emploi pour les T&R sélectionnées

valeur (METHANOL TO HVC) est la 3e technologie la plus créatrice d'emplois alors que c'est la 4e technologie en termes de valeur d'investissement supplémentaire.

La figure 4.4 montre les secteurs industriels les plus affectés par la création ou la suppression d'emplois. On constate que le ferroviaire et le génie civil concentrent une grande partie de la création d'emplois. Les points gris donnent le pourcentage que représentent ces emplois dans le secteur en 2022. Ils permettent de donner un ordre de grandeur, mais ne doivent pas être interprétés comme le pourcentage d'impact sur le secteur en 2050.

On ne prévoyait pas l'implication de certains secteurs, tels que celui des services de nettoyage. Leur présence dans les secteurs les plus touchés s'explique par leur grande intensité en emploi. Un faible investissement suffit pour créer beaucoup d'emplois. Cela se confirme également par le fait que le pourcentage de l'emploi actuel est très faible pour ce secteur [6].

Le secteur « Activités des sièges sociaux ; conseil de gestion » nécessite une interprétation particulière. En effet, il regroupe les indépendants qui sont administrateurs de sociétés. Leur rémunération est enregistrée non pas comme une rémunération du travail, mais comme une consommation intermédiaire : le secteur d'activité réel du gérant « achète » des services de gestion à ce secteur.

Pour mieux comprendre ces données, les secteurs d'activités ont été agrégés en grandes catégories. Nous avons utilisé la ventilation NACE A10 qui sépare l'écono-

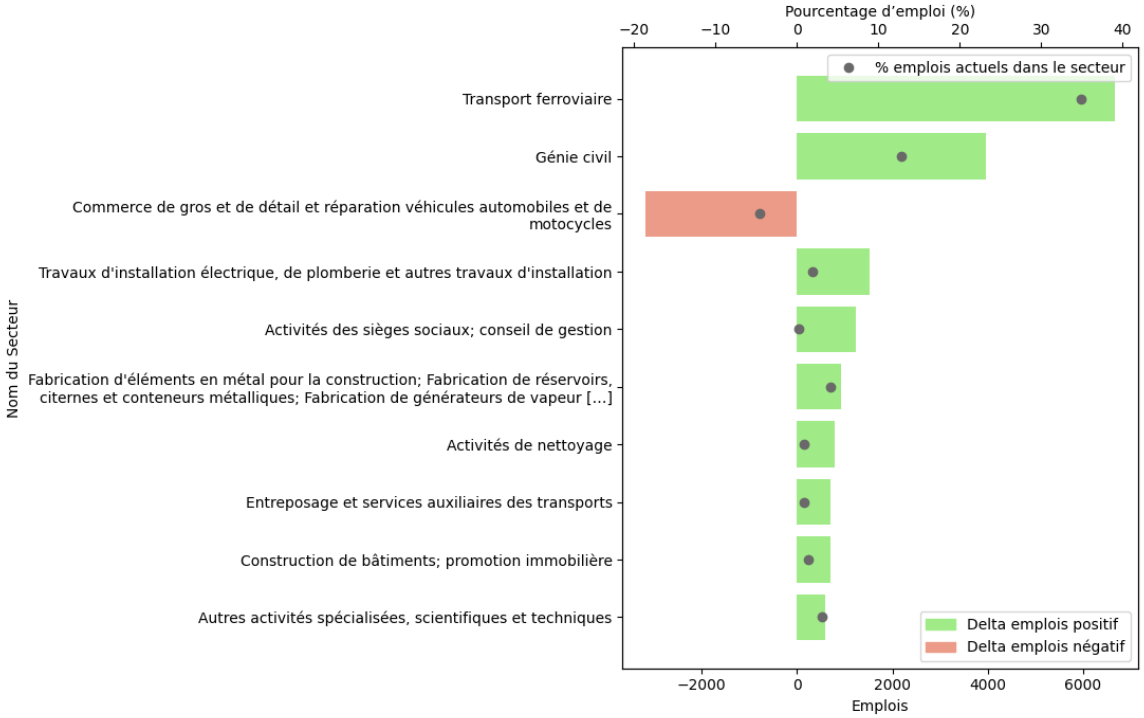


FIGURE 4.4 – Création d'emploi dans les 10 secteurs industriels les plus impactés.

mie en 10 grands secteurs. La grande majorité des emplois sont créés dans 4 de ces secteurs. Le tableau 4.1 reprend les valeurs trouvées pour ceux-ci.

Nom du secteur	Nombre d'emplois créés	Pourcentage
Construction	7269	39.6
Commerce, transports, hébergement et restauration	5206	28.4
Activités spécialisées, scientifiques et de soutien	3135	17
Industrie (sauf construction)	2136	11.6
Autres[1]	619	3.38

[1] Information et communication ; Administration publique, enseignement, santé ; Activités financières et d'assurance ; Autres activités de services ; Activités immobilières ; Agriculture, sylviculture et pêche ; Activités des ménages et organisations extraterritoriales.

TABLE 4.1 – Création d'emplois dans les secteurs les plus significatifs en ventilation A10

4.2.1 Désagrégation des emplois des T&R par secteurs industriels

Les figures 4.5a et 4.5b illustrent la répartition de la création et de la destruction d'emplois par secteur industriel, au sein de chaque technologie et ressource. Par souci de lisibilité, les résultats sont présentés en grands secteurs A10. Les secteurs dont la contribution est non significative pour l'ensemble des T&R sont regroupés sous la catégorie "Autre".

On observe que la part importante d'emplois créés dans la construction (39.6 % des emplois créés) provient principalement du transport ferroviaire de passagers, du photovoltaïque, de la transformation de méthanol en produits chimiques de grande valeur et de la production de chaleur par résistance dans l'industrie. Les technologies qui perdent des emplois ne sont pas spécialement liées à la construction. Les emplois liés à la catégorie "Commerce, transport, hébergement et restauration" sont en très grande partie associés aux moyens de transport. Ces résultats sont sensibles à la manière dont la matrice de correspondance est construite.

4.3 Scénario alternatif : relocalisation des filières

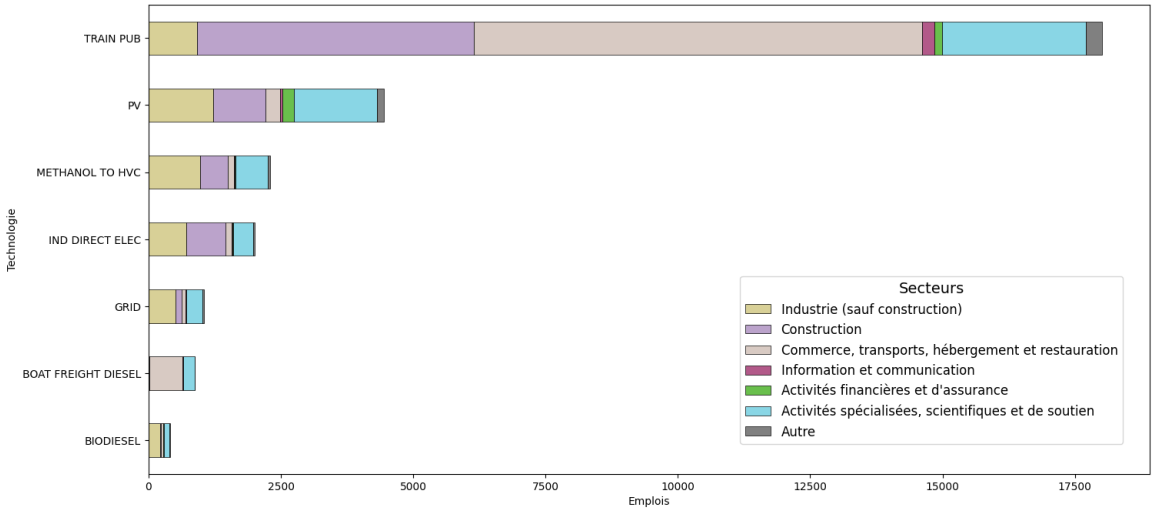
On analyse ici la création d'emplois supplémentaire théorique si la Belgique relocalisait ses importations. Le périmètre exact des importations prises en compte et la méthodologie sont explicités à la section 3.4.

Ce nouveau scénario crée 45 707 emplois. Cela représente une augmentation de 249% par rapport au scénario sans relocalisation.

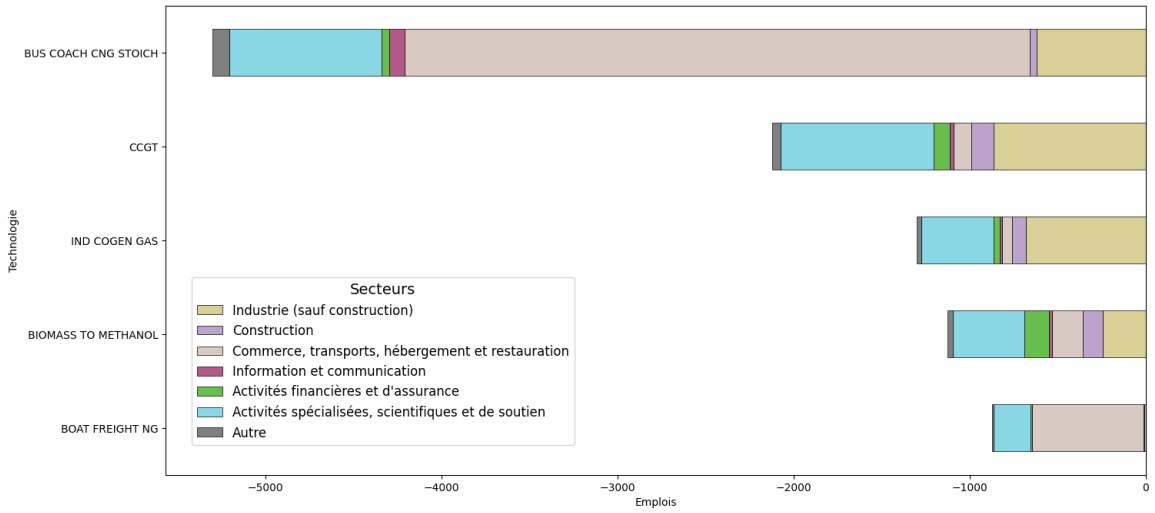
La figure 4.6 illustre les différences d'emplois dans les différents secteurs dans le cas du scénario avec relocalisation des activités. Les points gris indiquent les valeurs trouvées précédemment, sans relocalisation. On observe que les secteurs sont touchés de manière assez variable. Si l'impact sur le génie civil est faible, celui sur la fabrication de moteurs est très significatif.

Le tableau 4.2 compare les résultats des scénarios avec et sans relocalisation. Les secteurs des activités spécialisées, scientifiques et de soutien, ainsi que l'industrie, font des bonds considérables en termes de création d'emplois.

Dans le scénario initial, les flux financiers sortants de la Belgique liés aux importations ne sont plus pris en compte dans le modèle. Ainsi, si une entreprise belge réalise un achat auprès d'une entreprise située en France et que ce fournisseur



(a) Techno/ressources impactées positivement



(b) Techno/ressources impactées négativement

FIGURE 4.5 – Création d'emploi pour les T&R désagrégés par secteurs A10.

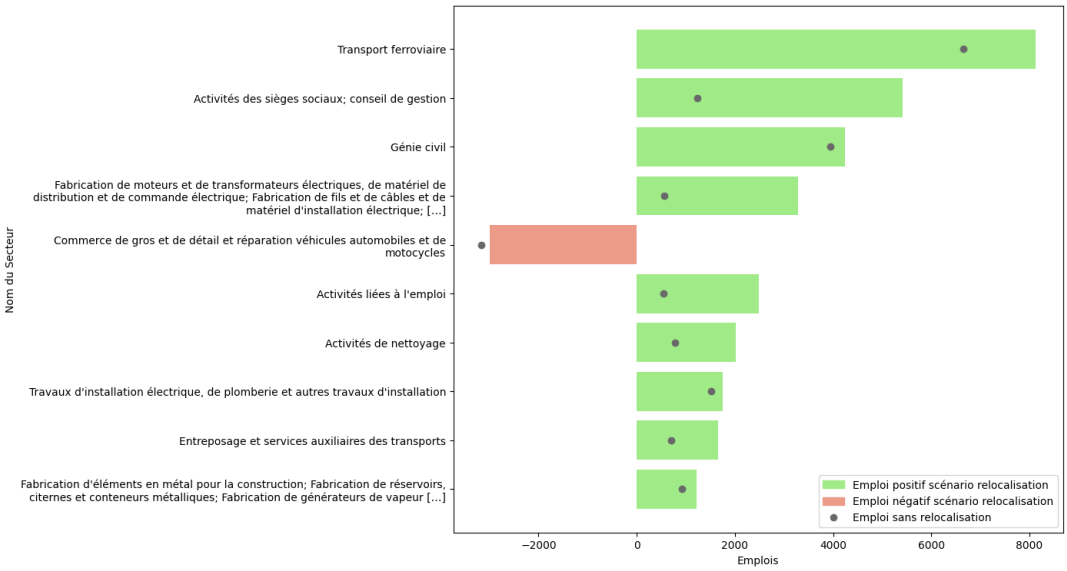


FIGURE 4.6 – Comparaison de la création d'emploi par secteur entre les scénarios avec et sans relocalisation pour les dix secteurs les plus impactés.

Nom du secteur	Nombre d'emplois créés sans relocalisation	Nombre d'emplois créés avec relocalisation
Construction	7 269	8 303
Commerce, transports, hébergement et restauration	5 206	10 889
Activités spécialisées, scientifiques et de soutien	3 135	12 501
Industrie (sauf construction)	2 136	10 184
Autres[1]	619	2 831

[1] Information et communication ; Administration publique, enseignement, santé ; Activités financières et d'assurance ; Autres activités de services ; Activités immobilières ; Agriculture, sylviculture et pêche ; Activités des ménages et organisations extraterritoriales.

TABLE 4.2 – Création d'emplois dans les cas avec et sans relocalisation des importations en ventilation A10

étranger s'approvisionne lui-même auprès d'un fournisseur établi en Belgique, les emplois générés chez ce second fournisseur belge ne sont pas intégrés dans l'analyse. Puisque tout les flux sont considérés domestiques, cette limite méthodologique n'est pas présente dans le nouveau scénario étudié. La différence en termes d'emplois entre les deux scénarios est donc vraisemblablement surestimée. Une étude de plus grande envergure serait nécessaire pour corriger cette limite et appréhender pleinement ces effets indirects.

4.4 Intensité emploi des T&R

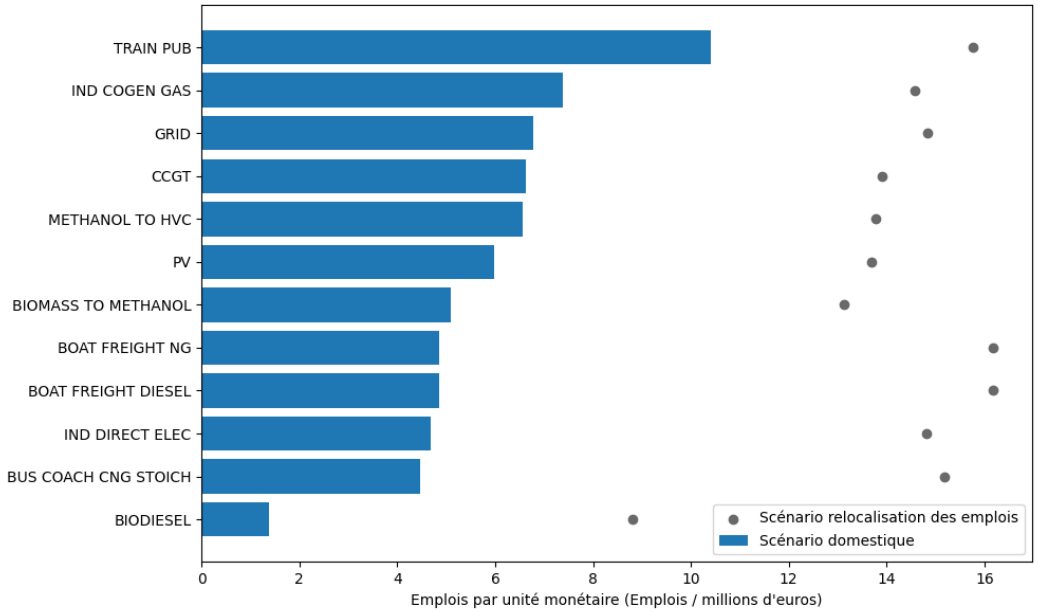


FIGURE 4.7 – Intensité emploi par T&R

La figure 4.7 présente une analyse du nombre d'emplois créés pour chaque T&R. Les barres bleues indiquent les résultats obtenus dans le cas où seuls les emplois domestiques sont pris en compte. Les points gris indiquent les résultats obtenus dans le scénario où les filières ont été relocalisées.

Certaines T&R, à l'instar du biodiesel, présentent des écarts substantiels en termes d'emplois générés par million d'euros, selon que l'on prenne ou non en compte les effets de relocalisation. Le transport ferroviaire public est, parmi les technologies considérées, celle qui présente le meilleur rendement en termes de création d'emplois par unité d'investissement.

4.5 Désagrégation en type d'emploi

Les sections précédentes ont analysé la répartition des emplois par secteur d'activité et T&R. La présente section vise à approfondir cette analyse en désagrégeant les résultats afin d'examiner la nature des emplois selon trois dimensions complémentaires : l'équilibre entre les genres, les différences de niveau de formation et les écarts salariaux.

Distribution des emplois par genre

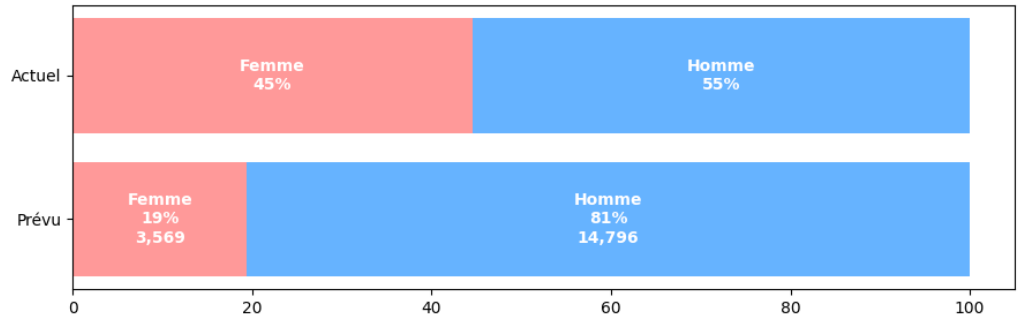


FIGURE 4.8 – Proportion de femmes obtenus dans les emplois créés

La deuxième ligne de la figure 4.8 présente la répartition attendue entre hommes et femmes au sein des nouveaux emplois requis pour atteindre le scénario bas carbone. La première ligne représente la structure actuelle, elle sert de point de référence.

Les résultats suggèrent que les emplois créés tendent à accentuer les inégalités de participation au marché du travail entre hommes et femmes.

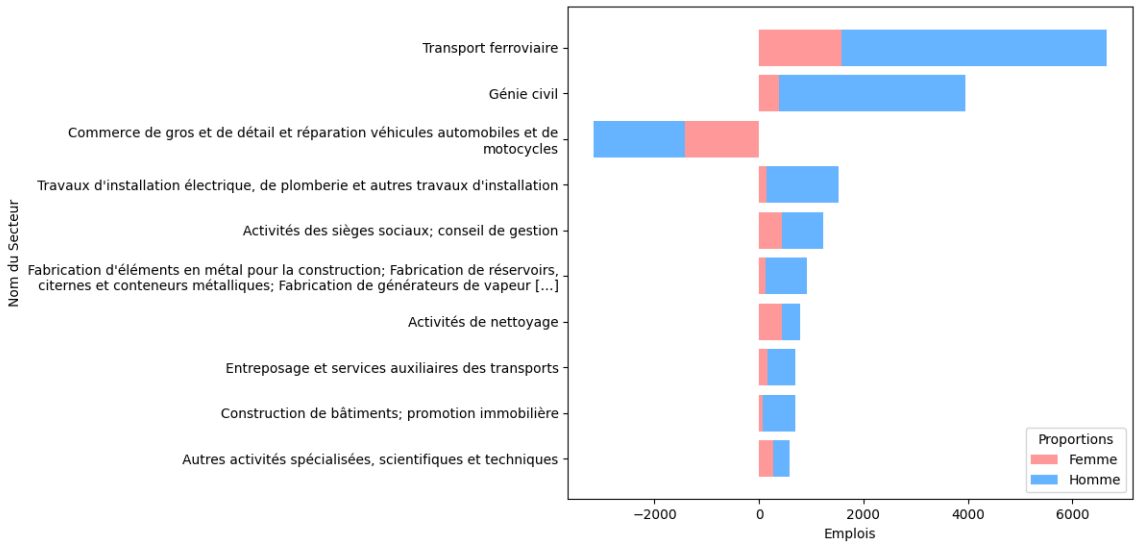


FIGURE 4.9 – Répartition Homme/Femme par secteur

La figure 4.9 désagrège ce déséquilibre par secteur. Les deux secteurs qui gagnent le plus d'emplois, à savoir le génie civil et le transport ferroviaire sont composés à

respectivement 24% et 10% de femmes. A l'inverse, le secteur du commerce de gros et de détail et de réparation de véhicule, secteur perdant des emplois dans notre analyse, est relativement paritaire avec 45% de femmes.

La désagrégation des types d'emplois provient de l'évaluation qualitative de l'emploi de 2024. Ces proportions évoluent chaque année et sont amenées à s'adapter aux nouvelles réalités de l'économie. Si, par exemple, de nombreux emplois à prédominance masculine sont créés et que des emplois à prédominance féminine sont supprimés. Il y a fort à parier que certaines femmes s'orienteront naturellement vers des emplois dits « masculins ». Les résultats sur le genre associé aux emplois doivent donc être interprétés comme indicatifs des tendances des structures plutôt que comme des prévisions. [41]

Différences de niveau de formation

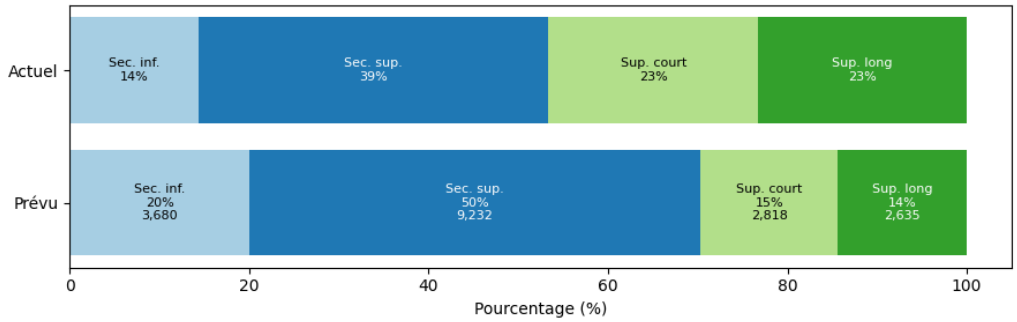


FIGURE 4.10 – Répartition des niveaux d'éducation dans les emplois créés [1]

La deuxième ligne de la figure 4.10 montre la proportion des différents niveaux de formation attendus dans les nouveaux emplois nécessaires pour atteindre le scénario bas-carbone. La première ligne montre la proportion actuelle, elle sert de point de référence.

On observe que les emplois nécessitant relativement moins de formation sont surreprésentés dans les nouveaux emplois créés. A l'inverse, les emplois nécessitant d'être plus formé sont présents en proportion plus faible que dans la répartition nationale.

1. "Sec.inf." correspond à un niveau d'étude maximum du primaire ou du secondaire inférieur ; "Sec. sup" au secondaire supérieur ; "Sup. court" au supérieur non universitaire de type court et "Sup. long" au supérieur non universitaire de type long et au supérieur universitaire.

La figure 4.11 montre comment les types d'emplois sont répartis au sein des T&R dans notre modèle. Nos données brutes étant limitées aux répartitions sectorielles, l'impact global de chaque T&R a été estimé en sommant les contributions de ses différents secteurs directs et indirects, pondérées par leur importance respective.

Le photovoltaïque, les turbines à gaz, la conversion de la biomasse en méthanol et la production de biodiesel se démarquent par leur plus grande proportion de profils plus formés.

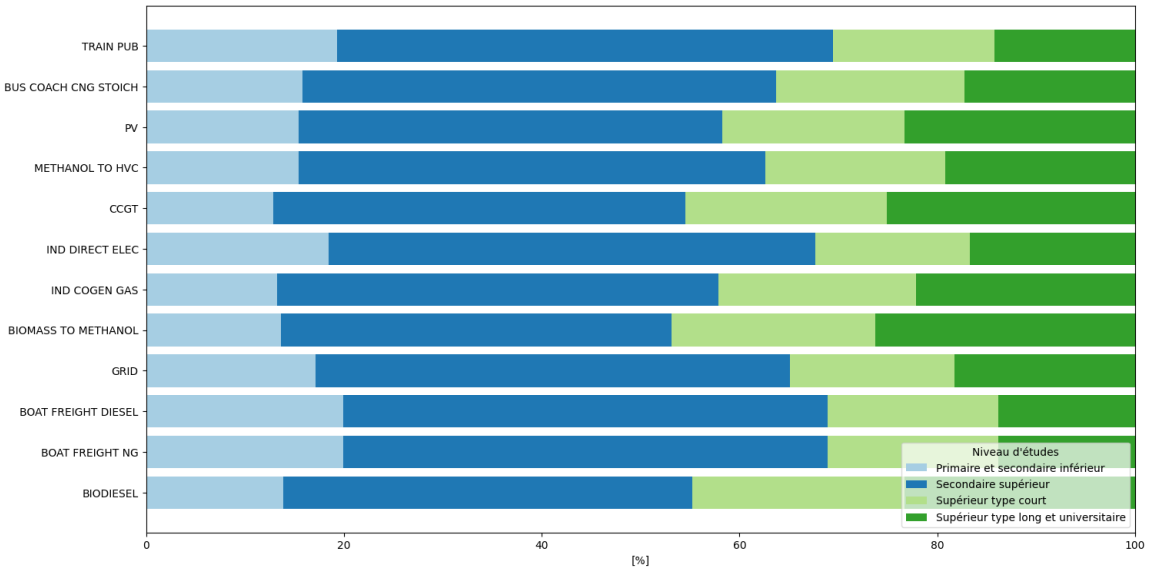


FIGURE 4.11 – Répartition par niveau d'étude pour les T&R

Ecarts salariaux

Le salaire moyen des emplois salariés créés est de 58 497 €/an, soit un niveau légèrement supérieur à la moyenne nationale actuelle calculée selon la même méthodologie, qui s'établit à 51 447 €/an. Il s'agit de valeurs coût complet employeur et non du salaire réellement perçu par les employés.

Chapitre 5

Discussion

5.1 Synthèse et interprétation des principaux résultats

Les résultats de notre modélisation indiquent une création nette de 18 365 emplois directs et indirects pour l'année 2050. Ce volume s'inscrit dans la moyenne basse des différentes études menées sur le contexte belge [31][14] et doit être mis en perspective avec les quelque 5 millions d'actifs que compte le pays. Ces créations d'emplois sont en grande partie liées au transport ferroviaire de personnes. Cela s'explique par l'ampleur des investissements requis et par la haute intensité en main-d'œuvre domestique de cette technologie.

Le secteur de la construction est le principal bénéficiaire de cette dynamique, concentrant 40% des emplois générés. Cette forte sollicitation du secteur concorde avec les constats de la littérature existante [45][8], mais elle soulève des questions cruciales quant à la faisabilité concrète d'une « transition juste ». La construction fait face à une pénurie structurelle de main-d'œuvre en Belgique [28]. Dès lors, la capacité du marché du travail à absorber cette demande devient un facteur critique : si ces besoins ne peuvent être satisfaits ces gains d'emplois théoriques s'avéreront irréalistes et inatteignables. Une telle inadéquation pourrait in fine inverser le bilan si les suppressions d'emplois dans les énergies fossiles ne sont pas compensées par une absorption effective des nouveaux postes dans les renouvelables. [7].

La transition énergétique risque également d'accentuer les disparités de genre sur le marché de l'emploi. Nos résultats montrent que seuls 19% des emplois nets créés bénéficient à des femmes. Ce phénomène est récurrent dans la littérature [10] [3]. Il découle, entre autres, de la surreprésentation des secteurs du transport ferroviaire et de la construction, majoritairement masculins.

Pour pallier ce déséquilibre, l'International Renewable Energy Agency (IRENA) propose plusieurs leviers d'action dans son rapport sur l'égalité des sexes dans les énergies renouvelables [27]. Il apparaît nécessaire de favoriser l'accès des femmes aux filières éducatives et aux formations techniques, tout en structurant des réseaux professionnels et des programmes de mentorat dédiés. En parallèle, les pratiques de gouvernance d'entreprise pourraient évoluer vers l'instauration de quotas de parité, la garantie de l'équité salariale et la mise en place de mesures favorisant l'articulation entre vie professionnelle et vie privée, telles que des horaires flexibles ou des congés parentaux adaptés.

Nos résultats mettent en évidence une proportion de créations d'emplois plus élevée dans les secteurs nécessitant de faibles niveaux de qualification. Ce constat diverge des conclusions de Martin Černý et al. [10] pour l'Union européenne et de Cai et al. [7] pour la Chine, qui observent une tendance inverse. Cette divergence pourrait s'expliquer par une différence de périmètre entre les modèles. Alors que Černý et al. et Cai et al. limitent leur analyse à la seule production d'électricité, l'outil EnergyScope TD intègre une vision systémique englobant les secteurs de la mobilité, du chauffage et de l'électricité. Les emplois liés au secteur photovoltaïque se démarquent d'ailleurs dans notre étude comme faisant partie de ceux qui exigent les profils les plus qualifiés dans les T&R. Lewney et al. [32] et Raju et al. [41], dans des études similaires à la notre sur l'Europe et sur le Maroc, obtiennent également une plus grande création d'emplois pour les catégories moins formées.

Enfin, en cas de relocalisation industrielle, les ratios d'emploi par million d'euros investi obtenus dans notre scénario s'alignent sur les valeurs calculées par Quirion P. [39] pour la France. À l'inverse, les scénarios sans relocalisation affichent une création d'emplois moins importante. Compte tenu de la forte interconnexion économique et géographique de la Belgique, une fuite importante d'emplois vers l'extérieur apparaît parfaitement cohérente.

5.2 Limites méthodologiques et pistes de recherches futures

Malgré les apports de cette étude, plusieurs limites doivent être soulignées. Elles tiennent à la fois aux hypothèses structurelles du modèle entrées-sorties et aux contraintes liées aux données mobilisées.

Hypothèses structurelles du modèle Une première série de limites est inhérente à la méthodologie IO elle-même. Celle-ci repose sur l'hypothèse de rendements d'échelle constants : chaque bien ou service requiert toujours la même combinaison d'intrants, indépendamment du volume produit. Les substitutions entre facteurs de production, par exemple en réaction à des variations de prix relatifs, sont exclues par construction, tout comme le progrès technique. En pratique, on peut pourtant s'attendre, sur les vingt-huit années qui séparent la matrice IO de l'année cible, à des gains de productivité significatifs et à des évolutions technologiques substantielles. Le modèle suppose par ailleurs une homogénéité intra-sectorielle : toutes les activités au sein d'un même secteur sont traitées comme identiques en termes d'utilisation d'intrants et de débouchés. Enfin, aucune contrainte de capacité de production n'est imposée, tout secteur est supposé pouvoir répondre à n'importe quel niveau de demande [8] [37].

Une deuxième limite structurelle concerne le périmètre des effets d'emploi pris en compte. La méthodologie IO capture les emplois directs et indirects, mais ignore les effets induits, c'est-à-dire les emplois générés par le réinvestissement dans l'économie des revenus issus des nouveaux emplois créés. L'intégration de ces dynamiques de second tour nécessiterait le recours à une matrice de comptabilité sociale (MCS), dont le principe est présenté à l'annexe B et qui constitue une piste pour des recherches futures [37].

Cette étude repose sur la version « Snapshot » du modèle EnergyScope TD, qui restreint l'analyse à une seule année cible. Par conséquent, la répartition temporelle des emplois tout au long de la transition n'est pas capturée. Il serait donc pertinent d'étendre ce modèle avec la déclinaison « pathway ». Une approche pluriannuelle permettrait de cartographier la trajectoire des créations d'emplois et d'anticiper leur étalement dans le temps. Cela s'avère crucial pour le secteur de la construction afin de déterminer la temporalité et l'ampleur des pics de tension temporaires sur un marché du travail belge déjà en pénurie.

Enfin, le modèle EnergyScope TD suppose une demande finale exogène et invariante, ce qui revient à ignorer les effets de prix sur le comportement des consommateurs. Or, si la transition vers un système énergétique renouvelable engendre une hausse du coût de l'énergie, une partie de cette augmentation pourrait être répercutée sur le consommateur final, entraînant une contraction de la demande susceptible d'affecter le niveau d'emploi. Cet effet, que les modèles d'équilibre général calculable permettraient de capturer échappe par construction au cadre analytique retenu ici.

Limites liées aux données Au-delà des hypothèses structurelles, plusieurs limites tiennent aux données mobilisées et aux choix opérationnels effectués. Les résultats présentés sont exprimés en nombre de postes et non en ETP, ce qui induit un risque de double comptabilisation des emplois à temps partiel. Étant donné que le volume horaire travaillé est connu pour chaque secteur, une approche possible pour estimer les ETP consisterait à diviser le nombre total d'heures travaillées par le nombre d'heures correspondant à un emploi à temps plein par travailleur. Toutefois, il demeure difficile pour les comptables et les statisticiens d'estimer de manière fiable le volume d'heures effectivement travaillées dans les secteurs à forte prévalence de travailleurs indépendants. Cette problématique pourrait faire l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre d'une étude ultérieure.

Par ailleurs, seule une sélection des T&R d'EnergyScope TD a pu être intégrée à la matrice de correspondance, les coûts retenus représentant 94.34 % des coûts associés aux technologies. Cette sélection s'explique par la rareté et la discordance fréquente des sources de données nécessaires à la ventilation sectorielle des coûts. Un affinement de cette matrice, couplé à une analyse de sensibilité, constituerait une étape précieuse pour renforcer la robustesse des résultats.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, seules les émissions liées aux ressources ont été prises en compte. Les émissions relatives à la construction et à la fin de vie des technologies ne sont pas incluses. C'est une limite importante, car les émissions liées à la fabrication des technologies dites « renouvelables » sont non-négligeables [42]. Cette approche correspond néanmoins à celle adoptée dans les rapports nationaux [33].

Enfin, les désagrégations par genre et par niveaux d'études reposent sur les données du Bureau du Plan relatives à la qualité de l'emploi en 2024 [19], les parts d'importation et les intensités d'emploi par secteur NACE sont établies sur la base des niveaux observés en 2022. Ces deux ensembles de paramètres sont susceptibles d'évoluer significativement d'ici 2050, notamment si de nouvelles filières industrielles locales venaient à se constituer en réponse aux besoins de la transition. Les résultats doivent donc être interprétés comme des ordres de grandeur conditionnels aux structures économiques actuellement observées, plutôt que comme des projections au sens strict.

Chapitre 6

Conclusion

L'objectif de ce travail était de déterminer l'impact de la transition énergétique sur le marché du travail en Belgique, en analysant précisément le volume et le type des emplois générés.

Les résultats mettent en évidence une création nette de 18 365 emplois, ce qui correspond à 0,36 % de la population active belge. Bien que ce résultat se situe dans la moyenne basse de la littérature scientifique, nos simulations révèlent un potentiel de croissance bien supérieur : ce chiffre pourrait atteindre 45 707 emplois si la Belgique parvenait à relocaliser l'ensemble de ses filières technologiques.

Au-delà du volume, l'analyse qualitative du type d'emplois créés soulève des enjeux sociétaux majeurs. D'une part, la transition semble accentuer les disparités de genre, puisque seuls 19 % des postes générés bénéficieraient à des femmes. D'autre part, le modèle montre une surreprésentation des postes nécessitant un faible niveau de formation. Ce travail confirme donc la nécessité de mettre en place des politiques publiques de rééquilibrage, visant notamment à favoriser l'insertion des femmes dans les secteurs clés de la transition, tels que la construction et le transport ferroviaire.

Ces conclusions doivent toutefois être interprétées au regard des choix méthodologiques adoptés. L'utilisation d'un modèle Entrées-Sorties comporte des limites intrinsèques, notamment la rigidité des coefficients techniques et l'absence de bouclage macroéconomique complet. Pour dépasser ces contraintes, plusieurs perspectives de recherche s'ouvrent. Il serait pertinent d'étendre le modèle à une Matrice de Comptabilité Sociale (MCS) afin d'intégrer un éventail plus large de dynamiques économiques et de tenir compte des emplois induits. Enfin, coupler cette approche à la version « pathway » d'EnergyScope permettrait d'intégrer la temporalité des investissements. Une telle modélisation s'avérerait cruciale pour anticiper chronolo-

giquement les tensions et les pénuries de compétences sur le marché de l'emploi tout au long de la trajectoire de transition.

Annexe A

Signification des abréviation des ressources/technologies d'Energie Scope TD présentés.

Tableau des T&R énergétiques

Identifiant	Description
Ressources	
METHANOL_RE	Methanol renouvelable
GAS	Gas
ELECTRICITY	Electricité importée
LFO	Light Fuel Oil
H2_RE	Hydrogène renouvelable
COAL	Coal
BIODIESEL	Biodiesel
Technologies	
PV	Photovoltaic
BUS_COACH_CNG_STOICH	Bus gas
TRAIN_PUB	Train (passenger)
IND_DIRECT_ELEC	Electrical resistors (industry)

Identifiant	Description
METHANOL_TO_HVC	Methanol to HVC
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine
BIOMASS_TO_METHANOL	Biomass methanolation
TS_HIGH_TEMP	Thermal storage industries
BOAT_FREIGHT_DIESEL	Boat diesel
BOAT_FREIGHT_NG	Boat gas
IND_COGEN_GAS	Cogeneration gas (industry)
SMR	Steam methane reforming
GRID	Electrical grid cost
OIL_TO_HVC	Oil to HVC
H2_ELECTROLYSIS	Electrolysers
GAS_STORAGE	Gas storage
IND_BOILER_WOOD	Boiler wood (industry)
IND_BOILER_COAL	Boiler coal (industry)
DHN_HP_ELEC	Heat pump (DHN)
TS_DEC_HP_ELEC	Decentralised electrical heat pumps
IND_BOILER_GAS	Boiler gas (industry)
IND_BOILER_WASTE	Boiler waste (industry)
DHN	District heating network

Annexe B

Matrice de comptabilité sociale et modèles d'équilibre général calculables

Matrice de comptabilité sociale

La matrice de comptabilité sociale est le prolongement d'une matrice input output. Elle combine les flux intersectoriels, la balance des payements et des enquêtes auprès des ménages. C'est donc une matrice exhaustive des flux financiers au sein d'une économie. Elle englobe tous les types d'acteurs, y compris l'état et le reste du monde. Elle résouds le problème des zones d'ombre des matrices entrées sorties. Tout achat implique une vente et tout revenu implique une dépense. [26]

General equilibrium models

Les modèles d'équilibres généraux (GEM) sont généralement utilisé pour évaluer les effets, à l'échelle de l'ensemble de l'économie, des changements de politique, en tenant compte de l'interdépendance entre tous les secteurs, marchés, régions ou pays, ainsi que des différents groupes de travailleurs ou de ménages. [26] Il se base sur la théorie économique néoclassique.

Ils sont calibré en mettant ensemble une matrice de comptabilité sociale et un groupe de paramètre et d'équations qui modélisent le comportement d'agents économiques (comme la maximisation du profit pour les entreprises ou la maximimsation de l'utilité pour les consommateurs.) On calibre le modèle sur une année de référence qui servira de point de comparaison avec le modèle ayant subi le changement de politique.

Une critique de ces modèles porte sur le choix de la règle de fermeture qui peut avoir un gros impact sur l'output et qui se base parfois sur des suppositions comportementales non réalistes. Il peut également y avoir de l'incertitude sur la valeur des paramètres et il est parfois compliqué de savoir ce qui dicte les résultats dans le modèle.

Fragkos et Parousos [20] ont utilisé GEM-E3 pour mesurer l'impact sur l'emploi de remplacer les sources d'énergie conventionnelles par l'utilisation d'énergie renouvelable. Ils ont trouvé que la transition bas carbone pourrait mener à la création nette de 200,000 emplois principalement dans la construction de panneaux photovoltaiques, la fourniture et la production de biocarburants avancés ainsi que la fabrication et l'installation d'éoliennes. Les travaux dans les sources d'énergies renouvelables représenteraient 1% de la mains-d'oeuvre européenne en 2050. Ils ont trouvé que les énergies renouvelables sont en moyenne plus intense en emploi que les énergies fossiles.

Annexe C

Sources matrice de correspondance

	Capex
CCGT	[18]
Biomasse_to_Méthanol	[18]
Methanol_to_hvc	[46]
Grid	[4]
BATT_LI	[4]
IND_COGEN_GAS	[18]
TRAIN_PUB	[22]
PV	[4]

Bibliographie

[1] *2050*. URL : https://climat.be/2050-fr (visité le 18/05/2026).

[2] *Belgique - Émissions totales de GES (gaz à effet de serre) (kt équivalent CO2) | Statistiques*. URL : https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=10&codeStat=EN.ATM.GHGT.KT.CE&codePays=BEL&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=1&codeStat2=x&codePays2=BEL&optionsDetPeriodes=avecNomP (visité le 16/04/2026).

[3] Maria Isabel Blanco et Glória Rodrigues. "Direct employment in the wind energy sector : An EU study". In : *Energy Policy* 37.8 (1er août 2009), p. 2847-2857. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2009.02.049. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509001359 (visité le 10/05/2026).

[4] Joris Bücker et al. "Employment dynamics in a rapid decarbonization of the US power sector". In : *Joule* 9.2 (fév. 2025), p. 101803. ISSN : 25424351. DOI : 10.1016/j.joule.2024.12.004. URL : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542435124005397 (visité le 23/05/2026).

[5] Bureau fédéral du Plan. *Matrices input-output de l'économie belge 2022*. 2022.

[6] Bureau fédéral du Plan. *Zelfstandigen : beheerders vennootschappen*. Published : Présentation PowerPoint communiquée personnellement par courrier électronique. 2026.

[7] Wenjia Cai et al. "Distributional employment impacts of renewable and new energy–A case study of China". In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (1er nov. 2014), p. 1155-1163. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.07.136. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005887 (visité le 22/05/2026).

[8] N. Caldés et al. "Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain". In : *Energy Policy* 37.5 (1er mai 2009), p. 1628-1636. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2008.12.022. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508007878 (visité le 09/05/2026).

[9] *CEPCI*. URL : https://www.training.itservices.manchester.ac.uk/public/gced/CEPCI.html?reactors/CEPCI/index.html (visité le 10/04/2026).

[10] Martin ČERNÝ et al. *Employment effects of the renewable energy transition in the electricity sector : An input-output approach*. Rochester, NY, 20 jan. 2022. DOI : 10.2139/ssrn.4013339. URL : https://papers.ssrn.com/abstract=4013339 (visité le 10/05/2026).

[11] Carl F CHRIST. "A review of input-output analysis". In : *Input-output analysis : An appraisal* (1955), p. 137-182.

[12] Michel CORNET, Julien PESTIAUX et Quentin SCHOBBENS. *The socio-economic impact of 6 GW offshore wind development in Belgium*. Belgian Offshore Platform, 2021.

[13] *Des emplois dans les énergies renouvelables ? Le travail ne manque pas | Bureau fédéral du Plan*. URL : https://www.plan.be/fr/publications/des-emplois-dans-les-energies-renouvelables-le (visité le 19/05/2026).

[14] Danielle DEVOGELAER. *Walking the green mile in Employment - Employment projections for a green future*. Working Paper 07-13. Bureau fédéral du Plan, 2013.

[15] *Disponibilité de la biomasse durable pour la production de biocarburants avancés | Energia*. URL : https://www.energiafed.be/fr/disponibilite-de-la-biomasse-durable-pour-la-production-de-biocarburants-avances (visité le 23/04/2026).

[16] DUBOIS, L. et al. *Feuille de route technologique en vue de la gestion du futur marché du CO2 en Belgique (Délivrable 6 du projet DRIVER)*. UMONS (Université de Mons), UCLouvain, ULiège, 30 sept. 2025. URL : https://web.umons.ac.be/app/uploads/sites/32/2025/11/Livrable-DRIVER-D6.pdf.

[17] United Nations Department of ECONOMIC et Social AFFAIRS. *Handbook on Supply and Use Tables and Input-Output Tables with Extensions and Applications*. United Nations, 2018. URL : https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789213582794.

[18] EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. INSTITUTE FOR ENERGY AND TRANSPORT. et SERTIS. *Energy Technology Reference Indicator (ETRI) projections for 2010-2050*. LU : Publications Office, 2014. DOI : 10.2790/057687. URL : https://data.europa.eu/doi/10.2790/057687 (visité le 19/04/2026).

[19] *Evaluation qualitative de l'emploi : données 1999-2024 | Bureau fédéral du Plan*. URL : https://www.plan.be/fr/donn%C3%A9es/evaluation-qualitative-de-lemploi-donnees-1999 (visité le 20/05/2026).

[20] Panagiotis FRAGKOS et Leonidas PAROUSSOS. "Employment creation in EU related to renewables expansion". In : *Applied Energy* 230 (nov. 2018), p. 935-945. ISSN : 03062619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.09.032. URL : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918313382 (visité le 20/04/2026).

[21] Yann FÜLLEMANN et al. "Hire fast, fire slow : the employment benefits of energy transitions". In : *Economic Systems Research* 32.2 (2 avr. 2020). _eprint : https ://doi.org/10.1080/09535314.2019.1695584, p. 202-220. ISSN : 0953-5314. DOI : 10.1080/09535314.2019.1695584. URL : https://doi.org/10.1080/09535314.2019.1695584 (visité le 11/05/2026).

[22] Heidi GARRETT-PELTIER. "Green versus brown : Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model". In : *Economic Modelling* 61 (fév. 2017), p. 439-447. ISSN : 02649993. DOI : 10.1016/j.econmod.2016.11.012. URL : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026499931630709X (visité le 16/03/2026).

[23] *Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all | International Labour Organization*. 2 fév. 2016. URL : https://www.ilo.org/publications/guidelines-just-transition-towards-environmentally-sustainable-economies (visité le 18/05/2026).

[24] *InforEuro, the exchange rate of the Euro currency*. URL : https://commission.europa.eu/funding-tenders/procedures-guidelines-tenders/information-contractors-and-beneficiaries/exchange-rate-inforeuro_en (visité le 11/04/2026).

[25] *Input Data — EnergyScope_documentation 2.2 documentation*. URL : https://energyscope.readthedocs.io/en/latest/sections/Input%20Data.html (visité le 11/04/2026).

[26] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. EMPLOYMENT POLICY, JOB CREATION AND LIVELIHOODS DEPARTMENT. *Reference guide on employment impact assessment*. 2nd ed. Geneva : ILO, 2025. DOI : 10.54394/INYX6157. URL : https://researchrepository.ilo.org/esploro/outputs/encyclopediaEntry/995646467202676 (visité le 16/02/2026).

[27] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy : A Gender Perspective*. Abu Dhabi : IRENA, 2019. URL : www.irena.org.

[28] *Labour shortages and surpluses in Europe 2024 | European Labour Authority*. URL : https://www.ela.europa.eu/en/publications/labour-shortages-and-surpluses-europe-2024 (visité le 22/05/2026).

[29] Rosebud Jasmine Lambert et Patrícia Pereira Silva. "The challenges of determining the employment effects of renewable energy". In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.7 (1er sept. 2012), p. 4667-4674. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2012.03.072. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002572 (visité le 09/05/2026).

[30] *Le pacte vert pour l'Europe - Commission européenne*. URL : https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr (visité le 18/05/2026).

[31] Thibaud Lemercier et al. *Macroeconomic impacts of the low carbon transition in Belgium : FINAL REPORT*. Climate Change Service of the Federal Public Service Health, Food Chain Safety et Environment, oct. 2016. URL : http://www.climatechange.be/2050/scenario-analysis.

[32] Richard Lewney et al., éd. *Energy scenario : employment implications of the Paris Climate Agreement*. Luxembourg : Publications Office, 2019. 1 p. ISBN : 978-92-897-1825-7. DOI : 10.2806/708639.

[33] Gauthier Limpens, Hervé Jeanmart et Francois Maréchal. "Belgian Energy Transition : What Are the Options ?" In : *Energies* 13.1 (2020). ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en13010261. URL : https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/261.

[34] Gauthier Limpens et al. "EnergyScope Pathway : An open-source model to optimise the energy transition pathways of a regional whole-energy system". In : *Applied Energy* 358 (mars 2024), p. 122501. ISSN : 03062619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2023.122501. URL : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261923018652 (visité le 07/01/2026).

[35] E. Llera et al. "Forecasting job creation from renewable energy deployment through a value-chain approach". In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (1er mai 2013), p. 262-271. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2012.12.053. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000099 (visité le 11/05/2026).

[36] M. Markaki et al. “The impact of clean energy investments on the Greek economy : An input–output analysis (2010–2020)”. In : *Energy Policy* 57 (juin 2013), p. 263-275. ISSN : 03014215. DOI : 10.1016/j.enpol.2013.01.047. URL : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513000748 (visité le 09/01/2026).

[37] Ronald E. Miller et Peter D. Blair. *Input-Output Analysis : Foundations and Extensions*. 2e éd. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. DOI : 10.1017/CBO9780511626982. URL : https://www.cambridge.org/core/books/inputoutput-analysis/69827DA658E766CD1E17B1A47BA2B9C3 (visité le 20/05/2026).

[38] C. Oliveira et al. “How many jobs can the RES-E sectors generate in the Portuguese context ?” In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (1er mai 2013), p. 444-455. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2013.01.011. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000427 (visité le 09/05/2026).

[39] Philippe Quirion. “L’effet net sur l’emploi de la transition énergétique en France : Une analyse input-output du scénario négaWatt”. Avr. 2013. URL : https://hal.science/hal-00866447 (visité le 23/05/2026).

[40] Thijs ten Raa et José Manuel Rueda-Cantuche. “The Problem of Negatives Generated by the Commodity Technology Model in Input–Output Analysis : A Review of the Solutions”. In : *Journal of Economic Structures* 2.1 (2 mai 2013), p. 5. ISSN : 2193-2409. DOI : 10.1186/2193-2409-2-5. URL : https://doi.org/10.1186/2193-2409-2-5 (visité le 18/05/2026).

[41] Pranoi Raju et al. *A Net Zero transition for Morocco and its impact on the labor market : a LEAP-coupled input-output analysis*. 2026.

[42] Steffen Schlömer et al. “Annex {III} : Technology-specific Cost and Performance Parameters”. In : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group {III} to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edenhofer, O. and Pichs-Madruga, R. and Sokona, Y. and Farahani, E. and Kadner, S. and Seyboth, K. and Adler, A. and Baum, I. and Brunner, S. and Eickemeier, P. and Kriemann, B. and Savolainen, J. and Schl{\"o}mer, S. and von Stechow, C. and Zwickel, T. and Minx, J.C. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2014.

[43] *Série de Neumann*. In : *Wikipédia*. Page Version ID : 226691783. 22 juin 2025. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=S%C3%A9rie_de_Neumann&oldid=226691783 (visité le 18/05/2026).

[44] Moana Simas et Sergio Pacca. “Assessing employment in renewable energy technologies : A case study for wind power in Brazil”. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (1er mars 2014), p. 83-90. issn : 1364-0321. doi : 10.1016/j.rser.2013.11.046. url : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007958 (visité le 10/05/2026).

[45] C. Tourkolias et S. Mirasgedis. “Quantification and monetization of employment benefits associated with renewable energy technologies in Greece”. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.6 (1er août 2011), p. 2876-2886. issn : 1364-0321. doi : 10.1016/j.rser.2011.02.027. url : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211100075X (visité le 10/05/2026).

[46] Dong Xiang et al. “Techno-economic analysis of the coal-to-olefins process in comparison with the oil-to-olefins process”. In : *Applied Energy* 113 (1er jan. 2014), p. 639-647. issn : 0306-2619. doi : 10.1016/j.apenergy.2013.08.013. url : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191300648X (visité le 23/04/2026).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**