Traduit de Portugais vers Français - www.onlinedoctranslator.com

NOTE TECHNIQUE

Décarbonisation du secteur du transport routier

Intensité carbone des sources d'énergie

JUIN 2025

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

epe
anos

NOTE TECHNIQUE EPE/DPG/SDB/2025/03

Image de couverture

1. Développé parNoName_13 sur PixaBay .

Directeur
Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordination technique
Ángela Oliveira da Costa

Équipe technique
Angela Oliveira da Costa Arthur
Cortez Pires de Campos Danilo
Perecin
Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Technique de secrétariat
Rachel Couto

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

Ministre d'État
Alexandre Silveira de Oliveira

Secrétaire exécutif
Arthur Cerqueira Valerio

Secrétaire à la transition énergétique et à la planification
Thiago Vasconcelos Barral Ferreira

Secrétaire du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants
Peter Adamo Sampaio Mendes

http://www.mme.gov.br

epe Empresa de Pesquisa Energética | 20 anos

Président
Thiago Guilherme Ferreira Prado

Directeur des études économiques, énergétiques et environnementales
Thiago Ivanoski Teixeira

Directeur des études en énergie électrique
Reinaldo da Cruz Garcia

Directeur des études sur le pétrole, le gaz et les biocarburants
Heloisa Borges Bastos Esteves

Directeur de la gestion d'entreprise
Carlos Eduardo Cabral Carvalho

http://www.epe.gov.br

VALORPPUBLIQUE

L'EPEMÈNE DES ÉTUDES ET DES RECHERCHES POUR SOUTENIR LA FORMULATION,MISE EN ŒUVRE ET ÉVALUATION DE LA POLITIQUE ET DE LA PLANIFICATION ÉNERGÉTIQUES BRÉSILIENNES.

ETSTANOTATÉCNICA CONTRIBUE AVEC DES ESTIMATIONS SUR L'ÉVOLUTION DE L'INTENSITÉ CARBONE DES SOURCES D'ÉNERGIE(GLACE)ET LEURS DEMANDES ÉNERGÉTIQUES RESPECTIVES, AVEC L'OBJECTIF DE SOUTENIR LES DÉCISIONS DE LAWCONSEILNACTIONNEMENT DEPPOLITIQUE ETÉNERGIE,QUANT AUX DÉFINITIONS DES OBJECTIFS DEPPROGRAMMEMOBILITÉVHERDE ET JENOVATION(MSUR). TLE PROGRAMME EST LIÉ ÀLHé, fais-leWCARBURANT DE FUTUR,QUI CHERCHE L'INTÉGRATION DES INITIATIVES ET MESURES ADOPTÉES DANSPPOLITIQUE PDES PUBLICATIONS COMME LERENOVABIO,LEPPROGRAMMEMSUR,LEPBEVET LEPROCONVE,AFIN DE PROMOUVOIR UNE MOBILITÉ DURABLE À FAIBLES ÉMISSIONS DE CARBONE.

LEDIVULGATION D'ÉTUDES EXPLIQUANT LES POSSIBILITÉS DE DÉCARBONISATION DE LA MATRICE DE TRANSPORT ROUTIER DEBRASIL,BASÉ SUR L'ÉVALUATION DU CYCLE DE VIE DU PUITS-LE-ROUE,LEEPECHERCHE À ÉLARGIR LA CAPACITÉ DE PLANIFICATION DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE,AVEC L'OBJECTIF DE FAVORISER UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ALIGNÉE AVEC LE POTENTIEL,DÉFIS ET AVANTAGES CONCURRENTIELS DEBRASIL. ETL'APPROCHE SSA VISANT À GARANTIR LA SÉCURITÉ ÉNERGÉTIQUE,COMPÉTITIVITÉ ET DURABILITÉ,CONSOLIDER LE PAYS COMME PROTAGONISTE DU SCÉNARIO ÉNERGÉTIQUE NATIONAL ET INTERNATIONAL.

Identification et révisions des documents

Empresa de Pesquisa Energética

Zone d'étude

Direction des études sur le pétrole, le gaz et les biocarburants (DPG)

Surintendance des dérivés du pétrole et des biocarburants (SDB)

Étude

Intensité carbone des sources d'énergie

Révision	Date de émission	Description
r0	27/06/2025	Publication sur le site de l'EPE
r1	04/07/2025	Ajustements : Graphique 1 et Tableaux 1 et 2 (maintien des résultats finaux).

Résumé

Glossaire 1
Objectif 2
Introduction 2
Caractérisation des boissons énergisantes 5
Dérivés du pétrole 5
Gaz naturel pour véhicules 7
Biométhane 8
Éthanol anhydre et hydraté 8
Biodiesel 9
Électricité 11
Méthodologie 13
Paramètres techniques 13
Analyse du cycle de vie (ACV) 14
Demande de boissons énergisantes 23
Sources d'énergie – Résultats 28
Intensité carbone moyenne de la matrice de transport 29
Considérations finales 31
Annexe 32
A1) Propriétés physiques des boissons énergisantes – Programme Mover 32
A2) Facteurs d'émission lors de l'utilisation (combustion) des sources d'énergie 32
A3) Méthodologie de calcul de l'intensité carbone du gaz naturel 32
A4) Effet Corona 37
A5) Consommation énergétique des véhicules électriques 38
A6) Demande énergétique (volume) (2022 – 2034) 37
A7) Méthodologie de calcul de l'intensité carbone des mélanges nationaux de carburants . ...$_2$eq/MJ) des sources d'énergie (2022 – 2034) 39
A9) Intensité carbone moyenne de la matrice des transports (2022 – 2034) 39
Références bibliographiques 40

Liste des graphiques

Graphique 1 : Injection d'électricité dans le SIN – Brésil 12
Graphique 2 : Intensité carbone des sources d'énergie (du puits à la roue) 29
Graphique 3 : Intensité carbone moyenne des sources d'énergie dans la matrice du transport routier . ...

-Liste des figures

Figure 1 : Flux logistiques pour la production, le transport et le stockage de l'essence et du gazole. 5
Figure 2 : Chaîne des dérivés du pétrole (essence et diesel) 7
Figure 3 : Chaîne de véhicules au gaz naturel 7
Figure 4 : Chaîne éthanol (canne à sucre et maïs) 9
Figure 5 : Chaîne d'ester de biodiesel (FAME) 11
Figure 6 : Cycle de vie des sources d'énergie 14
Figure 7 : Chaîne de production d'électricité.....19
Figure 8 : Pertes d'énergie électrique 20

Figure A 1 :*Organigramme des étapes de production du gaz naturel et de son utilisation finale comme carburant pour véhicules (GNV) au Brésil. Les zones en pointillés indiquent la source utilisée pour estimer les émissions de GES de chaque étape de production. Adapté de l'EPE (2024)[1].*.....33
Figure A 2 :*Valeurs des émissions de GES par étape de production de GN. Pour cette estimation, les résultats utilisent le PRP du CH_4de 34 et le PCS (pouvoir calorifique supérieur) du GN*.....35
Figure A 3 : Points de mesure pour la recharge des véhicules électriques à batterie 39

-Liste des tableaux

Tableau 1 : Participation des sources de la matrice électrique nationale injectées dans le SIN.....12
Tableau 2 : Propriétés physiques moyennes des boissons énergisantes 13
Tableau 3 : Intensité carbone des sources de production d'électricité.....19
Tableau 4 : Demande énergétique (volume).....25
Tableau 5 : Demandes énergétiques (énergie - MJ).....26
Tableau 6 : Part de la demande énergétique dans la demande totale (en énergie) 27
Tableau 7 : Évolution de l'intensité carbone (gCO_{2eq}/MJ) de boissons énergisantes 28

Tableau A 1 : Approvisionnement intérieur en gaz naturel -*Valeurs moyennes consolidées de l'exploration et de l'approvisionnement en gaz naturel au Brésil, par origine*.....33
Tableau A 2 : Offre interne -*Valeurs consolidées du NG IC, par origine, se référant aux étapes d'exploration, d'écoulement, de traitement et d'importation*.....34
Tableau A 3 :*CI des étapes de transport et de distribution, séparées entre la valeur rapportée dans l'étude SGI (2015) et la valeur ajustée avec le PRG du CH_4de 27 et PCI de GN*.....35
Tableau A 4 : CI de l'étage de combustion mobile par type de combustible.....36
Tableau A 5 : IC des étapes de la chaîne de production et d'utilisation du GNV au Brésil et résultat estimé.....37
Tableau A 6 : Graphiques qui composent le calcul de l'effet Corona (en gCO_2/MJ).....38
Tableau A 7 : Demande énergétique (volume) pour 2022 ; 2024 - 2034 37
Tableau A 8 : Évolution de l'intensité carbone (gCO_2eq/MJ) de sources d'énergie.....39
Tableau A 9 : CI du secteur et des segments du transport routier (léger et lourd) 39

Glossaire

Analyse du cycle de vie

Méthodologie complète et standardisée au niveau international pour quantifier toutes les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie d'un produit ou d'un service, intégrant toutes les ressources pertinentes consommées et les impacts générés jusqu'à l'utilisation du produit ou du service produit.

Du puits au réservoir (*du puits au réservoir*, WTT)

Il s'agit des émissions liées aux processus d'extraction (puits), de traitement, de stockage et de distribution, jusqu'au point d'utilisation final (réservoir). Ses valeurs varient selon la source d'énergie, le mode de production et le mode de transport, jusqu'à sa mise sur le marché (SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Réservoir sur roues (*du réservoir à la roue*, TTW)

Désigne les émissions résultant de l'utilisation de carburants pour la production d'énergie. L'efficacité de chaque technologie de véhicule n'a pas été prise en compte dans ce document (JEC, 2020 ; SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Du puits à la roue (*du puits à la roue*, WTW)

Il comprend les émissions du cycle de vie du carburant, équivalant à la somme des étapes du puits au réservoir et du réservoir à la roue (SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Intensité carbone des sources d'énergie (ECI)

Relation entre les émissions de gaz à effet de serre, basées sur l'analyse du cycle de vie, calculées dans le processus de production du combustible ou de la source d'énergie et son utilisation, exprimée en grammes d'équivalent dioxyde de carbone par mégajoule ($gCO_2éq./MJ$).

Cote d'efficacité énergétique et environnementale (NEEA)

Dans le cadre de la Politique Nationale des Biocarburants (RenovaBio), il est fait référence à la différence entre les intensités carbone du combustible fossile de substitution et celle du biocarburant, qui est établie dans le processus de certification des unités de production (ANP, 2018a).

Crédit de décarbonisation (CBIO)

Instrument enregistré sous forme écrite, dans le but de prouver l'objectif individuel du distributeur de carburant, dans le cadre de RenovaBio, comme indiqué à l'art. 7 de la loi n° 13 576/2017 (BRÉSIL, 2017).

Objectif

La loi sur les carburants du futur, loi n° 14.993/2024, prévoit dans son article 5 que le Conseil national de politique énergétique (CNPE) fixera les valeurs d'intensité carbone des sources d'énergie (ICE) et la participation des carburants liquides ou gazeux ou de l'énergie électrique, dans le but de déterminer la conformité avec les objectifs du programme de mobilité verte et d'innovation (Mover) (BRASIL, 2024a).

Dans ce sens, la Société de Recherche Energétique (EPE) a fait les efforts nécessaires pour mettre à jour la Note Technique "*Décarbonisation du secteur du transport routier : intensité carbone des sources d'énergie*« (EPE, 2022), à la demande du Ministère des Mines et de l'Énergie (MME).

Cette note technique vise à présenter une trajectoire d'intensité carbone des sources d'énergie (ICE) pour chaque source d'énergie du secteur du transport routier, dans une analyse du cycle de vie centrée sur le puits à la roue, mesurée en grammes de CO_2-équivalent par mégajoule (gCO_2eq/MJ), afin d'aider le CNPE à définir les objectifs de Mover. Il convient de souligner que le document n'aborde pas les aspects liés à l'efficacité des véhicules, mesurée en mégajoules par kilomètre (MJ/km).

L'étude revisite la première édition, publiée en 2022, réalisée par l'EPE en réponse à une invitation de l'Association brésilienne d'ingénierie automobile (AEA), à la demande du ministère des Mines et de l'Énergie (MME), pour coordonner le groupe de travail sur l'intensité carbone des carburants actuels et futurs dans la matrice des transports brésiliens, dans le cadre du Comité des carburants de l'AEA (EPE, 2022).

Introduction

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) sont de plus en plus débattues dans le monde entier, et cette problématique prend de l'ampleur en raison des conséquences potentielles du changement climatique, comme le soulignent les rapports périodiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Dans son sixième et dernier rapport d'évaluation (AR6), le GIEC souligne sans équivoque que l'influence humaine est à l'origine du réchauffement climatique, la décennie 2011-2020 ayant enregistré une augmentation de 1,1 °C de la température moyenne à la surface de la planète par rapport à la période 1850-1900. Le GIEC affirme que l'ampleur des changements récents du système climatique dans son ensemble et l'état actuel de nombreux aspects de ce système sont sans précédent depuis des siècles, voire des milliers d'années (GIEC, 2023).

Il existe cependant des moyens de limiter ces effets et leurs risques, grâce à un développement humain continu et à une croissance économique durable, et il est essentiel de mener des actions concrètes et ambitieuses en matière d'atténuation et d'adaptation, ce qui implique de surmonter les défis économiques, technologiques, sociaux et institutionnels.

Le secteur des transports est l'une des principales causes des émissions mondiales de GES, avec une contribution encore plus importante aux émissions de CO_2Le secteur de l'énergie représentait 23 % de ses émissions en 2019. Dans le secteur des transports, le transport routier était responsable de 69 % des émissions de GES. À cet égard, le GIEC estime que la réalisation des objectifs climatiques nécessiterait des changements profonds dans le secteur (GIEC, 2022), ce qui rend nécessaire et efficace de placer les transports au cœur des stratégies d'atténuation des pays. Au Brésil, dans le secteur de l'énergie,

les émissions liées aux transports sont encore plus importantes que la moyenne mondiale, atteignant 50 % en 2024 (EPE, 2025a).

Français Le Brésil participe activement aux discussions internationales sur le changement climatique. Dans sa Contribution déterminée au niveau national (CDN) à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), lors de la 21e Conférence des Parties (COP 21), en tant que signataire de l'Accord de Paris, le pays s'est engagé à réduire ses émissions de GES de 37 % d'ici 2025 et d'ici 2030, il a indiqué une réduction de 43 %, en utilisant 2005 comme année de référence. En 2024, un nouvel engagement a été pris, discuté lors de la COP 29, lorsque le Brésil s'est engagé à réduire ses émissions de 59 % à 67 % d'ici 2035 et, comme objectif à long terme, vise à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Ces mesures continuent d'englober tous les secteurs de l'économie, tels que l'agriculture et l'énergie, cette dernière incluant les transports (BRASIL, 2009, 2024b).

La Politique nationale des biocarburants (RenovaBio) fixe des objectifs de réduction de l'intensité carbone (IC) pour le secteur des transports, avec une évaluation centrée sur l'efficacité énergétique et environnementale des différents biocarburants, par rapport aux combustibles fossiles (BRASIL, 2017). L'objectif est d'accroître la production et l'utilisation des biocarburants dans le secteur énergétique brésilien et de contribuer à la sécurité énergétique et à la prévisibilité du marché. Les principaux instruments de sa mise en œuvre se résument à trois axes stratégiques : Objectifs nationaux de réduction des émissions de GES ; Certification de la production de biocarburants et Crédit de décarbonation (CBIO). L'adhésion des producteurs de biocarburants à RenovaBio est volontaire. Ceux qui certifient leur production sur la base de l'analyse du cycle de vie (ACV)[1], conformément à la résolution ANP n° 758/2018, reçoivent, en conséquence, des notes d'efficacité énergétique et environnementale (NEEA) (ANP, 2018a). De plus amples informations sur RenovaBio et ses outils sont décrites au point 3.

La loi n° 14 902 du 27 juin 2024 a instauré le Programme de mobilité verte et d'innovation (Programme Mover) et abrogé les dispositions de la loi n° 13 755/2018, notamment celle portant création du Programme Rota 2030 (BRASIL, 2018, 2024c). Parmi ses orientations, Mover vise à accroître l'efficacité énergétique des véhicules vendus dans le pays, à accroître les investissements dans la recherche, le développement et l'innovation au Brésil, à promouvoir l'utilisation de biocarburants, d'autres carburants à faible émission de carbone et de modes de propulsion alternatifs, ainsi qu'à valoriser le réseau énergétique brésilien, et à promouvoir l'utilisation de systèmes de production plus performants, en vue d'atteindre la neutralité carbone. Mover s'inscrit dans le cadre des engagements du Brésil en matière de décarbonation et de lutte contre le changement climatique. Le 15 avril 2025, le décret n° 12 435 a été publié.[2]a réglementé le programme Mover, établissant des paramètres techniques et environnementaux d'efficacité énergétique, de recyclabilité et de sécurité, que les fabricants et importateurs de véhicules doivent suivre pour la vente au Brésil à partir de juin de cette année (BRASIL, 2025).

[1]Seule la fraction de la production de biocarburants de chaque producteur répondant aux critères d'éligibilité de RenovaBio sera éligible à la production CBIO. Pour ce faire, le producteur doit renseigner les données relatives à sa production agricole – primaire ou standard (pénalisée) – dans RenovaCalc (un outil du programme de calcul de l'intensité carbone des biocarburants), en enregistrant uniquement les données relatives aux producteurs de biomasse possédant des propriétés rurales admissibles (ANP, 2021a).

[2]Aux fins du décret 12.435/2025, le concept d'efficacité énergétique des véhicules est entendu conformément aux dispositions de l'ordonnance n° 169, du 3 mai 2023, de l'Institut national de métrologie, de qualité et de technologie - Inmetro (INMETRO, 2023).

La loi sur les carburants du futur, approuvée par le président Luís Inácio Lula da Silva le 8 octobre 2024, prévoit une série d'initiatives visant à promouvoir une mobilité durable à faibles émissions de carbone et à consolider la position du Brésil comme leader de la transition énergétique mondiale. Pour ce faire, les initiatives et mesures adoptées dans le cadre de RenovaBio, du programme Mover, du programme brésilien d'étiquetage des véhicules (PBEV) et du programme de contrôle des émissions des véhicules (Proconve) doivent être intégrées. Cette intégration sera réalisée grâce à l'adoption de la méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV) visant à réduire les émissions de CO_2eq avec le meilleur rapport coût-bénéfice, en utilisant les concepts du puits à la roue et du berceau à la tombe (BRASIL, 2024a).

Compte tenu du niveau d'émissions de GES des différentes options, une évaluation systématique et complète du potentiel de décarbonation de ces voies est essentielle. De plus, l'orientation des politiques publiques et des stratégies des entreprises nécessite la normalisation des sources et des méthodes de calcul des facteurs impliqués dans cette analyse.

Français Ainsi, cette étude vise à estimer une trajectoire d'évolution de l'intensité carbone pour les différentes sources d'énergie qui alimentent les technologies des véhicules, qu'elles soient à combustion interne, hybrides ou électriques, et leurs parts respectives dans la matrice énergétique du secteur du transport routier, sur un horizon de dix ans. Les caractéristiques et les particularités du marché brésilien et l'analyse du cycle de vie du puits à la roue seront prises en compte. Les carburants commerciaux considérés étaient : l'essence C (essence A et éthanol anhydre), l'éthanol hydraté, le diesel B (diesel A et biodiesel) et le gaz naturel pour véhicules (GNV), ainsi que les nouveaux entrants, tels que le biométhane et l'électricité, pour les années 2022, 2024, 2027, 2032 et 2034. De plus, les valeurs relatives aux carburants de référence sont présentées.[3](Essence E22 et diesel B7).

Il est rappelé que l'analyse de l'efficacité des véhicules ne fait pas partie du champ d'application du présent document, le ministère du Développement, de l'Industrie, du Commerce et des Services étant chargé de définir et de suivre les objectifs de consommation d'énergie en MJ/km et les émissions de CO_2eq dans le cycle de vie de l'entreprise en CO_2eq/km, basé sur les valeurs ICE, conformément à l'article 5, § 1 de la loi 14.993/2024 (BRÉSIL, 2024a). Cet indicateur offre la possibilité de réaliser une analyse systémique et comparative des solutions de décarbonation du transport routier et de leur potentiel.

[3]Les carburants de référence sont établis par la résolution ANP n° 864/2021 et utilisés lors des tests de consommation et d'émissions des véhicules. Dans ces cas, l'essence contient 22 % d'éthanol anhydre (E22) et le diesel 7 % de biodiesel (B7) (ANP, 2021b). Ces teneurs en biocarburant diffèrent de celles disponibles dans les stations-service au moment de la publication du présent document (27 % d'éthanol anhydre pour l'essence C ordinaire et 25 % pour l'essence C). *prime*; 14 % de biodiesel dans le diesel B).

Cette section présentera des données générales sur la production et la caractérisation de la chaîne de production des sources d'énergie utilisées dans le secteur du transport routier.

Dérivés du pétrole

En 2024, le parc de raffinage brésilien comptait 18 raffineries[4] en activité, avec une capacité de traitement de 2,3 millions de barils par jour (bpj), soit 133,5 milliards de litres par an, Petrobras étant responsable de 82 % du total. L'essence et le diesel sont produits dans la plupart des raffineries nationales (ANP, 2025a).

Français La production d'essence et de diesel s'élevait respectivement à 30,8 milliards de litres et 47,3 milliards de litres en 2024. Dans le secteur du transport routier, la consommation d'essence A était de 32,3 milliards de litres et de 46,5 milliards de litres pour le diesel A cette même année. Les importations correspondaient en moyenne à 12 % et 25 %, respectivement, sur la base des cinq dernières années (EPE, 2025a).

La chaîne des dérivés du pétrole prend en compte les étapes de la production du pétrole (*à terre* et *offshore*, appelé *en amont*), transport vers les raffineries et autres producteurs (pipelines et cabotage, *à mi-chemin*), traitement, stockage et distribution aux revendeurs (*en aval*), voir Figure 1. Le pétrole atteint les raffineries principalement par pipelines et est également transporté vers les terminaux principalement par ce moyen de transport. Des terminaux aux bases de distribution, on utilise des pipelines, des routes, des voies navigables et le rail. Le transport vers les stations-service s'effectue principalement par route.

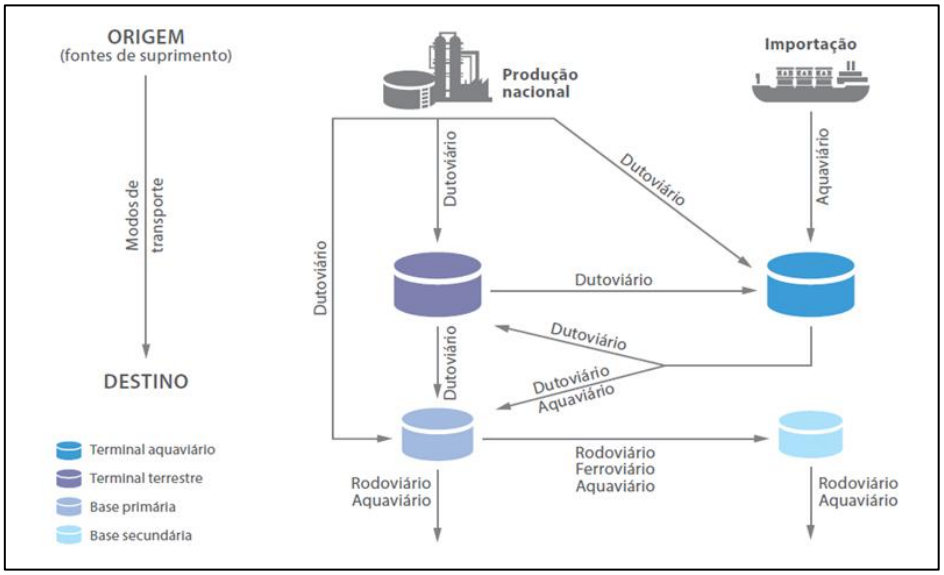


Figure 1 : Flux logistiques pour la production, le transport et le stockage de l'essence et du gazole.

Source : ANP (2015)

[4] Il y a aussi l'unité Univen Petróleo, à Itupeva/SP, dont les opérations sont suspendues depuis mars 2014.

L'essence est obtenue dans les raffineries, les usines pétrochimiques et les formulateurs à partir d'un mélange de procédés de distillation atmosphérique, de craquage catalytique, de reformage catalytique et d'alkylation. On produit également de l'essence à indice d'octane plus élevé.[5](*prime*), avec des proportions plus élevées de courants issus de ces deux derniers procédés. Le diesel est obtenu par distillation atmosphérique et hydrotraitement de courants provenant d'autres unités de traitement, telles que le craquage catalytique (FCC) et la cokéfaction différée, entre autres.

En termes d'émissions de GES, on estime qu'en 2022, les activités de l'industrie pétrolière et gazière étaient responsables de 5,1 $GtCO_2eq$, soit environ 15 % des émissions mondiales liées à l'énergie, à 3,5 $GtCO_2eq$ lié au pétrole (AIE, 2023). Bien que les émissions de la chaîne de production jusqu'à l'obtention et la distribution des dérivés soient importantes, il convient de noter que la part ayant le plus de poids dans l'intensité carbone de l'essence A et du diesel A réside dans l'étape d'utilisation de ces carburants, c'est-à-dire qu'elle résulte de la combustion des hydrocarbures d'origine fossile qui les constituent.

Il convient de noter que la réduction des émissions dans la chaîne pétrolière et ses dérivés fait partie de l'agenda climatique national et international, et notamment celui des compagnies pétrolières et gazières.

Durant les phases d'exploration et de production, la production pétrolière varie considérablement selon la région, la méthode d'exploration et les caractéristiques du pétrole disponible, entre autres facteurs. Les initiatives d'atténuation des émissions consistent à accroître l'efficacité et l'électrification des plateformes, ainsi qu'à réduire les émissions fugitives de méthane ou celles résultant de la ventilation et de la combustion incomplète. Certaines de ces mesures ont un coût de réduction négatif, c'est-à-dire qu'elles génèrent plus d'avantages économiques pour l'agent que les coûts de leur mise en œuvre (AIE, 2023 ; EPE, 2024a). Au Brésil, l'ANP publie le Panel dynamique des émissions de GES, qui présente les émissions et les intensités d'émission de tous les bassins de production de pétrole et de gaz naturel brésiliens (ANP, 2025b). Des études internationales indiquent que la production du pays présente des émissions par baril à un niveau intermédiaire ou inférieur à la moyenne mondiale, et pourrait se consolider comme un élément de compétitivité pour l'industrie nationale dans la transition énergétique (EPE, 2024a).

Les raffineries recherchent constamment des améliorations de leurs procédés afin de tirer parti des flux à plus faible valeur ajoutée, de réduire leurs émissions et de produire des produits de meilleure qualité. Par exemple, la production d'essence.*prime*Elle nécessite une plus grande participation aux processus à plus forte dépense énergétique et, d'autre part, son utilisation peut être plus efficace sur certains modèles de véhicules et dans certaines conditions de forte puissance. Il est important de noter qu'actuellement, l'utilisation de cette essence*prime*Ce système n'affecte qu'une faible partie du parc de vélos Otto, compte tenu de la diversité des caractéristiques des moteurs qui le composent et des conditions d'utilisation des véhicules (villes, embouteillages, autoroutes). De plus, son prix élevé rend son utilisation difficile pour le grand public.

Il existe également la possibilité de produire du diesel co-traité[6], qui fait référence à la transformation de la biomasse renouvelable simultanément avec des fractions moyennes de pétrole, comme le diesel, dans les raffineries pour la production de carburant (PETROBRAS, 2025).

---

[5]Dans ce cas, la teneur en éthanol anhydre est de 25 % et le RON est de 97, et pour l'essence C ordinaire, le RON est de 93 (ANP, 2020).
[6]Ce procédé implique l'hydrogénation catalytique d'un mélange de gazole et de fractions d'huiles végétales dans un réacteur d'hydrotraitement (HDT) sous des conditions contrôlées de température élevée et de pression d'hydrogène. La réglementation actuelle autorise la commercialisation du gazole cotraité sous le nom de gazole A, à condition qu'il réponde aux spécifications et aux critères de qualité (ANP, 2010, 2013). Petrobras a annoncé des projets bas carbone dans son plan stratégique 2025-2029, visant à produire du gazole à 5 % de contenu renouvelable (Gasole R5) (PETROBRAS, 2025).

À ce stade de l'étude, l'intensité carbone de l'essence et du diesel sera considérée comme constante, selon la valeur fournie par RenovaCalc. La figure 2 illustre les étapes d'utilisation de ces combustibles fossiles liquides.

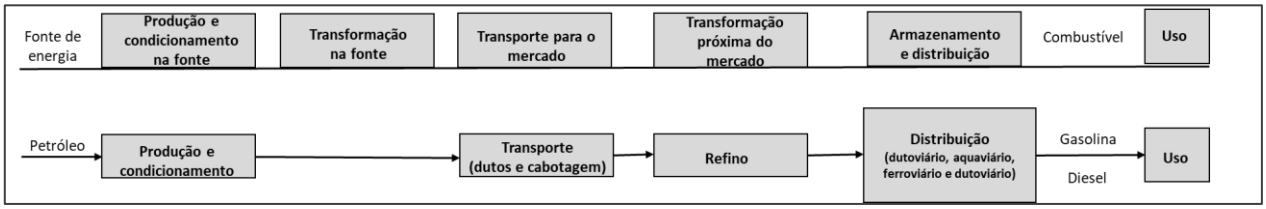


Figure 2 : Chaîne des dérivés du pétrole (essence et diesel)

Source : Préparé par l'auteur sur la base de JEC (2020)

Véhicules au gaz naturel

Le Brésil compte 12 unités de traitement de gaz naturel (UPGN) et un réseau de transport de 9 420 km (EPE, 2024b). De plus, les importations s'effectuent par trois gazoducs internationaux ou sous forme de gaz naturel liquéfié (GNL), réceptionné aux terminaux de regazéification. En 2024, la production nationale s'élevait à 55,8 milliards de m3, dont 30,3 milliards de m^3 ont été réinjectés. Ajouté à l'approvisionnement importé, l'approvisionnement national total s'élevait à 32,1 milliards de m^3, et la consommation du secteur du transport routier à 1,7 milliard de m3(12% de la consommation énergétique finale de gaz naturel) (EPE, 2024b).

La chaîne du gaz naturel, illustrée à la figure 3, suit un flux similaire à celui observé pour les carburants liquides dérivés du pétrole, détaillé précédemment. Après extraction des réservoirs, le gaz naturel est acheminé par pipelines jusqu'à l'UPGN, où il subit une séparation des contaminants acides (CO).2et H_2S) et des composants plus lourds (condensats, tels que C2 à C5+). Les UPGN sont reliés aux pipelines de transport, qui peuvent alimenter les gros consommateurs, et aux réseaux de distribution, qui atteignent la plupart des utilisateurs finaux.

Le ravitaillement des véhicules est l'une des nombreuses applications du gaz naturel. Son adoption dans l'automobile se concentre sur des niches régionales et des flottes à forte utilisation. Pour les véhicules lourds, l'utilisation du gaz en est encore à ses balbutiements, mais elle constitue une alternative prometteuse en matière de transition. Cela s'explique par les multiples défis liés à l'électrification directe par batteries, notamment pour les poids lourds et ceux qui parcourent de longues distances. L'alternative des véhicules à gaz prend de l'ampleur grâce à la combinaison du gaz fossile avec le biométhane renouvelable en remplacement du diesel, avec des gains en termes de diversification et d'internalisation de l'approvisionnement et de réduction des émissions.

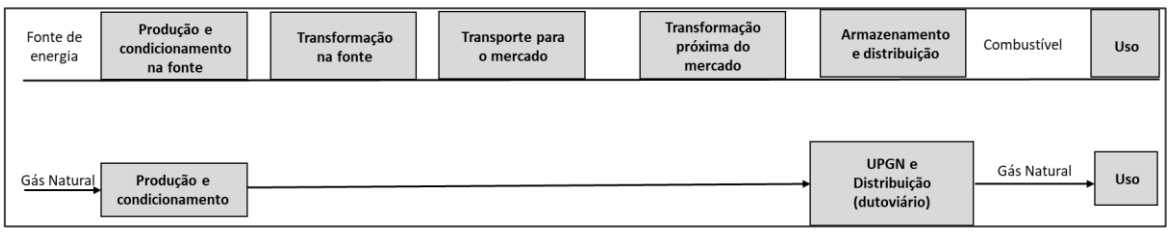


Figure 3 : Chaîne de gaz naturel pour véhicules

Source : Préparé par l'auteur sur la base de JEC (2020)

Biométhane

Le biométhane est obtenu par purification du biogaz produit par digestion anaérobie, un procédé de conversion de matière organique réalisé par des micro-organismes en milieu dépourvu d'oxygène. Différents substrats peuvent être utilisés et la quantité de biogaz produite dépend principalement de la technologie de digestion et du substrat utilisés. Au Brésil, le plus grand potentiel de biogaz provient des activités du secteur agricole, par exemple des déchets agro-industriels, de la production agricole et de l'élevage en stabulation. Outre la production de biométhane, considéré comme interchangeable avec le gaz naturel,[7]Le biogaz peut également être appliqué directement pour produire de l'énergie électrique et thermique, entre autres utilisations locales.

La capacité nationale de production de biométhane est encore limitée, mais elle connaît un processus d'expansion accéléré. En avril 2025, 12 unités de production étaient autorisées à fonctionner par l'ANP, la moitié d'entre elles obtenant leur première autorisation en 2024 ou au premier trimestre 2025. De plus, si les enregistrements des unités en construction auprès de l'ANP sont effectifs et que leurs calendriers sont confirmés, 35 nouvelles usines pourraient être ajoutées au parc national d'ici 2027, portant la capacité de production totale à plus de 2,1 millions de m^3/jour, soit 0,8 milliard de m^3/an (ANP, 2025a).

Le biométhane peut être utilisé dans les véhicules, en exploitant les infrastructures logistiques et les stations-service disponibles pour le gaz naturel. Cependant, la production décentralisée à partir de déchets peut également favoriser l'approvisionnement local et la généralisation des flottes captives, créant ainsi une chaîne indépendante du gaz fossile.

Éthanol anhydre et hydraté

Au Brésil, l'éthanol de première génération (E1G) est produit à grande échelle à partir de canne à sucre et de maïs. La production d'éthanol par les centrales à canne à sucre-énergie est déjà consolidée, avec un total de 29,7 milliards de litres en 2024, principalement concentrée dans la région Centre-Sud (responsable de plus de 90 % de ce total) (MAPA, 2025). Le Brésil compte également deux[8]unités commerciales d'éthanol de deuxième génération, à partir de bagasse de canne à sucre. D'autre part, des plants de maïs (*complet*ou *fléchir*)[9]ont connu une croissance considérable, ayant produit 7,7 milliards de litres au cours de la même année, en mettant l'accent sur l'État du Mato Grosso (MAPA, 2025 ; UNICA, 2025a).

Selon l'ANP (2025c), en avril 2025, 361 unités étaient autorisées à vendre de l'éthanol, dont 290 étaient déjà certifiées RenovaBio, ce qui correspond à 80 % du total. De ce nombre, 275 produisent du biocarburant à partir de canne à sucre (1G et 2G), avec un volume admissible d'environ 90 % de la capacité de production. Pour l'éthanol de maïs[10], le volume éligible était d'environ 70% dans les 7 unités*complet*, et 65% dans le cas des 7 plantes*fléchir*.

---

[7]Le biométhane est un biocarburant standardisé, dont les spécifications sont réglementées par l'ANP dans les résolutions n° 886 et n° 906 de 2022 (ANP, 2022a, 2022b).

[8]En 2025, Raízen a annoncé que l'unité Costa Pinto de Raízen, à partir de la récolte 2025/26, sera dédiée aux tests et au développement futur du biocarburant (NOVACANA, 2025).

[9]Unité de maïs*complet*produit du biocarburant uniquement à partir de céréales, tandis que*fléchir*utilise également de la canne à sucre.

[10]Les cultures de maïs sont difficiles à suivre, en raison du nombre élevé de fournisseurs de cette céréale aux unités de production de biocarburants.

L'éthanol, quelle que soit la matière première à partir de laquelle il est produit, peut être produit et vendu par les usines sous deux conditions principales qui diffèrent en termes de spécifications du produit. Selon la réglementation établie par l'ANP, entre autres paramètres spécifiques, l'éthanol anhydre doit avoir une teneur en éthanol supérieure (minimum de 98 % en volume) à celle de l'éthanol hydraté (minimum de 94,5 % en volume), ce qui nécessite une étape supplémentaire de séparation éthanol-eau dans les unités de production. Cette différenciation est nécessaire car, tandis que l'éthanol hydraté est destiné à la vente dans les stations-service sous le nom d'« éthanol » pour une utilisation directe dans les moteurs à combustion interne, l'éthanol anhydre est mélangé à l'essence A pour produire l'essence C, dans une formulation fabriquée par les distributeurs de carburant à la composition réglementée, actuellement de 27 % en volume (E27).

Dans le transport routier, l'éthanol est destiné aux véhicules légers, parmi lesquels l'utilisation des carburants du cycle Otto est prédominante. L'éthanol hydraté peut alimenter les véhicules exclusivement à l'éthanol, avec une part réduite dans le parc automobile.*fléchir*, qui dominent l'homologation des nouveaux véhicules légers depuis le milieu des années 2000 et ont atteint environ 80 % du parc en 2024. L'anhydre, à travers l'essence C, participe à répondre à la demande de véhicules *fléchir* et les véhicules à essence exclusifs, qui sont minoritaires dans la flotte et dans les permis (EPE, 2025b).

La figure 4 montre les étapes de la chaîne de production d'éthanol de canne à sucre et de maïs.

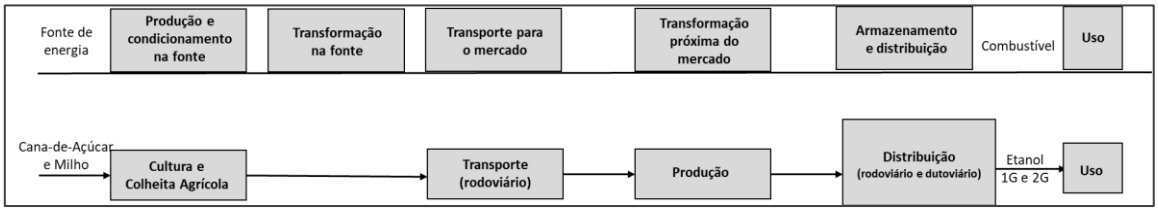


Figure 4 : Chaîne éthanol (canne à sucre et maïs)
Source : Préparé par l'auteur sur la base de JEC (2020)

Biodiesel

Le biodiesel est généralement produit à partir de la réaction entre des triglycérides et des acides gras avec de l'alcool, en présence d'un catalyseur, ce qui donne des esters méthyliques ou éthyliques d'acides gras, appelés FAME (*Ester méthylique d'acide gras*) ou FAEE (*Esters éthyliques d'acides gras*), respectivement. Dans le pays, le méthanol est l'alcool le plus utilisé dans le procédé. Plusieurs matières premières peuvent être utilisées dans ces réactions et le soja a occupé une part majoritaire au fil des ans, environ 70 %, suivi des graisses animales (10 %) et d'autres intrants, tels que d'autres huiles végétales, de l'huile de friture et d'autres matières grasses.

Le secteur national du biodiesel FAME comptait 58 usines de production en avril 2025, concentrées dans les régions du Centre-Ouest et du Sud du pays. En 2024, 9,1 milliards de litres de ce biocarburant ont été consommés (ANP, 2025d). On observe qu'en avril 2025, le pourcentage actuel d'ajout obligatoire de biodiesel au diesel vendu dans le pays était de 14 % (B14), se maintenant à ce niveau depuis mars 2024 (CNPE, 2023).

Il est important de différencier le biodiesel FAME du diesel vert, qui est un carburant renouvelable formé d'un mélange d'hydrocarbures paraffiniques avec une composition chimique similaire à celle du carburant fossile (*passer*[11]). Le diesel vert peut être produit à partir de différentes voies, telles que l'hydrotraitement d'huiles végétales et animales, la synthèse Fischer-Tropsch à partir de sources renouvelables, ainsi que les processus de fermentation et d'oligomérisation d'alcools (EPE, 2020).

La résolution ANP n° 842/2021 a introduit les spécifications et obligations relatives au contrôle qualité du diesel vert (ANP, 2021c). Ainsi, la réglementation a commencé à intégrer les avancées technologiques et a autorisé l'utilisation d'autres biocarburants issus du cycle diesel, en plus du biodiesel (EMAG). La loi sur les carburants du futur a créé le Programme national pour le diesel vert (PNDV), qui stipule que sa participation volumétrique minimale obligatoire dans le diesel B vendu au consommateur final doit être assurée par le CNPE et ne peut dépasser la limite de 3 %. Des projets de production de diesel vert, notamment de HVO, sont actuellement en cours.*Huile végétale hydrotraitée*), en coproduction avec des carburants d'aviation durables, comme détaillé dans l'EPE (2024c, 2025b). On estime que les volumes produits seront destinés au marché étranger, où ce produit présente une demande représentative. À ce jour, aucune prévision n'est prévue concernant la réglementation du pourcentage de mélange obligatoire ; par conséquent, le biodiesel paraffinique ne sera pas pris en compte dans cette étude.

Actuellement, la certification des unités de production de biodiesel chez RenovaBio présente une difficulté supplémentaire, car la matière première, notamment celle d'origine non résiduelle, provient de plusieurs fournisseurs et peut être détenue par de nombreux intermédiaires, ce qui rend son traçabilité difficile.[12]et le processus de certification.

Sur les 58 usines de biodiesel, 37 ont été certifiées[13]Français dans RenovaBio, correspondant à 64 % du nombre total d'usines, avec un volume éligible de 40 % de leur production (ANP, 2025c). En raison de la difficulté de suivi de la matière première, la part éligible à la génération CBIO correspondait à environ 40 % du volume produit dans les unités certifiées. La difficulté de suivi de la production se reflète également dans l'incapacité des producteurs à se certifier en utilisant leurs propres données (primaires) concernant la phase agricole, qui comprend l'utilisation d'intrants et la productivité des matières premières végétales à partir desquelles l'huile est extraite. Ainsi, l'intensité carbone du biodiesel est significativement impactée par l'adoption du profil standard, qui utilise les données moyennes de la production nationale plus les pénalités, comme le prévoit la loi n° 13.576/2017 (BRASIL, 2017).

Pour le transport routier, le biodiesel est généralement vendu uniquement dans le mélange qui compose le diesel B, actuellement sous la référence B14. Le diesel B est le carburant le plus gourmand en énergie du pays, principalement pour les véhicules lourds. Il joue donc un rôle essentiel dans le transport de marchandises, qui dépend d'un réseau routier prédominant, et est fondamental pour l'approvisionnement du pays en marchandises et pour les chaînes clés de l'économie nationale, comme l'agroalimentaire.

---

[11]Biocarburants*sans rendez-vous*il s'agit d'hydrocarbures fonctionnellement équivalents à ceux d'origine pétrochimique et totalement compatibles avec l'infrastructure pétrolière existante (EPE, 2020).

[12]En juin 2022, l'ANP a préparé le rapport technique n° 06/SBQ v.0, qui établit les procédures de mise en œuvre et de vérification de la chaîne de contrôle des céréales et des huiles végétales dans le cadre de RenovaBio (ANP, 2022c).

[13]La production de biodiesel présente une difficulté de certification liée à la traçabilité de la production de soja, qui est la principale matière première utilisée (de la même manière que ce qui se passe avec le maïs, comme mentionné précédemment).

Le transport routier de marchandises longue distance, assuré par camions, peut être considéré comme un secteur difficile à réduire en raison des défis liés à l'électrification de ces véhicules par batteries, tels que leur poids élevé et/ou leur faible autonomie et leurs longs temps de recharge, ainsi que des spécificités du pays, comme le développement d'infrastructures de ravitaillement internalisées. Par conséquent, les biocarburants, utilisables en complément ou en remplacement du diesel A, tels que le biodiesel et le diesel vert, jouent un rôle important dans la réduction des émissions dans ce secteur.

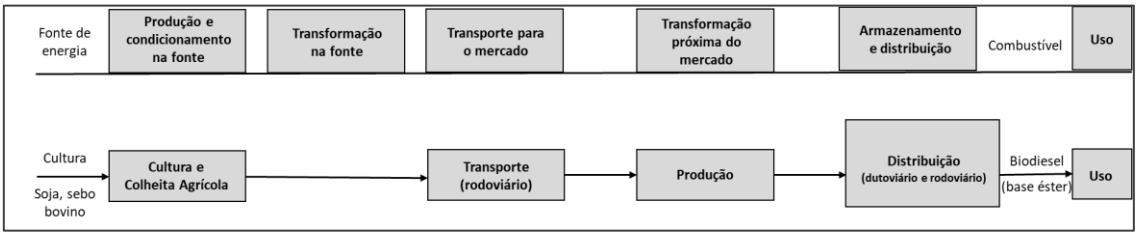


Figure 5 : Chaîne d'ester de biodiesel (FAME)
Source : Préparé par l'auteur sur la base de JEC (2020)

Électricité

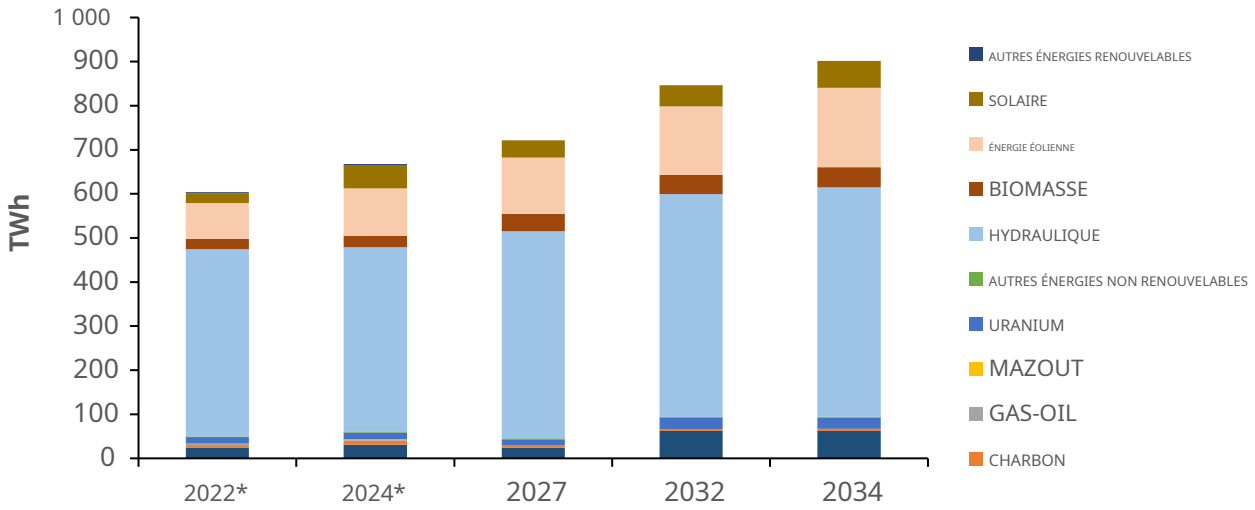
Dans un contexte de transition énergétique, l'électrification du transport routier s'est imposée comme une alternative prépondérante dans plusieurs pays. Ce mouvement inclut les véhicules hybrides et micro-hybrides, dotés de systèmes électriques et de batteries, mais conservant une alimentation externe exclusive en carburant et une propulsion principalement basée sur des moteurs à combustion interne, avec une efficacité énergétique accrue grâce à l'électrification. Véhicules hybrides*plugin*Les véhicules électriques à batterie peuvent être ou sont exclusivement alimentés par l'énergie électrique, qui assure la propulsion en partie ou en totalité. La croissance significative de la participation de ces catégories à l'immatriculation des nouveaux véhicules au Brésil, en particulier parmi les automobiles (EPE, 2024d), signifie que l'électricité gagne en importance comme source d'énergie pour le transport routier, bien que sa part dans le parc automobile soit encore modeste.

Le système de production d'électricité brésilien repose sur des centrales hydroélectriques dotées de grands réservoirs, capables de stocker l'énergie et d'offrir une flexibilité suffisante pour répondre à la demande. Cependant, pour diverses raisons, ce système a évolué ces dernières années, privilégiant la réduction de la part des sources hydroélectriques et l'augmentation de la production d'origine non contrôlable. Cela accroît les défis pour garantir la fiabilité opérationnelle et la sécurité de l'approvisionnement énergétique du réseau national interconnecté (RIN). Au fil du temps, le secteur électrique national a promu plusieurs initiatives qui ont contribué à maintenir la part élevée des énergies renouvelables, en exploitant les ressources abondantes du Brésil et en présentant des caractéristiques qui rendent la production issue de ces sources compétitive.

En 2024, l'injection d'électricité dans le réseau s'élevait à 668,1 TWh, dont plus de 90 % provenaient de sources renouvelables, dont l'hydroélectricité, suivie de l'éolien, de la biomasse et du solaire (EPE, 2025a). La part élevée des énergies renouvelables se maintiendra au cours de la prochaine décennie, comme le montre le graphique 1, d'après les données du PDE 2034 (EPE, 2025b). La part en pourcentage des sources de la matrice de production d'électricité injectées dans le SIN (hors autoproduction et production décentralisée)[14]est présenté dans le tableau 1.

[14]Pour plus de détails sur les projections de production d'électricité, nous suggérons de consulter le chapitre 3 du PDE 2034 (EPE, 2025b).

Graphique 1 : Injection d'électricité dans le SIN – Brésil



Remarque : les données de 2022 et 2024 font référence à l'historique du BEN.
Source : EPE (2025a; 2025b)

Tableau 1 : Participation des sources de la matrice électrique nationale injectée dans le SIN

	2022	2024	2027	2032	2034
Gaz naturel	4%	5%	3%	7%	7%
Charbon	1%	1%	1%	1%	1%
Gas-oil	1%	0%	0%	0%	0%
Mazout	0%	0%	0%	0%	0%
Uranium	2%	2%	2%	3%	3%
Autres énergies non renouvelables	0,2%	0,2%	0%	0%	0%
Non renouvelable	8%	9%	**6%**	**11%**	**10%**
Hydraulique	70%	63%	65%	60%	58%
Biomasse	4%	4%	5%	5%	5%
Énergie éolienne	14%	16%	18%	18%	20%
Solaire	4%	8%	5%	6%	7%
Autres énergies renouvelables	0,4%	0,4%	0%	0%	0%
énergies renouvelables	92%	91%	**94%**	**89%**	**90%**

Note 1 : La participation de la biomasse pour l'année 2024 a été déterminée selon le Bilan Energétique National (BEN, 2025a). Pour 2027, 2032 et 2034, il est composé à 80 % de celui provenant de la canne à sucre et à 20 % d'eau de Javel.
Source : EPE (2025a, 2025b)

Méthodologie

Cette section décrit les paramètres techniques des sources d'énergie considérées dans cette étude, ainsi que l'approche d'analyse du cycle de vie (ACV) et les facteurs utilisés pour estimer leurs intensités carbone respectives. Les demandes estimées sur un horizon de dix ans seront également présentées, ce qui, mis en relation avec les ICE, donnera l'intensité carbone moyenne du secteur du transport routier au Brésil.

Paramètres techniques

Le tableau 2 résume les principales propriétés des combustibles, la masse spécifique et le pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui ont été considérés comme constants dans l'horizon d'étude et qui sont conformes à ce qui est disponible dans le Bilan énergétique national, l'ANP et RenovaCalc.

Tableau 2 : Propriétés physiques moyennes[15] des boissons énergisantes[16]

CARBURANTS	Masse Spécifique	PCI		Contenu énergétique
LIQUIDES	**(kg/litre)**	**(kcal/kg)**	**(MJ/kg)**	**(MJ/litre)**
Éthanol anhydre[1]	0,791	6 750	28.26	22.36
Éthanol hydraté[1]	0,809	6 300	26,38	21.34
Essence A[1]	0,742	10 400	43,54	32,31
Biodiesel	0,88	9 000	37,68	33.16
Diesel A[1]	0,84	10.100	42,29	35,52
GAZEUX	**(kg/m3)**	**(kcal/m3)**	**(MJ/kg)**	**(MJ/m3)**
GNC[1]	0,74	8 800	49,79	36,84
Biométhane (96,5 % de méthane)	0,76	8 758	48,25	36,67

Remarque 1 : La différence entre les valeurs de ces propriétés physiques (principalement pour l'éthanol hydraté et le GNC) est enregistrée par rapport à celles prises en compte dans le programme brésilien d'étiquetage des véhicules (PBEV/INMETRO) (INMETRO, 2016, 2020, 2023),qui sont présentés à l'annexe A1 (tableau A1).

Note 2 : Selon le Bilan Energétique National, pour l'électricité, le PCI est de 860 kcal/kWh (EPE, 2025a).

Source : ANP (2018a, 2018b, 2024), EPE (2025a)

[15] Les valeurs PCI utilisées dans RenovaCalc sont les mêmes que celles adoptées pour cette étude, à l'exception du GNC.

[16] Voir la note de bas de page 3 sur les carburants de référence.

Analyse du cycle de vie (ACV)

Pour évaluer le niveau d'émissions de la matrice énergétique du transport routier, il est nécessaire de déterminer l'intensité carbone (IC), en gCO_2eq/MJ, des différentes sources d'énergie utilisables. La méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV) sera utilisée, couvrant toutes les étapes de la production, telles que l'extraction et la transformation des matières premières, la distribution, l'utilisation, la réutilisation, la maintenance et l'élimination finale dans l'environnement. L'ACV est un outil, normalisé par des normes techniques internationales, qui évalue les conséquences environnementales et sanitaires d'un produit ou d'un procédé, en déterminant la quantité de CO_{2eq}émis à toutes les étapes par unité d'énergie par rapport à chaque combustible (ABNT, 2014).

La portée de cette étude se limite au calcul de l'intensité carbone des sources d'énergie (ICE) et sera basée sur le concept du puits à la roue, sans tenir compte des émissions liées à la construction des unités de fabrication et à la fabrication des véhicules (lorsque toutes ces étapes sont prises en compte, on parle de « du berceau à la tombe »). La figure 6 illustre les étapes liées au cycle de vie des sources d'énergie, selon les termes adoptés dans cette analyse.

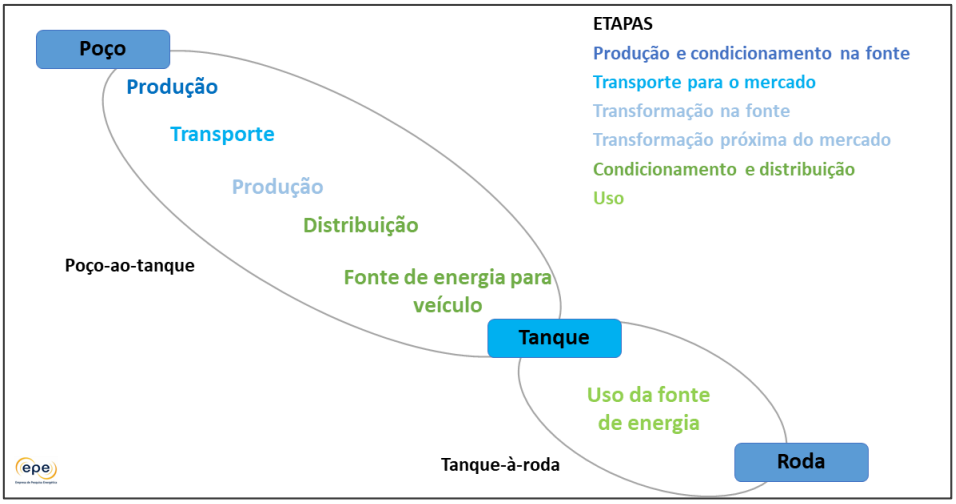


Figure 6 : Cycle de vie des sources d'énergie
Source:EPE (Élaboration propre) basé surJEC (2020)

Ainsi, cette étude présentera l'intensité carbone des sources d'énergie dans le secteur du transport routier, englobant les processus de production, de stockage, de distribution et d'utilisation dans les véhicules.

La période d'analyse couvre l'horizon 2034 pour les sources d'énergie utilisables dans le secteur du transport routier, à savoir l'essence C (essence A et éthanol anhydre), l'éthanol hydraté, le diesel B (gazole et biodiesel), le gaz naturel pour véhicules, le biométhane et l'électricité. Les résultats seront présentés pour 2022, 2024, 2027, 2032 et 2034. Une analyse similaire a été menée pour l'essence et le diesel de référence.

Dans le cadre de RenovaBio, l'outil RenovaCalc détermine l'intensité carbone des biocarburants et présente, à des fins de comparaison, des valeurs fixes pour les combustibles fossiles, comme détaillé ci-dessous. Pour l'électricité, une analyse complémentaire a été réalisée, prenant en compte d'autres sources de référence.

RenovaCalc est l'outil officiel de RenovaBio utilisé pour calculer l'intensité carbone des biocarburants (gCO_{2eq}./MJ)[17]à travers l'analyse du cycle de vie des missions[18], avec une allocation selon des critères énergétiques. Son périmètre est global, c'est-à-dire qu'il comptabilise les émissions provenant de l'extraction des ressources naturelles, de l'acquisition ou de la production et du traitement de la biomasse, de sa conversion en biocarburant, jusqu'à sa combustion dans les moteurs, incluant toutes les phases de transport (ANP, 2018a). Il convient de noter qu'actuellement, RenovaCalc n'inclut pas dans ses calculs d'intensité carbone les impacts liés aux changements d'affectation des sols, ni les émissions fugitives.[19].

L'outil présente séparément les intensités carbone des phases agricole, industrielle, de distribution et d'utilisation. Pour la phase de production agricole, il est possible d'opter pour un « profil spécifique » (données primaires du producteur) ou un « profil standard » (profil moyen de la production nationale, majoré des pénalités).[20]En phase industrielle, des données primaires concernant le processus de production de biocarburants de chaque unité sont systématiquement demandées. En phase de distribution, l'outil adopte une distance moyenne.[21], de la plante au consommateur, pour tous les modes[22](route ; pipeline ; ferroviaire et maritime)[23]), dont la valeur pour l'éthanol de canne à sucre est de 700 km. Pour l'éthanol de maïs, le biodiesel et le biokérosène nationaux et importés, elle est de 1 500 km, tandis que pour le biométhane, elle est de 43 km. Enfin, en ce qui concerne l'utilisation de biocarburants, des estimations de gaz à effet de serre ont été adoptées pour les sources intersectorielles (ANP, 2018a).

Voies de production de biocarburants[24]Les éléments pris en compte dans RenovaCalc sont :

- Biodiesel;
- Biométhane;
- Carburants alternatifs synthétisés par des acides gras et des esters hydrotraités ;
- Carburant éthanol.

  le)première génération de canne à sucre;

  b)première et deuxième génération dans une usine de canne à sucre intégrée ;

  w)deuxième génération;

  d)première génération de canne à sucre et de maïs dans une usine intégrée (*fléchir*);

  et)maïs de première génération; et

  f)première génération de maïs importé.

---

[17]Les gaz à effet de serre considérés sont détaillés dans l'annexe A2 (tableau A2).

[18]Technique descriptive ou comptable qui vise à attribuer à un produit, fabriqué à un moment donné, une part des émissions totales de polluants et de la consommation de ressources dans l'économie (WEIDEMA & EKVALL, 2009).

[19]La résolution CONAMA n° 501/2021 définit les émissions fugitives comme la libération diffuse dans l'atmosphère de toute forme de matière solide, liquide ou gazeuse, effectuée par une source sans dispositif conçu pour diriger ou contrôler son flux (CONAMA, 2021).

[20]La résolution ANP n° 758/2018 présente également des valeurs typiques pour la production nationale de biocarburants, qui cherchent à représenter la quantité moyenne d'intrants fournis aux systèmes de production agricole brésiliens (ANP, 2018a).

[21]Les distances moyennes adoptées dans RenovaCalc correspondent à une approximation (ANP, 2018b).

[22]Pour plus de détails, nous vous suggérons de consulter le tableau 2 de la note technique « RenovaCalc : méthode et outil de comptabilisation de l'intensité carbone des biocarburants dans le programme RenovaBio ». Il y est indiqué que les systèmes logistiques par pipeline, ferroviaire et maritime incluent également le transport routier dans leur composition (ANP, 2018b).

[23]Uniquement pour l'éthanol de maïs importé.

[24]Les données d'inventaire des processus en amont du processus agricole proviennent de la base de données Ecoinvent v.3.1 (WERNET*et al.*, 2016). La priorité a été donnée à l'adoption des inventaires de production et de transformation pour le Brésil (BR), le monde (GLO2) et, lorsque ceux-ci n'étaient pas disponibles, les inventaires « RoW3 » ont été utilisés (ANP, 2018a).

RenovaCalc présente également des valeurs fixes pour les intensités de carbone des combustibles fossiles[25]Les substituts, à savoir l'essence A, le diesel A, le gaz naturel et le kérosène d'aviation, ont été déterminés à partir des données de la littérature, qui ont été adoptées dans cette étude. La différence entre l'intensité carbone du combustible fossile de substitution et celle du biocarburant correspond à l'indice d'efficacité énergétique et environnementale (NEEA), résultant du processus de certification des unités de production.

Les unités de production et les importateurs qui décident de participer à RenovaBio et d'obtenir le certificat de production efficace de biocarburants doivent répondre à une série de critères d'éligibilité, tels que, par exemple, l'absence de suppression de végétation dans la zone de la propriété avec un registre environnemental rural (CAR) actif ou en attente dans lequel la biomasse énergétique est plantée, en décembre 2017, et qui sont détaillés dans les résolutions ANP n° 758/2018 et n° 802/2019 (ANP, 2018a, 2019) et le rapport technique ANP n° 02/SBQ (ANP, 2021a).

Pour estimer l'intensité carbone des sources d'énergie utilisées dans cette étude, les valeurs certifiées par RenovaBio et la caractérisation des systèmes de production typiques de soja, de maïs et de canne à sucre, récemment publiées par Embrapa (2023, 2024a, 2024b), dans la version la plus récente de RenovaCalc, ont été utilisées. La description des calculs et des valeurs estimées pour chacune des sources d'énergie sera détaillée ci-dessous.

Essence et diesel

Selon RenovaCalc, l'intensité carbone de l'essence A est de 87,4 gCO_2eq/MJ et le diesel A est de 86,5 gCO_2eq/MJ, considérées comme des valeurs représentatives des dérivés disponibles dans le pays. Le facteur d'émission lié à l'utilisation est de 71,33 $gCO.2eq/MJ$ et 74,43 gCO_2eq/MJ, respectivement (ANP, 2018a).

Par conséquent, et sachant qu'aucun changement significatif n'a été publié dans les valeurs pour l'essence et le diesel, les analyses de cette étude ont utilisé les valeurs susmentionnées.

Véhicules au gaz naturel (GNV)

Dans le cadre de RenovaBio, une intensité carbone pour le gaz naturel (GN) n'a pas été directement établie.[26]Afin de représenter les émissions associées au GNV national, ce document présente une méthodologie proposée pour déterminer une nouvelle valeur de l'intensité carbone de ce carburant, comme détaillé dans l'annexe A3.

En général, pour estimer les émissions en amont (du puits au réservoir) de la chaîne du gaz naturel, l'ensemble du profil de sa production et de son origine au Brésil a été pris en compte (*offshore*,*à terre* Importation de gazole et gaz naturel liquéfié (GNL), en tenant compte des émissions fugitives potentielles de méthane à chaque étape. Différentes bases de données et études spécifiques sur les émissions de GES inhérentes à la chaîne de ce combustible ont été utilisées pour établir un CI plus compatible avec la réalité brésilienne. La valeur estimée du CI pour l'étape du puits au réservoir était de 19,04 $gCO.2eq/MJ$. Les émissions provenant de l'utilisation/combustion (du réservoir à la roue) sont de l'ordre de 57,81 gCO_2eq/MJ,

[25]Les valeurs d'intensité carbone des combustibles fossiles, fournies par RenovaCalc, peuvent être améliorées grâce aux données des processus d'extraction et de traitement.

[26]Le « carburant fossile de substitution » d'origine fossile pour le calcul du NEEA du biométhane est une référence à la moyenne entre le diesel, l'essence et le gaz naturel, reflétant la diversité d'utilisation du gaz renouvelable dans les transports.

comme prévu dans RenovaBio. Ainsi, la CI finale du GNC estimée dans cette étude était de 76,85 gCO_{2eq}/MJ.

Éthanol anhydre et hydraté

L'intensité carbone de l'éthanol a été estimée par simulations dans RenovaCalc V7, à partir de : (i) données agricoles régionalisées sur les profils typiques de la culture de la canne à sucre et du maïs au Brésil, fournies par Embrapa (2024a, 2024b) ; et (ii) données industrielles moyennes basées sur les valeurs les plus récentes publiées dans les certifications RenovaBio. À partir de ces données, il a été possible de déterminer un IC compatible avec la réalité de chacune de ces filières agricoles, considéré comme identique pour les années 2022 et 2024.

La participation proportionnelle de la canne à sucre et du maïs dans l'approvisionnement intérieur total en éthanol a également été prise en compte, à 79 % et 21 % en 2024.[27], respectivement. Ainsi, l'IC pour l'année 2024 a été estimé à 22,39 gCO_2eq/MJ pour l'éthanol anhydre et 22,73 gCO_2eq/MJ pour l'éthanol hydraté. Pour 2022, les valeurs sont respectivement de 22,26 gCO_2eq/MJ et 22,65 $gCO_2éq$/MJ.

Il convient également de noter que, si la méthodologie de calcul de l'IC de l'éthanol était basée sur les indices d'efficacité énergétique et environnementale (NEEA) des certifications les plus récentes enregistrées dans RenovaBio, les valeurs estimées seraient plus élevées, en raison de la pénalité imposée aux données non primaires (standard) des producteurs. Pour l'année 2024, l'IC, compte tenu des valeurs certifiées dans RenovaBio et de la part proportionnelle de la canne à sucre et du maïs dans l'approvisionnement national en éthanol, serait de 27,95 gCO_2 eq/MJ pour l'éthanol anhydre et 28,37 gCO_2eq/MJ pour l'éthanol hydraté.

Pour tracer les trajectoires de réduction de l'IC de l'éthanol anhydre et hydraté dans les années à venir, la mise en œuvre de meilleures pratiques agricoles a été envisagée, comme l'utilisation du biométhane dans la flotte agricole de canne à sucre (UNICA, 2025b), entraînant un taux de réduction annuel de l'IC de 0,9 % par an pour l'éthanol de canne à sucre et de 0,5 % par an pour l'éthanol de maïs.[28].

Biodiesel

Les certifications des usines de biodiesel de RenovaBio, en particulier celles qui traitent l'huile de soja et d'autres huiles/graisses animales, présentent des variations importantes en termes de NEEA et d'éligibilité des matières premières utilisées, ce qui présente des défis dans le traitement de ces données.

Ainsi, la même méthodologie de calcul décrite pour l'éthanol a été appliquée, le CI du biodiesel étant également déterminé par simulation dans RenovaCalc V7, à partir de : (i) données agricoles régionalisées sur le profil typique de la culture du soja au Brésil (EMBRAPA, 2023) ; et (ii) données industrielles se référant aux valeurs les plus récentes publiées dans les certifications RenovaBio. À partir de la base de données de certification partagée par l'ANP (2025e), il a été possible de représenter dans RenovaCalc :*mélanger* Traitement moyen des différentes matières premières utilisées dans la production de biodiesel national. Le profil de traitement des matières premières obtenu était d'environ 68 % d'huile de soja, 9 % d'autres huiles végétales (palme, coton et autres) et 23 % d'huiles et graisses résiduelles (huiles de friture usagées, graisses animales et autres). Le choix d'utiliser des valeurs agricoles typiques pour le soja plutôt que les valeurs agricoles certifiées par RenovaBio et une*mélanger*moyenne des matières premières dans la phase industrielle, en plus d'assurer l'utilisation de la même méthodologie appliquée à

[27]En 2022, la part de l'éthanol de canne à sucre était de 86 % et celle de l'éthanol de maïs de 14 %.

[28]Si une analyse était réalisée à partir du CI des certifications, qui contiennent des valeurs pénalisées, une autre solution possible pour améliorer le CI serait d'accroître l'utilisation de données primaires plutôt que de données standard. Cela permettrait de réduire la pénalisation, notamment dans le cas du maïs, qui utilise encore peu de données primaires.

L'éthanol est également dû au fait qu'une partie du secteur est incapable de suivre l'intégralité de la chaîne des matières premières exigée par la politique et n'utilise pratiquement pas de données primaires. Ainsi, les certifications présentent des performances en matière d'émissions incompatibles avec la réalité du secteur.

Compte tenu de ce qui précède, la CI estimée du biodiesel était de 28,4 gCO_2eq/MJ. La trajectoire de réduction du CI du biodiesel pour les années à venir a suivi la même logique que celle appliquée à l'éthanol, en tenant compte de meilleures pratiques agricoles et des gains de productivité. Ainsi, une réduction annuelle moyenne du CI du biodiesel de 0,5 % a été estimée.[29].

Biométhane

L'intensité carbone du biométhane est basée sur les certifications RenovaBio actuelles. Fin mars 2025, quatre unités de production de biométhane étaient certifiées, avec 100 % du volume éligible, et présentaient une intensité carbone moyenne de 8,35 $gCO.2eq/MJ$. Cette valeur a été retenue à partir de 2024 et restera constante tout au long de la période. En 2022, l'intensité carbone des installations de biométhane certifiées était de 9,32 $gCO.2éq/MJ$.

Électricité

L'analyse des impacts des émissions liées à la production d'électricité intègre la consommation d'énergie résultant des étapes d'extraction à partir de sources primaires, de transformation, de transport, de distribution et d'utilisation. Pour déterminer son intensité carbone, les valeurs des facteurs d'émission présentés par le GIEC (médiane) et Ecoinvent 3.11 (2018) ont été prises en compte pour chaque source composant la matrice nationale, comme détaillé dans le tableau 3. La figure 7 illustre les étapes de la chaîne de production d'électricité.

[29]Il convient de noter que, si l'IC de référence était estimé sur la base des valeurs certifiées dans RenovaBio, un moyen important d'améliorer l'IC serait à nouveau d'augmenter l'utilisation de données primaires, ce qui ferait que les valeurs moyennes d'IC du biodiesel de soja s'éloigneraient des valeurs pénalisées et convergeraient vers des niveaux plus proches du profil typique analysé.

Tableau 3 : Intensité carbone des sources de production d'électricité

Sources de production d'électricité	CI (gCO_{2eq}/MJ)	Source
Hydro-électrique	6,67	GIEC
Énergie éolienne	3.06	GIEC
Solaire	11.39	GIEC
Bagasse de canne à sucre	13,68	Ecoinvent 3.11
Bois de chauffage	16.56	Ecoinvent 3.11
Eau de Javel	45,28	Ecoinvent 3.11
Autres sources renouvelables	6,90	GIEC/Ecoinvent 3.11
Nucléaire	3.31	GIEC
charbon vapeur	227,78	GIEC
Gaz naturel	136.11	GIEC
gaz de cokerie	525,00	Ecoinvent 3.11
Mazout	208,89	Ecoinvent 3.11
Gas-oil	204,72	Ecoinvent 3.11
Autres sources non renouvelables	133,50	GIEC/Ecoinvent 3.11

Remarque : Se réfère aux intensités carbone des sources d'énergie, selon le GIEC et Ecoinvent 3.11, pondérées par la participation des sources d'énergie dans la matrice électrique (2014 à 2023), selon les données présentées par EPE (2025a).

Source : EPE (2025a) ; Ecoinvent 3.11 (2018) ; GIEC (2013, 2023) ; Schlömer et al. (2014) ; WERNET et al. (2016)

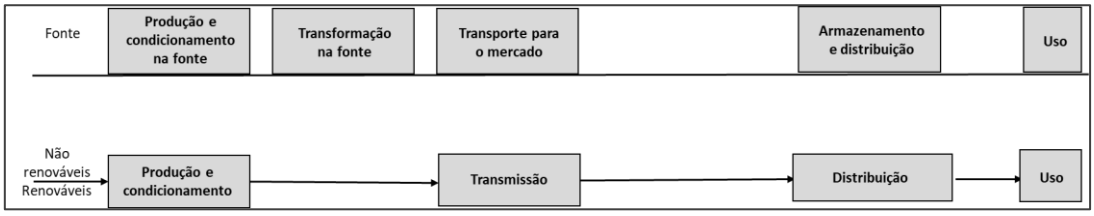


Figure 7 : Chaîne de production d'électricité

Source : Préparé par l'auteur sur la base de JEC (2020)

Les pertes désignent la comptabilisation de l'énergie électrique produite, qui transite par les lignes de transport (réseau de base) et les réseaux de distribution, mais qui n'est pas commercialisée, que ce soit pour des raisons techniques ou commerciales.[30](non techniques). Ces données sont vérifiées dans les différents segments du système, en plus des réseaux de transport, de distribution moyenne et basse tension, ainsi que dans les transformateurs de distribution, les branches de raccordement et les compteurs, entre autres. Le calcul des pertes d'énergie dans les réseaux et les équipements associés est effectué à l'aide d'une méthode de flux de puissance adaptée aux réseaux de distribution (COSTA, 2019).

[30]Les pertes commerciales moyennes n'ont pas été prises en compte dans cette étude car, historiquement, il existe une différence considérable entre les États brésiliens.

Dans ce contexte, cette étude n'a pris en compte que les pertes techniques, qui correspondent à une moyenne de 11,5 %, une valeur restée constante tout au long de la période. La figure 8 ci-dessous illustre la répartition de ces pertes dans les réseaux de transport et de distribution. Il est à noter que les pertes techniques liées au transport s'élèvent à 4,0 % et celles liées au réseau de distribution à 7,5 % (ANEEL, 2022). De plus, les émissions de N_2O et ozone, dus à l'ionisation de l'air dans la couche limite (couronne), provoquée par le champ électrique et magnétique des lignes à haute tension, à hauteur de 3,9 gCO_{2eq}/MJ (ARRUDA, 2012 ; Ecoinvent 3.5, 2018 ; GIEC, 2013). Il convient de noter que les émissions liées à l'effet corona sont complexes à déterminer, car elles sont liées aux conditions locales et aux spécifications du projet (BANQUE MONDIALE, 2010).[31]. En ce qui concerne les pertes dues à la recharge des véhicules électriques, les normes de test spécifiques, qui sont en cours de définition par l'ABNT, doivent inclure toutes les inefficacités et les pertes électriques de la sortie de courant alternatif du réseau,y compris ceux des chargeurs[32]indiqué par le constructeur du véhiculeCette étude n'a pas pris en compte les pertes lors de la recharge des véhicules électriques.[33].

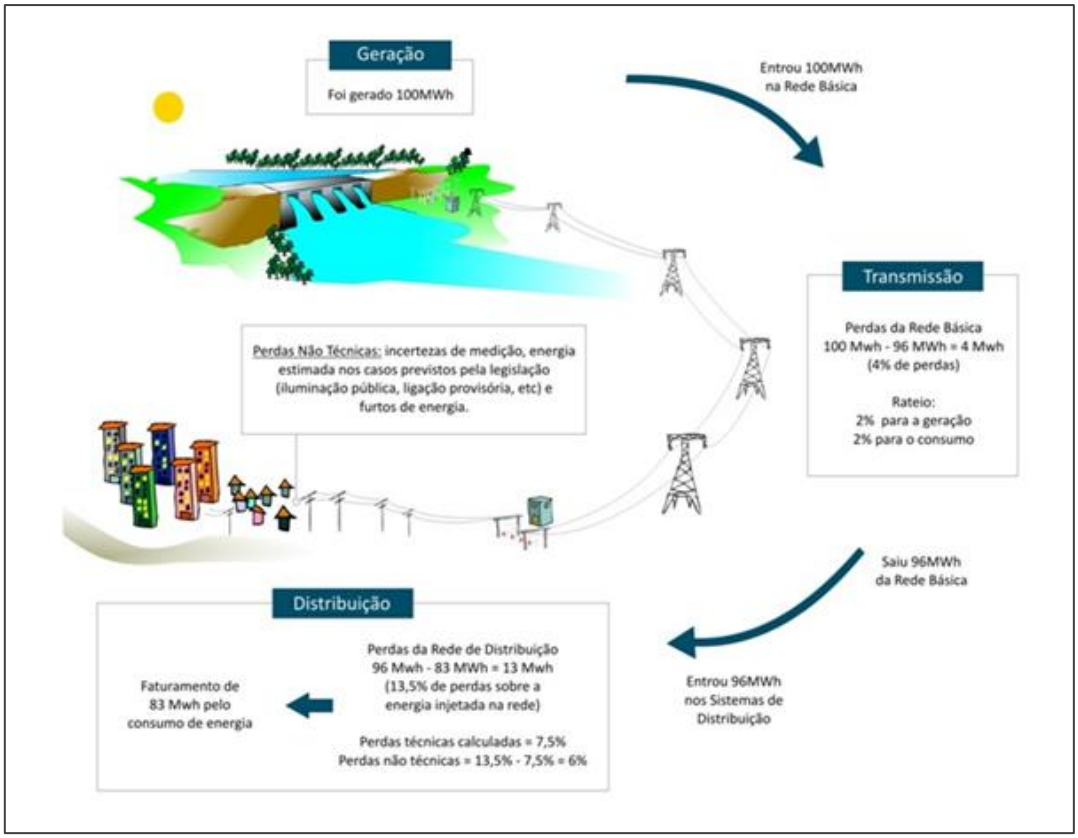


Figure 8 : Pertes d'énergie électrique

Source : ANEEL (2022)

[31]De plus amples détails sur les émissions associées à l'effet corona sont présentés dans l'annexe A4.

[32]Si ces pertes liées au chargement ne sont pas mesurées, puisqu'il s'agit d'un calcul d'évaluation du cycle de vie générique et ne fait pas référence à un véhicule spécifique, la valeur moyenne de 16 % peut être utilisée, selon le DOE (2018).

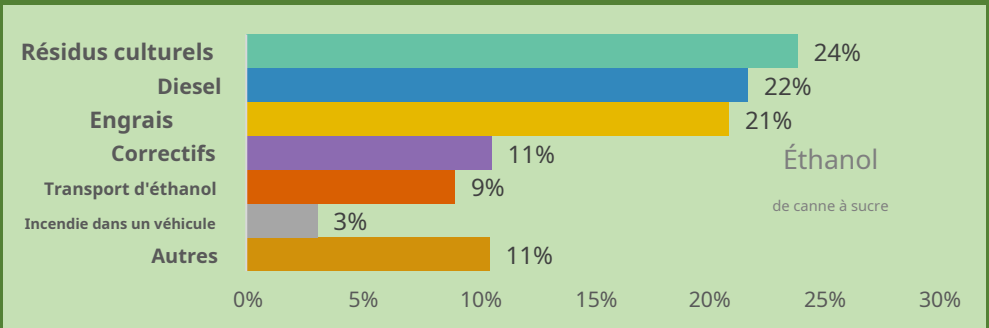
[33]Les détails sur la recharge des véhicules électriques se trouvent à l'annexe A5 (Consommation d'énergie des véhicules électriques, figure A 3).

PROFILS D'INTENSITÉ CARBONE (IC) DE L'ÉTHANOL ET DU BIODIESEL :

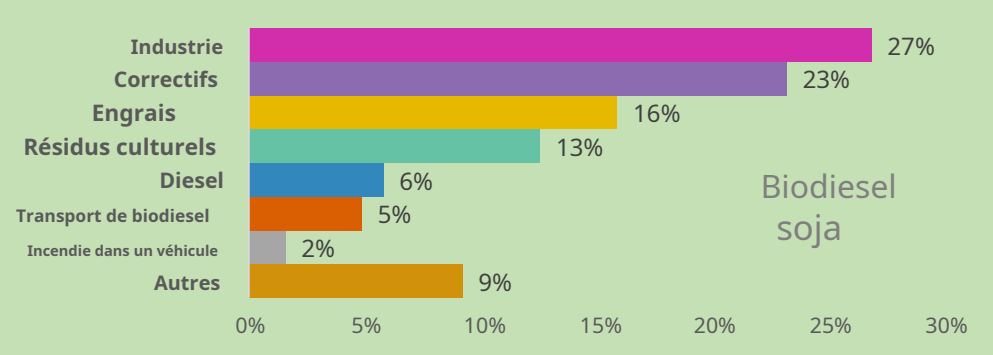
PRINCIPAUX CONTREVENANTS

RenovaBio encourage la certification volontaire des producteurs de biocarburants en les incitant à réduire progressivement leurs émissions de CO2, ce qui se traduit par une augmentation de la production de CO2 et une rémunération accrue lors de la commercialisation du produit. Grâce aux données saisies individuellement dans RenovaCalc, le producteur peut identifier les étapes et les intrants qui impactent les émissions du processus, et ainsi mettre en lumière les mesures à prendre pour les réduire.

Le premier graphique de cet encadré présente une estimation de la part de l'impact de chaque étape/intrant sur le CI de l'éthanol de canne à sucre, sur la base d'un profil type représentatif du secteur. Il est clair que l'étape agricole a un impact significatif sur le CI, notamment l'utilisation d'engrais et de diesel dans les machines et pour le transport de la canne à sucre vers les usines. Par conséquent, les initiatives d'atténuation devraient viser à optimiser l'utilisation de ces intrants ou à les remplacer.



Concernant le biodiesel de soja, comme l'illustre le deuxième graphique de cet encadré, on constate qu'une part représentative de son CI est constituée par l'étape agricole, l'accent étant mis sur l'application de correctifs (calcaire et gypse). Cependant, contrairement à l'éthanol, l'impact de l'industrie est plus important, en partie lié à l'utilisation de méthanol. Pour le biodiesel, selon RenovaCalc, le transport des céréales jusqu'à leur transformation est considéré comme faisant partie de l'étape industrielle, le calcul des émissions étant basé sur les informations du producteur concernant la distance moyenne.

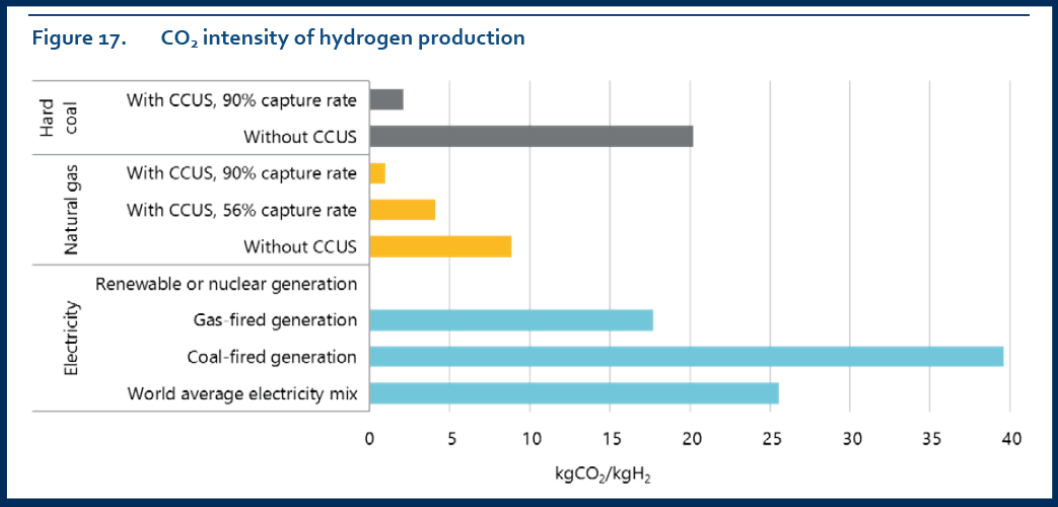


Par conséquent, les initiatives visant à réduire le CI des biocarburants trouvent dans le système créé par RenovaBio un outil permettant d'identifier les solutions les plus efficaces et, au moins en partie, de les rendre viables. Une série de mesures peuvent contribuer à cet objectif et rendre l'utilisation des biocarburants encore plus compétitive en termes d'émissions, en remplaçant ou en améliorant l'efficacité d'utilisation des intrants les plus impactants mis en évidence ici.

ENCADRÉ 2

HYDROGÈNE À FAIBLE TENEUR EN CARBONE

Plusieurs procédés et sources permettent de produire de l'hydrogène bas carbone. Parmi ceux-ci figurent l'électrolyse de l'eau issue principalement de la production d'énergie renouvelable ou nucléaire, ainsi que les procédés basés sur la biomasse, tels que le reformage à la vapeur de l'éthanol et du biométhane, et la gazéification des matières lignocellulosiques. Les filières de production qui convertissent le gaz naturel par reformage avec CCUS ou pyrolyse, ou par extraction naturelle ou géologique, entre autres, sont également envisagées. Il est désormais admis, défendu par des institutions comme l'AIE, que l'intensité carbone est le paramètre approprié pour caractériser l'hydrogène, plutôt que la référence au procédé de production et son identification par couleurs. Une estimation de l'AIE (2019) de l'intensité carbone des principales filières de production d'hydrogène est illustrée ci-dessous.



Ou considéré comment peut-on pour ça but o. Pour un côté, oh oe peut contours triification dans le véhicule temps de recharger et m bas

L'autonomie des véhicules dépendra, quant à elle, d'une série de développements améliorant la compétitivité de ce système. Les coûts des piles à combustible et du stockage embarqué de l'hydrogène sont importants, tout comme la production décentralisée d'hydrogène bas carbone et/ou sa disponibilité généralisée sur l'ensemble du territoire, indispensable à toute solution globale de transport routier. Une alternative consisterait à convertir l'hydrogène en d'autres carburants, tels que le méthane, le méthanol et l'ammoniac, voire en hydrocarbures synthétiques liquides, qui, du fait de leur nature, *passer*, peut utiliser la structure existante. Il convient de noter que les pertes liées à l'efficacité constituent un inconvénient majeur de la production d'hydrogène pour la mobilité, qui s'intensifie avec la conversion ultérieure en d'autres molécules. Selon les données de l'AIE (2024), 15 400 nouveaux véhicules à hydrogène ont été mis en circulation dans le monde en 2023, portant le parc à 87 600 unités. Ce parc est principalement composé de voitures, mais ces dernières années, les véhicules lourds sont devenus le principal moteur de la croissance.

Demande énergétique

La demande énergétique du secteur du transport routier comprend les véhicules légers (voitures, véhicules utilitaires légers et motos), destinés au transport individuel, et les véhicules lourds, utilisés pour le transport de marchandises et de passagers en commun. Les véhicules légers, pour la plupart,[34], sont alimentés à l'éthanol hydraté et/ou à l'essence C (comprenant le cycle Otto). En revanche, les véhicules utilitaires lourds et légers utilisent du diesel B (comprenant le cycle Diesel). Le GNC peut être utilisé aussi bien dans les véhicules légers que dans les véhicules lourds. Concernant la consommation d'électricité dans le transport routier, toutes les sources de production, fossiles et renouvelables, qui composent la matrice nationale sont couvertes.

Le décret n° 12.435/2025, qui régit le programme Mover, définit les exigences obligatoires en matière d'objectifs d'efficacité énergétique des véhicules et, conformément à l'annexe II, n'inclut pas la participation des motos. Par conséquent, cette étude présente la demande énergétique des véhicules, hors motos.[35].

Français Les données sur la consommation historique de combustibles fossiles (essence A, diesel A et gaz naturel), de biocarburants et de production d'électricité ont été tirées du Bilan énergétique national (EPE, 2025a). Concernant la ségrégation par matière première utilisée pour obtenir l'éthanol (canne à sucre, maïs), les valeurs ont été obtenues auprès du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de l'Approvisionnement (MAPA, 2025) et, pour le biodiesel, auprès de l'Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants (ANP, 2025b). Il est à noter que la ségrégation de la consommation d'électricité entre véhicules légers et lourds a été estimée par les modèles de demande de l'EPE.

Français Pour les projections, les données de demande du cycle Otto et du cycle Diesel du PDE 2034, la pénétration des véhicules hybrides et électriques, l'évolution de l'efficacité des nouveaux véhicules et la composition de la matrice électrique (EPE, 2025b) ont été utilisées. De plus, des aspects liés au Carburant du Futur (BRASIL, 2024a) ont été inclus, tels que l'augmentation de la teneur en éthanol anhydre de l'essence C de 27 % à 30 % à partir de 2026 ; l'augmentation du pourcentage de mélange de biodiesel dans le diesel B atteignant 20 % en 2034 ; et la participation du biométhane au remplacement du GNC fossile, à partir de 2026, jusqu'à 15 % à la fin de la période (même proportion pour les véhicules légers et lourds).

Côté véhicules légers, le parc de vélos Otto totalise 37 millions d'unités en 2024 (hybrides et électriques inclus), avec la technologie*carburant flexible*Ce parc devrait atteindre 45,4 millions d'unités en 2034. On estime également que la part des biocarburants augmentera, grâce aux signaux positifs des politiques publiques, telles que RenovaBio et Combustível do Futuro, ainsi qu'aux améliorations des processus de production prévues par le secteur. Le programme Mover favorisera également l'adoption de technologies automobiles plus efficaces en termes d'émissions de CO_2eq/km, qui inclut également les véhicules électrifiés. Le parc de véhicules légers en cycle Diesel est majoritairement composé de SUV (véhicules utilitaires sport).*véhicule utilitaire sport*), avec 2,8 millions d'unités en 2024 et qui atteindra 4,4 millions en 2034. Pour les véhicules légers, on considère que la part des véhicules hybrides et électriques dans le parc total sera de 5% en fin de période, résultant d'une augmentation de leur part dans les permis qui atteint 28% en fin de période.

[34]Il existe une partie des véhicules légers (7%), appelés véhicules utilitaires légers, qui fonctionnent au diesel B.
[35]Dans le cas de l'électricité, la demande n'exclut pas la participation des motos, car leur participation dans ce segment est encore faible.

Le parc de véhicules lourds (transport de marchandises et de passagers) totalisait 2,3 millions d'unités en 2024, dont 80 % pour le transport de marchandises et 20 % pour les transports publics. À l'horizon de l'étude, il est prévu que le parc de véhicules lourds atteigne 2,8 millions d'unités. Pour le transport routier de marchandises et les transports publics[36], on estime que la pénétration des véhicules électriques, principalement à court terme, sera tirée par les stratégies commerciales de groupes importants, correspondant à 0,1% de la flotte en 2034 (EPE, 2025b).

Pour la masse spécifique et le pouvoir calorifique inférieur, tableau 2, les données du bilan énergétique ont été utilisées, qui sont les mêmes que celles de RenovaCalc[37,38]et dans l'Annuaire statistique de l'ANP, en plus d'être considéré comme constant tout au long de l'horizon de cette analyse (ANP, 2018a, 2018b, 2024 ; EPE, 2025a).

Les demandes énergétiques du secteur des transports en 2022, 2023 et 2024 ainsi que les projections pour les années 2027, 2032 et 2034 sont résumées dans le tableau 4. Les tableaux 5 et 6 présentent les demandes en termes d'énergie et la part de la demande énergétique dans la demande totale (en énergie).

[36]Dans cette étude, l'énergie électrique destinée aux véhicules électriques collectifs prend en compte toutes les sources de production. Il est entendu que des accords bilatéraux pourraient être conclus entre les entreprises de transport et les producteurs, visant à utiliser une énergie plus propre, entraînant une réduction du coût de revient de l'électricité utilisée pour recharger ces véhicules.

[37]Les données relatives au biométhane ne sont disponibles que dans RenovaCalc.

[38]Il est à noter qu'il existe une différence entre ces paramètres, lorsqu'on les compare à ceux adoptés dans le programme Mover.

Tableau 4 : Demande énergétique (volume)

	2022	2023	2024	2027	2032	2034
CYCLE OTTO (sans GNC)						
(milliards de litres)	**53,5**	**56,9**	**59,9**	**61,6**	**65,0**	**66,0**
Essence C (milliards de litres)	**37,3**	**39,6**	**37,2**	**38,0**	**35,6**	**35,6**
Essence A	26,8	28,6	26,9	26,6	25,0	24,9
Éthanol anhydre	10.4	10,9	10.3	11.4	10.7	10.7
Éthanol de canne à sucre	9.1	9.0	8.2	7,9	6.4	6.2
1G Éthanol de canne à	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sucre 2G Éthanol de maïs	1.3	2.0	2.1	3,5	4.3	4,5
Mélange (%)	27%	27%	27%	30%	30%	30%
Éthanol hydraté (milliards de litres)	**16.2**	**17.3**	**22,7**	**23,5**	**29,3**	**30,4**
Éthanol de canne à sucre	13,7	14.0	17,8	17.0	21.1	21,8
1G Éthanol de canne à	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sucre 2G Éthanol de maïs	2,5	3.3	4.9	6,5	8.2	8.6
Part de marché des produits hydratés *carburant flexible* (%v/v)	36,7	35,7	43,9	43,7	52,2	54,6
CYCLE DIESEL						
Transport routier diesel B (milliards de litres)	**50,6**	**52,2**	**53,8**	**58,6**	**63,3**	**65,0**
Diesel	45,5	46,2	46,5	49,8	51,9	52,0
Biodiesel	5.1	6.0	7.3	8.8	11.4	13.0
Mélange (%)	10,0 %	11,5 %	13,6 %	15,0 %	18,0 %	20,0 %
Véhicules légers diesel B	4,3	4,6	4,8	5,0	5,5	5,8
Véhicules légers biodiesel	0,4	0,5	0,7	0,7	1,0	1,2
Véhicules lourds diesel B	41,2	41,6	41,7	44,9	46,4	46,2
Véhicules lourds biodiesel	4,6	5,5	6,7	8,0	10,4	11,8
GAZ						
GNC (milliards de m3)	**2.3**	**2.0**	**1.7**	**2,5**	**2.9**	**3.1**
GNC (fossile)	2.3	2.0	1.7	2.4	2.7	2.6
Biométhane	0,00	0,00	0,00	0,09	0,30	0,47
Part vol. (%)	0,0%	0,0%	0,0%	3,7%	10,0%	15,0%
Véhicules légers au GNC (fossile)	2.3	2.0	1.6	2.3	2.4	2.4
Véhicules légers au biométhane	0,00	0,00	0,00	0,09	0,27	0,42
Véhicules lourds au GNC (fossile)	0,02	0,03	0,04	0,09	0,21	0,27
Véhicules lourds au biométhane	0,00	0,00	0,00	0,003	0,02	0,05
ÉLECTRIQUE						
Électricité (GWh)	**68**	**132**	**338**	**1 682**	**5 667**	**8.021**
Lumière	32	83	252	1.109	2.822	3 822
Lourd	36	49	86	573	2 844	4.199

Note 1 : La consommation d'éthanol de deuxième génération (E2G) sur le marché intérieur n'a pas été prise en compte.

Note 2 : La série complète pour la période 2022 et 2024 à 2034 est présentée à l'annexe A6 (tableau A4). Note 3 : Les motos ne sont pas prises en compte dans la demande du cycle Otto. Le calcul de *part de marché* exclure le flotte et consommation de carburant des motos.

Source : EPE (Élaboration personnelle) basée sur EPE (2025a) (historique) et EPE (2025b) (projections)

Tableau 5 : Demandes énergétiques (énergie - MJ)

Des milliards de MJ	2022	2023	2024	2027	2032	2034
CYCLE OTTO (sans GNC)	1 446	1 539	1 583	1.618	1 671	1 692
Essence A	867	925	868	860	806	804
Éthanol anhydre	233	245	230	255	239	238
éthanol hydraté	346	370	485	502	626	649
* Part de marché hydratée dans *carburant flexible* (% et/et)	28,9%	28,7%	36,2%	36,1%	44,4%	46,8%
CYCLE DIESEL (sans GNC)	1 784	1 840	1 893	2.062	2.221	2.278
Diesel	1 617	1.641	1 650	1 770	1 843	1 847
Biodiesel	168	200	243	292	378	431
Véhicules légers diesel	152	163	171	176	195	206
Véhicules légers au biodiesel	14	18	22	25	33	38
Véhicules lourds diesel	1 465	1 478	1 480	1 594	1 649	1.641
Véhicules lourds biodiesel	153	182	221	267	345	393
ÉLECTRIQUE						
Électricité	0	0	1	6	20	29
Lumière	0	0	1	4	10	14
Lourd	0	0	0	2	10	15
GAZ						
GNC	84	73	61	90	109	115
GNC (fossile)	84	73	61	87	98	97
Biométhane	0	0	0	3	11	17
Véhicules légers au GNC (fossile)	83	72	60	84	90	88
Véhicules légers au biométhane	0	0	0	3.2	10.0	15.4
Véhicules lourds au GNC (fossile)	1	1	1	3	8	10
Véhicules lourds au biométhane	0	0	0	0,1	0,8	1.7

Source : EPE (Élaboré par l'auteur)

Remarque 1 : Les motos ne sont pas prises en compte dans la demande du cycle Otto. Le calcul de *part de marché* exclure le flotte et consommation de carburant des motos.

Tableau 6 : Part de la demande énergétique dans la demande totale (en énergie)

	2022	2023	2024	2027	2032	2034
OTTO CYCLE						
Essence A	26,2%	26,8%	24,5%	22,8%	20,0%	19,5%
Éthanol anhydre	7,0%	7,1%	6,5%	6,8%	5,9%	5,8%
éthanol hydraté	10,4%	10,7%	13,7%	13,3%	15,6%	15,8%
CYCLE DIESEL						
Diesel	48,8%	47,5%	46,6%	46,9%	45,8%	44,9%
Biodiesel	5,1%	5,8%	6,9%	7,7%	9,4%	10,5%
Véhicules légers diesel	4,6%	4,7%	4,8%	4,7%	4,8%	5,0%
Véhicules légers au biodiesel	0,4%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%	0,9%
Véhicules lourds diesel	44,2%	42,8%	41,8%	42,2%	41,0%	39,9%
Véhicules lourds biodiesel	4,6%	5,3%	6,2%	7,1%	8,6%	9,5%
ÉLECTRIQUE						
Électricité	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,5%	0,7%
Lumière	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,3%
Lourd	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,4%
GAZ						
GNC (fossile)	2,5%	2,1%	1,7%	2,3%	2,4%	2,4%
Biométhane	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,4%
Véhicules légers au GNC (fossile)	2,5%	2,1%	1,7%	2,2%	2,2%	2,1%
Véhicules légers au biométhane	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,4%
Véhicules lourds au GNC (fossile)	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,2%
Véhicules lourds au biométhane	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%

Source : EPE (Élaboré par l'auteur)

Sources d'énergie – Résultats

Le tableau 7 résume l'évolution des intensités carbone des sources d'énergie du secteur du transport routier. Le graphique 2 illustre la composition de ces IC, avec les parts relatives du puits au réservoir et du réservoir à la roue, en 2024 et 2034.

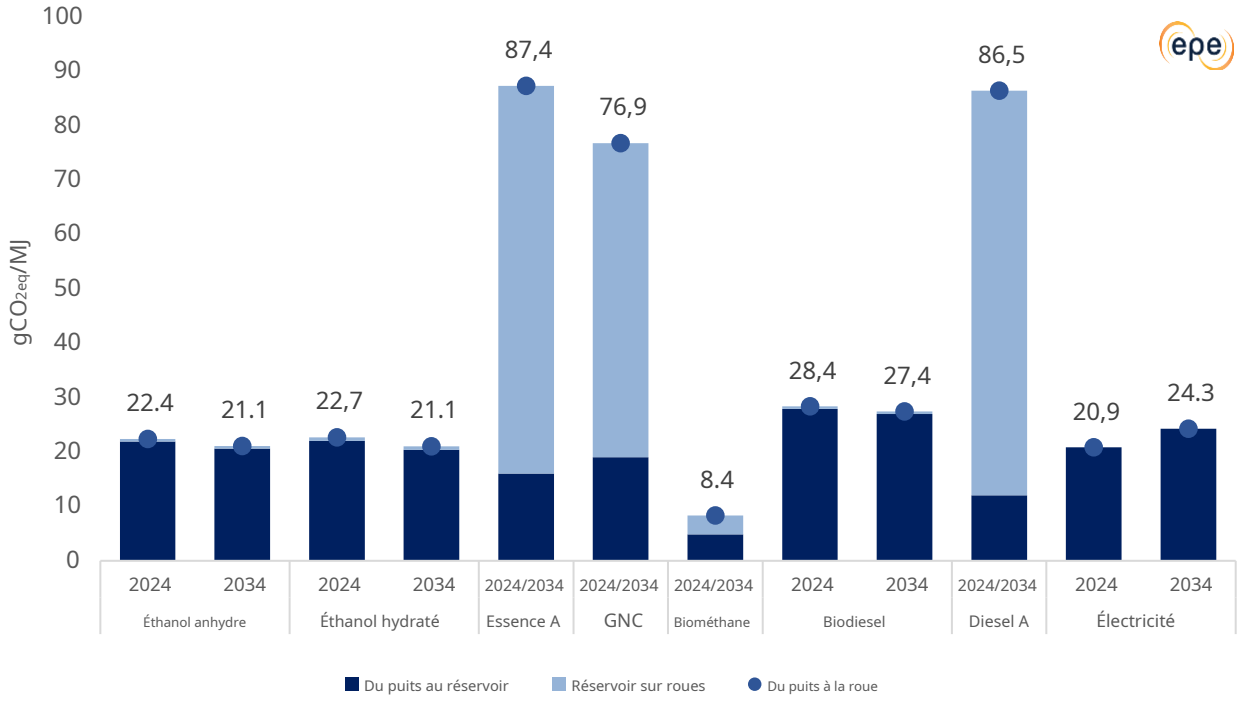
Tableau 7 : Évolution de l'intensité carbone (gCO_{2eq}/MJ) de boissons énergisantes

	2022	2024	2027	2032	2034
Éthanol anhydre	22.26	22,39	22.04	21.42	21.11
Éthanol hydraté	22,65	22,73	22h30	21.46	21.08
Essence A	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40
Essence C_1(E27/E30)	73,61	73,78	72,45	72,31	72,24
Essence C (E22)	76,76	76,78	76,73	76,63	76,57
Biométhane	9.32	8.35	8.35	8.35	8.35
GNC	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85
Biodiesel	28,40	28,40	28.11	27,64	27h45
Diesel A	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50
Diesel B_2(BX)	81.04	79.06	78,24	76,49	75,33
Diesel B (B7)	82,69	82,69	82,67	82,64	82,62
Électricité	21,78	20,85	19,89	25,00	24.31

Note 1 : Considère l'ajout de 27 % d'éthanol anhydre à l'essence C jusqu'à la fin de 2025. À partir de 2026, ce sera 30 %.
Note 2 : Teneur en biodiesel de 14 % à partir de mars 2024. À partir de 2026, envisager 15 %, pour atteindre 20 %. Note 3 : La méthodologie relative à l'IC de l'essence (E22 et E27/E30) et du diesel B (B7 et BX) est présentée à l'annexe A7.
Note 4 : La série complète pour la période 2024 à 2034 se trouve à l'annexe A8 (tableau A6).

Source : EPE (Élaboration personnelle) basé sur ANP (2018a, 2018b, 2024, 2025e) (historique), EPE (2025a) (historique), EMBRAPA (2023, 2024a, 2024b) (historique) et UNICA (2025b)

Graphique 2 : Intensité carbone des sources d'énergie (du puits à la roue)

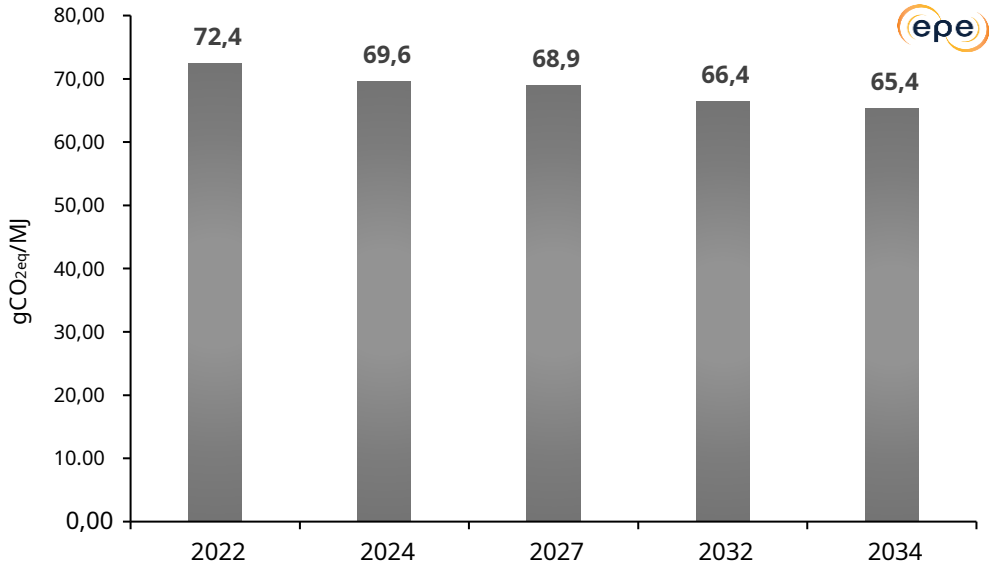


Source : EPE (Élaboration personnelle) basé sur ANP (2018a, 2018b, 2024, 2025e) (historique), EPE (2025a) (historique), EMBRAPA (2023, 2024a, 2024b) (historique) et UNICA (2025b)

Intensité carbone moyenne de la matrice de transport

Ainsi, sur la base de l'évolution de l'intensité carbone des sources d'énergie et de leurs demandes respectives, l'intensité carbone moyenne de la matrice du transport routier (sans motos) a été déterminée, dans le cadre du puits à la roue, comme indiqué dans le graphique 3.

Graphique 3 : Intensité carbone moyenne des sources d'énergie dans la matrice du transport routier

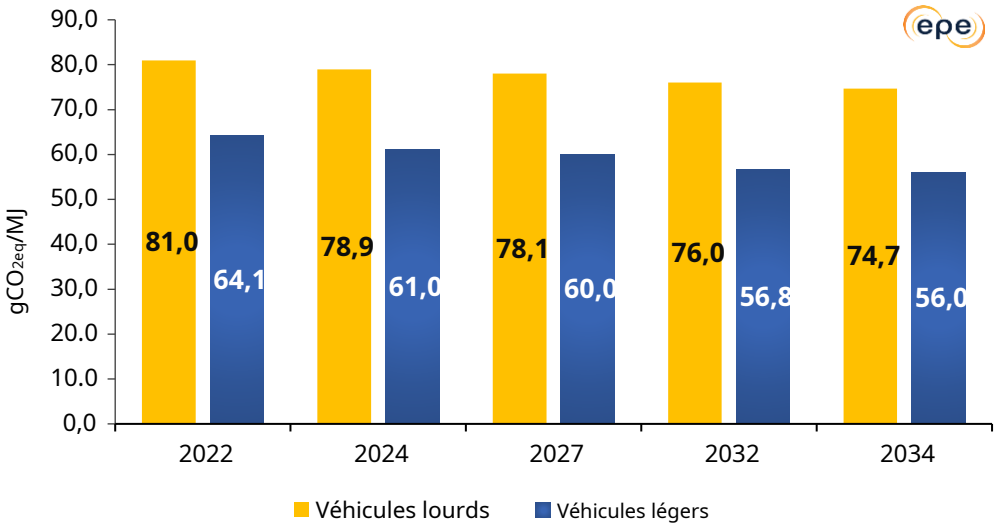


Source : EPE (Élaboré par l'auteur)

En considérant la matrice du transport routier (sans les motos), l'intensité carbone moyenne pour 2024 a été estimée à 69,6 gCO_{2eq}/MJ. Pour les années 2027, 2032 et 2034, ces valeurs sont de 68,9 gCO_2éq/MJ, 66,4 gCO_2eq/MJ et 65,4 gCO_2eq/MJ, représentant respectivement une réduction de 1,1%, 4,7% et 6,1% par rapport à 2024, avec des taux de -0,4% par an, -0,6% par an et -0,6% par an.

Le graphique 4 présente les intensités carbone du secteur du transport routier (hors motos), avec la séparation entre véhicules légers et lourds.

Graphique 4 : Intensité carbone du secteur du transport routier (léger et lourd)



Remarque : La série complète pour la période 2022 et 2024 à 2034 se trouve à l'annexe A9 (tableau A7).

Source : EPE (Élaboré par l'auteur)

Ainsi, il est possible d'observer une réduction significative de l'intensité carbone de la matrice de transport brésilienne sur l'horizon d'analyse, signalant l'importance des politiques publiques connexes, en mettant l'accent sur RenovaBio, Combustível do Futuro et Programa Mover.

On observe également des améliorations dans les années à venir, avec la réduction des émissions liées aux procédés d'extraction et de raffinage du pétrole, les progrès dans les procédés de production de biocarburants utilisant davantage de déchets, ainsi qu'une augmentation de leur part, sans oublier l'arrivée dans le secteur des transports du biométhane, de l'électricité et d'autres carburants renouvelables issus du cycle diesel. L'amélioration de la qualité de tous ces carburants peut également contribuer à la réduction des émissions associées à ce secteur.

Les engagements internationaux pris par le Brésil en matière de réduction des émissions de GES se reflètent en interne dans les politiques publiques et les investissements privés visant à décarboner l'économie nationale.

Considérations finales

La présente étude visait à déterminer, à travers l'analyse du cycle de vie du puits à la roue, l'évolution de l'intensité carbone des sources d'énergie utilisées dans la matrice du transport routier : essence C (essence A et éthanol anhydre), éthanol hydraté, diesel B (gazole et biodiesel), gaz naturel pour véhicules, en plus des nouveaux entrants, tels que l'électricité et le biométhane, ainsi que l'intensité carbone moyenne de la matrice du transport du secteur routier, afin de soutenir les décisions du Conseil national de politique énergétique, concernant la définition des objectifs du programme Mover.

La méthodologie adoptée dans l'étude s'appuie sur RenovaBio et sur des études contenant des données agricoles typiques sur les principales cultures utilisées dans la production de biocarburants. L'intensité carbone des combustibles fossiles est restée constante tout au long de la période d'analyse. Pour les biocarburants, en tenant compte de chaque matière première utilisée dans leur production, une réduction des valeurs moyennes d'IC a été proposée, en fonction de l'efficacité des processus de production.

L'étude a mis en évidence la nécessité d'harmoniser les propriétés physiques des sources d'énergie utilisées dans RenovaBio, Mover et PBEV. De plus, la méthodologie proposée ici permet d'actualiser ce document en fonction de chaque cycle d'étude PDE, des progrès réalisés dans les certifications de biocarburants et d'informations supplémentaires sur l'intensité carbone des combustibles fossiles.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'équipe ANP, Fabio Vinhado, Joana Borges et Maria Auxiliadora, Ricardo Abreu et l'équipe Unica, Luciano Rodrigues, Guilherme Belon et Lucas Rodrigues, Marília Folegatti (Embrapa), le chercheur Mateus Chagas (LNBR) et les collègues de l'EPE, Bruno Stukart, Caio Leocádio, Filipe de Pádua, Marcos Farinha et Rogério Matos, pour leurs contributions à la préparation de ce document.

Appendice

A1)Propriétés physiques des boissons énergisantes – Programme Mover

Tableau A1 : Propriétés physiques des boissons énergisantes – Programme Mover

	Masse spécifique (kg/litre)	IPC (MJ/kg)	Contenu énergétique (MJ/litre)
Éthanol hydraté	0,810	24,80	20.09
Essence A	0,735	43.06	31,65
Essence C (E22)	0,745	38,92	28,99
Diesel A	0,830	42,93	35,65
GNC (kg/Nm3)	0,723 kg/Nm3	48,74	35,24 MJ/Nm3

Remarque 1 : Comme indiqué précédemment, un carburant de référence est utilisé pour les tests de consommation et d'émissions des véhicules. Pour l'essence C, on ajoute 22 % d'éthanol anhydre (contre 27 % pour l'essence commerciale). Pour le biodiesel, la teneur est de 7 % (contre 10 % pour l'essence commerciale).
Remarque 2 : Le tableau A 1 résume les principales propriétés du carburant définies et utilisées dans la réglementation relative à l'homologation des véhicules pour calculer l'efficacité énergétique déclarée dans les programmes réglementaires, y compris le programme d'étiquetage INMETRO (PBEV).

Source : ANP (2021b) ; INMÉTRO (2015, 2020, 2023)

A2)Facteurs d'émission dans l'utilisation (combustion) des sources d'énergie

Tableau A2 : Facteurs d'émission pour l'utilisation (combustion) de sources d'énergie, selon RenovaCalc

	CO_2 Fossile	CO_2 biogéniques	CH_4 Fossile	CH_4 Biogénique	N_2LE	CO_2 eq/MJ
	g/kg					g/MJ
Diesel A (B0)	3 098,8	0,0	0,165	0,000	0,165	74,43
Biodiesel (B100)	0,0	2 762,5	0,000	0,377	0,023	0,44
Éthanol anhydre	0,0	1 929,2	0,000	0,283	0,017	0,44
Éthanol hydraté	0,0	1 801,0	0,000	0,475	0,016	0,66
Essence A	2 981,1	0,0	1 089	0,000	0,348	71,33
GNC	2 701,4	0,0	4 595	0,000	0,149	57,81
Biométhane	0,0	2 701,4	0,000	4 595	0,149	3.48

Source : ANP (2018a, 2018b)

A3) Méthodologie de calcul de l'intensitél'âge du carbone du gaz naturel

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) en amont de la chaîne GNV (WtT) concernent, de manière simplifiée, les chaînes de production et de logistique du gaz naturel (GN), de son extraction à son transport et sa distribution. Les principales contributions à l'impact climatique de ces chaînes proviennent du méthane (CH_4) résultant de la libération de gaz naturel à différentes étapes du processus de production (par exemple, émissions fugitives, émissions ventilées), de dioxyde de carbone (CO_2) et l'oxyde nitreux (N_2O), lorsqu'il existe.

Récemment, l'EPE (2024b) a publié une note technique traitant de la question des émissions de méthane dans la chaîne du gaz naturel au Brésil. L'étude conclut à un manque important de données régionales sur le sujet, qui seraient pertinentes pour refléter le profil national d'exploration du gaz naturel, généralement associé au pétrole.*offshore*et un système de transport et de distribution en développement. Dans ce contexte, il est nécessaire d'utiliser des sources d'information internationales pour estimer ces émissions.

La figure A1 illustre les étapes de la chaîne de production du gaz naturel et sa destination finale comme carburant pour véhicules (GNV) au Brésil. Les zones en pointillés colorées du diagramme indiquent les sources de référence utilisées dans cet exercice, visant à estimer les émissions de GES de chaque étape de production.

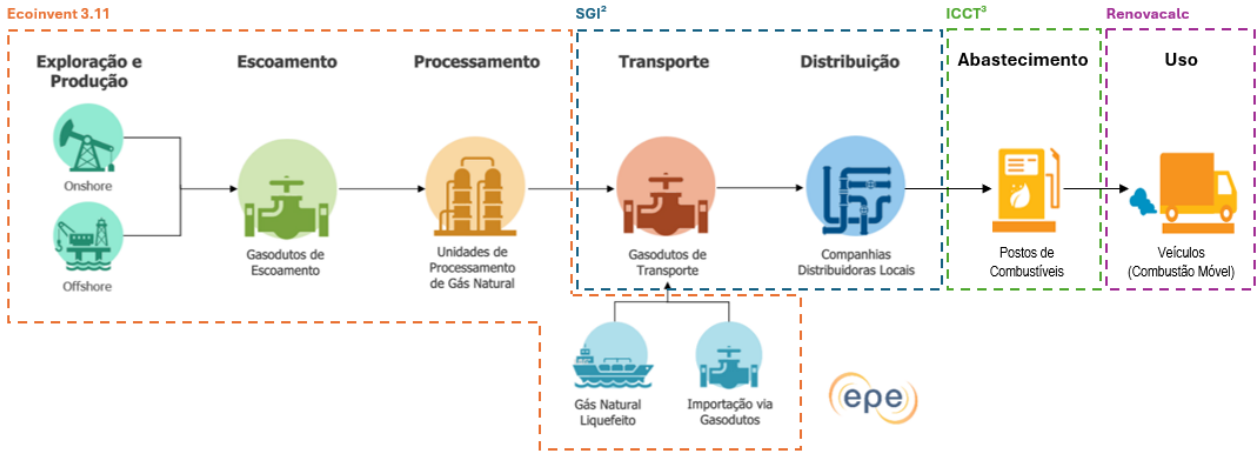


Figure A 1 :*Organigramme des étapes de production du GN et de son utilisation finale comme carburant pour véhicule (GNV) au Brésil. les zones en pointillés indiquent la source utilisée pour les estimations des émissions de GES de chaque étape de production.* ***Adapté de EPE (2024)[1].***

Source : EPE (2024b), ICCT (2015), SGI (2015)

Exploration, élimination, traitement et importation

L'approvisionnement national en GN au Brésil est constitué de différentes sources, telles que l'exploration nationale de pétrole et de gaz.*offshore*et*à terre*, importation de GN de Bolivie via Gasbol et importation maritime de gaz naturel liquéfié (GNL). La part du gaz naturel de chaque origine dans l'approvisionnement national en GN varie chaque année, mais les fluctuations les plus importantes sont observées dans l'importation de GNL. Afin de mieux représenter ces différentes origines de GN dans l'approvisionnement national, cette étude a utilisé la moyenne des dernières années, de 2020 à 2023 (MME, 2024).

Tableau A 1 : Approvisionnement intérieur en gaz naturel - ***Valeurs moyennes consolidées de l'exploration et de l'approvisionnement en gaz naturel au Brésil, par origine***

m³/jour	2020	2021	2022	2023	Moyenne totale	Participation moyenne
National	50,5	51,5	47,6	47,7	49,3	64%
GasBOL	17,9	19,9	17,5	15.4	17,7	23%
GNL [importation]	8.4	26.2	6,5	1,5	10.6	14%

Exploration nationale	
Offshore	*À terre*
96,70%	3,30%

Source : MME (2024)

Pour estimer les émissions de GES liées à la production et à l'approvisionnement en gaz naturel par origine au Brésil, cette étude a utilisé la base de données Ecoinvent, la plus grande base mondiale d'inventaires d'analyses du cycle de vie, dans sa version la plus récente (version 3.11). Il s'est avéré que cette base de données est la seule disponible à estimer les émissions de GES du gaz naturel au Brésil, ventilées par origine, y compris l'exploration. *offshore*et*à terre*, jusqu'à sa livraison dans la phase de transport (y compris, par conséquent, les étapes d'écoulement et de traitement), l'importation de GN de Bolivie et l'importation de GNL.

Le tableau A2 montre les valeurs IC[39]Le GN disponible dans Ecoinvent 3.11 est classé par origine, en référence aux étapes d'exploration, de transformation et d'importation. Il identifie les valeurs relatives à chaque composant de l'approvisionnement interne et la représentation de chaque source dans le CI total du GN au niveau national. Ce bilan pondéré de l'approvisionnement en GN par source et de leur CI respectif permet d'obtenir un CI final de 12,8 gCO.2/MJ de GN au Brésil.

Tableau A 2 : Offre interne -*Valeurs consolidées du NG IC, par origine, se référant aux étapes d'exploration, élimination, traitement et importation.*

		CI individuel	Participation du CI
		gCO2/MJ	*gCO2/MJ*
National*Offshore*	61%	8.09	4,97
National*À terre*	2%	8,55	0,18
GasBOL	23%	15.31	3.48
GNL [importation]	14%	30.13	4.13
IC GN	100%		**12,8**

Source : MME (2024)

Transport et distribution

Comme mentionné précédemment, en raison du manque de données régionales pour le Brésil, la note technique de l'EPE (2024)[1] a utilisé une autre étude, développée par SGI (*Institut du gaz durable*)/*Imperial College de Londres*[2], comme base d'estimation des émissions de méthane de la chaîne nationale du gaz naturel, y compris les étapes de transport et de distribution. Il est entendu qu'en l'absence de données régionales, cette étude présente des résultats cohérents et plus proches de la réalité brésilienne que d'autres analyses disponibles dans la littérature.

Suivant la même approche, cette étude a utilisé les estimations des émissions de GES liées au transport et à la distribution du gaz naturel contenues dans le rapport SGI (2015). Certaines adaptations ont été apportées, comme l'utilisation du facteur PRG.[40]le plus récent rapporté par le GIEC (2021), qui est de 27 pour CH_4combustibles fossiles, et la conversion du CI final en utilisant le pouvoir calorifique inférieur (PCI) au lieu du PCS (pouvoir calorifique supérieur), pour une meilleure compatibilité avec les politiques actuelles en matière de carburant. Pour cet ajustement, les facteurs de 9 400 kcal/m³ pour le PCS et de 8 800 kcal/m³ pour le PCS (ratio ~ 1,1) ont été utilisés. La figure A2 illustre les estimations des GES de la chaîne d'approvisionnement avec les meilleures technologies disponibles appliquées présentées par SGI (2015), séparées en émissions de méthane et de CO.2par étapes de production de NG.

[39]IC : intensité carbone, indiquant l'émission de gaz à effet de serre par unité d'énergie par source, généralement en gCO_2éq/MJ

[40]Le potentiel de réchauffement global (PRG) est utilisé pour estimer, comparer et agréger les effets climatiques relatifs de différents gaz à effet de serre (GES). Il s'agit d'une mesure de l'effet radiatif relatif d'une substance donnée par rapport à une autre, généralement le CO.2, intégrée sur un horizon temporel choisi (CCNUCC 2004).

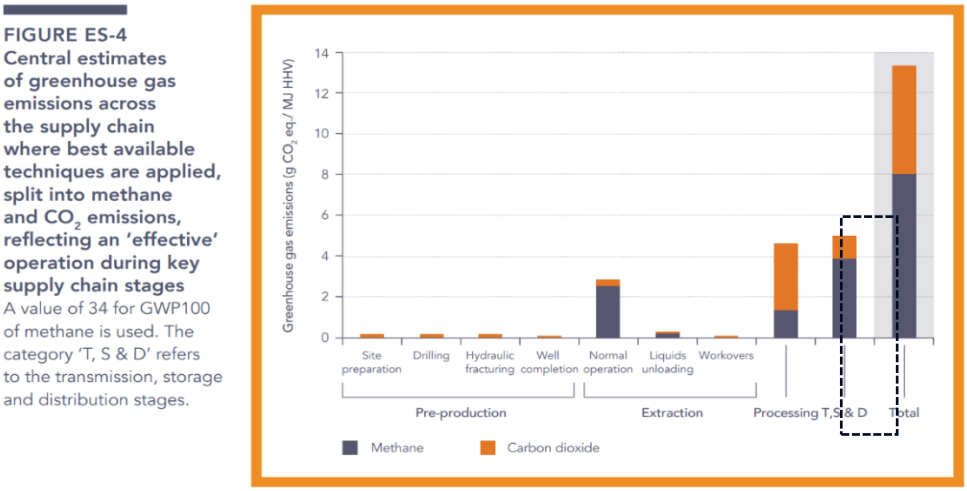


Figure A 2 : ***Valeurs des émissions de GES par étape de production de gaz naturel. Pour cette estimation, les résultats utilisent CH GWP4de 34 et le PCS (pouvoir calorifique supérieur) du GN.***

Source : SGI (2015)

Le tableau A3 ci-dessous compare les valeurs d'émission de méthane, en gCO_{2eq}/MJ de GN, contenu dans l'étude SGI[2] avec des valeurs converties en utilisant un PRG de 27 et un PCI de GN. Ainsi, on estime que l'IC de GN liée aux étapes de transport et de distribution s'élève à 4,47 gCO_{2eq}/ MJ de GN.

Tableau A 3 : ***CI des étapes de transport et de distribution, séparées entre la valeur rapportée dans l'étude SGI (2015) et la valeur ajusté avec le GWP de CH4de 27 et PCI de GN.***

	GWP 34 et PCS	*GWP 27 et PCI*
Émissions de méthane (gCO_2/MJ)	**original**	**ajusté**
Transport et distribution	5.27	4.47

Source : EPE de SGI (2015)

Fournir

Lors de l'allocation du GN pour les véhicules, il est nécessaire d'inclure l'étape de ravitaillement en station-service, rendant ce produit disponible sous forme de GNV pour le consommateur final. Durant cette étape, il est entendu que les émissions de GES se limitent essentiellement aux émissions fugitives de CH_4. L'ICCT (2015) estime que l'émission de l'étape d'approvisionnement équivaut à une perte approximative de 0,3 % de CH_4. La conversion de cette version de CH_4se traduit par une IC supplémentaire de 1,8 gCO_2/MJ de GNC.

Utilisation finale/Combustion mobile (TtW)

L'utilisation finale du GNC dans les véhicules implique sa combustion dans les moteurs, avec la conversion du carbone présent dans le carburant en CO_2. Émissions de CH_4Les facteurs associés à cette étape concernent principalement la combustion incomplète. Le facteur utilisé dans cette étude des émissions de GES liées à la combustion du gaz naturel dans le secteur des transports a été ajusté par rapport à celui présenté par RenovaBio, dans RenovaCalc.[41], se référant à la combustion mobile, dans un ensemble de données reproduites dans le tableau A 4. Ce facteur est de 57,81 gCO_{2eq}/MJ de GNC, et considère un impact de 2,58 gCO_{2eq}/MJ concernant les émissions de CH_4, basé sur une perte moyenne de 0,46 % CH_4au cours de ce processus, une valeur qui est cohérente avec d'autres observées dans la littérature sur le sujet.

Tableau A 4 : CI de l'étage de combustion mobile par type de combustible.

Fatores de emissão da queima de combustíveis em fontes móveis

Combustível	Unidade	CO_2 Fóssil	CO_2 Biogênico	CH_4 Fóssil	CH_4 Biogênico	N_2O	CO_2 eq/MJ
		g/unidade	g/unidade	g/unidade	g/unidade	g/unidade	g/MJ
Diesel A (B0)	kg	3.098,8	0,0	0,165	0,000	0,165	**74,43**
Biodiesel (B100)	kg	0,0	2.762,5	0,000	0,377	0,023	**0,44**
Etanol Anidro	kg	0,0	1.929,2	0,000	0,283	0,017	**0,44**
Etanol Hidratado	kg	0,0	1.801,0	0,000	0,475	0,016	**0,66**
Gasolina A	kg	2.981,1	0,0	1,089	0,000	0,348	**71,33**
Gasolina C	kg	2.140,9	546,3	0,782	0,080	0,255	**56,77**
GNV	kg	2.701,4	0,0	4,595	0,000	0,149	**57,81**
Biometano	Nm^3	0,0	2.701,4	0,000	4,595	0,149	**3,48**
Querosene de Aviação	kg	3.150,0	0,0	0,022	0,000	0,088	**72,89**
BioQav	kg	0,0	3.150,0	0,000	0,022	0,088	**0,55**
Gasolina renovável (HEFA)	kg	0,0	2.981,1	0,000	1,089	0,348	**2,73**
Diesel renovável (HEFA)	kg	0,0	3.098,8	0,000	0,165	0,165	**1,10**
Gás combustível renovável (HEF/	kg	0,0	2.701,4	0,000	4,595	0,149	**3,61**

Source : RenovaCalc, adapté de ANP (2025c).

Résultats

Enfin, en ajoutant les émissions en amont [WtT] du GNC, représentées par l'exploration et le traitement, l'importation, le transport, la distribution et l'approvisionnement, avec les émissions de combustion/utilisation [TtW] utilisées dans RenovaCalc/RenovaBio, nous arrivons au résultat du CI du GNC au Brésil [WtW] de 76,85 gCO_{2eq}/MJ de GN. Le tableau A5 résume les contributions de chaque étape, composant le résultat obtenu.

[41]Les valeurs constantes dans RenovaCalc ont été examinées et celle utilisée pour ce rapport est le résultat de mises à jour.

Tableau A 5 : IC des étapes de la chaîne de production et d'utilisation du GNV au Brésil et résultat estimé.

Étape de la chaîne GNC	Origine	gCO_2/MJ GNC (individuel)	Participation (%)	gCO_2e/MJ GNC (participation)	Source
Exploration, importation et traitement	National Offshore	8.09	61%	4,97	*Ecoinvent 3.11*
Exploration, importation et traitement	National À terre	8,55	2%	0,18	*Ecoinvent 3.11*
Exploration, importation et traitement	Boule à gaz Importé	15.31	23%	3.48	*Ecoinvent 3.11*
Exploration, importation et traitement	GNL Importé	30.13	14%	4.13	*Ecoinvent 3.11*
Transport et distribution	Offre Total interne	4,5	100%	4.47	*SGI*[1]
Fournir	Offre Total interne	1.8	100%	1,80	*ICCT*[2]
Utiliser la gravure	Offre Total interne	57,8	100%	57,81	*RenovaBio*
			Total	**76,85**	

Source : EPE de l'ANP (2025),Ecoinvent (2025) ,SGI (2015), ICCT (2015) .

A4) Effet Corona

Pour déterminer les émissions associées à l'effet corona, l'ensemble de données «*marché de l'électricité, haute tension BR*" de la base de données Ecoinvent 3.5 (Wernet*et al.,*2016 ; Ecoinvent, 2018), incluant uniquement les émissions liées à la distribution d'énergie (émissions de N_2Le et Le$_3$de l'effet corona et de l'infrastructure de distribution), calculé avec la méthode d'évaluation d'impact IPCC 2013 GWP 100a V1.03 (IPCC, 2013) du logiciel d'analyse du cycle de vie SimaPro.

Émissions provenant du transport d'électricité, calculées par LNBR (2021) dans l'ensemble de données « *Électricité, haute tension {BR} | distribution, sans pertes | APRÈS, U*", dérive de la version originale de l'inventaire Ecoinvent 3.5"*marché de l'électricité, haute tension BR*"

Ecoinvent inclut dans son ensemble de données : (a)**intrants électriques produits dans le pays ou importés** (*(intrants d'électricité produits dans ce pays et provenant des importations) ;*(b)**le réseau de transport**(*le réseau de transport) ;*(w)**émissions directes dans l'air (ozone et N_2LE)***(*émissions directes dans l'air (ozone et N_2O); et*(d) **pertes électriques lors de la transmission*le****(*pertes d'électricité pendant le transport).*

Pour isoler les effets de la transmission, dans l'ensemble de données de transmission LNBR (2021), une modification a été apportée à l'ensemble de données Ecoinvent d'origine pour prendre en compte uniquement :

(b)**le réseau de transport**(*le réseau de transport) ;*

(f)**émissions directes dans l'air (ozone et N_2LE)***(émissions directes dans l'air (ozone et N_2LE));*

Il convient de noter que les émissions liées au cycle de vie des sources et les pertes liées au transport d'énergie sont considérées séparément, comme déjà décrit dans le document.

Selon les références d'Ecoinvent, les émissions de N_2Le et Le$_3$sont cités comme :

Valeur/estimation de la littérature. Le champ électromagnétique à proximité des lignes aériennes à haute tension peut entraîner l'ionisation des molécules d'air et la formation d'oxyde nitrique et d'ozone. Cette réaction se produit dans une couche limite appelée couronne. La formation de polluants dépend des conditions météorologiques et de la surface du conducteur. Par conséquent, seules quelques hypothèses générales peuvent être formulées.

b.Émissions de monoxyde de diazote :

Hill et al. (1984) rapportent un taux de formation d'oxyde nitreux compris entre 0,01 et 0,21 g par kWh d'électricité transmise, valable pour les conditions nord-américaines. La moyenne géométrique est de 0,05 g/ kWh. Ce taux d'émission est dépassé pour ce pays.

w.Émissions d'ozone :

Bohlin et al. (1991) et B+¦hringer et al. (1988) signalent de très faibles concentrations d'ozone près de la couronne, difficilement mesurables. La valeur ici est estimée à partir de données suisses :

- émissions annuelles d'ozone : 50 à 1 250 tonnes (Knoepfel 1995, p. 99). La moyenne géométrique de 250 t/an est utilisée pour les calculs.

- quantité annuelle d'électricité transportée en Suisse : 60129 GWh.

S. Bohlin, K. Eriksson, G. Flisberg, « Transmission électrique », World Clean Energy Conf., Genève, novembre 1991

A. B+¦hringer et al., 'Ozonbildung an Hochspannungsfreileitungen', Elektrizit+ñtswirtschaft 87(1988) Nr. 21, art. 1017-1022 »

250t Le$_3$/ 60129 GWh = 4,157728 x 10^{-6}kg Le$_3$/kWh

Tableau A 6 : Graphiques qui composent le calcul de l'effet Corona (en gCO_2/MJ)

Émissions directes	Réseau de transport – Haute tension	Réseau de transport – longue distance	Total
3.680556	0,163459	3,95x 10^{-2}	**3,88**

Source : (ECOINVENT 3.5, 2018 ; GIEC, 2013)

A5)Consommation d'énergie des véhicules électriques

Pour déterminer la consommation énergétique des véhicules électriques à batterie, la norme SAE J1634/2021 est utilisée. Selon cette norme, un facteur appelé RAF (facteur d'allocation de recharge) est déterminé, qui calcule le rapport entre l'énergie fournie par le réseau électrique alternatif (Eac – kWh), utilisée pour recharger le véhicule lors de l'essai (y compris la part d'énergie utilisée pour alimenter le chargeur), et l'énergie consommée par le moteur électrique du véhicule (Edc – kWh), pour parcourir le trajet défini par la norme.

Le facteur RAF est appliqué au résultat d'efficacité énergétique (MJ/km), publié dans les programmes PBEV/INMETRO. Ainsi, cette efficacité énergétiqueprend en compte les pertes d'efficacité du chargeur utilisé dans le test La figure 1A illustre ces points de mesure de puissance.**Edc**et**Et**.

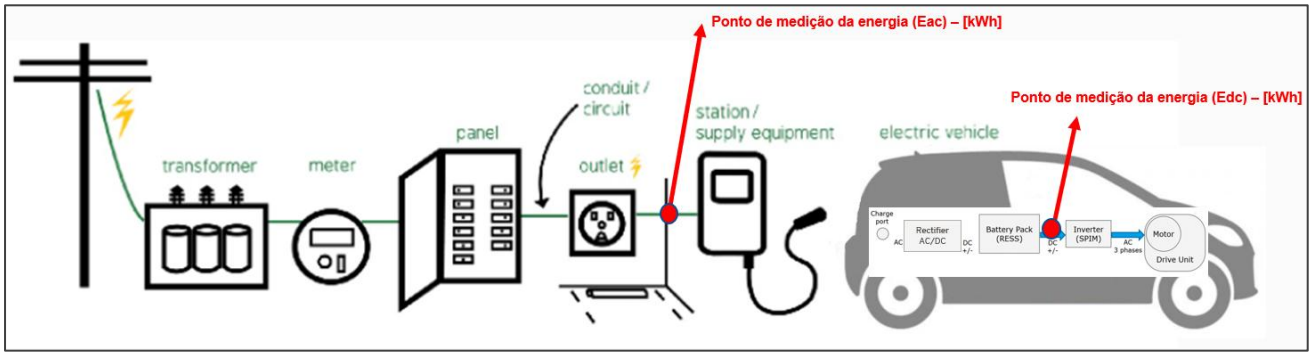


Figure A 3 : Points de mesure pour la recharge des véhicules électriques à batterie

Source : GM (2022)

A6)Demande énergétique (volume) (2022 – 2034)

Tableau A 7 : Demande énergétique (volume) pour 2022 ; 2024 - 2034

	Unités	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
OTTO CYCLE														
sans GNC	10^9l gaz. éq.	**53,5**	**56,9**	**59,9**	**59,5**	**60,6**	**61,6**	**62,5**	**63,2**	**63,8**	**64,4**	**65,0**	**65,5**	**66,0**
Essence C	10^9l	**37,3**	**39,6**	**37,2**	**40,7**	**39,3**	**38,0**	**36,9**	**36,5**	**36.1**	**35,7**	**35,6**	**35,6**	**35,5**
Essence A	10^9l	26,8	28,6	26,9	29,7	27,5	26,6	25,9	25,5	25.3	25,0	25,0	24,9	24,9
Éthanol anhydre	10^9l	10.4	10,9	10.3	11.0	11,8	11.4	11.1	10,9	10.8	10.7	10.7	10.7	10.7
Éthanol de canne à sucre 1G	10^9l	9.1	9.0	8.2	8.3	8.6	7,9	7.3	7.0	6.7	6,5	6.4	6.3	6.2
Éthanol de canne à sucre 2G	10^9l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Éthanol de maïs	10^9l	1.3	2.0	2.1	2.7	3.1	3,5	3.8	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4,5
Mélange (%)	%	28,0%	27,7%	27,7%	27,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
éthanol hydraté	10^9l	**16.2**	**17.3**	**22,7**	**18,8**	**21.3**	**23,5**	**25,6**	**26,7**	**27,7**	**28,7**	**29,3**	**29,9**	**30,4**
Éthanol de canne à sucre 1G	10^9l	13,7	14.0	17,8	13,9	15,5	17.0	18.4	19.2	19,9	20,7	21.1	21.4	21,8
Éthanol de canne à sucre 2G	10^9l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Éthanol de maïs	10^9l	2,5	3.3	4.9	4.9	5.8	6,5	7.2	7,5	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6
Part de marché de l'éthanol hydraté dans les carburants flexibles (v/v%)	%	36,7%	35,7%	43,9%	36,4%	40,4%	43,7%	46,6%	48,1%	49,6%	51,1%	52,2%	53,3%	54,6%
CYCLE DIESEL														
Route Diesel B	10^9l	**50,6**	**52,2**	**53,8**	**56,0**	**57,3**	**58,6**	**59,6**	**60,6**	**61,5**	**62,4**	**63,3**	**64,2**	**65,0**
Diesel	10^9l	45,5	46,2	46,5	48.1	48,7	49,8	50.1	50,9	51.1	51,8	51,9	52,0	52,0
Biodiesel	10^9l	5.1	6.0	7.3	7.8	8.6	8.8	9,5	9,7	10,5	10.6	11.4	12.2	13.0
Mélange (%)	%	10%	11,5%	13,6%	14%	15%	15%	16%	16%	17%	17%	18%	19%	20%
Véhicules légers diesel B	10^9l	**4.3**	**4.6**	**4.8**	**4.9**	**4.9**	**5.0**	**5.0**	**5.1**	**5.2**	**5.3**	**5.5**	**5.6**	**5.8**
Véhicules légers biodiesel	10^9l	**0,4**	**0,5**	**0,7**	**0,7**	**0,7**	**0,7**	**0,8**	**0,8**	**0,9**	**0,9**	**1.0**	**1.1**	**1,2**
Véhicules lourds diesel B	10^9l	**41.2**	**41,6**	**41,7**	**43,2**	**43,8**	**44,9**	**45.1**	**45,8**	**45,8**	**46,5**	**46,4**	**46,3**	**46,2**
Véhicules lourds biodiesel	10^9l	**4.6**	**5.5**	**6.7**	**7.1**	**7,9**	**8.0**	**8.7**	**8,9**	**9.6**	**9,7**	**10.4**	**11.1**	**11,8**

	Unités	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
GAZ														
Total GNC	$10^9 m^3$	**2.3**	**2.0**	**1.7**	**2.2**	**2.3**	**2,5**	**2.6**	**2.7**	**2.8**	**2.9**	**2.9**	**3.0**	**3.1**
GNC fossile	$10^9 m^3$	**2.3**	**2.0**	**1.7**	**2.2**	**2.2**	**2.4**	**2,5**	**2,5**	**2.6**	**2.6**	**2.7**	**2.7**	**2.6**
Biométhane total	$10^9 m^3$	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**
Mélange (%)	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,0%	3,7%	4,5%	5,5%	6,7%	8,2%	10,0%	12,3%	15,0%
GNC léger	$10^9 m^3$	2.26	1,96	1,63	2.10	2.17	2.27	2.36	2.42	2.44	2,45	2.44	2.42	2.38
Biométhane léger	$10^9 m^3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,27	0,34	0,42
GNC lourd	$10^9 m^3$	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27
Biométhane lourd	$10^9 m^3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05
ÉLECTRIQUE														
Électricité	GWh	68	132	338	702	1 147	1 682	2.302	3.013	3.815	4 697	5 667	6 759	8.021
Lumière	GWh	32	83	252	524	811	1.109	1 417	1 736	2.070	2 427	2.822	3.276	3 822
Lourd	GWh	36	49	86	178	336	573	885	1 278	1 745	2.269	2 844	3 482	4.199

Source : EPE (2025a, 2025b)

A7)Méthodologie de calcul de l'intensité carbone des mélanges de carburants nationaux

Équation 1 : CI de l'essence C :

$$\left[\frac{gCO_2eq}{MJ}\right]_{Exx} = \frac{\left[\frac{gCO_2eq}{MJ}\times\frac{MJ}{l}\times(100-Exx)\right]_{E0}+\left[\frac{gCO_2eq}{MJ}\times\frac{MJ}{l}\times(Exx)\right]_{Anhydrous\ Ethanol}}{\left[\frac{MJ}{l}\times(100-Exx)\right]_{E0}+\left[\frac{MJ}{l}\times(Exx)\right]_{Anhydrous\ Ethanol}}$$

Équation 2 : Diesel IC B :

$$\left[\frac{gCO_2eq}{MJ}\right]_{Bxx} = \frac{\left[\frac{gCO_2eq}{MJ}\times\frac{MJ}{l}\times(100-Exx)\right]_{B0}+\left[\frac{gCO_2eq}{MJ}\times\frac{MJ}{l}\times(Bxx)\right]_{Biodiesel\ B100}}{\left[\frac{MJ}{l}\times(100-Exx)\right]_{B0}+\left[\frac{MJ}{l}\times(Bxx)\right]_{Biodiesel\ B100}}$$

Source : VOLKSWAGEN (2022)

A8)Évolution de l'intensité carbone (gCO2eq/MJ) de boissons énergisantes (2022) – 2034)

Tableau A 8 : Évolution de l'intensité carbone (gCO2eq/MJ) de boissons énergisantes

	2022	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Éthanol anhydre	22.26	22,39	22.27	22.14	22.04	21,94	21,81	21,69	21h55	21.42	21,29	21.11
Éthanol hydraté	22,65	22,73	22,62	22.46	22h30	22.13	21,96	21,80	21,62	21.46	21h30	21.08
Essence A	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40
Essence C (E27/E30)	73,61	73,78	74.13	72,47	72,45	72,43	72,40	72,37	72,34	72,31	72,28	72,24
Essence C (E22)	76,76	76,78	76,76	76,74	76,73	76,71	76,69	76,67	76,65	76,63	76,60	76,57
Biométhane	9.32	9.32	8.35	8.35	8.35	8.35	8.35	8.35	8.35	8.35	8.35	8.35
GNC	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85
Biodiesel	28,40	28,40	28h30	28.21	28.11	28.02	27,92	27,83	27,73	27,64	27,54	27h45
Diesel A	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50
Diesel B (BX)	81.04	79.06	78,82	78,26	78,24	77,67	77,66	77,08	77.07	76,49	75,91	75,33
Diesel B (B7)	82,69	82,69	82,68	82,67	82,67	82,66	82,65	82,65	82,64	82,64	82,63	82,62
Électricité	21,78	20,85	21h15	19.13	19,89	22.06	24,82	25,39	25.14	25,00	24,88	24.31

Source : EPE (Élaboré par l'auteur)

A9) Intensité carbone moyenne de la matrice des transports (2022 – 2034)

Tableau A 9 : CI du secteur et des segments du transport routier (léger et lourd)

gCO2éq/MJ	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Matrice de transport	72,4	72,5	69,6	71,0	69,5	68,9	68,1	67,8	67,2	66,9	66,4	65,9	65,4
Véhicules légers	64,1	65,4	61,0	63,8	61,2	60,0	58,8	58,2	57,7	57.1	56,8	56,4	56,0
Véhicules lourds	81,0	80,1	78,9	78,7	78,1	78,1	77,4	77,4	76,7	76,7	76,0	75,4	74,7

Source : EPE (Élaboré par l'auteur)

Références bibliographiques

ABNT (2014).*Gestion environnementale – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*a. Version corrigée le 21/07/2014. Association brésilienne de normalisation technique. Disponible sur : www.abnt.org.br. Consulté le : 4 février 2025.

ANEEL (2022).*Pertes d'énergie*Version mise à jour le 03/11/2022. Agence nationale de l'énergie électrique. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia. Consulté le : 4 février 2025.

ANP (2010).*Résolution ANP n° 16/2010. Réglemente l'activité de raffinage du pétrole, qui comprend la construction, la modification, l'extension de capacité et l'exploitation des raffineries de pétrole.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-16-2010-2010-06-10-versao-original?origin=instituicao. Consulté le : 4 février 2025.

____ (2013).*Résolution ANP n° 50/2013. Réglemente les spécifications du gazole pour usage routier.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-50-2013?origin=instituicao&q=%C3%B3leo%20diesel%20rodovi%C3%A1rio. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2015).*Flux logistiques pour la production, le transport et le stockage d'essence A et de gazole A au Brésil*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/anp/ptbr/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/arquivos/fluxos-logisticos-producao-transportearmazenamento.pdf. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2018a).*Résolution ANP n° 758/2018. Réglemente la certification de la production ou de l'importation efficace de biocarburants visée à l'article 18 de la loi n° 13.576 du 26 décembre 2017 et l'accréditation des sociétés d'inspection.* Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-758-2018-regulamenta-a-certificacao-da-producao-ou-importacaoeficiente-de-biocombustiveis-de-que-trata-o-art-18-da-lei-no-13-576-de-26-de-dezembro-de-2017-e-ocredenciamento-de-firmas-

Inspecteurs ? Origine = Institution = Résolution ANP n° BA 758/2018. Consulté le 3 février 2025.

_____ (2018b).*Note technique RenovaCalc : méthode et outil de comptabilisation de l'intensité carbone des biocarburants dans le programme RenovaBio.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/anp/pt-br. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2019).*Résolution ANP n° 802/2019. Établit les procédures de génération des garanties nécessaires à l'émission primaire de crédits de décarbonation.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-802-de-5-de-dezembro-de-2019-231852634. Consulté le : 4 février 2025.

_____(2020).*RRésolution ANP n° 807/2020. Établit les spécifications de l'essence à usage automobile et les obligations en matière de contrôle de qualité auxquelles doivent se conformer les agents économiques qui commercialisent le produit sur l'ensemble du territoire national.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-807-2020. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2021a).*Rapport technique n° 02/SBQ v. 4. Lignes directrices générales : procédures de certification de la production ou de l'importation efficace de carburants.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse :https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/ocr/informe-tecnico-02-sbq.pdf. Consulté le : 4 février 2025.

_____(2021b).*Résolution ANP n° 864, du 23 décembre 2021. Établit les spécifications des carburants de référence utilisés dans les tests d'évaluation de la consommation de carburant et des émissions des véhicules pour l'homologation des nouveaux véhicules automobiles et des nouvelles machines agricoles et routières.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-864-2021-estabelece-asespecificacoes-dos-combustiveis-de-referencia-utilizados-nos-ensaios-de-avaliacao-de-consumo-de-combustivel-e-deemissoes-veiculares-para-a-homologacao-de-veiculos-automotores-novos-e-de-maquinas-agricolas-e-rodoviariasnovas. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2021c).*Résolution n° 842, du 14 mai 2021. Établit la spécification du diesel vert, ainsi que les obligations en matière de contrôle de qualité à respecter par les agents économiques qui le vendent sur le territoire national.* Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse :

https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616. Consulté le 27 avril 2022.

____ (2022a).*Résolution n° 886, du 29 septembre 2022.Établit les spécifications et les règles d'approbation du contrôle de la qualité du biométhane provenant des décharges et des stations d'épuration destinées à l'usage des véhicules et des installations résidentielles, industrielles et commerciales, pour être commercialisées sur le territoire national.*Disponible sur :www.anp.gov.br. Consulté le : 4 mars 2025.

____ (2022b).*Résolution n° 906 du 29 septembre 2022.Prévoit les spécifications du biométhane issu de l'agroforesterie et des produits et déchets organiques commerciaux destinés à l'usage des véhicules et des installations résidentielles et commerciales à commercialiser sur tout le territoire national.*Disponible sur :www.anp.gov.br. Consulté le : 4 mars 2025.

_____(2022c).*Rapport technique n° 06/SBQ v. 0 - Procédures de mise en œuvre et de vérification de la chaîne de traçabilité des céréales et des huiles végétales.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-orientacoes-certificacoes-renovabio/informe-tecnico-06-cadeia-de-custodia_v0.pdf. Consulté le : 28 avril 2025.

_____(2024).*Annuaire statistique, 2024. Facteurs de conversion, densités et pouvoirs calorifiques inférieurs.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse :https://www.gov.br/anp/pt-br. Consulté le : 4 mars 2025.

_____(2025a).*Données statistiques*s. Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible sur https://www.gov.br/anp/pt-br. Consulté le 4 mars 2025.

_____(2025b).*Panneau dynamique sur les émissions de gaz à effet de serre.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineisdinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/painel-dinamico-de-emissoes. Consulté le : 28 avril 2025.

_____(2025c).*RenovaBio*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio. Consulté le : 14 juin 2022.

_____(2025d).*Informations sur le marché – Biodiesel.*Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse suivante :https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-debiocombustiveis/biodiesel/biodiesel/market-information. Consulté le : 3 mars 2022.

_____(2025e).*Données de certification RenovaCalc*(communication personnelle).

ARRUDA, C. K. da C. (2012).*Modélisation de l'effet corona dans les lignes de transmission à courant continu*Thèse de doctorat. Programme de génie électrique : UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : http://www.pee.ufrj.br/index.php/fr/production-academique/thèses-doutorat/2012/2012033001-2012033001/file. Consulté le : 4 février 2025.

BRÉSIL (2009).*Loi n° 12 187 du 29 décembre 2009. Instituant la Politique nationale sur le changement climatique (PNMC) et prévoyant d'autres mesures..* Disponible sur : www.planalto.gov.br. Consulté le : 2 décembre 2021.

_____ (2017*).Loi n° 13 576 du 26 décembre 2017. Elle prévoit la politique nationale des biocarburants (RenovaBio) et d'autres mesures..* Disponible sur : www.planalto.gov.br. Consulté le : 2 décembre 2021.

_____ (2018).*Loi n° 13.755 du 10 décembre 2018.Établit le programme Rota 2030 – Mobilité et Logistique et prévoit d'autres mesures.*Disponible sur : www.planalto.gov.br. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2024a).*Loi n° 14.993 du 8 octobre 2024. Prévoit la promotion d'une mobilité durable à faible émission de carbone et la capture et le stockage géologique du dioxyde de carbone ; institue le Programme national de carburant d'aviation durable (ProBioQAV), le Programme national de diesel vert (PNDV) et le Programme national de décarbonisation du producteur et de l'importateur de gaz naturel et d'incitation au biométhane.*Disponible sur : www.planalto.gov.br. Consulté le : 4 février 2025.

_____(2024b). Déterminé au niveau national https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf. Consulté le : 3 févr. 2025.Contributions (NDC), 2024b. Disponible dans:

_____(2024c).*Loi n° 14.902, du 27 juin 2024. Institue le Programme de Mobilité Verte et d'Innovation (Mover).* Disponible sur : www.planalto.gov.br. Consulté le : 4 février 2025.

_____ (2025).*Décret n° 12.435, du 15 avril 2025. Réglemente le Programme de Mobilité Verte et d'Innovation (Mover).* Disponible sur : www.planalto.gov.br. Consulté le : 16 avril 2025.

CNPE (2023).*Résolution CNPE n° 8, du 19 décembre 2023. Réduit le délai d'augmentation de la teneur en biodiesel et prévoit d'autres mesures20231.* .Conseil national de politique énergétique. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/mme/ptbr/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023/ResoluoCNPE8Publicada.pdfhttps://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-ecomites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/. Consulté le : 4 février 2025.

CONAMA (2021).*Résolution CONAMA n° 501, du 21 octobre 2021. Établit les limites maximales d'émission de polluants atmosphériques pour les sources fixes*Conseil national de l'environnement. Disponible à l'adresse : https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-501-de-21-de-outubro-de-2021-353968637. Consulté le : 4 février 2025.

COSTA, J. A. (2019).*Pertes d'énergie dans les systèmes de distribution avec intégration optimale de la production photovoltaïque décentralisée*RiodeJaneiro,PPE/UFRJ/COPPE,2019. Disponible sur : http://www.ppe.ufrj.br/index.php/en/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2019/1494-perdas-de-energia-em-sistemasde-distribuicao-com-integracao-otima-de-geracao-distribuida-fotovoltaica. Consulté le : 4 février 2025.

DOE (2018). Département de l'Énergie des États-Unis et Agence de protection de l'environnement des États-Unis, site web du Guide sur la consommation de carburant. Disponible à l'adresse : https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1045-september-3-2018-77-82-energy-put-electriccar-used-move-car-down. Consulté le 4 février 2025.

ECOINVENT 3.5 (2018).*Base de données, version 3.5*. Données reçues du LNBR et de l'UNICA.

EMBRAPA (2023).*Régionalisation des profils de production de soja « typiques » à utiliser dans Renovabio.*Rapport final de recherche. Société brésilienne de recherche agricole. Disponible à l'adresse :https://www.gov.br/anp/ptbr/assuntos/renovabio/arq/regionalizacaosojarenovabio.pdf . Consulté le : 4 février 2025.

____ (2024a).*Régionalisation des profils de production de maïs « typiques » à utiliser dans Renovabio.*Rapport final de recherche. Société brésilienne de recherche agricole. Disponible à l'adresse :Anglais : https://www.gov.br/anp/ptbr/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatorio-final-regionalizacao-perfis-tipicosproducao-milho.pdf . Consulté le : 4 février 2025.

____ (2024b).*Régionalisation des profils de production de canne à sucre « typiques » à utiliser dans Renovabio.*Rapport final de recherche. Société brésilienne de recherche agricole. Disponible à l'adresse :https://www.gov.br/anp/ptbr/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatoriofinalcanadeacucar.pdf . Consulté le : 4 février 2025.

EPE (2020).*Carburants alternatifs pour moteurs à cycle diesel*Société de recherche énergétique. Rio de Janeiro. Disponible. dans: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-open/publications/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT_Combustiveis_renovaveis_em_%20motores_ciclo_Diesel.pdf. Consulté le : 4 février 2025.

EPE (2022).*Note technique Décarbonation du secteur du transport routier : intensité carbone des sources d'énergie.* Société de recherche énergétique. Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse :Décarbonisation du secteur du transport routier Intensité carbone des sources d'énergie . Consulté le : 4 février 2025.

____ (2024a).*Marché international du pétrole.*Corporation de recherche énergétique, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-809/Bloco%206%20-%20Mercado%20Internacional%20Petr%C3%B3leo_Intensidade%20de%20Carbono.pdf. Accéder le : 28 avril 2025.

____ (2024b).*Émissions de méthane dans la chaîne du gaz naturel.*Société de recherche énergétique, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-837/ÉMISSIONS DE MÉTHANE DANS LA CHAÎNE DE CROISSANCE NATURELLE.pdf. Consulté le 28 avril 2025.

____ (2024c).*Carburants d'aviation durables au Brésil – Perspectives d'avenir.*Disponible sur : https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasilperspectivas-futuras. Consulté le : 28 avril 2025.

____ (2024d).*Electromobilité : Transport routier.*Corporation de recherche énergétique, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20(1).pdf. Consulté le : 28 avril 2025.

____ (2025a). *Bilan énergétique national 2025 : année de base 2024.* Société de recherche énergétique, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse :https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025 Consulté le : 29 mai 2025. Disponible à :https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-2025 Consulté le : 29 mai 2025.

____ (2025b). *Plan décennal de développement énergétique – PDE 2034*. Energy Research Company, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-deenergia-2034. Consulté le 28 avril 2025.

GENERAL MOTORS (2022). Communication personnelle.

ICCT (2015). Évaluation des émissions des véhicules lourds au gaz naturel : implications et recommandations politiques. Disponible à l'adresse :https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_NG-HDV-emissions-assessmnt_20150730.pdf . Consulté le : 20 mars 2025.

AIE (2019). *L'avenir de l'hydrogène : saisir les opportunités d'aujourd'hui* Agence internationale de l'énergie, Paris, juin 2019. Disponible sur https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen. Consulté le 28 avril 2025.

____ (2023). *Émissions provenant des opérations pétrolières et gazières dans les transitions vers le zéro net.* Agence internationale de l'énergie. Paris, mai 2023. Disponible à l'adresse : https://www.iea.org/reports/emissions-from-oil-and-gas-operations-in-net-zero-transitions. Consulté le : 28 avril 2025.

____ (2024). *Perspectives mondiales des véhicules électriques 2024.* Agence internationale de l'énergie. Paris, avril 2024. Disponible à l'adresse : https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024. Consulté le : 28 avril 2025.

DANSMÉTRO (2016). *Ordonnance n° 15 du 14 janvier 2016. Exigences en matière d'évaluation de la conformité des véhicules légers de tourisme et des véhicules utilitaires légers.* Institut national de métrologie, de qualité et de technologie, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002358.pdf. Consulté le : 4 mars 2025.

____ (2020). *Ordonnance n° 16 du 7 octobre 2020. Proposition de modification des exigences d'évaluation de la conformité des véhicules légers de tourisme et des véhicules utilitaires légers.* Institut national de métrologie, de qualité et de technologie, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002264.pdf. Consulté le : 4 mars 2025.

____ (2023). *Ordonnance n° 169, du 3 mai 2023. Approuve les exigences d'évaluation de la conformité des véhicules légers de transport de passagers et des véhicules utilitaires légers – consolidées.* Institut national de métrologie, de qualité et de technologie, Rio de Janeiro. Disponible à l'adresse : https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-169-de-3-de-maio-de-2023-485619287. Consulté le : 4 mars 2025.

GIEC (2013). Cinquième rapport d'évaluation. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Disponible à l'adresse : https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/. Consulté le : 4 février 2025.

GIEC (2022). Sixième rapport d'évaluation - Atténuation des changements climatiques (GTIII). Chapitre 10, Transports. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Disponible à l'adresse : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter10.pdf. Consulté le : 29 avril 2025.

____ (2023). Sixième rapport d'évaluation - Résumé à l'intention des décideurs. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Disponible. dans: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Consulté le : 29 avril 2025.

JEC (2020). Commission européenne, Centre commun de recherche, Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., et al., *Rapport JEC du puits au réservoir V5 : Analyse du puits à la roue du JEC : analyse du puits à la roue des futurs carburants et groupes motopropulseurs automobiles dans le contexte européen*, Office des publications, 2020. Disponible à l'adresse : https://data.europa.eu/doi/10.2760/959137. Consulté le : 3 février 2025.

LNBR (2021). Communication personnelle. Laboratoire national des bioénergies renouvelables.

CARTE (2025). *Durabilité/Agroénergie.* Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de l'Approvisionnement, Brasilia. Disponible sur : http://www.agricultura.gov.br. Consulté le : 4 mars 2025.

MME (2024). Bulletin mensuel de suivi de l'industrie du gaz naturel. Ministère des Mines et de l'Énergie. Disponible à l'adresse : https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/bulletin-mensuel-de-suivi-de-l-industrie-du-gaz-naturel . Consulté le : 20 mars 2025.

NOVACANA (2025). Raízen ferme son usine d'éthanol de 2e génération à Piracicaba (SP). Disponible sur : https://www.novacana.com/noticias/raizen-encerra-operacao-planta-etanol-2-geracao-piracicaba-sp-200125 Consulté le : 28 avril 2025.

PETROBRAS (2025).*Plan stratégique 2050 et plan d'affaires 2025-2029*. Disponible sur :4c9eecc5-c298-081d-799f-217fff1a1c82 Consulté le : 28 avril 2025.

SGI (2015). Émissions de méthane et de CO2 de la chaîne d'approvisionnement en gaz naturel. Sustainable Gas Institute. Disponible à l'adresse : Évaluation des émissions des véhicules lourds au gaz naturel : implications et recommandations politiques . Consulté le : 20 mars 2025.

SMART FREIGHT CENTRE (2019). Cadre du Conseil mondial des émissions logistiques pour la comptabilisation et la déclaration des émissions logistiques (version 2.0). Disponible à l'adresse : https://www.feport.eu/images/downloads/glec-framework-20.pdf. Consulté le : 4 mai 2025.

Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith et R. Wiser (2014). *Annexe III : Paramètres de coût et de performance spécifiques à chaque technologie. Dans : Changements climatiques 2014 : Atténuation des changements climatiques. Contribution du Groupe de travail III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.*[Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.wPETROBRAS. Plan stratégique 2025-2029. Disponible sur : https://petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/. Consulté le : 2 avril 2025.

BANQUE MONDIALE (2010). Impacts des projets de transport et de distribution sur les émissions de gaz à effet de serre – Examen des méthodologies et approche proposée dans le cadre des opérations de prêt de la Banque mondiale. Document n° 21, novembre 2010. Disponible. dans: https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/27755/632150WP0Impac00Box0361508B0PUBLIC0.p df?sequence=1&isAllowed=y. Consulté le 4 mars 2025.

CCNUCC (2004). Informations sur les potentiels de réchauffement planétaire. Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Disponible à l'adresse :https://unfccc.int/resource/docs/tp/tp0403.pdf . Consulté le : 20 mars 2025.

UNICA (2025a). U*NICADATA*.Disponible sur : www.unicadata.com.br. Consulté le : 1er février 2021.

___ (2025b). Communication personnelle. Syndicat de l'industrie de la canne à sucre.

VOLKSWAGEN (2022).*Intensité carbone (IC) de l'essence brésilienne (E22) : méthodologie de calcul ; Intensité carbone (IC) du diesel brésilien (B15) : méthodologie de calcul.Communication personnelle.*Réunion tenue le 26 juillet 2022.

WEIDEMA BP, EKVALL T., HEIJUNGS R. (2009).*Lignes directrices pour les applications de l'ACV approfondie et élargie.*Lignes directrices pour les candidatures aux ACV approfondies et élargies - Consultants ACV 2.-0. Disponible à l'adresse : https://lcanet.com/publications/show/guidelines-applications-deepened-broadened-lca/. Consulté le : 4 février 2025.

WERNET et al., (2016).*LA BASE DE DONNÉES ECOINVENT V3 : aperçu et méthodologie*. Disponible à : https://www.researchgate.net/publication/301561039_The_ecoinvent_database_version_3_Part_I_Overview_and_methodology?enrichId=rgreq-4dc6a024eee1155eba489c2677b22562-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMwMTU2MTAzOTtBUzo5OTE1ODIyMzY5OTE0ODlAMTYxMzQyMzAzNjY2Mw%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf?